

6. EL SIGLO XVII

6.1 Fray Lorenzo de San Nicolás

6.1.1 El tratado

El tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás consta de dos partes publicadas respectivamente los años 1639¹ y 1664². El tratado propiamente dicho lo forma la primera parte. La segunda parte se entiende como un complemento a la primera. En primer lugar se dedica a contestar las críticas formuladas contra la primera por Pedro de la Peña (quiso impedir su publicación); luego realiza un comentario sobre algunos famosos tratados de arquitectura (Vitruvio, Serlio, Palladio, Cataneo, Rusconi, etc.); posteriormente explica los órdenes según Vignola y, por último, repasa algunos aspectos técnicos sobre medida de bóvedas y armaduras ya tratados en la primera parte. El libro incluye también la traducción del libro quinto de Euclides y las ordenanzas de Toledo.

Los dos libros de Fray Lorenzo constituyen, sin duda, el tratado de arquitectura más importante del siglo XVII en España. Según Kubler: "*El Arte y Uso de Arquitectura* es, desde muchos puntos de vista, el mejor libro sobre instrucción Arquitectónica escrito jamás..."³. Llaguno lo cita pero señala que el libro resulta provechoso para canteros y albañiles pero entraña pocos

1. Fray Lorenzo de San Nicolás *Arte y Uso de Architectura. Primera parte*. Madrid: s.i., s.a. 1639. Suele decirse que la primera edición apareció en 1633, sin embargo tanto A. Bonet Correa como J. J. Martín González consideran más probable la de de 1639, año en que se firmó la fe de erratas del libro. Véase: A. Bonet Correa *Bibliografía de Arquitectura, Ingeniería y Urbanismo en España (1498-1880)*. Madrid: 1980, vol. 1, pág. 88; y J. J. Martín González "Noticia del Arte y Uso de Arquitectura", prólogo de la edición facsímil, Madrid: Albatros, 1989, pág. 21.

2. Fray Lorenzo de San Nicolás *Segunda Parte del Arte y Uso de Arquitectura... Con el Quinto y Séptimo Libros de Euclides traducidos del latín en Romance y las medidas difíciles de Bóvedas y de las superficies y pies cúbicos de Pechinas...* Madrid: s.i., 1665.

3. Véase G. Kubler *Arquitectura de los Siglos XVII y XVIII. (Ars Hispaniae. Historia Universal del Arte Hispánico, vol. 14)*. Madrid: 1957, pp. 79-82, donde Kubler hace un excelente comentario sobre el tratado de Fray Lorenzo.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

conocimientos sobre arquitectura⁴.

Desde el punto de vista de la historia de la construcción es un texto fundamental. Destinado a los jóvenes principiantes describe con claridad y detalle todos los procesos constructivos. Así, por citar un ejemplo, sus descripciones sobre la forma de construir los distintos tipos de bóvedas y cubiertas de madera constituyen un fuente valiosísima, y prácticamente única, para conocer el estado de dichas técnicas constructivas en el siglo XVII español.

Fray Lorenzo era un hombre de vasta erudición y conoce, y cita, los más importantes tratados de arquitectura de su época. Sin embargo, su obra no es en modo alguno un *collage* de opiniones de distintos autores, cosa harto frecuente en aquella época. El estudio que hemos realizado sobre la técnica de construir bóvedas, puentes y torres demuestra que era un hombre estudioso pero crítico, y, aunque es notoria la influencia de Alberti, siempre expone su opinión personal con independencia de criterio.

6.1.2 Reglas estructurales

El tratado de Fray Lorenzo contiene diversas reglas y observaciones sobre el diseño y construcción de arcos, bóvedas y cúpulas. Las comentaremos siguiendo el orden de aparición en el tratado.

6.1.3 Contrafuertes

Las primeras reglas se refieren a los contrafuertes de los templos.

4. "Es tan conocida esta obra de Fr. Lorenzo, que podemos dispensarnos de dar mayor noticia de ella. Merece estimación, y es útil para canteros y albañiles; pero sabe poco lo que es la arquitectura quien juzgue que con ella se pueden hacer arquitectos." E. Llaguno y J. A. Ceán-Bermúdez *Noticias de los Arquitectos y Arquitectura de España desde su Restauración*. Madrid: 1829, Vol. 4, pág. 24.

Aparecen formando un capítulo aparte⁵. Constituyen el conjunto más completo de reglas para el dimensionado de contrafuertes que hemos encontrado.

En primer lugar Fray Lorenzo señala la importancia de la materia de que se trata:

Qué grueso ayan de tener para sustentarle, assi el de su mismo pesso, como el del empujo de las bovedas, importa mucho el acierto...⁶

A continuación cita el caso de San Pedro de Roma, donde los contrafuertes tienen un canto de la mitad del vano lo cual le parece excesivo:

Hemos ido adelgazando los ingenios, y a este passo los edificios, y en el tiempo presente se conoce la mucha grosseza de los edificios antiguos, y la sutileza de los presentes.⁷

Discute la creencia general de que los daños se deben precisamente a las proporciones más esbeltas y señala que comunmente se deben a fallos en las cimentaciones o al paso del tiempo.

Podrán decirme, que por tanto adelgazar ha avido ruinas en ellos. A esto respondo dos razones, y es, que el daño ha nacido de estar mal plantados, mas que de su delgadez. Y lo otro, que ni los edificios plantados muy gruesos en sus paredes, han dexado de tener muy grandes ruinas, como las historias dicen, causadas del tiempo, de que adelante trataremos.⁸

Afirma que un exceso en el dimensionado puede ser tan perjudicial como quedarse corto, refiriéndose, en forma implícita, a la necesidad de buscar un equilibrio entre las distintas partes:

Conserva a un cuerpo, segun sienten los Phisicos, una mediana en el sustento; porque la abundancia la acaba, y la falta le destruye; asi siento que passa en los edificios, que mucho peso, o grueso les hace abrir quiebras, y falta de grueso les hace perecer: assi, que conviene que guarde una mediana para conservarle.⁹

5. Fray Lorenzo, op. cit., primera parte, Cap. XXVIII, 'Trata de la fortificacion de un Templo'; Fray Lorenzo, op. cit., fols. 30v-31v.

6. Op. cit. fol. 30v.

7. *Ibidem*.

8. *Ibidem*.

9. Op. cit., fol. 31r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Tras estas digresiones generales pasa a discutir el tema fundamental en la 'fortificación de un templo' que es el correcto dimensionado de los contrafuertes. La exposición es discursiva y en ella contempla todos los casos más frecuentes en la práctica: muros con o sin contrafuertes; bóvedas de piedra, ladrillo macizo o tabicadas. Aunque hemos resumido las reglas en forma de tabla, véase Tabla 6.1., citamos a continuación, por su extraordinario interés en el tema que nos ocupa, los párrafos del tratado.

Muros continuos (sin contrafuertes):

Comunmente se lleva, que cualquiera Templo tenga de grueso en sus paredes la tercera parte de su ancho, hallando inconveniente en poder echar estribos en los lienzos de los lados, que suele suceder por estar en calles publicas.¹⁰

Con contrafuertes y bóveda de piedra:

... mas llevando estribos, , le basta de grueso la sexta parte de su ancho; y lo que falta para cumplimiento del tercio, ha de llevar de estribos, aunque cuando en estos exceda algo, importe poco, y obrando como queda dicho, no ay que temer, ni falta de grueso ni abundancia, sino obrar con seguridad...¹¹

da un ejemplo numérico sobre este último caso:

... porque si el Templo tiene quarenta pies, y sin estribos lleva el tercio de quarenta, son trece pies de grueso, y un tercio de pie; y si lleva estribos, la sexta parte de quarenta son seis pies, y quatro sextos, que es poco mas de seis y medio, y lo restante de hasta el tercio de estribos, es otro tanto, y como queda dicho puede exceder algo en esto de los estribos, aunque sienta son suficientes...¹²

Con contrafuertes y bóveda de ladrillo. Dado el menor peso y, consiguientemente, menor empuje, reduce el canto de los contrafuertes:

... esto es para fábrica que lleva bobeda de piedra, que aviendo de ser la bobeda de rosca de ladrillo, por ser materia mas ligera, se puede aligerar el edificio, y assi en los gruesos no llevara mas de la septima parte de grueso, que de quarenta es septima parte cinco pies, y cinco septimos de pie, y en los estribos llevara el cumplimiento al tercio, sin excederle por ser suficiente...¹³

10. Op. cit. fol. 31r.

11. *Ibidem*.

12. *Ibidem*.

13. *Ibidem*.

con muro continuo:

... y puedes obrarla con seguridad, no llevando estribos: y siendo la bobeda de rosca de ladrillo, llevará de grueso la pared la quarta parte de su ancho, que de quarenta es diez pies, y sin temor se podran cargar las bobedas...¹⁴

Con contrafuertes y bóveda tabicada:

... quando la bobeda huviese de ser rubricada [tabicada] de ladrillo, baste que lleven las paredes de grueso la octava parte de su ancho, que es de quarenta, cinco pies de grueso, y los estribos se cumplan con el grueso hasta la quarta parte de su ancho...¹⁵

con muro continuo:

... Si en el Templo, cuyas bobedas han de ser tabicadas, no pudiese aver estribos, tendran de grueso las paredes la quinta parte de su ancho, que es de quarenta, ocho pies de gruesos, y aun ay lugar en esta parte de adelgazar mas.¹⁶

Fray Lorenzo manifiesta su seguridad en las reglas al final del capítulo:

... Y assi ... este edificio con tres diversidades de bobedas, ira seguro, con tal que en los demas guarde los preceptos que diremos: y en la alteza del Templo no exceda de suerte que parezca mal y el peso y el empujo lo destruyan.¹⁷

En la segunda parte, como contestación a una de las objeciones de Pedro de la Peña, sobre las reglas de dimensionado para los estribos, reafirma de nuevo la seguridad que tiene en sus reglas:

Y todos los que no han guardado en sus edificios estas reglas, las ruinas de ellos lo han manifestado; y aunque pudiera yo referir algunos descuidos de Pedro de la Peña, siendo la defensa natural, porque me deva algo lo dexo de hazer... En quanto a los gruesos, digo, que si la bobeda es de piedra, que es menester tengan las paredes los gruesos que digo, y estimara que me diera proporcion en el empujo de la bobeda de piedra, para que considerando el empujo de la bobeda de ladrillo, viera quan verdad es lo que digo.¹⁸

La exposición, aunque discursiva, es muy sistemática y puede reducirse a un cuadro de doble entrada, como el que se presenta a continuación:

14. Op. cit. fol. 31r.

15. *Ibidem.*

16. *Ibidem.*

17. *Ibidem.*

18. Op. cit. segunda parte, fol. 11r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

material		muro (secc.const.)	muro +	contrafuerte
bóveda de	piedra	1/3	1/6	$\geq 1/3$
	ladrillo	1/4	1/7	1/3
	tabicada	1/5	1/8	1/4

Tabla 6.1. Dimensiones de los contrafuertes en función de la luz y el material de la bóveda

Para que las dimensiones estén completamente definidas da a continuación el espesor transversal de los contrafuertes en función del espesor del muro, 2/3, así como la separación entre los contrafuertes:

Los estribos han de tener de grueso comunmente las dos partes del grueso de la parte, de tal modo, que si la pared tiene seis pies, ellos han de tener quatro, que son las dos partes. El hueco que ha de aver entre uno, y otro ha de ser la mitad del ancho del Templo, quitando de los huecos los gruesos de los mismos.¹⁹

También contempla el caso de la existencia de capillas laterales:

Y si tuviese la planta Capillas, tendrá de fondo lo que tuviere la Capilla, hasta que ella levante lo que huviere menester, que despues tornará à telejar, como està dicho, y la planta lo mostrarà adelante en el siguiente capitulo.²⁰

Fray Lorenzo da también regla para determinar el espesor de las paredes cuando éstas no reciben el empuje de ninguna bóveda y solamente soportan el peso de la cubierta:

... notarás, que no todas las paredes necesitan de un mismo grueso, porque ... [las] paredes ... [que] no hacen sino sustentarse a sí mismas, sin que ninguna bobeda cargue en ellas, sino solo las armaduras, y porque estas tambien observen preceptos, siendo el Templo de canteria, ... tendrá de grueso la septima parte de su ancho: y siendo de ladrillo las paredes, tendrán de grueso la octava parte de su ancho; y siendo asi, quedaràn seguras, y firmes, por no sustentar mas que à sí, y servir de hermohear el Templo.²¹

19. Op. cit. primera parte, fol. 3lv.

20. *Ibídem.*

21. *Ibídem.*

Como en el caso de Rodrigo Gil esta exposición sistemática permite determinar las dimensiones de los elementos estructurales de una iglesia. Si las reglas de Rodrigo Gil se referían a las iglesias salón, las de Fray Lorenzo parecen destinadas a las iglesias tipo 'il Gesù', nave única con capillas laterales, si bien el dimensionado es suficientemente generoso como para tener un ámbito más general de aplicación.

6.1.4 Arcos

Fray Lorenzo dedica un capítulo completo al tema de los arcos, sus tipos y estereotomía²². Se contemplan solamente los casos más sencillos y en modo alguno tiene comparación su contenido con los tratados de Martínez de Aranda o Alonso de Vandelvira.

Como Alberti, procede de manera sistemática: primero define los distintos tipos de arcos:

Muchos son los generos de los arcos que la industria ha inventado: mas aunque muchos, reducirlos hemos à cinco... Los nombres a los que los reduzco son: el primero, es escarzano, el segundo carpanel o apaynelado, el tercero buelta de cordel, ò punto hurtado, el quarto medio punto, el quinto todo punto.²³

Sobre cual de ellos es el mejor, desde un punto de vista estructural, suscribe la doctrina de Alberti:

Entre todos es el mas fuerte el de medio punto, y el mas agradable a la vista, y al fin en todo el mas perfecto...²⁴

Menciona el problema clave del diseño de arcos: determinar su canto en función de la luz, sin embargo no da ninguna regla (en efecto, como hemos visto el espesor depende de la configuración de cargas que soporta el arco):

22. Cap. XLII 'Trata de los generos de los Arcos, y de la forma que se ha de tener en labrarlos.', op. cit., fols. 64-74.

23. Op. cit. fol. 64r.

24. *Ibídem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Del grueso de los arcos no se puede dar regla asentada y cierta aunque algunos la dan; mas en esto el Maestro le aya prudente, y conforme à lo que ha de sustentar el grueso...²⁵

Más adelante se reafirma en su opinión:

...del grueso que han de tener los arcos, de que no podemos dar regla, como diximos en el cap. 42. y es la razon, que si a un grueso de veinte y cinco pies diessimos dos de rosca, a uno de cinquenta aviamos de dar quatro, y esto podria convenir en puentes, de que adelante trataremos, mas no conviene en Templos; y assi el grueso quede arbitrariamente a juicio del Maestro.²⁶

Los comentarios sobre las propiedades y ventajas estructurales de cada tipo de arco coinciden con las expresadas con Alberti. Así, sobre el arco de medio punto dice:

Este es un arco muy perfecto, como en su lugar diximos, y muy seguro, con tal que los empujos esten acompañados con suficientes estrivos, de que en su lugar diremos, assi deste, como de los demás.

Es muy interesante la alusión a una regla para conocer el estribo correspondiente a cada arco. Sin embargo, en este caso Fray Lorenzo parece haberse olvidado de su promesa y ni en la primera ni en la segunda parte de su tratado aparece ninguna mención (o al menos no la hemos encontrado) sobre este particular.

Sobre el arco apuntado, menciona su empleo en los arbotantes y su propiedad de no sólo resistir empujes horizontales sino también verticales:

Este arco puede sufrir muchissimo peso, y comunmente se echa el medio para recibir algun empujo de Iglesia, salvando alguna calle; y estando assi le llamamos botarete.²⁷

6.1.5 Bóvedas: generalidades

Fray Lorenzo dedica 8 capítulos, del 51 al 59, al estudio de las bóvedas. Como ya dijimos antes este nivel de detalle en la descripción de la

25. Op. cit. fol. 64v.

26. Op. cit., fol. 75r.

27. Op. cit. fol. 69r.

técnica constructiva de las bóvedas no es alcanzado ni siquiera por Alberti.

En primer lugar enumera los distintos tipos de bóvedas:

Los nombres de las bobedas son tantos, quantas son sus diferencias. Algunos difieren en sus nombres, aunque no en su efecto. Pueden ser tantas las bobedas, quantas las areas ... Mas aunque tantas, reduzirlas hemos a cinco, por estos nombres. El primero llamamos, un cañon de bobeda, que pertenece a cuerpos de Iglesias, y a salas largas, guardando en su buelta medio punto. La segunda es media naranja; pertenece a Templos, y plantas, sobre figuras redondas, y ella por sí lo es. La tercera se llama, Capilla bayda: plantase sobre plantas quadradas. La quarta se llama, Capilla esquilfada; tiene su planta como la passada, y tambien la quinta, a quien llamamos, Capilla por arista, y destas cinco se originan las demas.²⁸

A continuación cita la terminología de Alberti y habla de la probable etimología del término, así como de la escasez de estudios sobre las bóvedas²⁹.

A todas se les dà un nombre comun de bobeda, a imitacion de los cielos, que su figura es en bobeda, y assi Crio Poeta llama a los cielos bobedas grandisimas, y en este nombre de bobeda concuerdan todos, aunque pocas demostraciones he visto dellas impressas.³⁰

Afirma que es un tipo de estructura muy estable; en efecto, una bóveda con curvatura en dos direcciones presenta más posibilidades de equilibrio y precisa por tanto, en general, de menor espesor que los arcos, siempre y cuando los contrafuertes o estribos sean suficientes.

Es fabrica [la de la boveda] de suyo muy fuerte, siendo bien entendida del Artifice; porque todos sus lineamientos van à parar à su centro, que es donde hacen su empujo, hermosea mucho un edificio: y teniendo resistencia, de que tratamos en el cap. 24. durarán lo mismo que èl.³¹

Para cada forma de bóveda describe el modo de construcción según su tipo de material: tabicada de ladrillo, rosca de ladrillo o piedra (cantería). En este último caso describe sucintamente la estereotomía en cada caso.

28. Op. cit. fols. 90v-91r.

29. Este hecho, que ya hemos mencionado es muy llamativo ya que la construcción abovedada fue la base de la construcción en occidente desde los romanos hasta el siglo XX. Fray Lorenzo tiene razón, los tratados de arquitectura pasan casi sin mención este importante elemento estructural. Así, por ejemplo, Palladio apenas le dedica diez líneas donde trata únicamente la terminología: Palladio *I Quattro Libri della Architettura*. Venecia: 1570, Primo Libro, Cap. XXIII, pág. 54 'Delle Maniere de Volti'.

30. Op. cit. fol. 91r.

31. *Ibidem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

6.1.6 Espesor de las bóvedas

Sobre el espesor de las bóvedas, como en el caso de los arcos no da regla, aunque sí señala que éstas suelen tener muy poco espesor en comparación con los arcos. Así, cuando trata de sus medidas dice:

Las medidas de las bobedas comunmente están solo superficial, y es la causa que su grueso es muy pequeño, mas quando se ofreciese el aver de medir su cuerpo, o grueso; medida su superficie la multiplicaràs por el grueso, o alto que tuviere, ...³²

Sin embargo no da nunca regla sobre este aspecto e insiste de nuevo en ello al tratar de aquellos tipos de bóveda donde el espesor puede ser importante³³ :

[cañón seguido] El grueso que haya de tener dexo à la decision del Artifice, que en todo debe ser muy considerado...

[media naranja] ... como diximos en el cap. 38. no se puede dar regla universal à los gruesos, por la razon que alli diximos.

[rincón de claustro] [P]ara el grueso de la rosca, dexo al arbitrio del Artifice, que en todo debe ser muy considerado, assi en su hueco, como en el grueso de las paredes, para no cargar mas de lo que moderadamente pueden sufrir, que siendo assi, harà sus obras con acierto.

6.1.7 Estabilidad de las bóvedas

La forma de 'cargar' una bóveda, esto es, de disponer los rellenos sobre las *embecaduras* o *enjutas*³⁴ y las *lengüetas*³⁵, tiene una influencia tremenda sobre el funcionamiento estructural. Los antiguos constructores más

32. Op. cit. fol. 59r.

33. Las omisiones son muy significativas: como hemos visto en la primera parte las bóvedas rebajadas y por arista solamente necesitan un espesor constructivo. Otra prueba más del profundo conocimiento estructural de Fray Lorenzo, aunque fuera empírico

34. Son los espacios que quedan entre el extradós de la bóveda en el arranque y el muro vertical que sostiene la cubierta. J. R. Paniagua *Vocabulario básico de arquitectura*. 2a. ed. Madrid: 1980, pág. 39, la define así: "Cada uno de los espacios o superficies triangulares resultantes de inscribir un círculo, elipse o arco en un cuadrado."

35. D. A. Rejón de Silva en su *Diccionario de las Nobles Artes, para instrucción de aficionados y uso de los Profesores*. Segovia: 1788, la define así: "La pared o cítara que se hace en los costados ó enjutas de una bóvedas tabicada entre su superficie superior y el muro, que está al lado, para mayor firmeza de ella, y para reducir su convexidad á plano horizontal ú obliquo". Fray Lorenzo las empleaba también a modo de estribos para cargar las bóvedas en las juntas de rotura.

que buscar 'formas catenarias' utilizaban formas geométricas, de fácil replanteo y construcción, que convertían en casi-catenarias con una adecuada disposición de las cargas sobre su extradós (línea de carga). Así pues, para cada tipo de bóveda dice hasta que altura y de que forma hay que disponer embecaduras y lengüetas.

6.1.7.a Cañón seguido

Insiste en que esta forma es la óptima así para un arco como para un bóveda: "... es la mas firme, y vistosa buelta, y de menos peso,...".

A continuación explica los modos de construcción correspondientes a cada tipo de material, poniendo énfasis en el macizado de las embecaduras (esta recomendación también la daba Alberti) y la construcción de lengüetas:

... y asi como vayas tabicando , la iras doblando y macizando las embecaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bobedas, echando sus lenguetas à trechos, que levantan el otro tercio, para que asi reciban todo el empujo ò peso de la bobeda.³⁶

6.1.7.b Media naranja

Puede ser de tres tipos: perfecta, rebajada y perlongada. La regla en cuanto a embecaduras y lengüetas es la misma que para las bóvedas de cañón, lo que, en este caso, supone un cierto exceso de seguridad por ser más estables las cúpulas que las bóvedas de cañón, como hemos visto en la primera parte:

En esta, la passada, y la que siguiere, sacaràs sus enharrados, ò embecaduras, hasta el primer tercio, y hasta el segundo las lenguetas...³⁷

La idea que tiene Fray Lorenzo sobre el funcionamiento de las cúpulas esféricas coincide básicamente con la de Alberti, aunque no entra en el mismo detalle que aquel.

36. Op. cit. fol. 91v.

37. Op. cit. fol. 94r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

... en todas las dobelas se han de buscar lechos, y sobrelechos, juntas, y paramentos, y todo ello es causado de su mismo centro, contra quien van guiados todos los empujos.³⁸

... la media naranja, en cerrando cualquier hilada empezada, està segura, por hacer el empujo contra simisma; y assi no hay dificultad en hacer linternas.³⁹

Quando la cúpula sea exenta señala la conveniencia de colocar unas gradas o escalonamientos sobre los riñones, al modo que aconsejaba Palladio, pues esto disminuye aún más el empuje, que dice, con razón, que es el menor en las cúpulas esféricas con respectos a los otros tipos de bóvedas:

... podra quedar descubierta; y en ella podràs si quixieres, dexar unas gradas, para subir à su alto, que muchas las tienen, y fuera de servir para esto, sirven de fortaleza a la misma bobeda, aunque la media naranja es la bobeda que menos empujo hace.⁴⁰

6.1.7.c Bóveda baída.

Dice de esta bóveda que "es una bobeda vistosa y fuerte, aunque por mas tengo las passadas..."⁴¹ Como en los casos anteriores insiste en la importancia de cargar adecuadamente la bóveda.

... macizaràs el primer tercio de la embecadura, ò trasdosados, y dobla segun la necesidad lo pidiere; echaràs lenguetas, que sirven de estrivos, y estas han de coger la tirantez de la diagonal, para que resistan a su empujo, y queden con seguridad y firmeza.⁴²

y más adelante:

Esta bobeda, se ha de trasdosar, ò macizar los enharrados, como queda dicho para las de yeso, echando las lenguetas de piedra; porque de ordinario conviene, que todo un edificio sea de un material.⁴³

6.1.7.d Bóveda en rincón de claustro o esquifada.

Sobre esta bóveda admite las mismas reglas que para las anteriores: macizar las embecaduras hasta el primer tercio y hechar lengüetas hasta el segundo tercio, pero advierte:

38. Op. cit. fol. 94v.

39. Op. cit. fol. 95v.

40. *Ibidem*.

41. Op. cit. fol. 96r.

42. Op. cit. fol. 96v.

43. Op. cit. fol. 97v.

... mas si llevase estas lunetas, no ay que echar lenguetas para su fortaleza, sino solo macizarla hasta su primer tercio.⁴⁴

Para el caso de bóveda de cantería:

Las lenguetas, y macizos desta seràn como se dixo en la tabicada: Advirtiendò, en que a rosca mas gruessa, mas gruesos requieren los estrivos que han de tener las dobelas[.] [P]ara el grueso de la rosca, dexò al arbitrio del Artifice, que en todo debe ser muy considerado, assi en su hueco, como en el grueso de las paredes, para no cargar mas de lo que moderadamente pueden sufrir, que siendo assi, harà sus obras con acierto.

Tambièn advierte la necesidad de realizar una buena uniòn entre los distintos paños, ya que es en este punto donde la bóveda tendería a abrirse:

Es de advertir, que a esta bobeda conviene, que en los rincones vaya trabada, porque si cada quarto de los quatro fuere de por si, seria falso el enjarjado...⁴⁵

6.1.7.e Bóveda de arista.

Fray Lorenzo discute, con acierto, el funcionamiento estructural característico de estas bóvedas y la importancia de los arcos cruceros, si bien la descripción que realiza no corresponde a una bóveda de crucería gótica apuntada, sino a la derivada de la intersección de dos cilindros rectos. En cualquier caso su comentario es interesante:

La pasada se asienta, y bassa sobre las quatro paredes: Mas esta no tiene otro principio mas del de las quatro esquinas, haciendose fuerte en ellas, y en las quatro formas que ella misma monea, segun su buelta. Es bobeda muy usada en todas partes, y muy acomodada para qualquiera fabrica vistosa, y fuerte.⁴⁶

A diferencia de las otras, señala que no necesita lengüetas aunque sí es preciso macizar las embecaduras:

No necesita esta bobeda de lenguetas, ò estrivos, por causa de que tiene los empujos contra sus mismos diagonales: mas necesita de macizar las embecaduras hasta el primer tercio; y con esto tiene lo suficiente.⁴⁷

44. Op. cit. fol. 98v.

45. Op. cit. fol. 99r.

46. Op. cit. fols. 101r-101v.

47. *Ibíd.*

6.1.7.f Lunetas

Las lunetas sirven para equilibrar las bóvedas de cañón o en rincón de claustro, actuando a modo de contrafuertes:

En todas las bobedas, que sus bueltas son cañón seguido, ò por esquilfe, estan muy bien las lunetas; y no solo adornan y hermosean el edificio, sino que fortalecen la bobeda; y la que lleva lunetas, poca necesidad tiene de estrivos, ò lenguetas.⁴⁸

6.1.8 Puentes

Fray Lorenzo dedica un capítulo completo al tema de los puentes⁴⁹. Su doctrina está claramente inspirada en la de Alberti, aunque como es habitual en él expresa sus propias opiniones y existen algunas desviaciones.

Como todo buen constructor de fábricas sabe que el comportamiento estructural es el mismo para estructuras de ladrillo o piedra:

... siendo las puentes de ladrillo, y piedra, lo que se dixere de la una, se ha de entender de la otra por ser en todo muy semejantes.⁵⁰

6.1.8.a Pilas

Sigue una descripción muy detallada de la construcción de las pilas de los puentes que dice han de tener de espesor la mitad de la luz: "El grueso de las cepas ha de ser por la mitad del hueco del arco."⁵¹ Esta proporción es muy conservadora e indica que Fray Lorenzo era más un arquitecto de edificios, en el sentido actual de la palabra, que de puentes.⁵²

Como Alberti recomienda macizar y levantar las pilas hasta los dos tercios de los arcos:

48. Op. cit. fol. 103v.

49. Cap. LXV *Trata del sitio conveniente para las puentes, y de su fabrica.*, Op. cit. fols. 121v-125r.

50. Op. cit. fol. 122v.

51. Op. cit. fol. 123r.

52. El término arquitecto se usaba indistintamente en aquella época. El tema de los puentes se trataba como un capítulo más en los tratados de arquitectura. El primer tratado específico de puentes es el de H. Gautier *Traité des Ponts*. Paris: 1716. Gauthey en su famoso tratado de puentes publicado casi cien años más tarde, todavía habla de la construcción de puentes como perteneciendo a la arquitectura.

Los estrivos levantaràn hasta los dos tercios de los arcos, y hasta el ultimo se iràn rematando con la misma nariz del tajamar, ò angulo, que llevará bien soldado, para que assi tambien sea defendido el estribo de las inclemencias del tiempo.⁵³

y aconseja, construir torres para que con su peso estabilicen el puente. Dado el excesivo ancho de las pilas parece una medida prudente:

Haze las puentes mas seguras, si en el medio se levantassen algunas Torres, fundadas sobre sus cepas; porque el peso en las avenidas, resiste el impetu de las aguas: y assi las vemos en las puentes del Arzobispo, y Alcantara, y en otras partes.⁵⁴

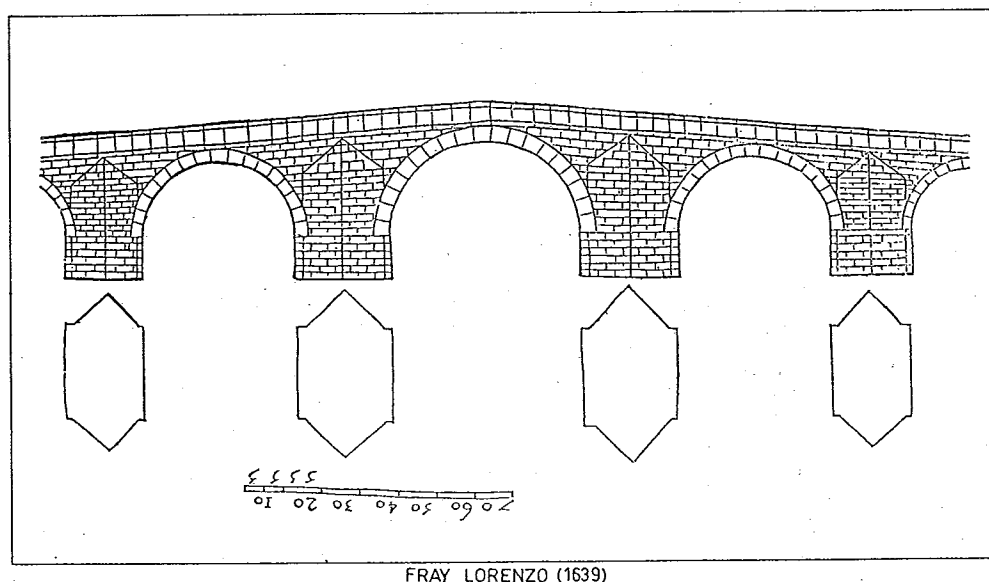


Figura 6.1. Diseño de puente según Fray Lorenzo

6.1.8.b Arcos

En el caso de los arcos de los puentes favorece el empleo del arco de medio punto, que como hemos visto considera el mejor estructuralmente. Vimos en la primera parte que para arcos extradosados horizontalmente la forma circular se aproxima bastante a la catenaria de las cargas:

La buelta que el arco ha de tener será bien sea de medio punto, por ser mas fuerte...⁵⁵

53. Op. cit. fol. 123v.

54. Op. cit. fol. 124r.

55. Op. cit. fol. 123v.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Sobre el canto de los arcos de la bóveda distingue como Alberti entre los aristones, las piedras del borde, y las del interior de la bóveda. Para las primeras de una proporción de 1/12 de la luz (Alberti propone 1/10, Palladio 1/12), para las segundas no da regla, si bien advierte que deben ser considerablemente más gruesas que en el caso de las bóvedas de los edificios:

El grueso de las dobelas será de alto en las bobedas segun al Artifice pareciese: mas los aristones, que son las dobelas exteriores, que reciben los golpes, serán por la dozaba parte de su ancho, aunque en el capitulo quarenta y uno diximos, que no se podia dar regla cierta para los gruesos de los arcos. Mas en este caso corre muy diferente regla; porque se ha de considerar, que por una puente pasan muchos, y diversos pesos de piedras, golpes de carros, y otras cosas y por esta razon conviene, que sean tan gruesas las bobedas, ò arcos de los puentes: y si el grueso que pide fuese tal, que comodamente no se puedan subir, ni assentar sus dobelas, en tal caso lo repartirás en dos bobedas, o arcos, y servirá de cimbra la primera à la segunda, y assi quedará la puente segura.⁵⁶

6.1.9 Torres

Fray Lorenzo también dedica un capítulo completo al tema de las torres.⁵⁷ Como en el caso de los puentes las proporciones generales están tomadas del tratado de Alberti, si bien Fray Lorenzo es más cauto con la esbeltez de las torres y solo admite una esbeltez aparente de 6 colocando un alma central dentro de la torre, que, con su peso, incrementa su estabilidad:

... la elevacion de la Torre, o altura, será hasta quatro cuerpos, ò quatro anchos, hasta el alto de la cornisa: y si la necesidad lo pidiere podrásla dar cinco cuerpos; y sin ella ay Autores que se alargan hasta seis; Mas yo no me atreviera a seguir en esta parte su doctrina, sino es echando en medio de la Torre un macho, ó pilar, que comúnmente llamamos Alma, del qual tambien cargaran las campanas; y si acaso la hizieseis, le darás de grueso la tercia parte del hueco de la Torre; esto es, levantando mas que los quatro cuerpos:...

El espesor de las paredes lo da en función del ancho y no de la altura total como Alberti (aunque ya señalamos que ese párrafo estaba confuso en la traducción española); Fray Lorenzo dice que sea el espesor la cuarta parte

56. *Ibídem.*

57. Cap. LXIII *Trata de la suerte que se ha de plantar una Torre, y de su fortificacion, y de algunas cosas tocantes à Muros y Fortalezas*, op. cit. fols. 114r-116v.

58. Op. cit. fol. 114v.

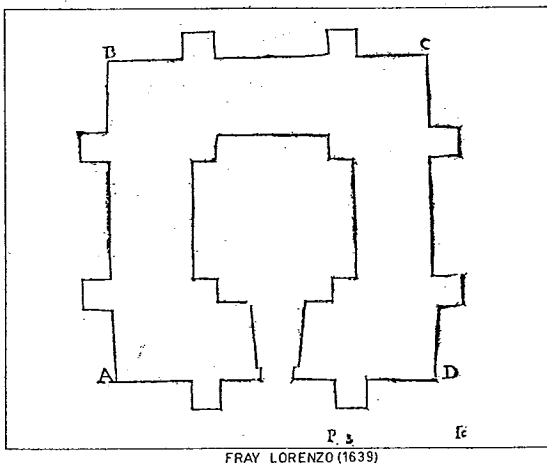
del ancho, lo cual para una torre de esbeltez 4 se traduce en $1/16$ de la altura, más delgado en comparación con el $1/10$ de Alberti:

... mas no excediendo del numero de quatro, puede quedar hueco lo que ay entre las paredes, que tendran de grueso, de qualquier manera que sea la Torre, la quarta parte de su ancho, y assi quedara con seguridad y firmeza;...⁵⁹

Luego da un ejemplo práctico de aplicación:

que puesto en practica, es: Si la Torre fuesse de sesenta pies de ancho, se ha de abrir de basis setenta y dos; y viene a quedar de zarpa o rodapie, la decima parte que diximos; y de hueco, o fondo, veinte pies: de gruesos de paredes, quince pies, que es quarta parte: y de alto doscientos y quarenta pies; y estas medidas guarda la Torre de Comares en la Alhambra de Granada.⁶⁰

Vuelve a insistir un poco más adelante sobre la esbeltez de las torres:



... Si la torre fuere redonda, la darás de alto quatro diámetros. Y es de advertir, que parecerà mayor que la cuadrada, y que la ochavada y todo: y la ochavada parecerà mayor que la quadrada, mas de la forma que fuere ha de observar las medidas dichas. Si quisieres hazer torre sin el alma, ò pilar, puedes, con tal que echas a la torre estrivos por la parte de adentro, y por la de afuera, en esta forma, segun lo demuestra la planta A.B.C.D. y assi quedará segura: y assi lo está la de la santa Iglesia de Toledo.⁶¹

Figura 6.2. Planta de torre de iglesia

6.1.10 Empleo de modelos

En la primera parte se vió como con la ayuda de modelos a pequeña escala, hechos de piezas sueltas, es posible sacar conclusiones respecto a la estabilidad de arcos, bóvedas compuestas e incluso edificios. Algunas de las reglas de Rodrigo Gil, como hemos visto, sugerían el empleo de modelos con este fin. No hemos encontrado evidencia documental de que los modelos

59. *Ibidem*.

60. Op. cit. fol. 114v.

61. Op. cit. fol. 115r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

fueran hechos con este fin; más bien, se empleaban para tratar de dominar la técnica del corte de piedras en una época en la que el desarrollo de la geometría descriptiva no había tenido suficiente difusión. Lo que sí es indudable es que de forma indirecta los modelos permitían obtener una sensibilidad o criterio intuitivo sobre las proporciones correctas de los espesores de los arcos o de los estribos. Fray Lorenzo hace continuas referencias al empleo de modelos a pequeña escala de escayola para descubrir los secretos del arte del corte de la piedra. Citamos a continuación algunas de sus persistentes admoniciones sobre su uso. Así, al tratar de los arcos dice:

El diestro Maestro, este, y los demas diseños, primero los forja, y corta en pequeño de yeso, que los haga. Mas los cortes dichos, por averlos assi primero executado, como se obren como está dicho, saldrán bien.⁶²

Los cortes dichos hallarás estar bien ajustados, si con diligencia los obrares: y tambien lo conoceras, si los cortares en pequeño de yesso, que assi lo advertimos al principio, de que yo por los diseños que obro en piezas de yesso, conozco su justificacion; y es obrar con seguridad, quando lo que se obra es costoso, pues te aprovecha el tiempo y se gasta menos.⁶³

Importaria, que antes que hiziesses el arco, que le cortasses de yeso en pequeño, para que de su conocimiento resultase el hazerte mas señor en las dificultades: mas los cortes dichos, antes los he experimentado, que llegase a tratar dellos.⁶⁴

Cuando describe los cortes de las bóvedas insiste de nuevo:

Si deseas aprovechar, y experimentar este mi escrito, haz cortes con yeso, y por ellos conocerás ser cierto, y concordar lo practico con lo especulativo: todo lo qual experimentè con mis manos antes de escribirlo, siendo este mi exercicio, como en otras ocasiones he dicho.⁶⁵

Sera bien, que para enterarte de lo dicho hicieress de piezas pequeñas de yeso los cortes dichos; y fuera del enterarte conoceras ser asi.⁶⁶

62. Op. cit. fol. 66r.

63. Op. cit. fol. 69r.

64. Op. cit. 67v.

65. Op. cit. fol. 91r.

66. Op. cit. fol. 95r.

6.2 Simón García

6.2.1 El Tratado

El Tratado de Simón García, nunca llegó a publicarse, y se conserva en forma manuscrita en la Biblioteca Nacional de Madrid.⁶⁷ Parece ser la obra de un erudito que ha consultado muchas fuentes; en cualquier caso, además de la parte del manuscrito correspondiente a Rodrigo Gil otra buena parte está inspirada, muchas veces copiada literalmente, de la obra de Fray Lorenzo.⁶⁸

6.2.2 Reglas estructurales sobre puentes

6.2.2.a Sobre las pilas

La regla sobre el dimensionamiento de las pilas de los puentes que aparece en el manuscrito de Simón García constituye un caso excepcional. En vez de basarse en proporciones lineales (sea geométrica o aritméticamente) como ha sido el caso hasta ahora, utiliza proporciones de áreas. Así, dice, que la pila tiene que tener de superficie la mitad de la superficie que cubre el arco: es decir, el producto de la luz del arco por su ancho. Las proporciones de la pila, sin embargo, no aparecen claramente establecidas y dice vagamente se den tres partes al tajamar situado en la dirección de la corriente y dos al de la parte de abajo:

La orden que se a de tener para sacar la traça de un puente, y darle el area que requiere el pilar segun el ancho del puente, y el largo de uno de los arcos sera esta ... Teniendo quenta de dar a los pilares el area que requieren que será de esta manera de exemplo. En esta planta

67. *Compendio de arquitectura y simetría de los templos conforme a la medida del cuerpo humano, por Simón García, arquitecto natural de Salamanca. Año 1681.* Ms. 8884, Biblioteca Nacional de Madrid. Sólo existe una edición facsímil completa del manuscrito realizada por Carlos Chanfón Olmos, Churubusco, México: 1979, con estudios introductorios de Antonio Bonet Correa "Simón García Tratadista de Arquitectura.", pp. vii-xiii, y del propio Carlos Chanfón "Simón García y la Antropometría.", pp. 7-37, y "Simón García y la Proporción Geométrica.", pp. 38-59. Las partes atribuidas a Rodrigo Gil tuvieron varias ediciones anteriores como se mencionó en el apartado correspondiente.

68. Este es el caso, por ejemplo, de los capítulos 48 al 52 que tratan de la medida de las bóvedas que están literalmente transcritos del capítulo 80 de Fray Lorenzo. También lo están los capítulos 69 y 70. En muchos otros capítulos hemos visto transcripciones literales, sin embargo, el orden del tratado de Simón García es distinto del de Fray Lorenzo y esto hace que las comparaciones sean laboriosas. Hemos realizado un examen superficial hace suponer que de una comparación detallada resultarían muchas más concordancias.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

que queda señalada con A, que tiene el arco de longitud 40 pies. Y de ancho 16 pues multiplica 40 por 16 y baldran 640. La mitad de estos 640 que son 320 serà el area que tendra este pilar, y el tajamar que està açia la parte de arriba que corta el agua tendra tres partes y el de abajo dos; tambien se a de mirar que si este edificio se a de haçer a donde el rio ba angosto y recio, en tal caso el puente sea mas ancho, que quando el rio ba tendido y manso porque desta suerte no halle la furia tanto en que haçer presa como si fuese el pilar ancho... 69

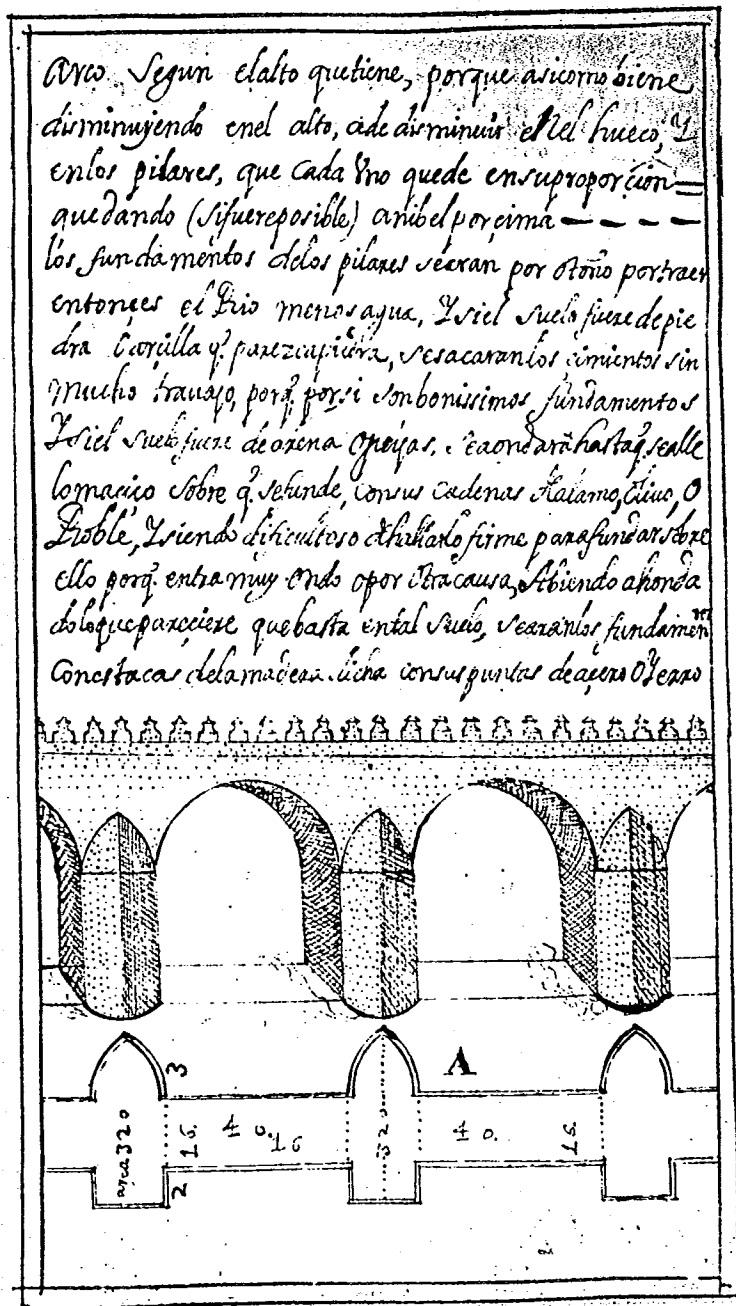


Figura 6.3. Dibujo original del manuscrito

Una interpretación podría ser, basándose en la figura y manteniendo la forma del tajamar de arriba (arco apuntado aproximadamente equilátero) y abajo (rectangular), que la relación entre las longitudes transversales de ambos esté en la relación de 3 a 2. Como, a su vez, los dos serían función del ancho de la pila, en este caso todas las dimensiones quedarían prefijadas al determinar la luz (L) y ancho (A) del tramo, produciéndose las relaciones geométricas que aparecen en la Figura. 6.4. De esta forma podemos establecer relaciones entre la luz del tramo y el espesor de la pila (e), L/e, para cada proporción del tramo L/A (véase Figura 6.5).⁷⁰

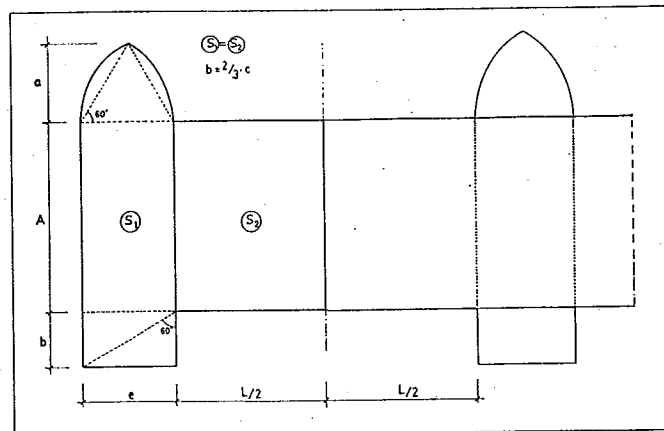


Figura 6.4. Restitución hipotética de la geometría

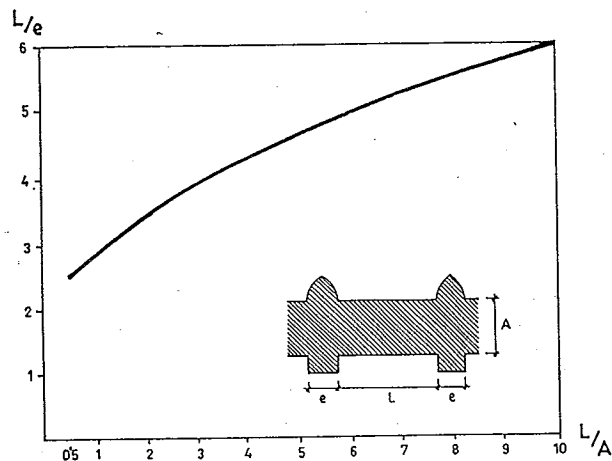


Figura 6.5. Relación entre luz y espesor de la pila en la hipótesis anterior

70. Realizando un desarrollo algebraico sencillo se llega a que la regla establece la siguiente relación entre los dos parámetros adimensionales mencionados anteriormente, $L/A = \delta$ y $L/e = \delta: \delta^2 - 2\delta - 2k\delta = 0$ donde k es una constante de valor $k = \pi/3 + 13/12$.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Como puede observarse los valores del espesor de la pila están comprendidos entre $1/3$ y $1/6$ de la luz. A medida que la calzada se hace más estrecha influye más el papel estabilizante de los tajamares y la pila disminuye de espesor. Esta manera tan sofisticada de realcionar varias variables parece corresponder más a la tradición de Rodrigo Gil que a la de Alberti/Palladio. La forma de presentar la regla también coincide, y, en nuestra opinión, es probable que esta regla perteneciera al antiguo manuscrito de Rodrigo Gil.

Más adelante, siguiendo su afán erudito, Simón García menciona las reglas de Alberti; cita primero a Cataneo⁷¹ pero su libro es muy posterior y las reglas corresponden al tratado de Alberti.

... Segun Cataneo, no seran las pilastras mas subtiles que la sexta parte del hueco del arco y concuerda con Leon Baptista Alberto que en el libro 4° Cap. 6, dice que sean los pilares de grueso la terçia parte de la mitad del arco que biene a ser la sexta del arco entero.⁷²

6.2.2.b Sobre los arcos

Sobre el diseño de los arcos repite de nuevo la regla de Alberti:

Las dobelas de los arcos serán tan altas como la 10a parte del ojo maior y ya que no puedan ser tan grandes todas las dobelas por lo menos los aristonos...⁷³

6.2.3 Reglas estructurales sobre Templos

Simón García era un erudito ecléctico, y tras haber incluido en la primera parte de su manuscrito las reglas de Rodrigo Gil, aumenta ahora su número dando reglas que en ocasiones se contradicen. No parece tener criterio personal propio y parece convencido que el saber es una acumulación de datos:

71. Pietro Cataneo *L'Architettura di Pietro Cataneo Sienese*. Venecia: 1567. Citado por D. Wiebenson *Architectural Theory and Practice from Alberti to Ledoux*. Charlottesville: 1983, I-22.

72. Op. cit. fol. 40v.

73. *Ibidem*.

Aunque desde el capt. 2 hasta el fin del capt. 6 se a tratado de la proporçion y repartimiento de los templos asi por la estatura humana, como por iometria, con advertençias y reglas generales, no obstante proseguire, que la abundancia de reglas y preceptos, no daña...⁷⁴

6.2.3.a Iglesias de una nave

Para una iglesia de una nave da la regla del tercio, mencionada por Palladio, y ampliamente seguida en la práctica constructiva del Renacimiento; la cita además en dos formas distintas, no pareciendo darse cuenta de que la proporción resultante es la misma:

... que si el templo ubiere de ser de una nabe, se tomarà el ancho del sitio, por los extremos de afuera, el qual se partira en 4 partes y dos se daran al ancho de la nave y dos a los de los dos lados, de pilares y paredes, haciendose entre pilar y pilar capillas hornaçinas, que sirban y parezcan cruçeros ... y si la yglesia no llebase hornaçinas, sino solas unas correspondençias que salgan fuera poco de la pared ... se dara de grueso, a la pared, y pilar, la terçia parte del ancho de la nabe, y los pilares, y estrivos quedarán a la parte de adentro adornados de buena arquitectura...⁷⁵

.....
Si la yglesia fuera de una nave, se partira todo el ancho en 5 partes y 3 se daran a la nave, y dos a las paredes de los lados, haciendose a manera de cruçeros con sus correspondençias.⁷⁶

6.2.3.b Iglesias de tres naves

Para una iglesia de tres naves da dos proporciones distintas; en ambos casos están muy sobradas y parece que se trata más bien de buscar un determinado efectos espacial con relación a la planta que de dar una regla estructural propiamente dicha:

Si la yglesia fuera de 3 naves, se partira el ancho en 8 partes; dos se daran a la nave maior, y dos a los pilares de los lados, y dos a las dos naves colaterales, y algo mas, y dos se darán a las paredes y pilares de los lados, abiendo de llevar ornaçinas.⁷⁷

.....
Y si el templo fuera de 3 naves, se partira el ancho en 11 partes, 3 se daran a la nave maior, y 2 a los dos pilares de los lados con sus correspondençias de pilares...⁷⁸

74. Op. cit. fol. 50r.

75. *Ibidem*.

76. Op. cit. fol. 51r.

77. Op. cit. fol. 50v.

78. Op. cit. fol. 51r.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

6.2.3.c Iglesia de cinco naves

Como en el caso anterior da dos proporciones distintas en distintos lugares y, debido al sobredimensionamiento, no parece que pueda hablarse de reglas estructurales propiamente dichas:

Y si fuere de 5 naves, se partira el ancho en 12 partes, dos se daran a la nave maior, y 4 a los 4 pilares, y 4 a 4 colaterales; y 2 a las paredes de los lados ...⁷⁹

.....

Y si la yglesia fuera de 5 naves, se partirá el ancho en 17 partes, 3 se daran a la nave maior, y 4 a 4 pilares, y 8 a quatro colaterales, y 2 a las paredes de los lados, con sus correspondencias.⁸⁰

6.2.3.d Otras reglas

Por si no fuera bastante esta diversidad de preceptos Simón García todavía da otros tres conjuntos de proporciones para los pilares y contrafuertes de una iglesia. Los primeros corresponden, según dice, a las proporciones de San Pedro de Roma; los dos últimos a las catedrales de Toledo y Salamanca.

Otra proporción se saca de un vien proporcionado cuerpo humano, y es, que la espalda que es el ancho que ay de un hombro, a otro, sea la nave maior, y lo que ay desde el hombro al codo, sea el grueso del pilar, y lo que ay desde el codo al juego de la muñeca sea la nave colateral, y lo que tiene de largo la mano la pared del lado, que por otro termino, es, 15 partes de nave maior, y 12 de cada pilar, y 12 de cada pilar, y 9 de cada colateral la qual proporción de la Yglesia de San Pedro de Roma.⁸¹

.....

La proporción de la Santa Yglesia de Toledo, es, la 4a parte del ancho de la nave maior, al pilar; de $\frac{2}{3}$ a cada colateral, y a cada pared lo que al pilar, lo qual es no llegando al cimborrio;...⁸²

.....

La proporción de la Santa Yglesia de Salamanca y Segovia, es la 4a parte del ancho de la nave maior, al pilar, y los $\frac{2}{3}$ la colateral, y otro tanto a cada ornaçina, a la pared, lo que al pilar.⁸³

Simón García mezcla reglas para edificios que no corresponden al mismo tipo estructural. Es curioso, sin embargo, la aparición de la regla gótica

79. *Ibídem.*

80. Op. cit. fol. 51r.

81. Op. cit. fol. 51v.

82. *Ibídem.*

83. *Ibídem.*

del 1/4 de la luz, citada con cierto menosprecio por Rodrigo Gil, tanto en la catedral de Toledo como en la de Salamanca.

6.2.3 Torres

Sobre las torres todas las reglas de proporción están inspiradas en Alberti, como el propio autor reconoce. Una prueba más de la importancia y difusión de su obra, que, como dijimos marcó la pauta en el diseño de torres hasta el siglo XIX:

Segun Leon Bautista, si fueren pulidas, y cuadradas, tendran de alto, 6 de sus anchos, y si fueran toscas, subiran 4 de su ancho. Y si fueran redondas, y pulidas 4 y si redondas y toscas 3 veces su diametro. El grueso de las paredes, 6 pies, si sube 60. Si sube 70 tendra de grueso 7 y asi se hirà proporcionando, de modo que se tenga por regla general darle de grueso a las paredes la deçima parte de lo que subiere de alto.⁸⁴

6.3 Henry Wotton y Bernardino Baldi

Ya mencionamos en el apartado correspondiente a Alberti la formulación por el matemático italiano Baldi⁸⁵ de los primeros teoremas sobre arcos (exceptuando, por supuesto, las contribuciones de Leonardo). Estos tuvieron popularidad al ser publicados en una obrita de Wotton que tuvo mucha difusión; la primera edición inglesa es de 1624 y en español se imprimió en 1698⁸⁶.

Los Teoremas de Wotton no aportan ninguna regla al diseño estructural de los arcos, pero por su énfasis en el equilibrio de las masas, que como veremos es recogida en las interpretaciones de otros tratadistas como el padre Tosca, y por tratarse del primer intento sistemático merecen ser

84. Op. cit. fols. 53r-53v.

85. 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.

86. H. Wotton *The Elements of Architecture*. London: 1624. Traducción al español:

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

citados íntegramente.

En primer lugar pone énfasis en la importancia de la materia y limita el campo a los arcos y bóvedas de cañón, que como dice son equivalentes:

... Porque las mas de las vezes se hallan sustentando Bobedas y Arcos [los muros] ... trataremos de estos; pues la Bobeda no es mas que un Arco dilatado, y ensanchado; y el Arco una Bobeda estrechada. Y para proceder en esto de Compendiosa, Clara y fundamentalmente, reduciré todo este negocio à pocos Theoremas.⁸⁷

El primer teorema trata de la fuerza de la gravedad:

THEOREMA I

Todas las materias solidas si no las impiden, descienden perpendicularmente azia abaxo; porque el peso tiene natural inclinacion al Centro de el Universo; y la Naturaleza perficiona sus movimientos por las lineas mas breves.⁸⁸

En el segundo afirma que los arcos adintelados con dovelas rectangulares de lados paralelos no son estables. La afirmación parece de Perogrullo, sin embargo el al final dice "... para que esten firmes, es preciso, se mude su posicion, su Figura, o entrambas cosas." En efecto, si los ponemos verticales obtenemos un pilar estable (cambio de posición respecto a la dirección de la gravedad); la otra única posibilidad es variar su forma.

THEOREMA II

Los ladrillos de forma Rectangular Ordinaria, si se unen, ò juntan en orden nivelado, y plano, entre fulcimientos que sustentan ambos terminos: Todas las partes intermedias necessariamente harán asiento con su natural gravedad ... porque como sus lados son paralelos, tienen espacio para descender perpendicularmente. Y assi para que esten firmes, es preciso, se mude su posicion, su Figura, ò entrambas cosas.⁸⁹

En el tercer teorema justifica la forma cuneiforme de las dovelas y prescribe además que las juntas concurren en un centro, como es la práctica habitual. Advierte que aunque la figura resultante es estable los empujes son muy fuertes.

THEOREMA III

Los ladrillos, ò Piedras de forma Quadrada, si se ponen con Orden Nivelado (en forma de

87. Wotton, op. cit. pág. 57.

88. *Ibidem*.

89. Op. cit. pág. 58.

Cuñas...) y sus puntos interiores concurren en un Centro, sustentados sus extremos... Ninguna de las partes intermedias puede hazer asiento, mientras no lo permiten los fulcimientos; porque no tienen espacio (aunque estèn a Nivel) para descender perpendiculares. Pero aun es muy debil este especie de Fabrica; porque los fulcimientos que sustentan los extremos... , padecen el muy violento impulso de las paredes intermedias... Por lo qual se usa rara vez esta forma, si no es en Ventanas, y Puertas angostas.⁹⁰

Prosiguiendo el razonamiento del teorema anterior concluye que la figura mejor para un arco es la semicircular.

THEOREMA IV

Si los materiales figurados como antes Cuneatum, no se colocan en forma nivelada, ó plana, sino en forma de Arco, ò porcion de Círculo, concurriendo en un Centro: Ni las partes de el Arco pueden hazer asiento, por faltados de espacio para descender perpendiculares. Ni los fulcimientos (assi los llaman) de dicho Arco, pueden padecer tanta violencia como en la Postura plana precedente : porque su redondez causa, que el peso que carga, descansa sobre los fulcimientos mas que impelerlos... De donde se infiere un evidente Corolario, que la mas segura forma de los Arcos es la semicircular: y para Bobedas, la Emisferica... como lo prueba bien Bernardino Baldo, Abad de Guastala, en sus comentarios a Aristoteles.⁹¹

El último teorema y los comentarios que le siguen tratan simplemente de justificar el empleo de otro tipo de arcos que empezaron a emplearse a partir del renacimiento⁹², los carpaneles y elípticos, y a denostar los arcos apuntados góticos, considerados como bárbaros.

THEOREMA V

Assi como los Arcos semicirculares, ò Bobedas hemisfericas son las mas redondas entre todas, y consiguientemente las mas firmes, segun el Theorema precedente: Assi tambien son las mas hermosas entre todas, las que guardando la misma altura, se dilatan, y ensanchan una catorzena partes mas largas, que su Diametro entero; porque esta añadidura en la extension, pone mucho de hermosura, y quita poco de firmeza. Esta observacion se halla en Leon Baptista Albertis: pero la Practica de conservar la misma altura, y dilatar los braços, ò terminos del Arco, està en la Geometria de Alberto Durero...⁹³

.....
Sobre estos cinco Theoremas se funda toda la Ciencia de Arquear y Embobedar: Y en quanto à las Bobedas, que los Ytalianos llaman: Di terzo, & di quarto acuto; porque siempre terminan en Angulo Agudo, y resultan de la division del diametro en tres, quatro, o más partes; digo: Que estas, assi por su flaqueza, y debilidad, como por su feo aspecto, deben exterminarse de los ojos juyciosos, y dexarle à sus primeror inventores los Godos y Longobardos, con las demàs reliquias de aquel barbaro Siglo.⁹⁴

90. Op. cit. pág. 59.

91. Op. cit. pág. 60.

92. Para un estudio completo sobre la aparición de este tipo de arcos, véase: W. Müller "Der elliptische Korbogen in der Architekturtheorie von Dürer bis Frézier." *Technikgeschichte*, Vol. 38, 1971. pp. 93-106.

93. Op. cit. pág. 62.

94. Op. cit. pág. 63.

6.4 Fontana: diseño de cúpulas

Carlo Fontana, arquitecto e ingeniero, nació en Como en 1634 y se estableció en Roma en 1655. En 1694 publicó un monumental tratado dedicado a la fábrica de San Pedro.⁹⁵ Se trata de un voluminoso libro in-folio y nos interesa porque incluye unas reglas geométricas de dimensionamiento para cúpulas. Además, como veremos, las reglas proporcionales de Fontana fueron citadas en el debate suscitado sobre el diseño de la cúpula de Santa Genoveva en París.

Fontana distingue entre cúpulas dobles, formadas por dos cáscaras como la de San Pedro, y las simples, compuestas por una cáscara única. Favorece el empleo de las primeras para mejor adecuar la percepción exterior e interior de la cúpula: para que la cúpula sea visible desde el exterior debe estar peraltada; esto sin embargo lleva a una proporción desagradable desde el punto de vista del espacio interior. La solución es hacer una cúpula formada por dos cáscaras, cada una respondiendo a las exigencias del espacio exterior e interior respectivamente:

... Poiche la di lui Volta, si come dentro rende pago l'occhio , così non sodisfá la vista della parte esterna, rispetto alla maggiore estensione, che la rende piú bassa, in mancanza della sua simetria; e perche anche la forma propria d'una di queste cupola dello stile antico è solamente la concorrenza del di dentro.⁹⁶

Fontana da reglas geométricas para definir la forma de ambos tipos de cúpulas, así como para la colocación de las cadenas de hierro en su parte baja.

6.4.1 Cúpulas dobles: San Pedro

Como es lógico, Fontana considera como forma óptima para una cúpula doble la de la cúpula de San Pedro. Le dedica varios capítulos a la forma geométrica y la construcción de esta magnífica mole. La definición geométrica de la cúpula aparece en el capítulo XV, titulado "Regole occulte, che si

95. C. Fontana *Il Tempio Vaticano e sua origine*. Roma: Nella Stamperia di Gio: Francesco Buagni, 1694.

96. Op. cit. pág. 315.

mostrano nella seguente Tavola per il composto della Cupola, e suoi sostegni." La descripción ocupa dos láminas donde aparece claramente el trazado geométrico de la cúpula. La misma regla parece haberse empleado en el dimensionado de los cúpulas menores sobre los ángulos de las naves menores del templo. Esto hace presuponer que existía el convencimiento de la estabilidad de una forma independientemente de la escala.

Merece destacarse, además, la adecuada colocación de las cadenas que según Fontana están situadas en "il luogo del maggiore springimento"⁹⁷. Efectivamente su posición tendería a zunchar las zonas más propensas a abrirse durante el colapso.

6.4.2 Cúpulas simples

El capítulo dedicado a las cúpulas simples⁹⁸ es más explícito, en cuanto a la importancia de la forma y no de la escala. Comienza en primer lugar disculpando el empleo de este tipo que considera inferior al anterior:

Ma perche le scarzesse de' denari, ò per trovarsi li Tempii scoperti con sostegni, e muri già fatti, non habili à reggere le duplicate per essere i muri scarsi di quelle habilità necessaria per le due...⁹⁹

A continuación presenta su regla basada en su experiencia profesional:

... nelle seguenti Tavole vi è scolpita la Regola de noi inventata, e praticatta in molte altre Cupole...., sono riuscite di un contorno piacinto tanto à gli Architetti, come à Pittore...¹⁰⁰

La regla, como en el caso de las cúpulas dobles, consiste en una serie de trazos geométricos donde los centros vienen determinados por fracciones simples de las dimensiones principales. La lámina que reproducimos es suficientemente explícita y también es una buena ayuda la restitución simplifica-

97. Op. cit. pág. 325.

98. Cap. XXIV "Regole per le Cupole Semplici, & effeti di esse, e dell'altre doppie.", pág. 361 y ss.

99. Op. cit. pág. 361.

100. *Ibidem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

da de Straub.¹⁰¹ No obstante citamos, por su interés, íntegros los párrafos del libro en los que se establece la regla:

Regola dell'Autore per costruire li Tamburi, e Cupole semplici con Lanterne.

Destinato, che farà il Vano della Cupola, e Cornicioni sopra gl'Arconi con il Zoccolo, la metà della linea Diametrale costituirà l'Ornato esteriore del Tamburo A; la di cui altezza si dividerà in parti quattro; tre de quali s'affegnaremo all'Ornato de Pilastrì, Base, Architrave, Fregio, e Cornice, come in B; e la quarta al Piedestallo C, quando però lo permeteranno l'elevatione de Tetti, il che non hà Regola

Ornato interiore del Tamburro

Divideri la linea Diametrale per metà, alzata sopra l'altezza del primo Piedestallo costituirà l'Ornato con il Piedestallo superiore come in D.

Grosezza del Tamburro

Divideri la linea Diametrale in parti dieci; una delle quali costituirà la grosezza del Tamburro, come in E; e trè parti di questa grosezza costituirà il Muro, che fà nascimento alla Cupola, come in F.

Sesti

Una delle parti duodeci del Vano si darà nell'altezza del dritto come in G; e nell'intersecante del Catetto H, farà punto del tutto Sesto I; e due delle duodeci parti costituiranno la Circonferenza K; per l'apertura dell'ochio della Lanterna, il cui diametro divideri in parti quattro nell'intersecante L; farà punto del sesto interno, e nell'altro M; farà punto del Sesto esterno, l'elevatione del quale divideri in parti trè, una delle quali farà il luogo delle Catene seganto N.

Lanterna

La metà del Vano della Cupola costituirà la circonferenza O; la quale assegnerà l'altezza della Lanterna¹⁰² senza la Palla e Croce, e numero trè diametri sopra il tutto Sesto costituiranno il Vano.

Los párrafos siguientes tienen una gran importancia pues permiten conocer el método seguido por Fontana a la hora de elaborar sus reglas. Para fijar la relación entre el espesor del muro del tambor y la luz de la cúpula realiza diferentes mediciones en distintas iglesias ya ejecutadas, e incluso dibuja las plantas a escala (véase Figura 6.6. (d), parte inferior izquierda) y encuentra que existe una relación, prácticamente fija de 1/10 entre ambos parámetros. Se trata, pues, de una regla empírica, pero su fundamento está en el reconocimiento, implícito, de que el factor fundamental es la forma, no el tamaño, y, para fijar esa forma se emplean números adimensionales.

101. H. Straub *A History of Civil Engineering*. London: Leonard Hill, 1952, pág. 91, fig. 29.

102. Op. cit. págs. 362-363.

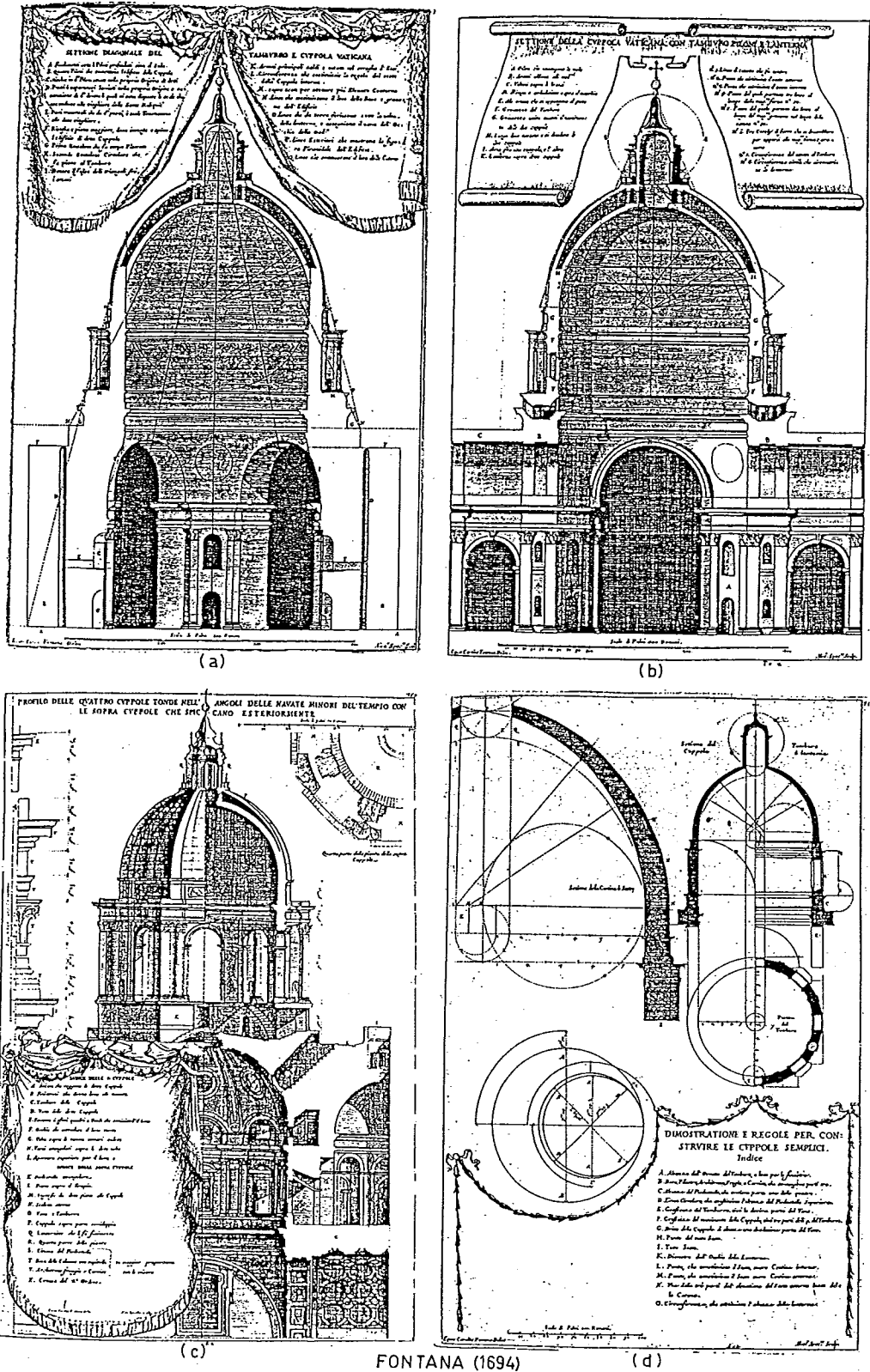


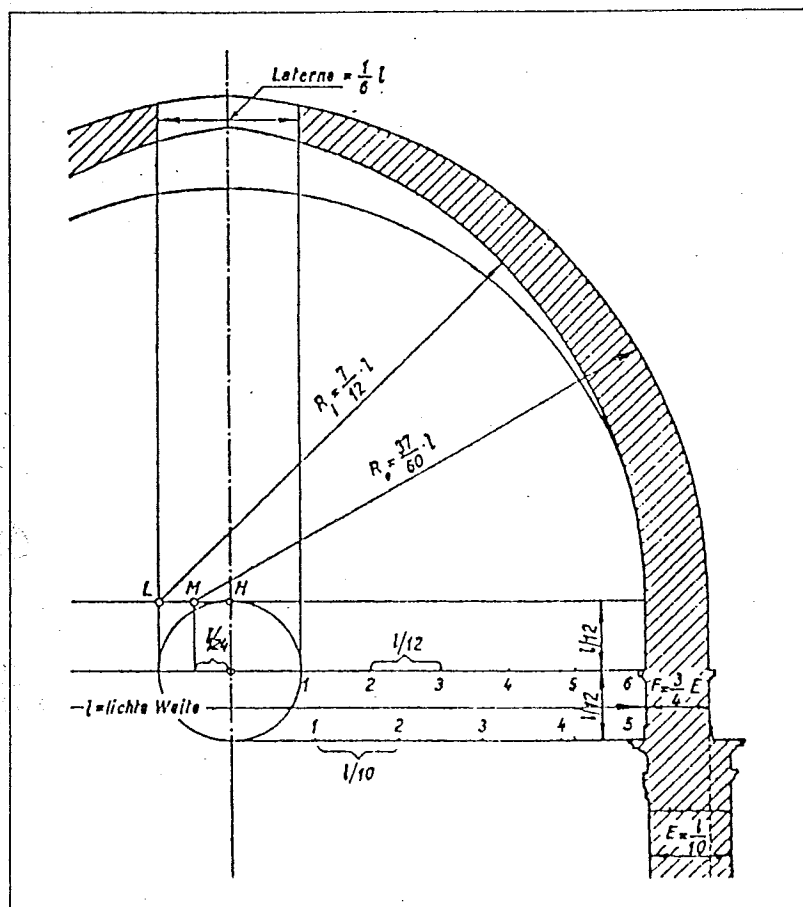
Figura 6.6. Diseño de cúpulas según Fontana. Cúpulas dobles: San Pedro (a) Cúpula principal: sección diagonal; (b) ídem: sección transversal; (c) Cúpulas laterales: sección; (d) Cúpulas simples.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Vano delle seguenti Cupole, e Regole per la grossezza de' loro Muri, che li fan Tamburro
 Cupola di Santa Margarita in Monte Fiafcone di Vano palmi 115; come AB; grosso il muro palmi $13 \frac{1}{4}$; cioè circa la nona parte del Vano, perche il muro è di Tufi.
 Cupola di Sant'Andrea della Valle di Vano palmi $74 \frac{1}{2}$; come F; grossi il muro palmi $7 \frac{1}{2}$; cioè circa la decima parte del Vano.
 Cupola della Madonna de' Miracoli di Vano palmi $78 \frac{3}{4}$ come AE; grosso il muro palmi $7 \frac{2}{3}$, cioè circa la decima parte del Vano.
 Cupola del Giesu di Roma di Vano palmi $78 \frac{1}{4}$; come AD, grosso il Muro palmi $7 \frac{3}{4}$; cioè circa la decima parte del Vano.
 Cupola di San Carlo a' Catinari di Vano Palmi 72; grosso il muro palmi $7 \frac{1}{4}$; parimente circa la decima parte del Vano.

Avertimenti

Li Muri, che devono reggere le Cupole semplici, se faranno di ottimo lavoro di Mattoni doveranno essere le loro grosseze, al meno la decima parte del Vano di esse.
 Li Muri, come sopra, se faranno d'inferior qualità di Cimento, cioè di Tufi, ò Pietre, doveranno essere le loro grosseze almeno la nona parte del Vano.
 Li Muri, come sopra, che doveranno reggere Cupole doppie, doveranno essere più abbondanti di grossezza delle sudette, secondo sarà giudicato dal Professore.



STRAUB (1952)

Figura 6.7. Regla para cúpulas simples: restitución de Straub

103. Op. cit. págs. 363-364.

6.4.2.a Influencia posterior

Las reglas de Fontana sobre las cúpulas no pasaron desapercibidas y aparecen citadas en dos de las controversias suscitadas sobre la estabilidad de las cúpulas en el siglo XVIII, concretamente sobre las de San Francisco el Grande en Madrid y Santa Genoveva en París.

En el primer caso, Ventura Rodríguez cita en su Informe a la Academia de 1761, las reglas de Fontana para desautorizar el proyecto presentado por Fr. Francisco Cabezas:

Las paredes del pie derecho, ó cuerpo de luces, de las seis Capillas de los lados del Templo, no tienen suficiente grueso, como se ve por los cortes ó perfiles, de líneas simples de lápiz que seme han manifestado, dónde solo hai la duodécima parte del vano, ó diámetro de las Cúpulas que han de sustentar, debiendo á lo menos tener la décima parte, como advierte Carlos Fontana en la descripción del Templo Vaticano libro 5, cap. 24...¹⁰⁴

En el segundo caso, Patte cita a Fontana en relación con la polémica sobre el diseño de la cúpula de Santa Genoveva en París¹⁰⁵. En ella intervinieron, además de Patte, Gauthey y Rondelet que publicaron varias memorias sobre el particular¹⁰⁶:

Fonatan, savant Architecte du siècle dernier a donné... des règles sûres pour trouver les proportions les plus agréables des coupoles simples,... comme il seroit difficile de rien ajouter à ce qu'il a dit à cet sujet,¹⁰⁷ d'après les meilleurs modèles d'Italie, nous ne pouvons mieux faire que de la rapporter...

A continuación describe con detalle la regla de Fontana y, aplicando el análisis de La Hire comprueba su estabilidad por el procedimiento de calcular el contrafuerte de la bóveda de cañón correspondiente y dividirlo por dos,

104. P. García Barriuso, *San Francisco el Grande de Madrid. Aportación documental para su historia*. Madrid: 1975, págs. 136-137.

105. P. Patte, *Memoire sur la construction de la coupole projectée pour couvrir la nouvelle église de Saint Geneviève a Paris*. Amsterdam: 1770.

106. E. M. Gauthey, *Mémoire sur l'application des principes de la Méchanique à la construction des voûtes et des domes, dans lequel on examine le Problème proposé*. Dijon: 1771. E. M. Gauthey *Dissertation sur les dégradations survenues aux piliers du dome de Panthéon Français, et sur les moyens d'y remédier*. Paris: 1798. Rondelet, J. *Mémoire historique sur le dôme du Panthéon Français*. Paris: 1797. J. Rondelet, *Addition au mémoire historique sur le dôme de l'Eglise Saint-Geneviève*. Paris: , 1814.

107. Patte, op. cit., pág. 8.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

siguiendo la regla de Frézier (véase capítulo siguiente). Concluye que las reglas de sobre cúpulas Fontana son válidas, y añade otras sobre pilares y contrafuertes:

Il résulte de tout ce que nous avons dit sur les proportions des supports des coupoles, que l'épaisseur des murs du tambour doit être au moins le dixième de leur diamètre intérieur; que l'épaisseur des contre-forts, lorsqu'on en admet, roule du sixième au huitième de leur diamètre; et qu'enfin la largeur des piliers destinées à porter un dôme sur pendentifs, est, suivant les exemples, depuis le quatrième jusqu'au septième inclusivement, quelle que soit la nature de la voûte. Nous ne connoissons point de voûtes sphériques ou sphéroïdes de quelque étendue, dont les supports dérogent à ces règles générales: et nous ne croyons pas même qu'ils puissent y en avoir de contraires, parce qu'elles seroient opposées aux principes établis de l'équilibre et de la pesanteur, sur lesquels est fondée la solidité des bâtimens.

6.4.3 Regla superficial

Dentro del conjunto de reglas y observaciones que aparecen dispersas en el libro de Fontana, sobre diversos aspectos de la construcción de San Pedro (cimentaciones, muros, cimbras, cúpulas, etc.), hemos encontrado una particularmente interesante por su originalidad.

La regla relaciona la superficie ocupada por las paredes (S_p) que sostienen la cúpula con la superficie neta cubierta (S_c) y establece que la relación entre ambas cantidades sea de dos a tres; es decir, $S_p/S_c = 2/3$. Parece estar deducida de la medición de diversos templos circulares romanos y, en particular, del Panteón:

... divisero il sito, che viene occupato de tutto il Tempio, cioè, quello, che contiene la parte circolare, in parte cinque. Tre di queste assegnarono al Vano Sferico, e l'altre due parti alla Parete, che lo circuisse...¹⁰⁹

El cómputo se hace descontando la superficie de las hornacinas y entrantes en las paredes. Para una semiesfera perfecta de espesor e que cubre una luz interior l , esta regla daría una relación $l/e = 8.87$. En el Panteón, sin tener en cuenta las hornacinas, $l/e = 7.74$. Esta proporción de superficie

108. Op. cit., pág. 19.

109. Op. cit. pág. 339.

en planta da, curiosamente, para una semiesfera, una relación entre volumen de estructura y volumen interior muy cercana a la unidad, 1.15; considerando un óculo de las proporciones del Panteón la relación se convierte prácticamente en 1.

El procedimiento, como es obvio, es largo y penoso. Pues bien, Fontana se tomó el trabajo de superficialiar y cubicar las medidas de la cúpulas de San Pedro y del Panteón para demostrar la bondad del diseño empleado, e incluso cubicó el volumen del edificio completo para estudiar la relación entre el volumen interior y el volumen ocupado por el cerramiento. La relación entre macizo y vano es, en San Pedro, mayor que la unidad en una sexta parte, lo que para Fontana demuestra la seguridad del edificio:

... si che resta superiore il materiale, la sesta parte in circa di più del vano; però si rendera sicuro il Tempio, come è seguito degli altri antichi sopracitati.

Este tipo de reglas 'superficiales' podría tener un origen muy Antiguo. En efecto, según cita Petronotis¹¹¹, el arquitecto P. Theodorides ha descubierto la siguiente regla para el dimensionamiento de los pilares que soportan las cúpulas bizantinas: La superficie los cuatro pilares será igual a la cuarta parte de la superficie del cuadrado que circunscribe la cúpula.

6.6 Wren: primeras reglas 'pseudo-científicas'

Christopher Wren, científico y arquitecto eminente, no llegó a publicar ningún tratado de arquitectura. Como dijimos en la introducción, colaboró con Hooke y es más que probable que empleara el principio de la catenaria al

110. Op. cit. pág. 341.

111. A. Petronotis, "Der Architekt in Byzanz.", *Bauplanung und Bautheorie der Antike (Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung Vol. 4)*, Berlin: Wasmuth, 1984, pág. 341.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

diseñar la cúpula para la catedral de San Pablo¹¹². Sus notas fueron publicadas póstumamente por su hijo¹¹³; entre ellas, una parte conocida como "Tract II" parece haber sido el borrador de un futuro tratado. Algunos de los comentarios contenidos en esta parte hacen referencia expresa al equilibrio de bóvedas y al problema de los contrafuertes.

En sus notas Wren resalta la importancia del equilibrio entre las masas que componen el edificio:

It is by due Consideration of the Statick Principles, and the right Poising of the Weights of the Butments to Arches, that good Architecture depends...¹¹⁴

y discute a continuación la conveniencia de cargar los pilares de las naves de las iglesias para conseguir una estabilidad suficiente (para centrar la resultante en su interior). La discusión es detallada y va acompañada de un esquema para su mejor comprensión (véase Figura 6.8. (a)):

Let ABC be an Arch resting at C, against an immovable Wall KM, but at A upon a Pillar AD, so small as to be sufficient Butment to the Pressure of the Arch AB: what is then to be done? I cannot add FG to make it a Butment, but I build up E so high, as by Addition of Weight, to establish it so firm, as if I had annexed FG to it to make it a Butment: it need not be enquired how much E must be, since it cannot exceed, provided AD be sufficient to bear the Weight imposed on it: and this is the Reason why in all Gothick Fabricks of this Form, the Architects were wont to build Towers or Steeples in the Middle, not only for Ornament, but to confirm the middle Pillars against the Thrust of the several Rows of Arches, which force against them every way.¹¹⁵

Más adelante Wren se maravilla de la poca atención que se presta en los Tratados de Arquitectura a los 'problemas geométricos', esto es de estabilidad, y en concreto de la estabilidad de los arcos y sus contrafuertes, realmente el problema central de las estructuras de fábrica:

It seems ver unaccountable that the Generality of our late Architects dwell so much upon this ornamental, and so slightly pass over the geometrical, which is the most essential Part of Architecture. For Instance, can an Arch stand without Butment sufficient? If the Butment be

112. Véase R. Graefe "Zur Formgebung von Bogen und Gewölben." *Architectura*, Vol. 16, 1986. pp. 50-67. Una extensa serie de diseños previos de la cúpula han sido recientemente publicados en K. Downes *The design of St. Pauls Cathedral*. London: 1988.

113. Ch. Wren (hijo) *Parentalia: or, Memoirs of the Family of the Wrens*. London: T. Osborn, 1750.

114. Wren, op. cit. pág. 298.

115. Op. cit., pág. 301.

more than enough, 'tis an idle Expense of Materials; if too little, it will fall; and so for any Vaulting: And yet no Author hath given a true and universal Rule for this; nor hath considered all the various forms of Arches...

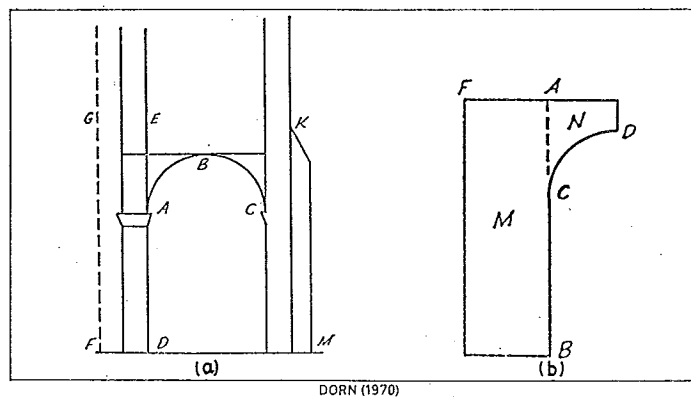


Figura 6.8. Reglas estructurales de Wren (restitución de Dorn)

A continuación, siguiendo la exposición de Dorn, cita la regla de Martínez de Aranda/Derand (véase su dibujo en la Figura 6.9.) y la critica diciendo que no se basa en ninguna prueba cierta, "it is not built upon any sure geometrical Theorem...". La solución al problema, dice, reside en procurar un adecuado equilibrio de las distintas masas, para lo cual es preciso emplear la ciencia de la estática, en particular la parte que se ocupa de encontrar los centros de gravedad:

... what is true will be shown to be only determinable by the Doctrine of finding the Centers of Gravity in the Parts of the proposed Design.

A continuación propone una regla general para determinar el contrafuerte de cualquier arco o bóveda de cañón. La regla dice que el contrafuerte

...if N be equiponderant to M on each Side the Perpendicular AB, it is certain the whole Stone will stand immoveable upon the Basis at B, although it be half an Arch; add the like Stone on the opposite Side, till the Horns meet in an entire Arch, so the Whole will stand as well as the Halves. If any thing be added without M, that alters nothing, only 'tis an useless Expense; but if any thing be added above N, that alters the Center of Gravity, which therefore must be provided for, by adding more Weight to M; and the same may be shewn in all kinds of Vaulting. So it appears that the Design, where there are Arcades, must be regulated by the Art of Staticks, or Invention of the Centers of Gravity, and the duly poising all Parts to equiponderate; without which, a fine Design will fail and prove abortive.

116. Op. cit. pág. 356.

117. *Ibidem*.

118. *Ibidem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

La regla da soluciones razonables a problemas de proporciones usuales en la práctica. De hecho Wren asegura haberla comprobado en edificaciones existentes. Así, afirma que el Panteón de Roma tiene, según su regla, un contrafuerte excesivo¹¹⁹ :

Hence I conclude, that all Designs must, in the first place, be brought to this Test, or rejected. I have examined some celebrated Works, as the Pantheon, and judge there is more butment than necessary, though it is flat and low; but I suppose the Architect provided it should stand against Earthquakes, as it indeed it hath, and will.

Critica, a continuación, basándose en la aplicación de su regla la forma de la cúpula de San Pedro de Fontana, y afirma que el diseño de Bramante hubiera sido más duradero, y no hubiera precisado del empleo de cadenas para sostenerse (en realidad, como demostró Poleni las cadenas no son necesarias). Critica el empleo de las cadenas; la obra debe estar proporcionada de tal forma que éstas no sean necesarias¹²¹ :

The great Fabrick of St. Peter's, if it had been followed as Bramante had designed it, would have been as durable [as the Pantheon]; but the Butment of the Cupola was not placed with Judgement: however, since it was hooped with Iron, it is safe at present, and, without an Earthquake, for Ages to come. Iron, at all Adventures,¹²⁰ is a good Caution; but the Architect should so poise his Work as if it were not necessary.

El razonamiento empleado en la regla es falso, ya que un arco no puede considerarse dividido en dos mitades sin la existencia del empuje en la clave. Para el caso de arcos apoyados directamente sobre sus arranques la regla, evidentemente, no funciona pues el centro de gravedad cae siempre fuera de la base del arco. Para arcos sobre contrafuertes de una altura alrededor del

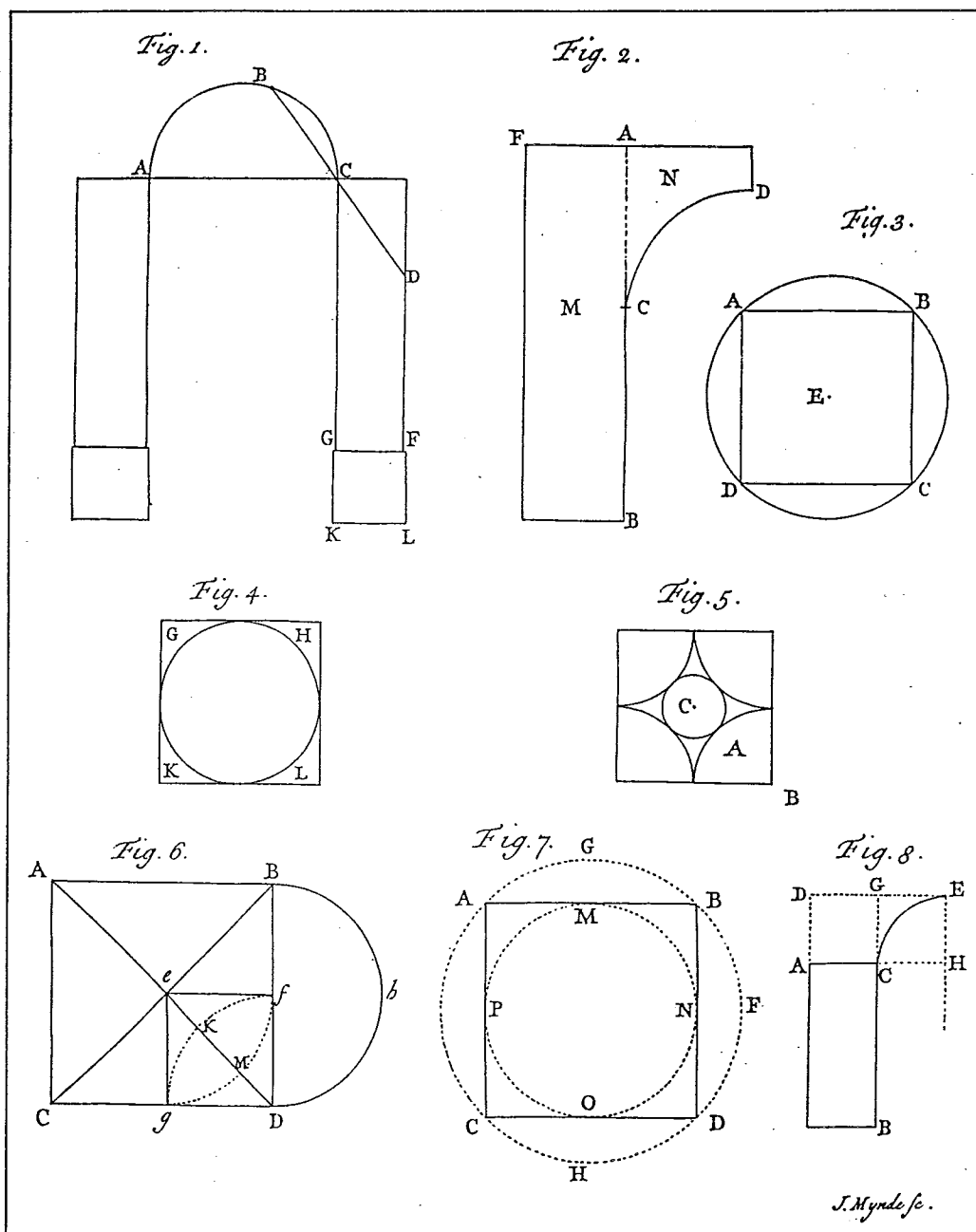
119. Hemos comprobado esta afirmación y, efectivamente, es cierta: la vertical del centro de gravedad de la sección del Panteón cae dentro de la base del tambor.

120. Op. cit., pág. 356.

121. La misma opinión manifiesta realiza Leonardo Vegni en su traducción del libro de Branca, *Manual de Arquitectura...*, Madrid: Viuda de Joachim Ibarra, 1790, pág. 83, donde critica "... la necesidad de tantos pobres jóvenes, que en los preceptos y obras de algunos que hacen de Maestros, no pueden aprender otra cosa en la construcción de bóvedas, que liarlas con cadenas de hierro, ó fiarlas á la tenacidad de la puzzolana; pero las fábricas bien entendidas (dice Viñola) quieren regirse por sí mismas, y no estar atadas con cabestros." (el subrayado es mío).

122. *Ibidem*.

vano, la regla puede funcionar para los casos más comunes. En cualquier caso, no tenemos constancia de que esta regla haya tenido ninguna influencia posterior.



WREN (1750)

Figura 6.9. Lámina original del tratado de Wren

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

7. EL SIGLO XVIII

7.1 El padre Tosca

7.1.1 El tratado

Matemático, geómetra, arquitecto, filósofo, físico, astrólogo,... el Padre Tosca fue, quizá, uno de los hombres más cultos de su época en España. Toda su erudición y conocimiento las compiló en un extenso tratado en nueve volúmenes, su *Compendio matemático...* publicado en Valencia entre los años 1707 y 1715¹. Su vida y obra no parecen haber despertado la atención que merecen: Llaguno² apenas le dedica un párrafo y en el artículo correspondiente del Espasa apenas se menciona su contribución a la teoría arquitectónica (además con errores de fechas)³. En un reciente artículo se dice que trabajó en la construcción del palacio del Rey Rasselas, en Abisinia, donde aplicó sus principios de arquitectura oblicua.⁴

Lo que nos interesa de su obra, a efectos de la presente tesis, es el volumen 5 de su *Compendio*, dedicado a la arquitectura civil, a la montea y a la estereotomía. Esta obra tuvo tanto éxito e influencia que se reimprimió, en forma separada, en 1794⁵. Como comentario a su obra suscribimos las afirma-

1. Tomás Vicente Tosca *Compendio matemático en que se contienen todas las materias más principales de las ciencias que tratan de la cantidad...* Valencia: Antonio Bordazar, 1707-1715. 9 vols. Obra de gran aceptación tuvo dos reimpressiones más en breve plazo: Madrid, 1721-1727 y Valencia, 1757.

2. E. Llaguno y Almirola y J.A. Ceán-Bermúdez *Noticia de los Arquitectos y Arquitectura de España*. Madrid: , tomo IV, pág. 102.

3. *Espasa*, Madrid: 1928. Tomo 62, pág. 1565.

4. J. Perucho "Tomás Vicente Tosca y la Arquitectura Oblicua." *ABC*, 7 julio, 1988. pág. 3.

5. Tomás Vicente Tosca *Tratados de arquitectura civil, montea y cantería, y relojes*. Valencia: s.i. 1794.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

ciones de León Tello⁶ :

... muestra en su tratado una amplia información ... pero mantiene su independencia de criterio... En su obra justifica la adscripción matemática de este arte. Su teoría se desarrolla como una geometría aplicada. Emplea una estricta metodología cartesiana de problemas, teoremas y corolarios... Pero el racionalismo no le impide reconocer el valor de la empiria y la experiencia.⁷

7.1.2 Reglas estructurales

El tratado del padre Tosca solamente incluye una regla estructural, la de Martínez de Aranda/Derand. Sin embargo, sus comentarios sobre la estabilidad de las estructuras de fábrica demuestran un profundo conocimiento de su funcionamiento estructural.

Ya en la introducción del Tratado XV "De la Montea y Cortes de Canteoría" expone, con gran claridad, que el equilibrio y la proporción entre las distintas masas es la base de este tipo de construcción:

Comprende este tratado lo mas sutil y primoroso de la Arquitectura, que es la formación de todo género de arcos y bóvedas, cortando sus piedras, y ajustándolas con tal artificio, que la misma gravedad y peso que las había de precipitar hácia la tierra, las mantenga constantes en el ayre, sustentándose las unas á las otras en virtud de la mutua complicación que las enlaza, con lo que cierran por arriba las fábricas con toda seguridad y firmeza.⁸

Este conocimiento cualitativo de las proporciones y el equilibrio de cada uno de los tipos de arcos y bóvedas de fábrica es patente a lo largo de todo el tratado. Hemos agrupado sus comentarios, como en casos anteriores, por tipos estructurales. Así, pasaremos revista sucesivamente a arcos, bóvedas, cúpulas, contrafuertes, así como al posible empleo de modelos.

6. F. León Tello ha publicado dos artículos sobre la arquitectura del Padre Tosca: "Introducción a la teoría de la arquitectura del P. Tosca (1651-1725)", *Revista de Ideas Estéticas*, Núm. 140, 1977; "La Teoría de la Arquitectura de Tomás Vicente Tosca: Montea y Ordenes Arquitectónicos." *Revista de Ideas Estéticas*, Núm. 144, 1978.

7. F. León Tello "La teoría de la Arquitectura...", op. cit. pp. 289-290.

8. Tosca *Tratado de arquitectura civil*, op. cit., pág. 81.

7.1.3 Arcos

Sobre el canto que hay que dar aun arco no da regla, a ejemplo de Fray Lorenzo, cuya obra sin duda conocía:

En quanto a la crasicie que ha de tener el arco, no hay regla fixa, sí que el prudente Arquitecto se la debe dar, atendiendo á la firmeza de la materia que se fabrica, y al peso que ha de sustentar.⁹

7.1.3.a El arco 'ideal'

En cuanto al arco 'ideal' se aparta de la doctrina tradicional y propone, y además lo destaca con letra itálica en el original, un curioso arco mixto de intradós de medio punto y extradós apuntado. Este arco, dice, es muy seguro y apenas produce empuje:

Si se quisiere que un arco se mantenga seguro con poco ó casi ningun estribo, se hará su dovela superior trespuntada, aunque la inferior sea semicírculo, y sus tiranteces se encaminarán á los centros de la dovela superior; y siendo de piedra, con que se le hagan dos ó tres hiladas de ensachado, no necesitará de mas estribos.¹⁰

7.1.3.b Arcos de medio punto

Sobre el arco de medio punto afirma que es muy seguro si cuenta con contrafuertes suficientes:

Este arco es muy perfecto y seguro, con que lleve los competentes estribos para resistir sus empujos, como después diré; y su vuelta empieza á mover de quadrado ó plano horizontal.¹¹

7.1.3.c Arcos apuntados

Mucho más interesante es su comentario sobre los arcos apuntados. El texto no deja lugar a dudas: Tosca conocía la peculiar forma de colapso de los arcos apuntados, por levantamiento de la clave, y propone el método tradicional empleado ya por los constructores góticos de ajustar la línea de empujes a la directriz cargando la clave y los riñones del arco. Las figuras

9. Op. cit. pág. 117.

10. Op. cit. pág. 118.

11. Op. cit. pág. 95.

de Ungewitter¹² que ponemos a continuación a clara el texto.

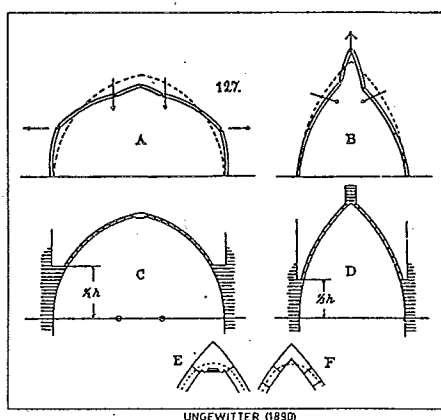


Figura 7.1. Formas de estabilizar un arco apuntado

Son estos arcos propios del orden Gótico, y á mas de no ser hermosos, son algo débiles cerca de sus tercios ... singularmente sino están bien cargados en la clave ...; porque el peso que carga sobre sus lados repuja con su impulso la clave hacia arriba; pero tienen la conveniencia de impeler las paredes de sus lados mucho menos que las otras especies de arcos; y por consiguiente necesitan de menos estribos, y pueden sustentar mucho peso.¹³

7.1.3.c Arcos degenerantes

Sobre los arcos adintelados, platabandas o degenerantes, como les llama, expone su cualidad de producir un considerable empuje horizontal y recomienda, como Alberti, solamente colocarlos con grandes estribos o, preferiblemente, en medio de paredes de forma que los propios muros hagan de estribos:

Llamo arcos degenerantes á aquellos cuyas piedras estando unidas entre sí de la misma manera que en los arcos, no se terminan en figura circular, sino en otra muy distante: algunos vienen á terminarse en línea recta por abaxo, ó tambien por arriba, y estos se llaman degenerantes en línea recta, y adintelados ó á nivel. Otros degeneran en polígonos, extendiendo sus piedras hasta formarles.¹⁴

... necesitan estos arcos de grandes estribos, y no se deben fabricar sino en medio de paredes continuadas á entrambas partes.¹⁵

12. G. C. Ungewitter *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. III Auflage neu bearbeitet von K. Mohrmann.* Leipzig: T.O. Weigel Nachfolger, 1890. Vol. 1, ilustración 127.

13. Op. cit. pág. 105.

14. Op. cit. pág. 107.

15. Op. cit. pág. 108.

7.1.4 Bóvedas

7.1.4.a Media naranja

Resalta las cualidades estructurales más relevantes: la posibilidad de realizar óculos y su gran estabilidad y poco empuje. En realidad, dice literalmente que 'no causa empujo'. En realidad las cúpulas semiesféricas producen un cierto empuje y Tosca lo sabía; la expresión anterior hay que entenderla, como que no necesita estribos, es decir, no hace falta dar más grosor al tambor que al de la propia cúpula.

Esta bóveda, por componerse de piedras ordenadas en forma de anillos paralelos, consiste segura y sin riesgo, aunque le falte la clave: tiene gran robustez y no causa empujo; y por consiguiente no necesita de estribos para mantenerse con sus mismas tiranteces.¹⁶

7.1.4.b Bóvedas de crucería

Una parte importante del apartado correspondiente a las bóvedas está dedicado a las bóvedas de crucería. Los arquitectos del siglo XVIII eran muy conscientes de la superioridad estructural, en cuanto a eficacia, de las estructuras góticas, como veremos más adelante en las opiniones del padre Pontones y de Frézier. Es notorio, por los párrafos que siguen y el apartado siguiente, que el padre Tosca dedicó bastante tiempo a reflexionar sobre el funcionamiento de estas estructuras. La descripción que realiza de la construcción de una bóveda de crucería es detallada, si bien no da reglas estructurales:

Reconociendo los Arquitectos que las bóvedas hechas enteramente de sillares, tienen peso excesivo; y si se fabrican solo de ladrillo, no tienen tanta seguridad y firmeza, discurrieron fabricar en ellas unos arcos de piedra que sirvan como arcos mas sólidos, en que se afiance la seguridad de la bóveda, formando sobre ellos todo lo restante de ladrillo ú otra materia mas ligera.¹⁷

Únicamente señala que, debido a su forma, el empuje se concentra en las esquinas y es ahí donde hay que colocar estribos suficientes:

Las tiranteces de estos arcos van en cada uno á su propio centro: las porciones de bóveda con

16. Op. cit. pág. 214.

17. Op. cit. pág. 226.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

que se van llenando los vacíos, tienen sus tiranteces al centro E de la bóveda, y las órdenes de ladrillos se van haciendo paralelas á la porción de arco mas cercana, sea la que fuera. Advertase últimamente, que esta bóveda tiene fuerte rempujo en sus ángulos, y así será menester armarla y fortalecerla allí con buenos estribos.¹⁸

7.1.4.c Cimbório gótico

El interés de Tosca queda de manifiesto en el detallado análisis que en la la proposición XIII de su tratado dedica a explicar el funcionamiento estructural de un cimborrio gótico. El título del 'problema', como lo llama, es suficientemente explicativo: *Formar una bóveda con arcos cruceros sobre qualquiera polígono del quadrado de arriba, que se mantenga con su propio peso sin mas estribos*. Como en el caso anterior, debemos entender como estribo la parte del contrafuerte que sobresale del grueso de la pared: es decir, que sólo el grueso de la pared basta para resistir el empuje de la bóveda. Tosca reconoce su fascinación por estas estructuras:

Aunque ahora ya no se estilan semejantes fábricas, por pertenecer mas propiamente al orden Gótico, que á los otros cinco que estan en uso; pero por ser tan ingeniosas, y hallarse executadas en algunos edificios antiguos... juzgo por conveniente explicar el artificio con que se fabrican.¹⁹

Toma como ejemplo el cimborrio de la catedral de Valencia. Se trata de un cimborrio octogonal, que consta de un tambor prismático coronado por una bóveda formada por la intersección de cuatro cañones de bóveda apuntados como puede verse en la planta. Estos cañones, apoyan sobre los arcos cruceros formados sobre las diagonales del octógono y cuyo peralte puede observarse también en la planta. La altura de los cruceros es mayor que la del arranque las bóvedas y, por tanto, toda el cimborrio está en su conjunto levantado de punto, lo que también contribuye a disminuir el empuje.

A continuación la descripción de Tosca:

Servirá pues de exemplo la que se halla en el Cimborrio del sobredicho Templo [iglesia Metropolitana de Valencia] sobre planta ochavada, y se sustenta sobre quatro arcos de punto levantado ó apuntados: sobre los ocho lados de la planta suben a plomo ocho paredes de

18. *Ibidem*.

19. Op. cit. pág. 228.

competente altura, y forman un paralelepípedo ochavado, que coronado con un entablamento de los que se usaban en aquel tiempo, constituye el primer cuerpo de la fábrica con ocho ventanas, una en cada lado. Sobre este primer cuerpo se levanta la bóveda, que formando el segundo cierra juntamente el edificio. Su disposición es la siguiente.

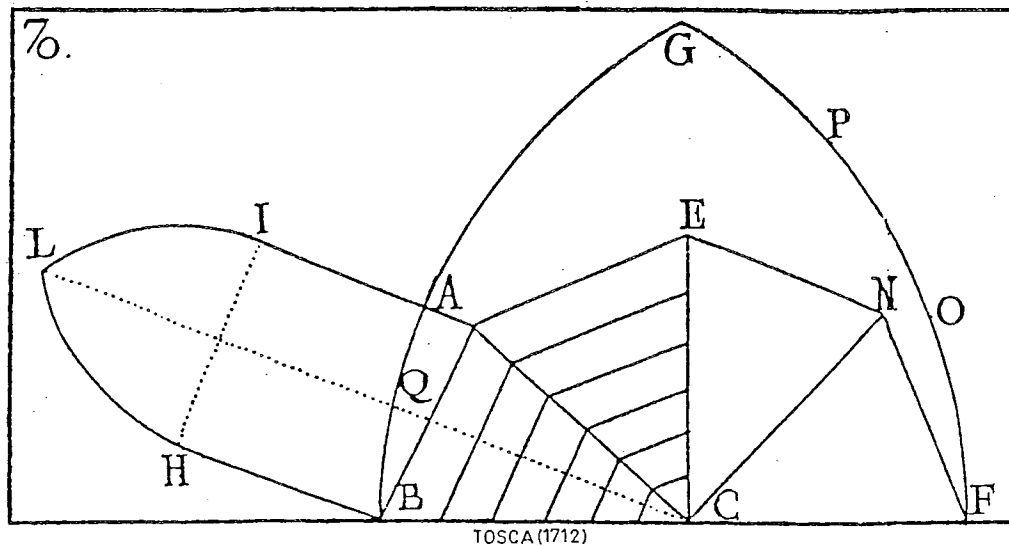


Figura 7.2. Planta y sección del cimborrio de la catedral de Valencia según Tosca

Sea el octógono ABEN, &c. la planta de la bóveda: tírense las diagonales, que se cortarán en el centro C, y esta serán los vestigios horizontales de los arcos diagonales, y juntamente sus diámetros: describáse sobre una de ellas, como por ejemplo sobre la BF el arco apuntado BGF, cuyos centros son B y F, á quienes se dirigirán sus tiranteces; sobre el lado BA fórmese el cuadrado BI cuya altura AI es la del segundo cuerpo; sobre el entablamento y sobre la HI, como diámetro, describáse el arco apuntado HLI, cuyas tiranteces vayan a los centros H, I; y esto mismo se ha de suponer sobre los demás lados, los quales arcos sirven de formeros para la bóveda, y en ellos y en dicho segundo cuerpo hay otro ventanage semejante al del primer cuerpo. Sobre los arcos diagonales se edifica la bóveda, siguiendo la misma montea del arco ó formero HLI, la cual es de ladrillo de rosca, y llena los vacíos ECA, ACB, &c. de los arcos diagonales, que por ser apuntada forma en medio un ángulo entrante en correspondencia de la línea QC: esto mismo se hace en todos los ochavos, y queda concluida la obra con mucha hermosura y suficiente firmeza sin casi necesitar de más estribo, como demuestro en la forma siguiente.

Tosca explica el funcionamiento estructural del cimborrio. En primer lugar habla de los cañones cuyos empujes se anulan con los de los adyacentes.

Primeramente, la bóveda que está sobre los cruceros AC y BC, y llena el vacío, cuya planta es el triángulo ACB, tiene bastantes estribos con las bóvedas colaterales correspondientes a los triángulos ACE y al de la otra parte; porque siendo de punto tan levantado es poco su empujo, contra el qual tienen bastantísima resistencia las sobredichas bóvedas colaterales, singularmente cuando la planta es de 6 ú ocho lados, ó más lados.²⁰

20. Op. cit. pág. 229.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Advierte, sin embargo, que estas bóvedas apoyan sobre los arcos cruceros y que estos, debido a este peso (también tiene una componente horizontal el empuje aunque no lo menciona), tenderían a empujar contra las esquinas. En disminuir el empuje horizontal de los arcos cruceros está la clave para eliminar los estribos y aligerar la fábrica:

Solo puede haber dificultad, en que, al parecer, los arcos diagonales, que son los que como nervios sustentan las bóvedas sobredichas, necesitarán de grandes estribos, siendo así, que tienen muy pocos en la sobredicha fábrica: pero digo, que por el mismo caso que estos arcos sustentan las bóvedas, no necesitan ni de muy pocos estribos; y en esto esta lo mas primoroso del arte con que se mantienen semejantes obras: el qual consiste en aquel maravilloso enlace con que los cruceros ó arcos diagonales sustentan las bóvedas hechas en sus vacíos, y estas mantienen los sobredichos arcos, y juntamente á sí mismas con sus recíprocos y encontrados empujos.²¹

Se trata de cargar adecuadamente estos arcos cruceros. Para ello aplica su teoría sobre el colapso de los arcos apuntados que expuso con anterioridad. La explicación de Tosca es básicamente correcta. Cargando con pesos claves y riñones, la línea de los empujes resultantes tiende a estirarse en la dirección de las cargas verticales y, aunque aumenta el peso total, disminuye la componente horizontal y, por tanto, el empuje. El artificio es análogo al empleado en la catedral de Palma de Mallorca para aumentar la esbeltez de los pilares y que describimos con anterioridad. Trata el problema sistemáticamente; primero el peso en los riñones:

Para inteligencia de esto es menester suponer, que el arco apuntado BGF necesita para su firmeza de ser cargado en la clave, y juntamente en los tercios OP: de suerte que si estuviese solamente cargado en OP, y no en la clave, corría gran riesgo de que la porción de arco cerca de la clave reventase saltando hacia arriba; porque el peso que en PO impele a las piedras hacia abaxo, viene como a querer reducir el arco FG a línea recta, y por consiguiente hará subir la clave hacia arriba, sino tiene sobre sí suficiente peso.²²

A continuación resalta el papel estabilizador del peso de la clave:

Tambien si hubiese gran peso sobre la clave, y poco ó ninguno en los tercios O, P, el peso de la clave impelería las piedras de OP, y si allí faltasen competentes estribos, se arruinaría el arco; pero habiendo competente y proporcionado peso en la clave y en OP, no son casi

21. *Ibídem.*

22. *Ibídem.*

menester otros estribos para que dicho arco se mantenga, por servirle de ellos el peso que carga en dichos tercios O, P.²³

Insiste en la forma adecuada de los cañones:

Cargando pues las bóvedas de ladrillo de rosca sobre los arcos cruceros, es forzoso se mantengan estos firmes, y ser grande el peso sobre sus tercios, donde es mayor la bóveda; pues tanto es esta menor cuanto mas se acerca a la clave, donde se termina; y tanto mayor, quanto mas se aparta de ella hacia los formeros.²⁴

Sobre cuál haya de ser la proporción entre los distintos pesos no da regla, y se remite a la experiencia del arquitecto. (Como hemos visto, Rodrigo Gil sí tenía una regla para determinar el peso de la clave en función de la geometría general (nervios) de la bóveda.)

Con esto y el suficiente peso que se le ha dado á la clave, se sustenta dicha fábrica sin mas estribos, no sin grande admiracion de los que atentamente la consideran. Quál haya de ser la proporción del peso de los tercios con el de la clave, pende de la experiencia y del juicio del sabio y prudente maestro.²⁵

No se puede expresar con más claridad el problema de la estabilidad de la estructura de un cimborrio gótico. Se trata de colocar adecuadamente los pesos de forma que se equilibren, como en una balanza, y produzcan la línea o líneas de empujes deseadas.

7.1.5 Contrafuertes

El problema del empuje de los arcos en función de su forma merece una atención especial. Empieza con una descripción cualitativa del problema del empuje en los arcos:

Es indubitable que los arcos y bóvedas tienen gran fuerza contra las paredes de los lados, lo que proviene de tener sus piedras la figura de una cuña, que con el ímpetu de su innata gravedad, procurando caerse hacia el suelo, rempujan las del medio a las de los lados, y todas juntas a las paredes colaterales que las mantienen: por lo qual, para que estas puedan resistir al impulso que les imprime el arco, es forzoso tanguen proporcionados refuerzos, que comunmente llaman estribos; considerando los dos aspectos que considera más importantes, el peralte del arco y la altura de los estribos.²⁶

23. *Ibíd.*

24. *Op. cit.* pág. 230.

25. *Ibíd.*

26. *Op. cit.* pág. 116.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Señala que el empuje aumenta con el peralte del arco y la explicación recuerda los teoremas de Baldi que vimos con anterioridad:

... es forzoso atender á la naturaleza del arco, y á la altitud de las paredes: porque los arcos, quanto mas rebaxados, tienen mayor empuje; y menor quanto fueran mas levantados de punto. Y es la razon, porque el impulso de los rebaxados se dirige por una línea que huyendo de la perpendicular al centro de la tierra, se acerca mas a ser perpendicular contra las paredes, lo que la hace mas vigoroso contra ellas; pero los mas levantados de punto exercen su impulso por línea menos distante de la perpendicular a la tierra, y por consiguiente es su impulso mas obliqüo contra las paredes, y ménos robusto.²⁷

También afirma que el estribo depende la altura, demostrando un conocimiento claro sobre la forma de colapso:

Asimismo las paredes mas altas tienen ménos resistencia contra la fuerza del arco; porque el centro del movimiento que tendrían las paredes, caso que cedieran al empuje del arco, está en el pie de la pared sobre el suelo: luego así como una potencia con tanto menos fuerza mueve una palanca, quanto se aplica en mayor distancia del centro ó punto de su movimiento, así el arco tanto más fácilmente vencerá la resistencia de las paredes, quanto por ser estas mas altas, les imprime su impulso en lugar mas alto y apartado de su pie, que, como he dicho, es el centro de su movimiento.²⁸

Pero tras la explicación teórica da reglas prácticas basadas en la experiencia:

Para determinar pues los estribos que requieren los arcos, se suelen dar las reglas siguientes, fundadas mas en la experiencia, que en demostracion Matemática.²⁹

La primera regla que da, como la más usual, es la de Martínez de Aranda-Derand:

Comunmente dan por regla general, que se divida en tres partes iguales la circunferencia interior del arco, sea este circular o elíptico, ú otro cualquiera, como por ejemplo ABC, (fig. 22) cuya tercera parte sea BC. Tírese la recta BC larga á discrecion, y cortando la CD igual á la CB, se tirarán las perpendiculares CE, DF, y la línea ED será la cantidad de estribo que requiere el arco.³⁰

Es significativo el escueto dibujo con el que explica la regla, lo que prueba que está tratando de una regla de uso habitual que no requiere de mayor explicación.

27. Op. cit. pág. 117.

28. *Ibidem.*

29. *Ibidem.*

30. *Ibidem.*

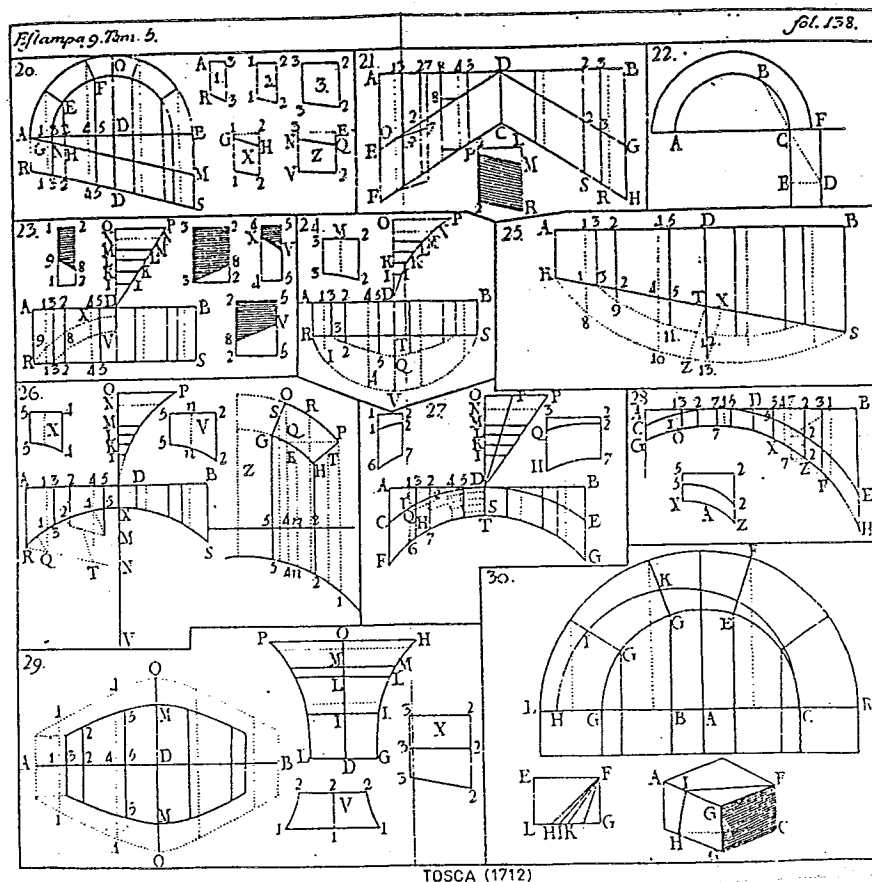


Figura 7.3. La regla de Martínez de Aranda en el tratado de Tosca. La regla aparece dibujada en el recuadro 22 en la parte superior derecha de la figura.

También menciona la regla del tercio (de Palladio etc.), aunque advierte, como lo hacía Fray Lorenzo, que también hay que tener en cuenta el peso del material que forma la bóveda:

Otros dan por regla general, que sean los estribos el tercio del diametro AC, que es algo más de lo que se determina por la regla primera. Pero lo cierto es que en este punto se ha de estar á lo experimentado por los Artífices, que prudentemente atienden las varias circunstancias que puedan ocurrir; y parece requiere mas estribos el arco o bobeda de piedra, que la de ladrillo de rosca; y esta mas que la de tabicado.³¹

7.1.6 Sobre el empleo de modelos

El empleo de modelos de bóveda es importante puesto que éstos pueden haberse empleado, no sólo para verificar los métodos de cortes de piedras,

31. *Ibidem.*

sino también para verificar la estabilidad de determinadas bóvedas. Tosca, como antes Fray Lorenzo etc., recomienda su realización:

Todos los arcos y bóvedas que hasta aquí se han explicado, y asimismo todos los demás que se han de explicar, será muy conveniente se formen primero de yeso con todos sus cortes, con lo cual formará mejor su idea el Arquitecto, y asegurará mas el acierto.³²

7.2 García Berruguilla

7.2.1 El tratado

El tratado de García de Berruguilla³³, publicado en 1747, tiene una orientación fundamentalmente práctica: se pretende dar al arquitecto o agrimensor un compendio claro y resumido de los conocimientos de geometría y aritmética que precisan en sus respectivas profesiones, así como las aplicaciones fundamentales. Está dividido en seis Tratados: el primero sobre aritmética, el segundo sobre geometría, el tercero sobre medición de bóvedas, el cuarto sobre estereotomía, el quinto sobre armaduras de cubierta y el sexto sobre los estribos de los arcos.

7.2.2 Reglas para contrafuertes. Primera propuesta española de análisis estático de las bóvedas

Las reglas y opiniones sobre el dimensionamiento de los contrafuertes aparecen recogidas en el tratado VI con el título *En que se trata de varias opiniones que hay en hallar, ò dâr regla para los estrivos de los Arcos.*³⁴ En este tratado aparece, una interesante crítica a las reglas proporcionales, basándose en la disparidad de resultados que dan unas y otras. Así, señala

32. Op. cit. pág. 114.

33. Juan García Berruguilla, *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría, sobre las tres dimensiones para un perfecto architecto, con una total resolución para medir, y dividir la planimetría para los agrimensores*. Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados, 1747. 16 h., 135 pp., 19 lám.

34. Op. cit. págs. 129-132.

mediante un ejemplo los distintos estribos que se obtienen empleando la regla de Martínez de Aranda y la regla del tercio. En efecto, cada regla proporcional es válida únicamente para un determinado tipo estructural: la regla gótica de Martínez de Aranda es válida para ligeras bóvedas de crucería góticas o bóvedas baídas, pero no para bóvedas de cañón.

García de Berruguilla menciona en primer lugar la que él considera como regla más antigua, la del tercio, que como hemos visto recomendaba y seguía Palladio. Critica que en la mencionada regla no se tenga en cuenta el material de que está hecho la bóveda y recomienda, acertadamente, que los estribos se reduzcan en las bóvedas de ladrillo en la misma proporción que los pesos específicos de la piedra y del ladrillo:

La mas antigua opinion es, que se ayan de dar el tercio de su ancho à la pared de grueso: v. gr. tiene un Salon, ò Iglesia una nave de sesenta pies de ancho, ò 30, dice que se haya de techar, ò cubrir con una bobeda de piedra, y que para echar esta bobeda, se le de a las paredes de grueso el tercio de su ancho, que de treinta es diez pies. Y dice, que siendo la bobeda de rosca de ladrillo, se le aya de dar los mismos 10. pies à los estrivos, ò paredes: voy hablando sin estrivos como assi lo dicen. Arguyo diciendo, hablo de semejantes anchos, altos, corrientes, ò cartabones de los corrientes de las aguas, las magnitudes son iguales, pero la solidez, ò materia es diferente: luego segun la gravedad empuja: luego en el grueso de la pared ha de haver la diferencia del peso de un pie cubico de ladrillo à otro de piedra, excepto de que sea piedra tan leve, que sea la solidez de la piedra igual al del ladrillo: doy por supuesto, que estos casos estèn bien puestos.³⁵

A continuación realiza la comparación entre la regla de Martínez de Aranda y la regla anterior. Mediante un ejemplo numérico deja patente la disparidad de resultados:

Figura L. En la Nación Francesa, y Española he visto muchos juicios tocantes al assumpto de dar regla para hallar los estrivos, que le tocan à cualquiera generacion de arcos. Supuesto el arco apuntado ANZ, dicen se divida la concava AZ en tres partes, que quiere decir toda la concavidad en tres partes, y desde las dos AN tire la recta NAR, y sea Ar igual à AN; y tirese la recta RP, y RQ, y dice, que el estrivo ha de ser, ò pared del grueso RP, ò el de AQ. Passo à la Figura M, que es de medio punto, y formo la misma regla; y dice, que la AZ es el grueso de la pared, y la misma regla formo en G: las tres bobedas, como son M H Y, son de un grueso, los corrientes de sus aguas son del cartabon de à cinco, y conforme estas se deben hacer, y entre la opinión primera, y la segunda; y hablando sobre supuestos lados, como son las tres Figuras L M G, se diferencian las opiniones en la L, en la diferencia de grados Q2: la A es de la opinion primera, que es el tercio, de doce, quatro varas, y entre el uno, y el otro hay la diferencia de entre AQ y A2, que es Q2 cerca de quattro pies. En la Figura

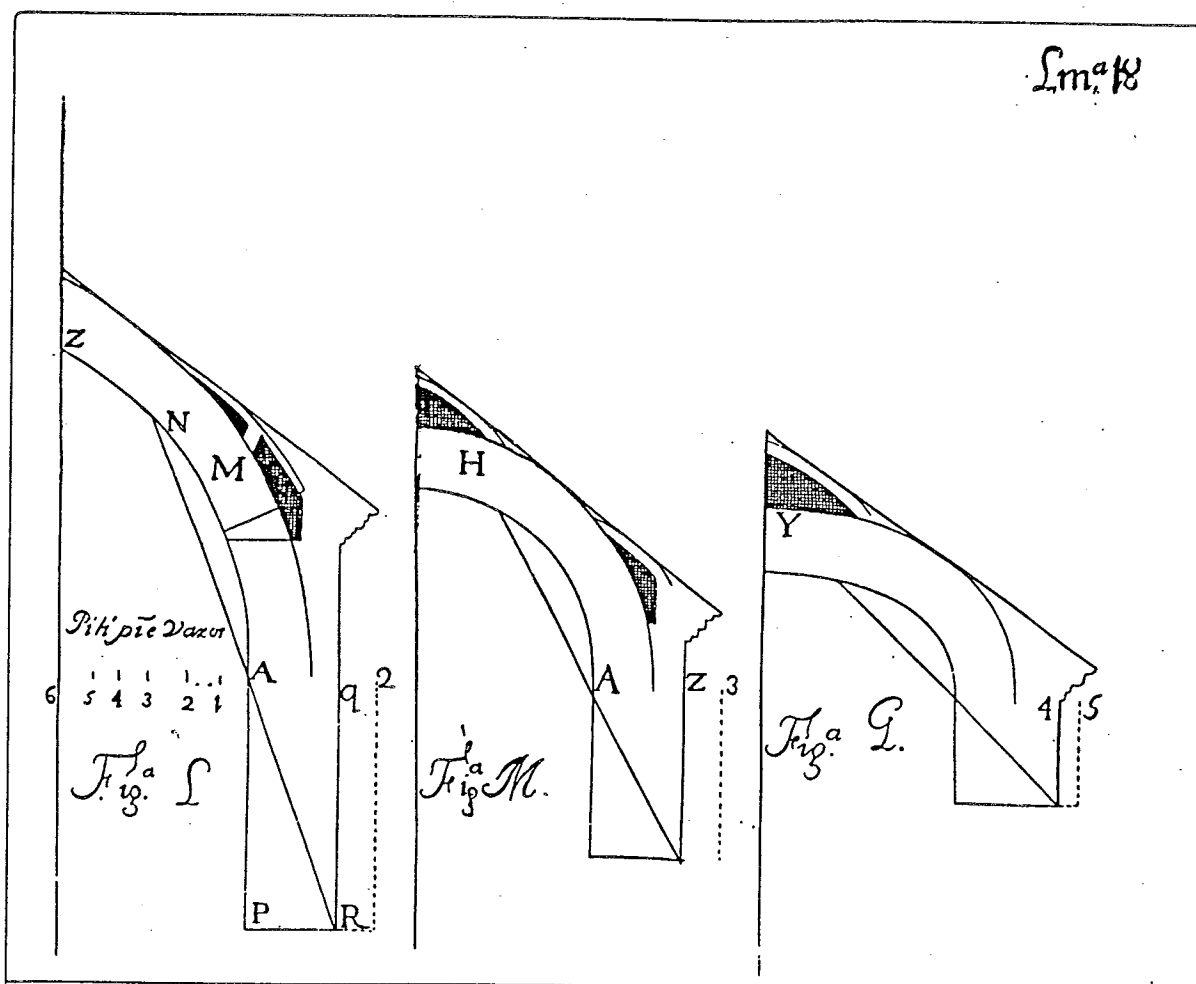
35. Op. cit. pág. 129.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

M es la diferencia pie, y un tercio; y en la figura G, entre 4, y 5 hay la diferencia de dos pies: Reglas muy antiguas son unas, y otras, la contradiccion que hay entre las dos reglas, a los ojos està presente.³⁶

Berruguilla atribuye al mal empleo de estas reglas y a la disparidad de los resultados a que conducen las ruinas que se producen, dice, en numerosos edificios:

De aqui nace, que estamos experimentando de todas las Provincias del Mundo las grandes ruinas, que se experimentan, y desaciertos en obras, las que no explico, por ciertos motivos, y estas son obras de los señores Arquitectos del Mundo.³⁷



GARCIA BERRUGUILLA (1747)

Figura 7.4. García Berruguilla: dibujo original del tratado

36. Op. cit. pág. 130. El subrayado es mío.

37. *Ibidem*.

A continuación propone un método de análisis mediante el cálculo a rotura: se imagina una forma de colapso y se dimensionan los contrafuertes para asegurar el equilibrio. Se trata de la primera mención en un tratado español de arquitectura o ingeniería de un procedimiento de análisis de las bóvedas. El método no aparece expuesto con suficiente detalle, ni hay una aplicación práctica del mismo; sin embargo, es interesante que el mecanismo de colapso aludido sea el correcto por formación de bielas (Couplet) y no el de la cuña (la Hire), si bien la suposición de que la rotura se produce en el arranque de la bóveda no es correcta (aunque va a favor de seguridad).

Y estos tres casos, que aquí vemos, se resuelven por ciertas proposiciones de la estática, y por otras de la maquinaria: y esto es tan claro, como conocer, que la magnitud de la L, que es la bobeda, y tejado AQZ, esta insiste, ò estriva en la palanca QRAP: luego la estática entra aqui, y en lo alto de la pared la palanca: luego AQZ es el grave, que empuja, ò oprime: busquese aqui en qué parte esta el iplomoquio, para que dandole a la pared AP el alto, para que guarde la proporcion sesquialtera, ò dupla, hallemos las arrobas de peso, que hemos de echar en la vase de la pared PR, que se saca por reglas de la maquinaria, y esta crasjicie hallada, entonces se la halla la potencia, que es el grueso, que ha de tener la pared.³⁸

Para terminar el capítulo dedicado a las bóvedas cita, casi textualmente, las reglas de Fray Lorenzo. Está implícita la confianza del autor en esas reglas para el tipo de edificios que se construían en su época. Las reglas de Fray Lorenzo matizan además el espesor de los contrafuertes en función del material de la bóveda, que era una de las objeciones planteada al principio.

Dicen se le dè el tercio de su ancho de grueso de pared; y que si lleva estrivos, que se le dè à la pared el sexto de su ancho, y lo demàs, hasta el tercio, se le de al estrivo. Siendo la bobeda de rosca de ladrillo, se le dè à las paredes la septima parte del ancho; y lo que falta de estrivos hasta el tercio, se le de al estrivo. Siendo la bobeda de rosca de ladrillo, y no pudiendo llevar estrivos, se le darà à las paredes la quarta parte de su ancho. Quando la bobeda huviere de ser tabicada, y doblada de ladrillo, se le darà à la pared la octava parte de su ancho, y los estrivos tendran la quarta parte de su ancho. Si no se pudiere echar estrivos, se le darà à las paredes la quinta parte de su ancho. Las paredes del frontispicio, y la del testero, y las de los laterales, que son quatro; si son de canteria, les daràs la septima parte de su ancho; y siendo de ladrillo se le darà la octava parte de su ancho.³⁹

38. *Op. cit.* págs. 130-131.

39. *Op. cit.* pág. 131.

7.2.3 Torres

En cuanto al problema del dimensionamiento de las torres sigue a pies juntillas la doctrina de Alberti, recogida por Fray Lorenzo, del cual parece haberla tomado dada la igualdad de los ejemplos y edificios citados.

Trato de las Torres, que dicen, que mientras no exceda de quatro cuerpos; esto es quatro quadros de la de su planta, se le dê à la pared la quarta parte de su ancho; con que si tiene la linea del lado de la Torre doce varas, tendrá la pared de grueso quatro varas; y si excede el alto hasta seis cuerpos, que se le eche enmedio un alma, ò macho, el qual se le dará la tercera parte de su ancho, y al rededor và la escalera. He leído, que la Torre de Comares de la Lambra de Granada, despues de hecha, que rebaxó, ò se sumergió una vara; ...

7.3 Plo y Camín

7.3.1 El tratado

Sobre Antonio Plo y Camín sólo nos dice Llaguno que era arquitecto-ingeniero, y que cerró la bóveda de la Iglesia de San Francisco el Grande en Madrid. Sin embargo, Antonio Plo ha pasado a la historia por ser el autor de uno de los tratados de construcción de mayor difusión en el siglo XIX en España. El tratado titulado *El Arquitecto práctico, Civil, Militar y Agrimensor*, fue publicado por primera vez en 1767⁴¹, pero tuvo otras cuatro ediciones en los años 1793, 1819, 1844 y 1856. Está dividido en tres libros de los cuales el segundo nos interesa muy particularmente ya que se contiene *..la práctica de hacer y medir toda clase de Bóvedas y Edificios de Arquitectura..*, donde expone las reglas estructurales por él conocidas y añade otras nuevas de su invención.

Queremos señalar que el autor en este caso debía ser ingeniero y arquitecto de cierto prestigio ya que se le encomendó la tarea de construir la cúpula de la citada iglesia de San Francisco el Grande en Madrid. La cúpula

40. *Ibídem.*

41. Antonio Plo y Camín *El Arquitecto práctico, Civil, Militar y Agrimensor, dividido en tres libros...* Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar, 1767. 8 h., 560 pp.

con un diámetro de aproximadamente 35 metros (117 pies)⁴² es la mayor cúpula de fábrica de España y una de las mayores del mundo, solamente superada esta vez por S. Pedro, Santa María del Fiore, el Panteón y el Gol Dombuz, todas ellas alrededor de los 42 metros.

7.3.2 Reglas sobre contrafuertes de arcos y bóvedas: estado de la cuestión y crítica

Antonio Plo debió dedicar bastante tiempo a reflexionar sobre el problema de descubrir una regla para encontrar el contrafuerte necesario para un arco o bóveda de forma cualquiera. En su tratado primero pasa revista a las reglas usadas comunmente en la práctica y, posteriormente, propone una regla de la que no da fuente y que hemos de suponer sea de su invención, con las matizaciones que más adelante haremos.

Al hablar de las reglas más usuales dedica una atención especial a la regla de Martínez de Aranda-Derand. La cita en primer lugar en el capítulo IV del libro II, dedicado a los arcos, al hablar '*De la estrivacion de los Arcos.*':

Los mas Autores antiguos, y con ellos los modernos, conforman, en que para todos los arcos se les de de grueso á las paredes, ó bastiones de sus lados la parte que les tocasse, según la regla siguiente...⁴³

y a continuación da la regla de Blondel empleando un dibujo muy similar al de Tosca. Es muy interesante la afirmación de que tanto los autores antiguos como los más modernos se guían por esta regla; otra prueba más de su extraordinaria difusión. Plo previene, con acierto, sobre el empleo de la regla en los arcos adintelados, y se remite a una discusión más detallada en el capí-

42. E. Llaguno y Almirola, op. cit., vol. 4, pág. 305. Este diámetro corresponde al de la rotonda o tambor que sirve de base a la cúpula y que está rodeado de capillas: "... Sin contar estas, y desde el resalto de las pilastras con que está adornada, tiene de diámetro ciento diez y siete pies..."

43. A. Plo y Camín, *El Arquitecto práctico...* Madrid: 1793, pág. 333.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

tulo dedicado a las bóvedas.

Nota, que para todo genero de arcos les dán la estrivacion por esta regla, á excepcion del arco adintelado, que es linea recta,... , que á este se le dá la mitad de su diámetro, y esto es lo que tiene de grueso...⁴⁴

....
[más adelante] ... se expresará con mas extension sobre las estrivaciones de toda clase de arcos, segun sus materiales, que aqui solo ha sido una anotacion de lo que comunmente siguen los Profesores de Arquitectura.⁴⁵

Efectivamente, en el capítulo VII del mismo libro, Flo vuelve sobre la cuestión, esta vez con gran extensión y claridad en sus opiniones. La discusión se divide en dos partes. En la primera de ellas con el título *De las estrivaciones correspondientes á todo género de arcos*, realiza lo que llamaríamos ahora un 'estado de la cuestión' del tema de las reglas empíricas.

Cita en primer lugar la regla de Martínez de Aranda/Derand, que dice tiene un origen antiguo y modernos seguidores como el padre Tosca:

Para dar las estrivaciones correspondientes á los arcos, se ha dado alguna luz en la Fig. 21 de este libro; pero habiendo de tratar de esta materia, digo, que en cuantos Autores he visto, que tratan sobre esto, siendo uno de los mas modernos, y del siglo presente el Padre Tosca, siguiendo á sus antecesores en su Tratado de Montea y Cantería, tom.5., hace la delineación sobre un arco esférico, previniendo sea regla general para toda suerte de vueltas...⁴⁶

A continuación describe con detalle y para los tres casos más habituales, arco de medio punto, apuntado y rebajado, el procedimiento a seguir. Curiosamente, advierte que es posible seguir el procedimiento de proyección,

44. Op. cit. pág. 334.

45. *Ibidem*.

46. Op. cit. pág. 453.

más sintético, de Martínez de Aranda.⁴⁷

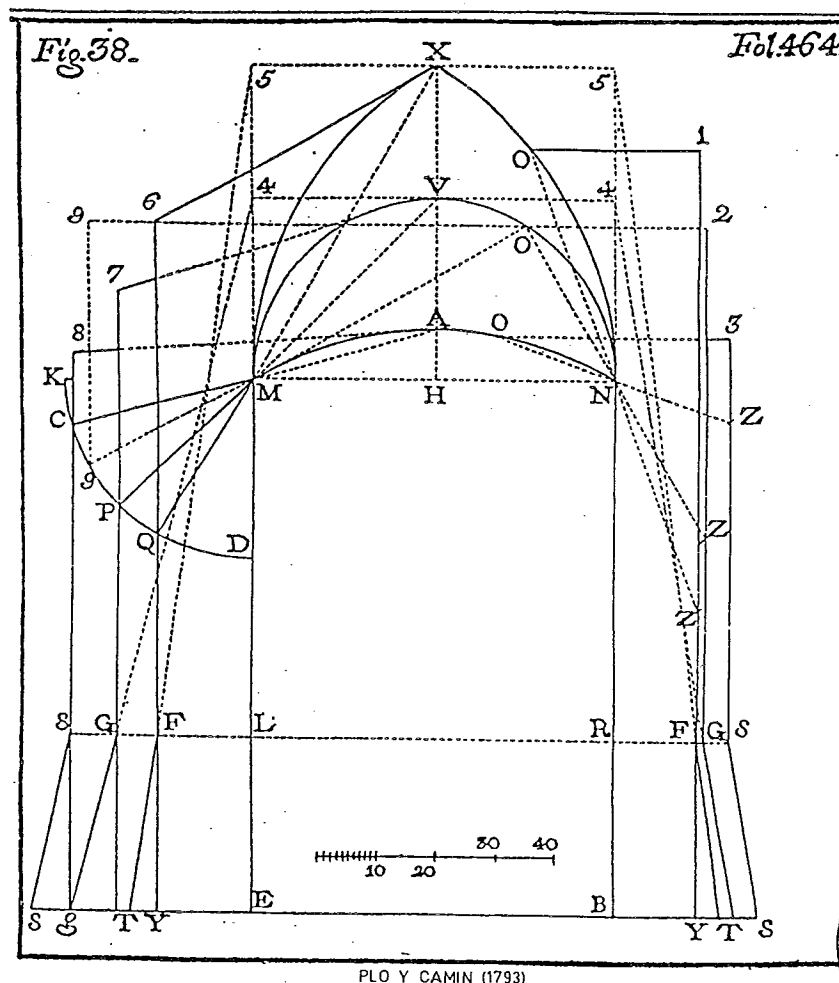


Figura 7.5. Dibujo original del tratado

Plo advierte que esta regla es válida solamente cuando la altura del estribo es igual a la luz de la nave, y aconseja que los estribos se macizen

47. El proceso se ha explicado ya reiteradas veces. He aquí la transcripción de la explicación de Plo: "OPERACION: Sea un arco esférico MVN. formado sobre el diámetro MN del centro H: tómesese el tercio de su circunferencia en O: tirese la ONZ, y cortara la NZ igual a NO: por el punto Z tirese la ZG paralela al lado NRB, ó perpendicular al diámetro MN, y la distancia de entre las dos paralelas RN, y GZ2 será la estrivacion del arco MVN, cuya altura del estribo se levanta hasta el mismo tercio del arco, como señala la horizontal O2 (Esta misma estrivacion saldrá tirando una perpendicular de O al diámetro, y la parte, que en él cortare hasta N, sacarla en derechura de HN, y cortaría en un punto en la misma GZ2: fundase la razon de esto, en que los angulos formados en N son iguales el interior, como el exterior). Siendo, pues, esta regla general para toda clase de vueltas, trazense sobre el mismo diámetro el arco apuntado MXN, y el rebajado, ó escarzano MAN; y tomando sus tercios en O, y tiradas las rectas ONZ en la misma forma que antes, se tiran las rectas FZ1, SZ3, y la estrivacion para el arco apuntado será el intervalo de entre las paralelas NR, y FZ1" Op. cit. pág. 454-455.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

hasta el tercio de la directriz del arco ("cuya altura del estrivo se levanta hasta el mismo tercio del arco"), práctica ésta ya prescrita por Alberti y Fray Lorenzo:

la altura del estrivo será hasta la horizontal 01: para el arco escarzano será su estrivo entre las rectas RN, y SZ3, y su altura es hasta la horizontal 03.⁴⁸

Y vuelve a insistir en la popularidad de la citada regla:

Este es el orden con que algunos, ó los mas, arreglan las estrivaciones de los arcos.⁴⁹

A continuación menciona los otros métodos empleados para el dimensionado de los contrafuertes y cita las reglas del tercio (Palladio), y las de Fray Lorenzo de San Nicolás, si bien advierte que las de este último sólo tienen validez para las bóvedas de medio punto.

Otros, siguiendo las reglas de los Autores, y edificios antiguos, les dan la mitad del diámetro del arco á los estrivos; y otros les dan el tercio, con los aditamentos de que siendo el arco de sillería, se les da a las paredes la sexta parte del diámetro, y los estrivos se cumplan hasta su tercio; y siendo la boveda, y arcos de ladrillo de rosca, se da á las paredes la séptima parte del diámetro, y los estrivos hasta el tercio, sin exceder de aquí; pero en bóvedas, y arcos de piedra, se les dé lo dicho arriba á las paredes, dexando libertad á exceder en los estrivos, dandoles mas que el tercio, y menos que la mitad. En bovedas, que han de ser tabicadas de ladrillo, dicen que se les dé á los estrivos la quarta parte de su diámetro y á las paredes la octava (Vease Fray Laurencio de San Nicolás en su primera parte de Arte y Uso de Arquitectura, Cap. 20, fol. 52 y 53. donde supone sea la vuelta de medio punto).⁵⁰

Posteriormente, como ya lo hizo García Berruguilla, critica la disparidad de resultados a que conducen las distintas reglas, así como la ausencia de indicación en ellas sobre la altura de los contrafuertes:

Digo, pues, que segun las mas opiniones, y las otras, no se halla conformidad entre ellas, ni altura determinada para los pies derechos, sobre quien han de cargar los arcos; porque puede ser tanta la elevacion de los estrivos, y asientos de los arcos, que aunque se les de de un grueso la mitad de su diametro, los puede abrir de arriba una simple boveda de ladrillo, por la fuerza que hace ácia abajo, sirviendo como de cuña contra los estrivos de los lados; y todo esto se remediará obrandolo todo por la práctica siguiente.⁵¹

48. *Op. cit.* pág. 455.

49. *Ibidem.*

50. *Op. cit.* pág. 456.

51. *Ibidem.*

7.3.3 Reglas sobre contrafuertes de arcos y bóvedas: propuestas de Plo

Tras esta crítica pasa a proponer su propia regla estructural en un apartado titulado *De las estrivaciones de los arcos por reglas experimentadas*. El título indica que el propio Plo verificó la bondad de su nueva regla en edificios existentes y en obras de propia construcción (esta última afirmación de forma explícita). Plo distingue entre contrafuertes para bóvedas de cantería, para bóvedas de ladrillo y para puentes.

7.3.3.a Contrafuertes para bóvedas de cantería

Encuentra insuficientes los obtenidos por la regla de Martínez de ArandaDerand son insuficientes e inventa una nueva regla geométrica que aparece descrita en la Figura 7.6. La regla es válida cuando la altura del contrafuerte es igual al vano que cubre la bóveda y los riñones se macizan de la forma indicada en la figura. Cuando la altura es superior al vano se incrementará su canto por el procedimiento descrito en la Figura 7.7.

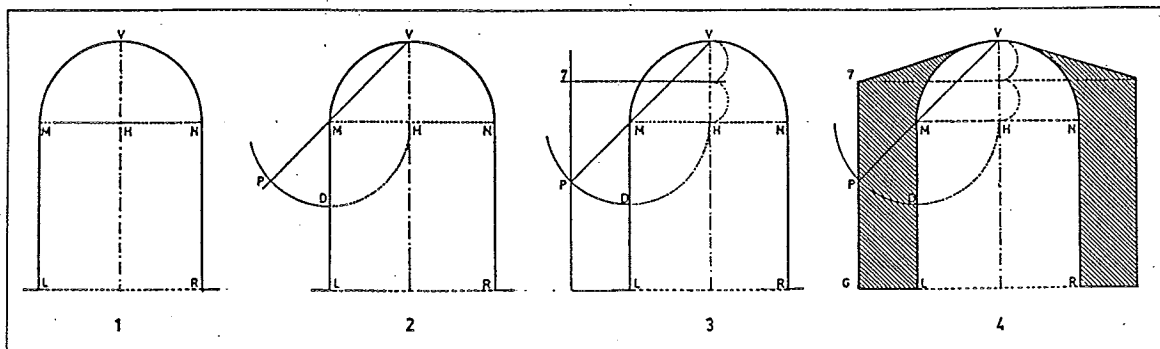


Figura 7.6. Regla geométrica para los contrafuertes de bóvedas de cantería

El texto de Plo es el siguiente:

Sean los mismos arcos antecedentes, cuyas claves son A del escarzano, ó rebajado, V del esférico, y X del apuntado, y el diámetro de todos la misma recta MN, cuyo centro es H: sea la altura de las paredes LM, o RN, igual al diámetro MN [p. 457] que es la que regularmente se da en los Templos, hasta los arrancamientos de los arcos torales, siendo el Templo de una Nave. Tomese la mitad del diámetro, que es la distancia MH, y desde M, como centro, hagase el cuadrante de círculo DK, y sobre este se cortarán las estrivaciones de todos los arcos formados sobre el diámetro MH, tirando del medio de cada arco una recta, que pasa por el ángulo M, hasta que corte la quarta de círculo DK en algún punto, y habiendo tirado las sobredichas rectas se halla, que el arco rebajado A corta el punto C, el esférico V corta en

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

P, y el apuntado X corta en Q: tirese por el punto Q, la recta FQ6, paralela al lado ML, y la distancia de entre estas dos paralelas, es el grueso que deben llevar los estrivos del arco apuntado X, cuya altura será suficiente si se levanta al punto 6, que tenga la mitad de la perpendicular HX, y macizando el estrivo, según la recta 6X, cuya inclinación se encamina al punto X, altura de la parte concava del arco, quedará con toda firmeza [p. 458] su estrivacion, sin tener necesidad de levantar hasta O, como se ha hecho por el lado opuesto; hagase la misma diligencia con el arco esferico, tirando por su punto P la recta GP7, paralela al lado ML, y la distancia de entre estas dos paralelas será el grueso de sus estrivos, levantando también su altura hasta la mitad del arco, según su perpendicular HV, á cuyo nivel corresponde el punto 7, que se macizará también según la inclinación 7V. Tirese ultimamente la recta sc8, con las mismas circunstancias que las antecedentes, y entre esta, y la ML, se halla el grueso del estrivo para el arco rebajado en A, y la altura 8 corresponderá, según las antecedentes, á nivel de la mitad de la altura que hay de H á A, y se macizará el estrivo por la recta inclinada 8A, con cuyas estrivaciones resultan por cada lado las partes siguientes...⁵²

Realiza los cálculos mediante la escala en el dibujo para un bóveda de 60 pies y concluye que, efectivamente los contrafuertes obtenidos son los adecuados para las bóvedas de cantería.

Para las bóvedas, ó arcos de piedra, será suficiente la estrivacion del lado LM, pues el arco apuntado, cuya estrivacion es FL, se le hallan por el mismo pitipie 15 pies, que son la quarta parte del diametro, y al estrivo del esferico V, se le hallan 20 pies, y dos tercios, ó tres quartos de otro pie, que es poco mas que el tercio, y al rebaxado A, le vienen 28 pies y medio, como se hallarán todas las medidas por el pitipie; luego á este ultimo arco le viene cerca de la mitad, que siendo esta 30, y la estrivacion de él desde L á S, 28 y medio, solo le falta uno y medio para su mitad, cuyas partes son suficientes, y tengo experiencia para poderlo asegurar, pues en los arcos que he construido por esta regla, se hallan en el dia tan firmes, como acabados de construir.⁵³

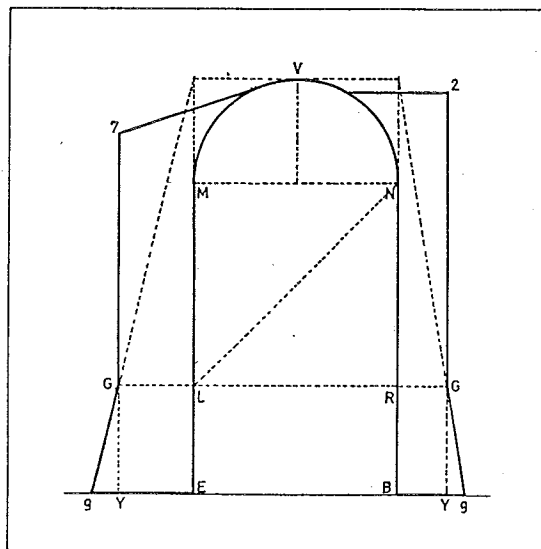


Figura 7.7. Regla para aumentar el canto del contrafuerte

52. *Op. cit.* págs. 457-458.

53. *Op. cit.* pág. 460. (El subrayado es mío).

La regla geométrica para aumentar el canto cuando la altura supera la luz del vano viene descrita en el siguiente párrafo:

Si la altura excediese, como de L á E, se sacará el punto 4 de la clave del arco esférico V, por el nivel de la altura concava del arco; la qual corta al lado LM, alargado en 4: por este punto, y el punto G, asiento del estrivo sobre LR, tirese a discrecion la recta 4G, y corte á la BE continuada en g, y la distancia Eg será el grueso del estrivo para el arco esférico V, cuya altura huviere de ser hasta sus arrancamientos, como la de E á M, y si huviese de ser mas, se alargará mas abajo la Gg, y si huviere de ser menos, la cortara su pavimento con una línea paralela entre L, y E. Con el arco apuntado se obrará lo mismo con le línea 5F, y cortará su planta en T. Para el arco A, [rebajado] tirese de su asiento S la recta Ss, paralela a la Gg, del arco esférico, y la SE será la planta de su estrivo, cuyas líneas se levantarán de escarpa desde E á L, con lo qual queda el edificio con toda firmeza para obras de sillería.⁵⁴

7.3.3.b Contrafuertes para bóvedas de ladrillo

Para bóvedas de ladrillo los contrafuertes (se sobreentiende que éstos son siempre de piedra que es la práctica habitual) obtenidos por la regla de Martínez de Aranda/Derand son suficientes, siempre y cuando: la altura no supere el vano, los riñones se macizen horizontalmente hasta el tercio de la circunferencia de la bóveda y el canto del contrafuerte obtenido por la regla se incremente con el canto del arco toral. Cuando la altura del contrafuerte excede de la luz se incrementará su canto por el mismo procedimiento que el seguido en el caso anterior.

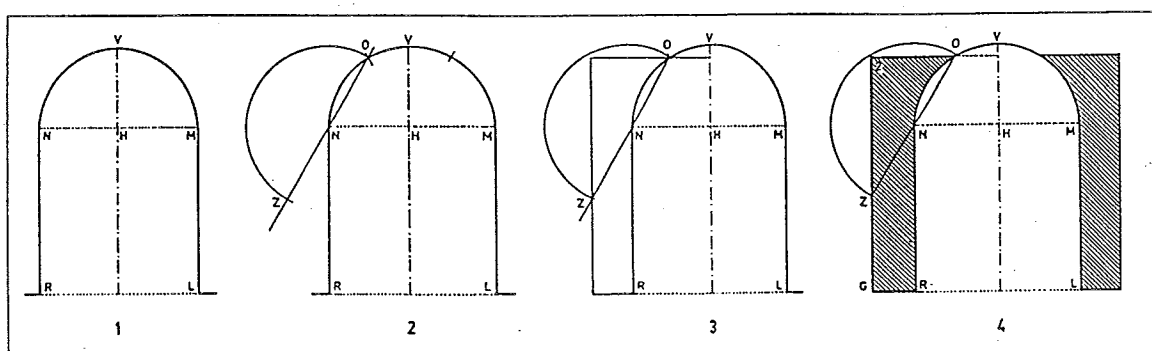


Figura 7.8. Regla geométrica para los contrafuertes de bóvedas de ladrillo

54. *Op. cit.* pág. 461. (El subrayado es mío).

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

El texto de Plo es el siguiente:

Suponese, que el ancho de la Nave LR tenga 60 pies, y la altura R á N tenga otros 60 (que se hallarán midiendolo todo con el pitipie formado de 40 pies, como aparece en la figura). Para saber las estrivaciones del lado R, vease qué grueso corresponde á cada uno de los arcos por el pitipie, y se halla que el arco apuntado X, tiene su estrivo de R á F, cuyo grueso es 13 pies y medio; pero su diametro es 60. La RG es el estrivo del arco esférico V, y tiene de grueso 15 pies cavales, y estos mismos son la quarta parte de su diametro; luego esta estrivacion solo podrá servir para bovedas de ladrillo, y no para las de piedra, y esto ha de ser no siendo su altura mas que el cuadrado MLNR, que si huviese de bajar hasta B, necesita de mas estrivacion, como se dirá despues. Y ultimamente, habiendo de ser el arco rebajado en A, le toca de estrivo lo ancho de R á S, el qual se halla tener 19 pies, que para ser el tercio del diametro aun le falta un pie; de que puede inferir cualquiera inteligente, que ninguna de las tres estrivaciones son suficientes para tales arcos, y que escasamente podran sufrir las bovedas tabicadas, aunque sus arcos torales sean de ladrillo de rosca, pero sin darles demasiada, y aun será mejor, que terminada cualquiera rosca del grueso que se le huviere de dar, que se proporcionará segun la calidad de los materiales de que se huviere de construir, se dé la mitad de ella a cada estrivo, aumentándole este grueso por la parte exterior, y no le dañará, aunque á los estrivos se les de de mas grueso todo el que tuviere la rosca, con lo qual no havrá que temer la falta de empujes, evitando con esto las muchas ruinas, que por falta de ellos han acontecido.⁵⁵

Cuando el contrafuerte es más alto que el vano, recomienda seguir el mismo método anterior:

Para las de ladrillos, se obrará lo mismo á la parte opuesta, y será la escarpa del arco apuntado (según baja la recta 5F) la inclinada FT. Para el esférico V (segun la línea 4G) será su escarpa GT, y para el rebajado A, será la escarpa SS, paralela a la del esférico V (que es GT), y en ambos lados son las basas de las escarpas del arco apuntado las porciones YT, y á esta correspondencia son las demás basas de los restantes arcos, sucediendo lo mismo con quantos se quisiesen formar sobre el diámetro MN.⁵⁶

7.3.3.c Contrafuertes para puentes

Plo resalta que las reglas y recomendaciones anteriores son para arcos y bóvedas de iglesias en terrenos secos. Para las cepas de los puentes o las iglesias que se construyan en terrenos húmedos, donde la resistencia del terreno es habitualmente menor, da una nueva regla más conservadora, que se explica en la Figura 7.9.

Nota que las estrivaciones, de que se ha tratado, son para arcos, y bovedas de los edificios de Templos, y obras que se pueden construir en terrenos secos, ó libres de inundaciones; pero en obras de agua, como son los puentes sobre rios caudalosos, no alcanzan aquellas estrivaciones (por muchas circunstancias, que serían largas de explicarse); por lo que es preciso dar regla para la seguridad de tales obras, pues hasta ahora, quantas he visto son variables, porque unos dan al macho de cada arco la mitad de su diametro, y esto aunque es seguro, impide

55. *Op. cit.* págs. 459-460.

56. *Op. cit.* pág. 462. (El subrayado es mío).

mucho al curso del agua por mucho grueso; otros varían a su gusto dando lo que se les antoja; y así, para dar a estas obras una estrivacion competente, se obrará de esta forma.

Sea el arco esférico de un puente MVN: hagase su quarta de círculo DK en la misma forma que antes, y en la parte opuesta tomese el tercio del arco en O, y tirese la OM, que corta al cuadrante en el punto 9: levántese la recta 9.9. paralela á la perpendicular HV, y entre esta y el lado ML, se halla el estribo que se desea, cuyo grueso es 26 pies de los 60 de diametro del arco, de que resulta ser mas que el tercio, y menos que la mitad; y tirando la horizontal O9 se halla lo que se ha de macizar en sus enjutas...⁵⁷

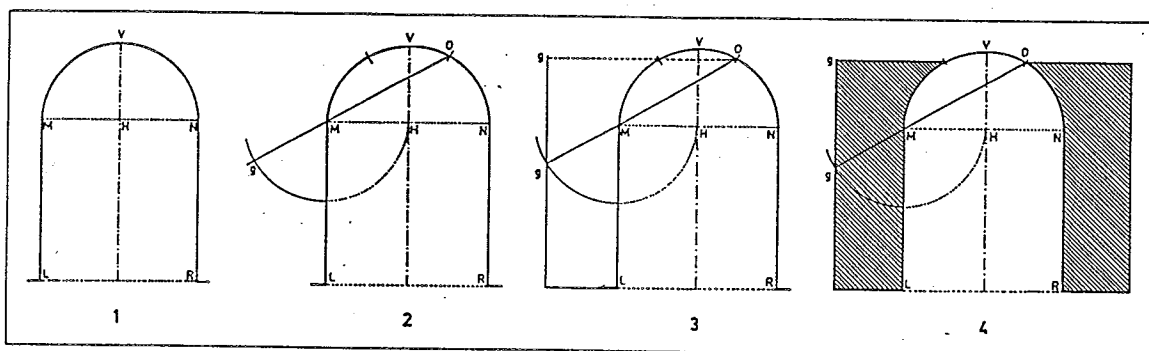


Figura 7.9. Regla geométrica para las cepas de los puentes

7.4 La tradición francesa: Gautier, Bélidor, Frézier, Danizy, y Perronet

7.4.1 Gautier

Gautier, como hemos dicho ya repetidas veces, fue el primero en escribir un tratado específico de puentes. Desde nuestro punto de vista lo que nos interesa es una disertación que al parecer, publicó primero separadamente y que se incluyó después en las siguientes ediciones del *Traité des Ponts*. La memoria tiene un título suficientemente explicativo *Dissertation sur l'épaisseur des culées des Ponts, sur la Largeur des piles, sur la Portée des voussoirs, sur l'Erfort & la Pesanteur des Arches à differens surbaissemens...* Es una memoria fundamental pues plantea de forma sistemática todos los problemas de la estabilidad de arcos y contrafuertes justo en el momento del nacimiento

57. *Op. cit.* págs. 462-463.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

de la ciencia de las estructuras. Gautier cita los avances de Parent y de la Hire, pero, para resolver los problemas acude al sistema tradicional: empirismo (comparación sistemática de ejemplos contruidos), empleo de modelos, y, a la postre, reglas proporcionales.

En primer lugar plantea la situación de su época, la falta de un estudio 'científico' del equilibrio y comportamiento de las estructuras de los edificios, y la sola existencia de tanteos y reglas aproximadas, a veces contradictorias entre sí.

La proportion dans tous les ouvrages d'architecture de quelque espece qu'ils puissent être, et le mécanisme de leurs efforts, dont les plus habiles architectes ne sont point convenues, a été jusqu'à present les plus difficile de cet art. Et on peut dire que nous sommes après à chercher aujourd'hui ce que tous les plus grans hommes des siècles passés n'ont point encore trouvé.⁵⁸

....

Il n'a été qu'en tâtonnant dans tous les Ponts et dans toutes les voûtes qu'il a fait construire dans toutes sortes de bâtimens. Il n'a jamais suivi de regles certaines, pour sçavoir jusqu'où il pouvoit sûrement porter les limites de son ouvrage.⁵⁹

Las consecuencias de esta ignorancia son tanto personales, afectan a la honestidad de los constuctores, como sociales pues obligan al Estado, en ocasiones, a un gasto muy superior al estrictamente necesario para la ejecución de las obras públicas.

... car si on donne aux culées des Ponts, et aux piedroits qui supportent les voûtes, plus de solidité qu'il n'en faut, sans s'embarasser de la recherche de cette précision, on peut tomber dans des inconvéniens très-désavantageux à un honnête homme. C'est que, si on est estimé de tout le monde, on a un reproche secret à se faire de n'être pas sur de ce qu'on propose. Et enfin, c'est que, donnant une plus grande étendue de maçonnerie qu'il ne faut au-delà de la force des possées des matériaux, on expose l'Etat, ou celui pour qui on travaille, à une dépense onereuse, qui seroit employée ailleurs fort utilment.⁶⁰

Dice ser el primero en ocuparse de estos temas y es consciente de que las soluciones que propone no son definitivas, pero cree su deber romper el

58. Gautier *Traité des Ponts*. 4a ed. Paris: 1765, pág. 343.

59. *Ibidem*.

60. Op. cit. págs. 343-344.

hielo en este tema y abrir un debate y una crítica, de la que no duda saldrá el progreso. Efectivamente, la exposición pública de las teorías y su crítica fue la base de la revolución científica que sucedió precisamente durante su vida (los *Principia* de Newton, etc...)

Comme personne n'a encore traité de ces sortes de faits que fort imparfaitement, que Vitruve, ni Vignolle n'en ont rien dit, je me suis fait mille reproches à moi-même de n'être pas sûr des ouvrages que je pourrois proposer sur cette matiere j'ai voulu hasarder mes conjectures, afin qu'étant vues de tout le monde, elles obligent quelque plus habile que moi à faire mieux, et à me redresser. C'est ainsi que les choses se perfectionnent; si je ne réussis pas mieux qu'un autre, au moins aurai-je devers moi l'avantage d'avoir été le premier à rompre la glace et à frayer un chemin que d'autres perfectionneront pour n'avoir plus rien à souhaiter sur une matiere qui fait tant de peine à tous les habiles architectes...⁶¹

A continuación expone los cinco problemas fundamentales que es preciso resolver y que se refieren a:

- 1) espesor de los contrafuertes.⁶²
- 2) espesor de las pilas.⁶³
- 3) espesor de las dovelas en la clave de las bóvedas.⁶⁴
- 4) arco ideal y proporción óptima de cada tipo de arco.⁶⁵
- 5) perfil de los muros de contención.⁶⁶

Solamente el quinto de estos problemas se sale del ámbito de nuestra tesis. Examinaremos a continuación las respuestas de Gautier a cada uno de ellos.

61. Op. cit. pág. 344.

62. "Quelle doit être l'épaisseur des culées dans toutes sortes de Ponts et Ponceaux de maçonnerie, à proportion de la grandeur des Arches et arceaux, et des poids qu'elles doivent supporter?". Op. cit. pág. 345.

63. "Quelle doit être la largueur des piles par rapport à l'ouverture des Arches et arceaux, et des poids dont on les charge?". *Ibidem*.

64. "Quelle doit être la portée des voussoirs depuis leur intradosse à leur extradosse, et à toutes sortes de grandeurs d'Arches et d'arceaux, à l'endroit de la clef?". *Ibidem*.

65. "...quelle est, de toutes les Arches et arceaux fixés sur un même diametre, celle ou celui qui pourra porter de plus grands fardeaux; ou à quelle proportion les uns et les autres détermineront au juste leurs efforts, ou à celle de l'ellipse, à quelle surbaissement qu'on veuille la réduire, ou à celle à plein cintre, ou enfin à celle à tiers-point ou gothique, quelque hauteur qu'on veuille la faire atteindre?". *Ibidem*.

66. "... quel doit être le profil des murs de soutènement pour retenir les terres d'une chaussée, des turcies, des remparts dans les fortifications, à toutes sortes de hauteurs?". Op. cit. pág. 346.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Gautier dice que tratará de solucionar los problemas mediante hipótesis ciertas y hablando un lenguaje claro que pueda ser entendido por los maestros de obras: solamente es preciso, tener sentido común y algunos conocimientos de estática, dada la importancia del equilibrio, mecánica, y geometría para conocer los pesos, volúmenes, áreas y poder compararlas entre ellas.

Son especialmente importantes, para el asunto que nos ocupa sus comentarios sobre la estática, el equilibrio, y la geometría.

Sobre la estática y el equilibrio:

On a besoin de connoître quelque chose de la statique, pour faire voir que tout ce qui tourne autour d'une essieu, comme dans les bassins d'une balance qui a ses bras égaux ou inégaux, ne sera jamais en équilibre avec un autre poids, s'ils n'ont entr'eux une égale pesanteur, ou des raisons réciproques de leurs efforts. C'est ainsi qu'on s'assure de la poussée des voûtes, en leur opposant des forces qui ont une égale puissance.⁶⁷

Sobre la geometría:

Et enfin la géométrie est nécessaire à l'intelligence de ces cinq propositions, pour pouvoir mesurer les surfaces ou les solides de tous ces corps qui ont diverses puissances, afin de les comparer les uns aux autres.⁶⁸

7.4.1.a Contrafuertes

Antes de pasar a tratar de contestar esta pregunta Gautier pasa revista a las contribuciones más importantes realizadas hasta la fecha. Menciona en particular la aportación de La Hire:

Monsieur La Hire, ce sçavant du Siécle passé, prétend avoir démontré la poussée des voûtes, et déterminé l'épaisseur des pieds-droits qui les supportent.⁶⁹

A continuación realiza un breve resumen de las hipótesis básicas de la teoría de La Hire citando su memoria de 1712. Gautier reconoce no comprender el desarrollo algebraico y geométrico de La Hire y rechaza su método basándose en que también sería incomprensible e inaplicable para cualquier arquitecto o maestro de obras:

67. Op. cit. pág. 347.

68. Op. cit. pág. 348.

69. Op. cit. pág. 348.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

de l'Arche, ou au milieu de la clef dans l'intradosse, la ligne AE, et du point d'appui A, et de l'ouverture AE, décrivez le quart de cercle DEB, qui coupera AM, en B, et AD indéfinie, en D. Il est certain que AB, AE, et AD, sont égaux par l'opération, comme rayons d'un même cercle. Faites aussi AC, égal à AB. Tirez ensuite l'hypotenuse BD, qui coupera AE, en I. Abaissez du point I, la perpendiculaire IL, sur AD, qui fera moitié de AB. Du sommet E, tirez l'indéfinie EG, parallèle à BC, qui coupera AD, en H, et portez IL, de H en G, pour servir de culée à l'Arche AEM, en abaissant GV.⁷³

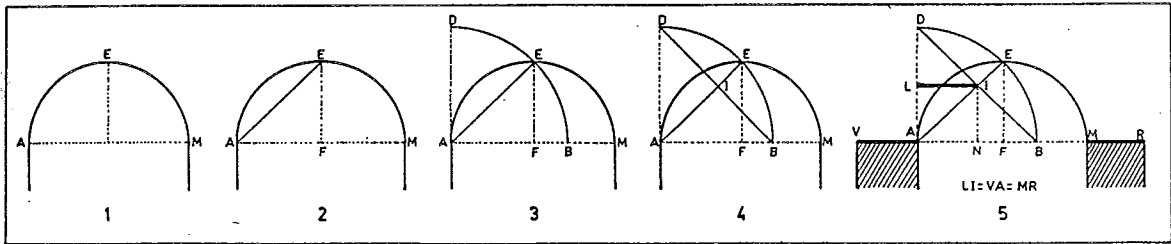


Figura 7.10. Regla geométrica de Gautier

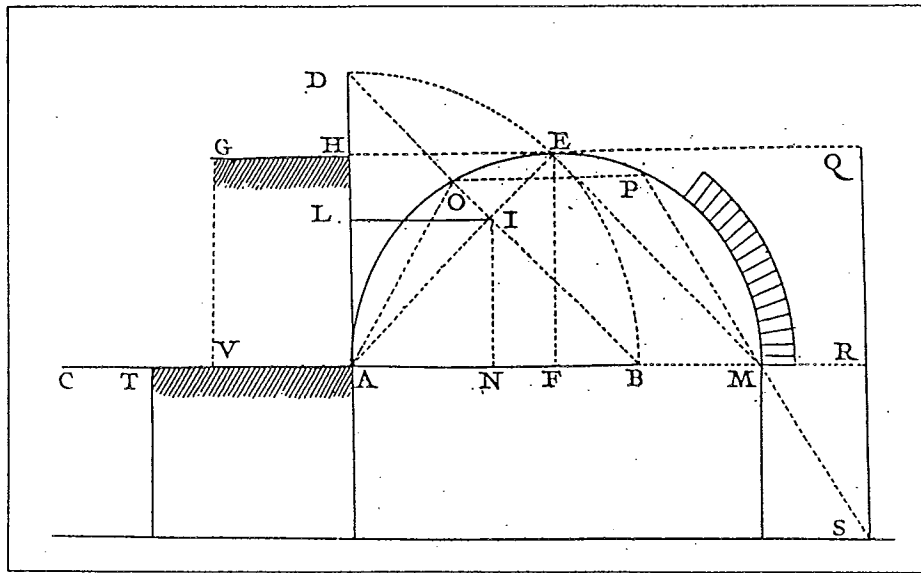


Figura 7.11. Dibujo original de Gautier

Gautier da una demostración incomprensible de su regla. Parece basarse en el hecho, que considera probado, que el contrafuerte correspondiente a un

73. Op. cit. págs. 355-356.

Car si pour concevoir ce qu'il rapporte, il faut sçavoir absolument l'algebre ... je ne crois pas qu'aucun tailleur de pierres, appareilleur, ni architecte, pour qui ces sortes d'ouvrages doivent être faits et rendus aisés, en puissent jamais profiter, parce que, pour l'ordinaire, ces personnes ne s'appliquent pas à cette science... Et tant que nos pensées ne seront pas aisées à penetrer aux moins sçavants, elles ne seront pas instructives, et par conséquent deviennnent inutiles à la posterité.⁷⁰

Menciona después las memorias de Parent para conocer la figura del extradós de una bóveda para que esté en equilibrio suponiendo que no existe rozamiento entre las dovelas⁷¹. Cita también la regla de Derand y Blondel, como práctica habitual, pero la rechaza diciendo que no tiene ningún fundamento:

Cette opération n'est point prouvée pour faire voir qu'elle est juste ou véritable. Ainsi ce n'est rien dire, et c'est donner au hasard que de la suivre.⁷²

Aunque más adelante reconoce que es útil para conocer la diferencia entre los empujes de los distintos tipos de arcos, lo que, evidentemente, es una contradicción con la afirmación anterior. Estas contradicciones, como hemos visto y veremos, son frecuentes en esta etapa de transición entre el diseño proporcional o empírico, y el científico.

Después de pasar revista a las reglas de Palladio y de citar varios ejemplos de puentes construidos con sus correspondientes dimensiones, pasa a dar una regla geométrica de su invención para encontrar el contrafuerte para cualquier tipo de arco. Como en el caso de la regla de Derand/Blondel no se tiene en cuenta ni el espesor del arco ni la altura de los contrafuertes. El proceso es el siguiente (véase la Figura. 7.10 para una explicación paso a paso):

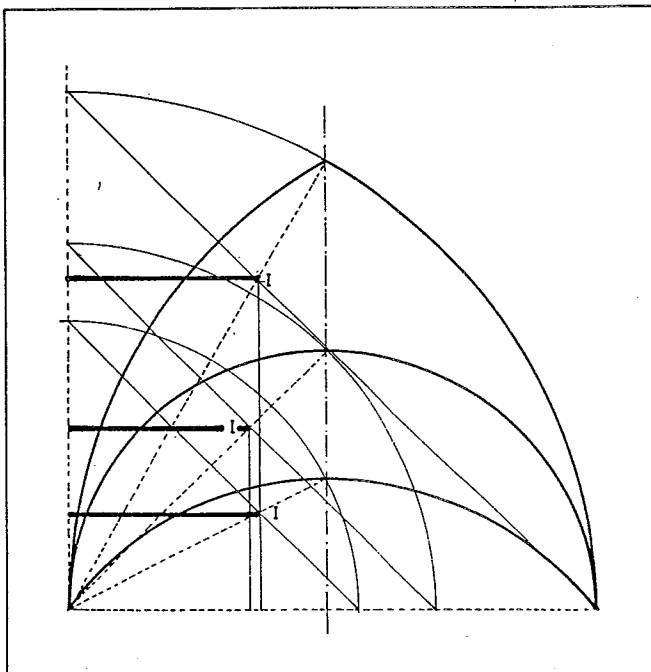
... AM est le diametre d'une Arche à plein cintre AEM, surbaissé, gothique, ou toute autre qu'on voudra, dont on souhaite trouver la poussée pour y opposer une culée, ou une puissance égale. Prolonguez indéfiniment le diametre MA, du côté de C, toujours de niveau. Elevez la perpendiculaire AD, indéfinie à la naissance de l'Arche A, et dont le point A doit être regardé comme un point d'appui, et inébranlable. Tirez encore du point d'appui A, au sommet

70. *Ibidem*.

71. Op. cit. págs. 351-353.

72. Op. cit. pág. 354.

arco adintelado debe tener de canto la mitad del vano. Sin embargo, el 'razonamiento' está lleno de saltos en el vacío y da la impresión de haberse realizado con posterioridad.⁷⁴ Advierte que para los arcos apuntados o rebajados el proceso a seguir deberá ser el mismo. En la Figura 7.12 hemos realizado una comparación sobre la aplicación de la regla a los tres tipos de arcos: de medio punto, apuntado y rebajado.



El resultado es que el arco apuntado requiere el mismo contrafuerte que el rebajado y más que el de medio punto, con muy poca diferencia entre estos valores; esto contradice las propias las propias opiniones de Gautier expuestas antes, aunque como veremos en la Tercera Parte, los valores correspondientes a los tres casos son, para el caso de extradós horizontal al nivel de la clave, muy parecidos.

Figura 7.12. Aplicación de la regla de Gautier a tres tipos de arcos

No parece advertir, o importarle esta contradicción, y señala, por último, que una de las ventajas de su regla es su fácil aplicación por los maestros canteros y aparejadores:

Il n'y a personne, ce me semble, qui, sans même beaucoup de geometrie, comme sont la plupart des maîtres Maçons, des Appareilleurs, et des tailleurs de pierres, ne puisse comprendre ce que j'avance, le tracer, et le démontrer sur toutes sortes d'Arches sans beaucoup d'operation.⁷⁵

74. Véase op. cit. págs. 356-357.

75. Op. cit. pág. 358.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

La Regla secreta

No terminan aquí las contradicciones. Gautier suministra en su tratado unas tablas⁷⁶ (véase Figura 7.13) para dimensionar los parámetros fundamentales de un puente de fábrica (para directriz semicircular): cepas, pilas y espesor en la clave. En los dos últimos casos emplea las reglas empíricas que veremos más adelante. En el caso de las cepas era de esperar que empleara su propia regla geométrica, que produce una dimensión constante de, aproximadamente, $L/2.9$. Un vistazo simplemente a los valores de la tabla pone de manifiesto que esta regla no se ha empleado y se ha sustituido por otra que da proporciones más esbeltas.

370° DISSERTATION SUR LES CULÉES;												VOUSOIRS ET PILES DES PONTS. 371																
Ouvr- Culées.				Piles.				Voussoirs de pierres dures.				Voussoirs de pierres tendres.				Ouvr- Culées.		Piles.		Voussoirs de pierres dures.		Voussoirs de pierres tendres.						
Pieds.	Pi.	Pou.	Li.	Pi.	Pou.	Li.	Pi.	Pou.	Li.	Pi.	Pou.	Li.	Pi.	Pou.	Li.	Pieds.	Pi.	Pou.	Li.	Pi.	Pou.	Li.						
42	11.	2.	8.	8.	5.	0	2.	9.	8.	3.	9.	8.	19.	5.	6.	73	19.	5.	6.	14.	7.	0.	4.	10.	6.	5.	10.	3.
43	11.	5.	6.	8.	7.	0.	2.	10.	6.	3.	10.	6.	74	19.	8.	74	19.	8.	11.	14.	9.	7.	4.	11.	4.	5.	11.	2.
44	11.	8.	11.	8.	9.	7.	2.	11.	4.	3.	11.	4.	75	20.	0.	75	20.	0.	0.	15.	0.	0.	5.	0.	0.	6.	0.	0.
45	11.	0.	0.	9.	0.	0.	3.	0.	0.	4.	0.	0.	76	20.	3.	76	20.	3.	3.	15.	2.	5.	5.	0.	10.	6.	0.	10.
46	12.	3.	3.	9.	1.	5.	3.	0.	10.	4.	0.	10.	77	20.	6.	77	20.	6.	8.	15.	5.	0.	5.	1.	8.	6.	1.	8.
47	12.	6.	8.	9.	5.	0.	5.	1.	8.	4.	1.	8.	78	20.	9.	78	20.	9.	6.	15.	7.	0.	5.	2.	6.	6.	2.	6.
48	12.	10.	0.	9.	7.	0.	3.	2.	6.	4.	2.	6.	79	21.	0.	79	21.	0.	11.	15.	9.	7.	5.	3.	4.	6.	3.	0.
49	13.	0.	11.	9.	9.	7.	3.	3.	4.	4.	3.	0.	80	21.	4.	80	21.	4.	0.	16.	0.	0.	5.	4.	0.	6.	3.	10.
50	13.	4.	0.	10.	0.	0.	3.	4.	0.	4.	3.	10.	81	21.	7.	81	21.	7.	3.	16.	2.	5.	3.	4.	10.	6.	4.	8.
51	13.	7.	3.	10.	2.	5.	3.	4.	10.	4.	4.	8.	82	21.	10.	82	21.	10.	8.	16.	5.	0.	5.	5.	8.	6.	5.	6.
52	13.	10.	8.	10.	5.	0.	3.	5.	8.	4.	5.	6.	83	22.	1.	83	22.	1.	6.	16.	7.	0.	5.	6.	6.	6.	4.	4.
53	14.	1.	6.	10.	7.	0.	3.	6.	6.	4.	6.	4.	84	22.	4.	84	22.	4.	11.	16.	9.	7.	5.	7.	4.	6.	7.	2.
54	14.	4.	11.	10.	9.	7.	3.	7.	4.	4.	7.	2.	85	22.	8.	85	22.	8.	0.	17.	0.	0.	5.	8.	0.	6.	8.	0.
55	14.	8.	0.	11.	0.	0.	3.	8.	0.	4.	8.	0.	86	22.	11.	86	22.	11.	3.	17.	2.	5.	5.	8.	10.	6.	8.	10.
56	14.	11.	3.	11.	2.	5.	5.	8.	10.	4.	8.	10.	87	23.	2.	87	23.	2.	8.	17.	5.	0.	5.	9.	8.	6.	9.	7.
57	15.	2.	8.	11.	5.	0.	3.	9.	8.	4.	9.	7.	88	23.	5.	88	23.	5.	0.	17.	7.	0.	5.	10.	6.	6.	10.	3.
58	15.	5.	6.	11.	7.	0.	3.	10.	6.	4.	10.	3.	89	23.	8.	89	23.	8.	11.	17.	9.	7.	5.	11.	4.	6.	11.	2.
59	15.	8.	11.	11.	9.	7.	3.	11.	4.	4.	11.	2.	90	24.	0.	90	24.	0.	0.	18.	0.	0.	6.	0.	0.	7.	0.	0.
60	16.	0.	0.	12.	0.	0.	4.	0.	0.	5.	0.	0.	91	24.	3.	91	24.	3.	3.	18.	2.	5.	6.	0.	10.	7.	0.	10.
61	16.	3.	3.	12.	2.	5.	4.	0.	10.	5.	0.	10.	92	24.	6.	92	24.	6.	8.	18.	5.	0.	6.	1.	8.	7.	1.	8.
62	16.	6.	8.	12.	5.	0.	4.	1.	8.	5.	1.	8.	93	24.	9.	93	24.	9.	6.	18.	7.	0.	6.	2.	6.	7.	2.	6.
63	17.	0.	9.	12.	7.	0.	4.	2.	6.	5.	2.	6.	94	25.	0.	94	25.	0.	11.	18.	9.	7.	6.	3.	4.	7.	3.	0.
64	17.	3.	11.	12.	9.	7.	4.	3.	4.	5.	3.	0.	95	25.	3.	95	25.	3.	4.	19.	0.	0.	6.	4.	0.	7.	3.	10.
65	17.	6.	0.	13.	0.	0.	4.	4.	0.	5.	3.	10.	96	25.	6.	96	25.	6.	3.	19.	2.	5.	6.	4.	10.	7.	4.	8.
66	17.	9.	3.	13.	2.	5.	4.	4.	0.	5.	4.	8.	97	25.	9.	97	25.	9.	8.	19.	5.	0.	6.	5.	8.	7.	5.	6.
67	17.	12.	8.	13.	5.	0.	4.	5.	8.	5.	5.	6.	98	26.	1.	98	26.	1.	6.	19.	7.	0.	6.	6.	6.	7.	6.	4.
68	18.	1.	6.	13.	7.	0.	4.	6.	6.	5.	6.	4.	99	26.	4.	99	26.	4.	11.	19.	9.	7.	6.	7.	4.	7.	7.	2.
69	18.	4.	11.	13.	9.	7.	4.	5.	4.	5.	7.	2.	100	26.	7.	100	26.	7.	8.	0.	20.	0.	6.	8.	0.	7.	8.	0.
70	18.	7.	0.	14.	0.	0.	4.	6.	0.	5.	8.	0.	101	26.	10.	101	26.	10.	3.	20.	2.	5.	6.	8.	10.	7.	8.	10.
71	18.	10.	3.	14.	2.	5.	4.	8.	10.	5.	8.	10.	102	27.	1.	102	27.	1.	8.	20.	5.	0.	6.	9.	8.	7.	9.	7.
72	19.	3.	8.	14.	5.	0.	4.	9.	8.	5.	9.	7.	103	27.	4.	103	27.	4.	6.	20.	7.	0.	6.	10.	6.	7.	10.	3.

GAUTIER (1717)

Figura 7.13. Tablas de Gautier para dimensionamiento de puentes. Las tablas dan los valores para arcos de medio punto de uno hasta ciento veinte pies de luz.

76. Op. cit. págs. 368-372.

La regla obtiene el espesor del contrafuerte a partir del de las pilas.

- para $L \geq 40$ pies, se toma como espesor del contrafuerte el de la pila aumentado en un tercio de su valor. Es decir:

$$C = L/5 + (1/3)(L/5) = L/3.75$$

- para $L < 40$ pies, emplea una regla compleja, que no hemos podido descubrir, que conduce a contrafuertes cada vez más gruesos en relación con la luz. Hemos representado esta relación en la gráfica de la Figura 7.14.

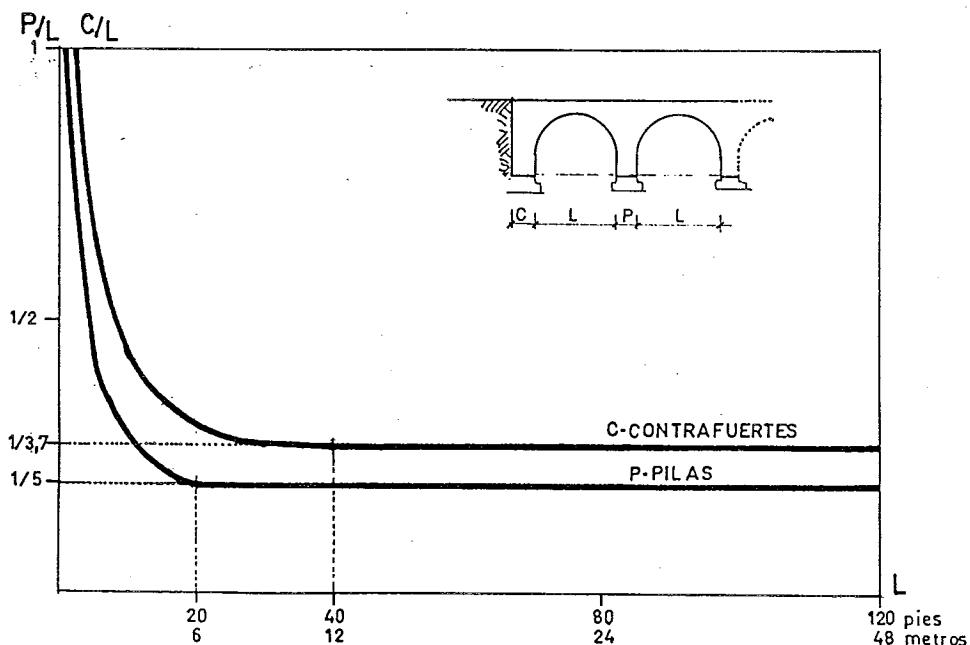


Figura 7.14. Dimensionamiento de capas y pilas según Gautier

7.4.1.b Pilas

Para responder al problema del dimensionamiento de las pilas Gautier recurre a un método puramente empírico: repasa las distintas reglas dadas por diversos autores (Alberti, Palladio, Serlio y Blondel), así como las proporciones de algunos puentes existentes (Pont du Gard, Pont Neuf de París, Pont-Royal en las Tullerías y Pont-Neuf en Toulouse).

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Tant de variété dans tous ces ouvrages, nous doit faire penser que leurs auteurs n'ont encore observé aucune règle générale, ni certaine, qui soit fondée sur des principes démontrés, pour établir les piles des Ponts.⁷⁷

Gautier insiste en que el tamaño de las pilas deberá depender, necesariamente, del tipo de piedra y fábrica empleados en su construcción, de la luz de los arcos y de los pesos que hayan de pasar por encima del puente.

Finalmente, Gautier emplea la siguiente regla (y esta vez lo dice explícitamente) para formar la columna correspondiente a las pilas en sus tablas (para su representación gráfica véase la Figura 7.14):

- para $L \geq 20$ pies, se toma como espesor de la pila un quinto de la luz.

$$C = L/5$$

- para $L < 20$ pies, emplea como para los contrafuertes una regla compleja, que no hemos podido descubrir, que lleva a pilas cada vez menos esbeltas.

7.4.1.c Espesor en la clave

Análogamente al caso de las pilas realiza un repaso del estado de la cuestión en distintos tratadistas (Blondel, Alberti, Palladio y Serlio) y examina, así mismo, la relación entre espesor en la clave y luz en distintos puentes construidos.

Decide, finalmente, tomar como espesor en la clave (e):

- para $L \geq 40$ pies un quinceavo de la luz del arco:

$$e = L/15$$

añadiendo un pie para el caso de que las piedras sean blandas.

- para $L < 40$ pies, como para pilas y cepas, emplea una regla que produce claves proporcionalmente cada vez más gruesas.

Los valores de la tabla están representados en la figura 7.15.

77. Op. cit. pág. 363.

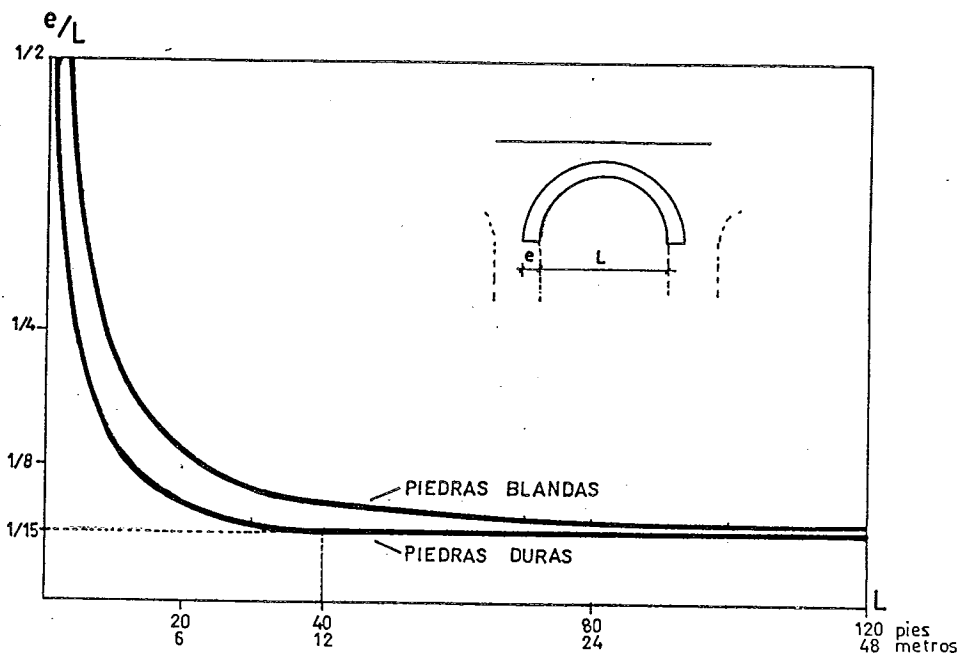


Figura 7.15. Dimensionamiento de arcos

Gautier aconseja que estos valores se corrijan en función de las condiciones particulares del material y de la obra, aunque para él son básicamente correctos. Afirma finalmente:

Cette Table résout la question du présent Chapitre, et fait voir la longueur des Voussoirs depuis leur intradosse à leur extradosse sur une proportion qu'on a tirée des Auteurs, et des Ouvrages antiques, que l'on ne peut réduire dans de justes Regles de Géométrie pour la démontrer, n'ayant tablé que sur l'expérience de la solidité des pierres plus ou moins dures ou compactes sur lesquelles roule toute la question. Ainsi la Physique y a plus de part que la Méchanique, et que les Démonstrations géométriques.⁷⁸

Ensayo sobre un modelo de arco a escala:

Para convencerse de la bondad de la regla expuesta Gautier realiza un ensayo sobre un modelo a escala. Se trata del primer ensayo de este tipo, después de los realizados por Leonardo.

Pour être plus sûr de toutes ces idées que je viens de donner au sujet de la poussée des Arches, des voûtes, de la portée des voussoirs, j'ai voulu me convaincre par une expérience.⁷⁹

78. Op. cit. pág. 372.

79. Op. cit. págs. 372-373.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

El modelo (véase Figura 7.16) consiste en un semiarco formado por nueve dovelas de madera unidas 'a hueso' sin mortero ni pegamento. El espesor se ha tomado empleando la regla anterior y es aproximadamente el quinceavo de la luz total. Gautier extrae varias conclusiones de su ensayo, la más importante de las cuales es la importancia de cargar los riñones para asegurar su estabilidad.

Para el presente estudio lo más importante es que pone de manifiesto que Gautier sabía que el problema de la estabilidad es un problema de geometría, independiente de la escala.

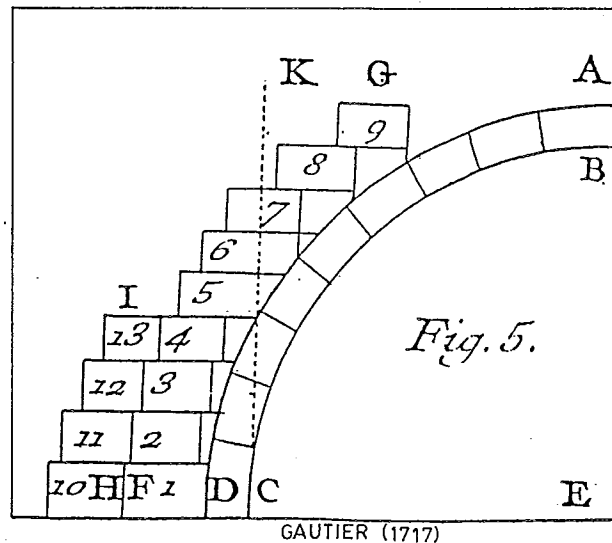


Figura 7.16. Ensayo de Gautier

7.4.1.d Arco ideal

Antes de responder a esta pregunta, Gautier expone su teoría sobre la variación del empuje en los arcos que, dice, depende fundamentalmente de la relación flecha/luz.

... les poussées de toutes les Arches à divers surbaissements, sont aux poids dont on les charge comme leurs différentes inclinaisons aux largeurs des culées qu'on oppose pour leur résister: on trouvera que celles qui ont leurs poussées moins inclinées seront capables de supporter des fardeaux plus grands, que celles qui approchent le plus de la plate-bande, qui

est celle de toutes les figures la plus forcée et la plus rampante, ou plutôt de niveau.⁸⁰

Con este argumento, y tras una disgresión ininteligible, concluye que el arco capaz de resistir cargas más fuertes es el apuntado.

Par cette démonstration on conclut facilement que l'Arche Gothique est celle qui est capable de supporter des fardeaux plus pesans que celle à plein cintre, celle ci plus que l'ellipse, et enfin cette derniere plus que la plate-bande.⁸¹

7.4.2 Danizy

Como hemos visto en la Primera Parte, este oscuro ingeniero francés ha pasado a la historia de la teoría de las estructuras por ser el primero en realizar ensayos sistemáticos sobre modelos de arcos, con vistas a averiguar la forma correcta de colapso.

Desde el punto de vista de las reglas empíricas, su contribución es importante, por dos aportaciones completamente originales:

1) es el primero en darse cuenta del carácter asintótico de la curva que define el contrafuerte necesario de un arco o bóveda en función de la altura. Es decir, es posible deducir una regla de dimensionado de contrafuertes que sea correcta aunque no tenga en cuenta la altura⁸², si se toma el valor de la asíntota o uno próximo a él.

2) demostrado esto, intenta definir una nueva regla, donde no considera la altura, pero sí el espesor de la bóveda en la clave.

Danizy no llegó a publicar su prometida memoria de la que sólo se con-

80. Op. cit. pág. 375.

81. Op. cit. pág. 376.

82. Este era uno de los argumentos más repetidos para demostrar la falsedad y el carácter acientífico de la regla de Martínez de Aranda/Derand, u otras similares que no tuvieran en cuenta la altura del contrafuerte. Por ejemplo, véase, Belidor *La Science des Ingenieurs*. Paris: 1729, Libro II, pág 6, donde critica que la citada regla no considere ni la altura ni el espesor de la bóveda: "On voit que dans cette regle il n'est fait aucune mention de l'épaisseur de la voûte, ni de la hauteur des piédroits qui sont pourtant deux circonstances auxquelles il faut avoir égard absolument...".

serva el extracto publicado en los anales de la academia de Montpellier⁸³ y las referencias, bastante completas, que sobre ella hace Frézier en su libro de estereotomía⁸⁴.

Sobre el carácter asintótico de la curva de los espesores de los contrafuertes para resistir el empuje de una bóveda dada, tema fundamental a la hora de evaluar las reglas geométricas y proporcionales, hemos dedicado un apartado en la Tercera Parte. La exposición de Danyzy la recoge Frézier como addenda al problema titulado *La direction de la poussée d'une voûte, sa pression ou poussée, et la hauteur du piédroit étant donnés, trouver son épaisseur*.⁸⁵

7.4.2.a Regla de Danyzy

La preocupación de Danyzy era, probablemente, deducir una regla relativamente sencilla para dimensionar los contrafuertes, que pudiera ser aplicada en obra sobre la montea de la bóveda (dibujada ésta sobre el suelo o sobre una pared, a escala o a tamaño natural). Como primera simplificación no considera la altura del contrafuerte, dándole una dimensión que va a favor de seguridad.

J'y ai pris ... certain licences qui pourroient vous faire juger que je me suis trop écarté de la rigueur géométrique; je dois vous avertir que j'ai cru devoir le faire ainsi en faveur des ouvriers qui préfèrent des pratiques aisées, quoique moins géométriques, aux méthodes plus exactes. C'est dans cette idée qu'il a apparemment supprimé l'effort vertical pour fortifier le piedroit au delà de nécessaire, et qu'il confond dans l'usage les inégalement surbaissés, ou plus ou moins surhaussés sur un même diametre horizontal.⁸⁶

A continuación da dos métodos, uno analítico y otro gráfico. El método

83. A. A. H. Danyzy, A.A.H. "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-. No hemos podido consultar este extracto; la referencia está tomada de J. Heyman, *The Masonry Arch*. Chichester: 1982, pág. 113.

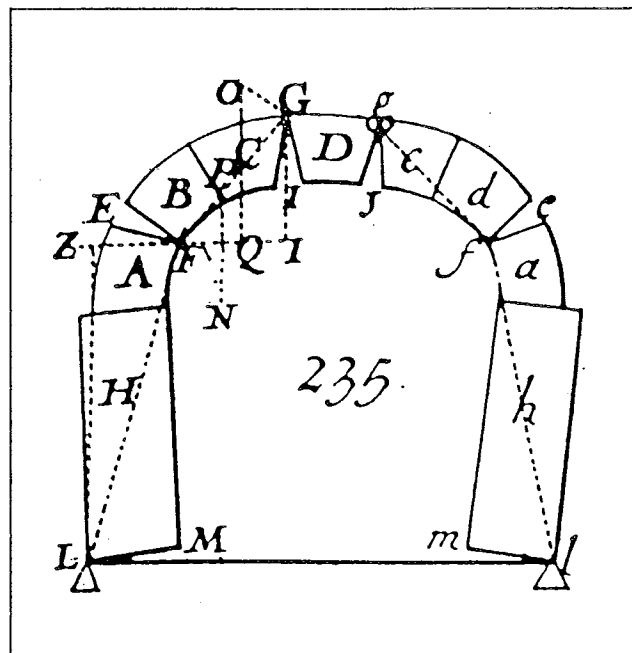
84. A. F. Frezier, *La théorie et la pratique de la coupe de pierres...* Strasbourg/Paris: Charles-Antoine Jombert, 1737, 1768 y 1789. 3 vols.

85. Op. cit. Vol. 3, págs. 374-377.

86. Frézier, op. cit. Vol. 3, pág. 388.

análitico tiene la forma de una receta de cálculo paso a paso. No menciona las hipótesis sobre empuje de las bóvedas que le han llevado a esta solución; en este sentido se parece a las reglas prácticas deducidas por Bélidor a partir de las hipótesis de la Hire. El proceso es el siguiente (véase la Figura 7.16):

Elle consiste à mener en quelque part de la ligne oblique GF, une ligne à-plomb GI, et une horizontale, FI, pour avoir le triangle FIG. On toisera ensuite la surface FEef avec celle des murs qui sont bâtis sur cet arc FEef; on en multipliera la moitié par la ligne horizontale FI; on divisera le produit par le double de l'oblique FG, et on tirera ensuite la racine quarré du quotient. Pour les platebandes, on prendra se nombre trois fois, pour les arcs surbaissés deux fois et demi, pour les arcs en plein cintre deux et un quart, et pour les surmontés deux fois...⁸⁷



DANISY (1732)

Figura 7.17. Dibujo original de Danyzy

Danyzy propone también un procedimiento geométrico, objetivo final de su investigación. El desarrollo está explicado, paso a paso, manteniendo la terminología, en la Figura 7.18. Para el dibujo original de Danyzy, véase la figura 7.17).

87. *Ibidem.*

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

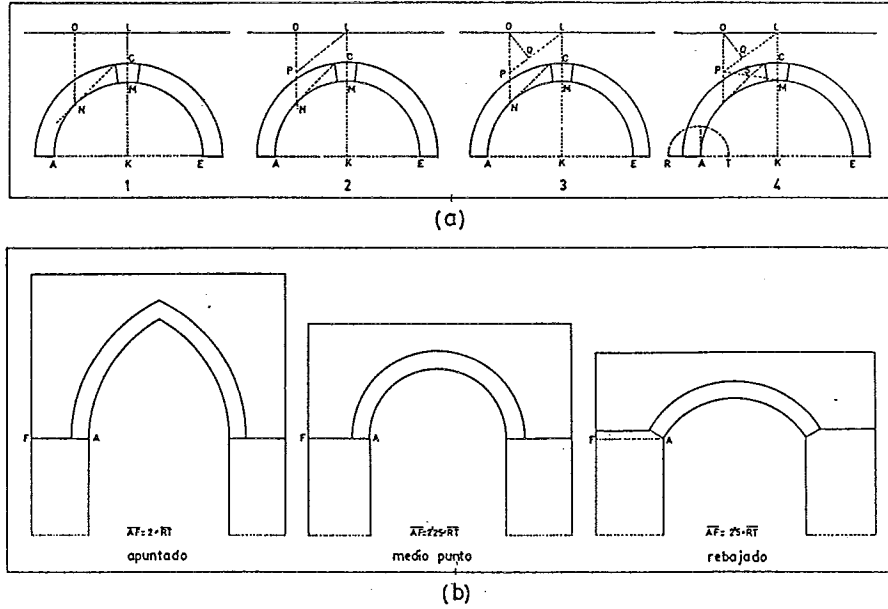


Figura 7.18. Método geométrico de Danyzy

Après avoir tracé en grand sur un mur, ou en petit sur le papier, l'épure de l'arceau **ABCDE**, les ouvriers diviseront cet arceau en deux également par la ligne **KN** à plomb, qu'ils prolongeront jusqu'en **L**, qui rencontre le plus haut **GH** du mur **FGHI** qui est soutenu par l'arceau. De l'extrémité **C** de la clef à l'extrados, et du point d'atouchement **N**, ils meneront la ligne **NO**; ils feront **PL** parallèle à **NC**, et par le point **O** ils abaisseront la perpendiculaire **OO** sur l'oblique **PL**; il faudra ensuite porter la ligne **OO** de **A** en **R** sur l'horizontale **FI**; il faudra encore porter de **A** en **T** la partie **PS**, moitié de **PN**, et par le point **V**, milieu de **RT**, décrire avec une ouverture de compas égale à **RV**, le demi-cercle **RXT**. Par le point **A** on mènera la ligne à plomb **AX**, et ce sera cette longueur **AX** qu'on prendra trois fois pour les platebandes, deux fois et demi pour les arcs surbaissés, deux et un quart pour ceux à plein-cintre, et deux fois pour les gothiques ou à tiers-point; si on porte cette valeur de **A** en **F**, **AF** sera l'épaisseur qu'on peu donner au piédroit, et quoiqu'on pût absolument la donner moindre, c'est toujours hasarder, et il vaut beaucoup les faire trop forts que trop foibles.⁸⁸

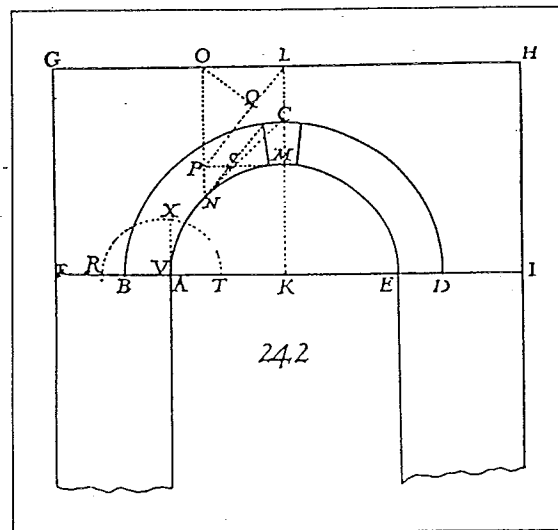


Figura 7.19. Dibujo original

DANISY (1732)

88. Op. cit. págs. 388-389.

7.4.3 Frézier

Amédée-François Frézier, ingeniero militar francés, fue el autor de uno de los libros de estereotomía más populares del siglo XVIII. Su libro titulado *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils et militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture*,⁸⁹ tuvo, además de la edición original (1737-39), otras dos reimpresiones (1754 y 1769).

El libro es importante para el tema que nos ocupa por los comentarios y reglas que incluye sobre el diseño de arcos, en el primer volumen, así como por el capítulo dedicado al empuje de las bóvedas y cálculo de contrafuertes, en el tercer volumen.

7.4.3.a Diseño de arcos: espesor de las bóvedas en la clave

Frézier se plantea el problema del diseño de los arcos en base al empleo de una regla simple, al alcance, dice, de aquellos que desconocen el cálculo algebraico.⁹⁰

On me demandera peut-être ici quelque règle, tirée de l'expérience, touchant l'épaisseur des voûtes à la clef, sur laquelle on puisse raisonnablement compter, sans avoir recours au calcul algébrique, dont tout le monde n'est pas capable, et auquel les causes physiques ne sont pas sujettes, sans quelque correction, comme dans cet exemple des pierres plus ou moins dures.⁹¹

Afirma, con razón, que la regla deberá depender del tipo de cargas que vaya a soportar el arco; así, distingue entre aquellos arcos que deben soportar el paso de grandes cargas, los puentes, y los que solamente recibirán cargas pequeñas o únicamente su propio peso, como las bóvedas de los edifi-

89. A. F. Frézier *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils et militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture*. Strasbourg/Paris: Charles-Antoine Jombert, 1737-1739. 3 vols.

90. Se trata de un 'farol' por parte de Frézier. Como hemos visto, el problema del diseño de arcos, especialmente de puentes, con cargas puntuales móviles, presenta una considerable complejidad teórica, fuera de su alcance dado el bagaje teórico de la época.

91. *Op. cit.*, Vol. 1, pág. 105.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

cios o de las iglesias.

... qu'il faut premierement fait attention aux usages de las voûtes; il en est qui doivent porter de gros fardeaux inégalement dispersés sur leur surface, comme sont les arcs de ponts, sur lesquels passent de pesantes voitures; il en est qui en portent peu, comme des voûtes sur lesquelles on appui quelques pieces de charpente; il en est qui ne portent rien du tout, comme plusieurs voûtes d'églises, dont la charpente porte sur les murs.⁹²

Arcos de puentes: En el primer caso cita las reglas de Alberti (1/10 - 1/12 de la luz) y Palladio (1/15 de la luz), si bien atribuye esta última a Alberti, siguiendo, erróneamente, a Gautier.

Al'égard des voûtes de la première espece, on remarque dans quelques ponts antiques, que leur épaisseur à la clef est au plus la dixième du diametre de l'arche, et plus ordinairement le douzieme, et que le moins qu'on puisse leur donner, suivant le sentiment d'un bon Architecte, Leon Baptiste Alberti, est la quinzieme.⁹³

Arcos y bóvedas de cañón en los edificios: En este caso considera suficiente tomar como canto del arco en la clave 1/24 de la luz, que es la proporción que presenta la bóveda de cañón de la nave principal de San Pedro en Roma. Advierte, sin embargo, que es preciso aumentar el espesor al doble hasta los 30° a partir de los arranques.

Lorsque les voûtes ne portent rien, il suffit de leur donner moitié moins d'épaisseur, que je réduis à une vingt-quatrième partie du diametre, c'est-à-dire, un demi pouce par pied; une raison est que la voûte de la nef de l'église de Saint-Pierre de Rome, qui est des plus grandes que je sçache, et qui n'est pas même absolument sans charge, puisqu'elle porte une partie de la charpente de la couverture, est à peu près dans cette proportion ...; sur cette principe une voûte de 28 pieds de diametre auroit 14 pouces à la clef, ce qui paroît assez conforme à la construction ordinaire, pourvu que les reins soient épaissis au moins du double à 30 degrés de hauteur au dessus de la naissance, ou butés par quelques lunettes.⁹⁴

La regla es válida para arcos de medio punto y Frézier afirma que conoce de bóvedas apuntadas que presentan un espesor de la mitad del estipulado, pero afirma que eso se debe a su forma particular y que si las mismas bóvedas fueran de medio punto colapsarían:

92. *Ibidem.*

93. *Ibidem.*

94. *Op. cit. págs. 105-106.*

... voûtes gothiques en tiers point de 24 et 25 pieds de rayon subsistent avec une épaisseur de 5 et 6 pouces, laquelle devroit être du double suivant nôtre regle, prenant le rayon des gothiques pour diametre ou largueur de la voûte, comme il est en effet; il est vrai que ce n'est que dans des arcs de 60 degrés; car je doute qu'elles esussent subsisté à 90 degrés, si elles n'avoient en qu'un cintre.⁹⁵

Ventajas de los arcos apuntados: Frézier es muy consciente de la mejor forma de los arcos apuntados a la hora de soportar su propio peso. Sin embargo, este ingeniero de la 'edad de la razón' los rechaza por motivos puramente estéticos. Los comentarios reflejan un buen conocimiento de las estructuras góticas y dan más luz sobre su ligereza que las numerosas y recientes contribuciones que se han publicado en los últimos años sobre el particular (véase Bibliografía, apartado C.3.2)

Cette construction est désagréable à la vue, à cause del'angle que forment à la clef les doëles de chaque pendentif; mais elle avoit ces avantages:

1° Qu'elle donnoit le facilité d'exécuter les voûtes avec très-petits voussoirs, sans façon; car ils étoient souvent à l'équerre sans coupe, ce qu'on appelloit des "pendans".

2° Ils coûtoient peu de dépense.

3° Ils rendoient les voûtes légères, et cependent de longue durée, comme nous le prouvent la plupart de nos anciennes églises.

4° Cette légereté diminoit encore la dépanse des piliers et piedroits, qui étoient contretenus facilement par quelques arcbutants aussi légers, mais suffisans pour résister à la poussée des voûtes.⁹⁶

Como consecuencia de todas estas ventajas, Frézier tiene que reconocer que los edificios góticos requerían una cantidad de material considerablemente menor a los que se edificaban en su época (más adelante veremos que el Padre Pontones es de la misma opinión), pero rechaza este tipo por motivos estéticos, ya que da lugar a edificios 'disformes'.

Les Architectes de ce temps-là faisoient de grands et bons ouvrages avec beaucoup moins de frais que nous ne faisons aujourd'hui, par la seule disposition de ceintres de leurs voûtes,

95. *Op. cit. pág. 106.*

96. *Op. cit. pág. 112.*

mais ils étoient disformes.⁹⁷

7.4.3.b Empuje de bóvedas y cálculo de contrafuertes

El tercer volumen de la obra de Frézier está dedicado a las bóvedas, y en él dedica el capítulo XII al problema de la construcción de las bóvedas que, según él, consiste fundamentalmente en: a) dimensionar los contrafuertes en función del empuje de las bóvedas; b) dimensionar las cimbras que han de sustentar las bóvedas hasta su terminación.

El primer apartado nos interesa. Con espíritu enciclopedista Frézier realiza un examen del estado de los conocimientos sobre el empuje de las bóvedas y el cálculo de contrafuertes; pasa revista, detalladamente y con ejemplos de aplicación, a todas las contribuciones realizadas hasta la fecha: fundamentalmente, las teorías de La Hire, Couplet y Danizy (véase la Introducción para un examen más detallado), y realiza el primer intento de análisis estructural de las bóvedas compuestas. A efectos de la presente Tesis nos importa resaltar tres aspectos: su actitud hacia las reglas empíricas y sus comentarios sobre las bóvedas compuestas, en particular sobre las cúpulas y las bóvedas de crucería.

Reglas empíricas: Frézier reconoce la necesidad de determinar de antemano, antes del descimbramiento, las dimensiones de los contrafuertes de las bóvedas, pero critica las reglas dadas en los anteriores tratados de estereotomía, y les atribuye numerosos accidentes:

...les auteurs qui ont traité de la coupe des pierres, ont cru devoir donner des regles pour déterminer l'épaisseur des piédroits, afin qu'ils ne soient pas renversés par l'effort que elles [les voûtes] font pour s'ouvrir; mais malheureusement ils n'en ont donné que de mauvaises, qui ont sans doute eu beaucoup de part à ces fâcheux accidens de chûtes prématurées, qui ont couvert les architectes qui s'étoient fiés à cette regle, d'une honte ...⁹⁸

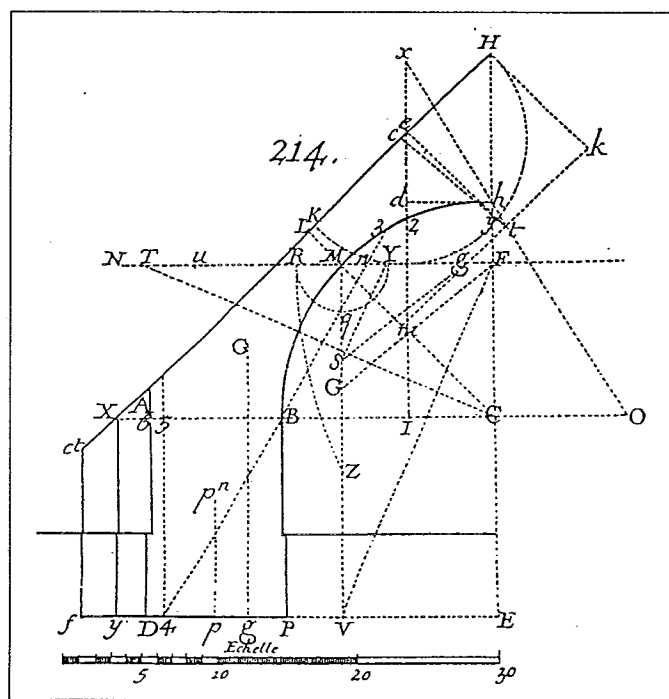
97. *Ibidem.*

98. *Op. cit.*, Vol. 3, pág. 345.

Cita específicamente en este sentido las reglas de Martínez de Aranda/Derand y de Gautier, así como la de Danyzy. Los argumentos son los mismos que los empleados por Bélidor, ya comentados más arriba, de que la regla no tiene en cuenta la altura de los contrafuertes, ni el espesor y carga de la bóveda que sustentan.

Más adelante, además, compara los resultados numéricos obtenidos por el método de la Hire con los obtenidos aplicando las reglas de Martínez de Aranda/Derand y de Gautier⁹⁹, para ciertos casos de bóvedas. Concluye en tono despectivo:

Il est étonnant qu'aucun de ces faiseurs de regles n'ait senti qu'il falloit plus d'effort pour soutenir une grande charge qu'une petite, le diametre du ceintre restant toujours le même, et qu'un piédroit fort élevé est plus facile à renverser que celui qui est si court qu'il n'est presque pas distingué de la naissance.



FREZIER (1769)

Figura 7.20. Comprobación de la regla de Martínez de Aranda/Derand. El contrafuerte que da la regla de Martínez de Aranda/Derand viene marcado por el punto 4 en la base. El obtenido por el método de la Hire está marcado por el punto y.

99. Le dedica un apartado titulado *Comparaison et remarque importante sur les regles des Auteurs qui ont traité de la poussée des voûtes*. Op. cit. pág. 355.

100. *Ibidem*.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Bóvedas compuestas: Frézier dedica un largo apartado a considerar el empuje de las bóvedas compuestas.¹⁰¹ Se trata de la primera vez que se intenta un análisis de este tipo, como él mismo señala.

Les Auteurs qui ont travaillé à résoudre le Probleme de la Poussée des Voutes, n'ont fait attention qu'à celles des Berceaux et des Platebandes ... sans faire aucune mention de celles des autres especes dont les surfaces intérieures sont de différentes figures ... ce qui méritoit cependant d'être mis en question, parce que les Berceaux simples ne sont pas les Voutes les plus usitées dans le bâtimens civils.¹⁰²

El método de análisis propuesto consiste en tratar de comparar el empuje de estas bóvedas con el de bóvedas de cañón de directriz análoga, descomponiendo las bóvedas en un conjunto de bóvedas simples considerando una serie de cortes.

Je vais tâcher de suppléer à cette omission autant qu'il est nécessaire pour la pratique, en rapportant toutes sortes de Voutes aux cylindriques par des conséquences tirées de la spéculation et de l'expérience.¹⁰³

El método es el mismo al empleado por Heyman para estudiar este tipo de bóvedas, aplicando los teoremas del análisis límite, como hemos visto en la Primera Parte.

Cúpulas de revolución: Frézier, sin embargo, no da solución numérica a ninguno de los problemas planteados, limitándose a indicar cuál sería el proceso de cálculo. Solamente para el caso de las cúpulas de revolución deduce una regla simple, que tendría gran difusión: *el contrafuerte necesario para una cúpula de revolución es la mitad del que precisaría una bóveda de cañón seguido de la misma directriz*. No entraremos en el detalle de los argumentos de Frézier, algo largos, si bien básicamente correctos, y citaremos solamente su conclusión.

... on reconnoitra que ces sortes de voûtes poussent plus de la moitié moins que les berceaux simples, de même ceintre, diametre et épaisseur, ou charge, et par conséquent qu'en ne donnant

101. *De la poussée des voûtes composées, et de plusieurs simples, qu'on peut considerer comme composées.* Op. cit. págs. 392-411.

102. *Op. cit. pág. 392.*

103. *Op. cit. pág. 393.*

à leurs piédroits que la moitié de celle des berceaux conditionnés de même, ils seront encore plus fortes qu'il n'est nécessaire pour les mettre en équilibre avec la poussée.¹⁰⁴

Bóvedas de arista: A pesar del disgusto que le provocaban, desde el punto de vista estético, las construcciones góticas, Frézier parece haber dedicado un tiempo considerable a reflexionar sobre su comportamiento y sus ventajas estructurales. Al hablar de los arcos y bóvedas de cañón ya consideró el tema (véase más arriba).

Al tratar la estereotomía de las bóvedas de arista, realiza una descripción detallada de su construcción y ventajas estructurales. En el citado apartado sobre el empuje de las bóvedas compuestas, casi la mitad del mismo está destinado a este tipo de estructuras.

Aunque no da ninguna regla para el dimensionamiento de los contrafuertes de este tipo de bóvedas, sus observaciones están llenas de interés y llaman la atención sobre ventajas y aspectos de este tipo estructural, que han pasado desapercibidas a posteriores comentaristas como Viollet, Ungewitter, Mark o Heyman.

En primer lugar define geoméricamente este tipo de bóvedas, considera su posible origen y justifica su interés por ellas en base a la necesidad, en ocasiones, de realizar intervenciones y reparaciones en este tipo de estructuras:

On appelle Voûtes "Gothiques", ou selon le P. Derand, Voûtes "Modernes", et à "Augives", celles dont les cintres perpendiculaires à leurs directions sont composez de deux arcs de cercles, traçez de differens centres, faisant un angle rentrent à la clef.¹⁰⁵

....

La mode de ces Voûtes que nous tenions des Gots, ou plutôt selon quelques Antiquaires des Maures, est tellement abolie qu'on n'en fait plus de cette espece dans les nouveaux Bâtimens; mais comme dans les réparations des anciens Cloîtres, Eglises, ou autres Edifices, il se présente des occasions de rétablir quelques parties, il est nécessaire d'en connaître le Trait.¹⁰⁶

104. *Op. cit.*, pág. 406.

105. *Op. cit.*, Vol. 3, pág. 24.

106. *Ibidem.*

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Realiza una observación importante sobre su geometría. Las superficies de estas bóvedas son raramente cilíndricas [en particular en el gótico tardío], sino que cada plemento es una porción de esferoide irregular con doble curvatura.

... les doëles des Voûtes d'arêtes Gothiques, sont très rarement des portions de surfaces Cylindriques, comme à nos Berceaux et Voutes d'Arêtes Antiques, qui sont usitées dans l'Architecture Moderne; mais chaque Pandantif est une portion triangulaire d'un espece de Sphéroïde irrégulier, dont la surface se courbe depuis sa naissance insensiblement, suivant la direction de la clef, à mesure qu'elle en approche, de sorte que chaque Pandantif est une surface à double courbure...¹⁰⁷

Los nervios son el principal objeto de la estereotomía, ya que los plementos, dado su poco espesor, consiguen la curvatura simplemente variando el espesor de la capa de mortero. Esto reduce extraordinariamente el volumen de piedra tallada, mucho más cara, en la construcción de estas bóvedas.

... leurs Nervures [de las bóvedas góticas] en sont le principal objet pour la coupe des pierres, en ce qu'il n'est preque jamais question d'Appareil pour les Pandantifs que ces nervures terminent, à cause que leur peu d'épaisseur rendroit la coupe presque insensible dans chaque Voussoir; c'est pourquoi on se contente ordinairement de les faire de petites pierres, sans coupe, qu'on appelle "Pandans", pour lesquelles le mortier est un peu plus épais à l'extrados qu'à la doële, fait l'office de la coupe d'un Voussoir.¹⁰⁸

Las directrices de los nervios son siempre arcos de círculo. Cada dovela se fabrica, pues, con la misma saltaregla.

Les Courbes de ces cintres son arbitraires, cependant on n'y employe jamais que des Arcs de Cercles.¹⁰⁹

A continuación, como al estudiar los arcos apuntados, Frézier dedica un apartado, *Remarque sur les voûtes gothiques*, a comentar las ventajas de este tipo de estructuras.

Las rechaza, como hemos visto, por motivos puramente estéticos, si bien reconoce que este tipo de bóvedas reúne una serie de ventajas sobre las usadas en su época.

107. *Ibidem*.

108. Op. cit. pág. 25

109. *Ibidem*.

Si les doëles des Voûtes Gothiques n'étoient pas en quelque façon brisées, et interrompues au milieu sous la clef, par un angle rentrant qui est désagréable à la vue, elles serient sans doute préférables à nos nouvelles Voûtes, par plusieurs raisons.¹¹⁰

Frézier deduce que las ventajas de este tipo de bóvedas se derivan fundamentalmente del poco espesor de los plementos. Esto se traduce, directamente, en un menor consumo de material y en una mayor facilidad de ejecución.

La premiere, est que la grande inclinaison de leurs pendantifs ... permet qu'on les fasse extrêmement minces et legeres, de-là suivent plusieurs avantages.

1° Qu'elles consomment beaucoup moins de materiaux.

2° Qu'elles sont d'un plus facile et plus prompte exécution, parce que les materiaux étant plus petites sont plus faciles à transporter, et à mettre en oeuvre.

3° De-là suit qu'elles coutent beaucoup moins en dépense de consommation, et en journées d'ouvriers.

4° Qu'il y a moins de sujétion pour la taille des Voussoirs, où l'on n'est asservi à aucune coupe pour les lits; parce que leur épaisseur n'étant que d'environ 5 à 6 pouces, on n'y a pas d'égard à la coupe, à laquelle on peut supplier par un peu de mortier, plus épais à l'extrados qu'à la doële; de sorte qu'on y employe des petites pierres taillées à l'équerre, qu'on appelle "Pandans".¹¹¹

Esta mayor ligereza trae como inmediata consecuencia un menor empuje contra los contrafuertes y el consiguiente ahorro, en una zona de la estructura que, al tener que ser de cantería, es de mayor coste que, por ejemplo, los muros intermedios.

La seconde raison qui leur donne un grand avantage sur les nôtres, c'est qu'étant plus legeres et inclinées, elles font beaucoup moins d'effort pour renverser les murs, sur lesquels elles sont élevées par conséquent elles épargnent une grande épaisseur, qu'il faut donner aux piédroits, qui soutiennent des Voutes en plein cintre, ce qui est une forte raison de diminution de dépense.¹¹²

Más adelante, da una tercera razón. A la hora de cubrir un espacio rectangular, una bóveda de arista produce una superficie menor que las correspondientes de cañón o rincón de claustro, de la misma cimbra.

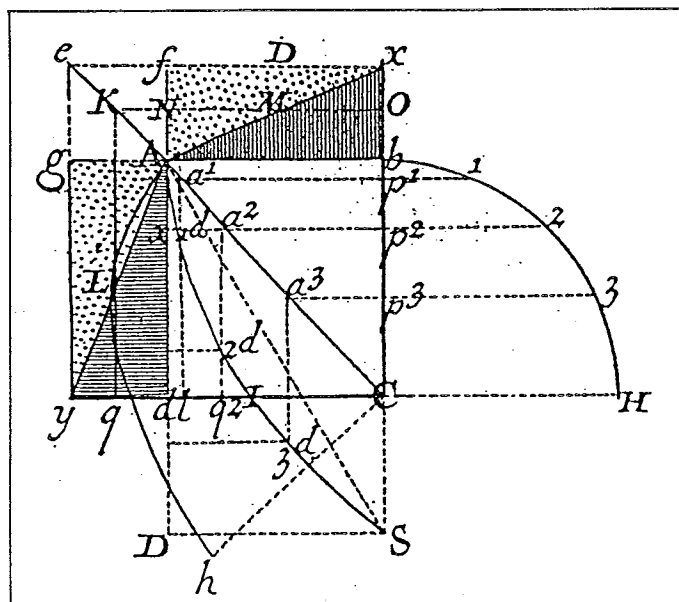
Il faut remarquer que par cette composition et disposition de portions de berceaux qui se croisent, il résulte une voûte dont la surface est moindre que celle du berceau simple qui couvrirait le même espace du rectangle ... parce chacun des pendantifs est moindre que la huitieme partie d'un tel berceau, quoiqu'il le paroisse ainsi dans sa projection. Pour en connoître la difference, il n'y a qu'à faire le developpement d'un de ces pendantifs...¹¹³

110. Op. cit. Vol. 3, pág. 30.

111. *Ibidem*.

112. Op. cit. Vol. 3, págs. 30-31.

113. Op. cit., Vol. 3, pág. 401.



FREZIER (1769)

Figura 7.21. Comparación de superficies: bóvedas de arista, de cañón y en rincón de claustro. Las superficies de la mitad de un cuadrante son: bóveda de arista $A2SD$; bóveda de cañón ADS ; bóveda en rincón de claustro $A2bS$.

Hemos calculado las superficies, sobre un mismo rectángulo, para la solución en bóveda de cañón, de crucería y en rincón de claustro. Efectivamente, como se deduce sin más que mirar la figura del tratado de Frézier, la menor superficie se obtiene con la bóveda de crucería. El empleo de la bóveda de cañón produce un incremento del 20 % y el de la bóveda en rincón de claustro de un 32 %.

Teniendo en cuenta todas las ventajas antedichas, Frézier no se extraña que este tipo de construcción, a pesar de su menor belleza, haya pervivido durante tantos siglos. Afirma incluso que empleando la arquitectura 'masiva' de su época no hubieran podido construirse edificios de ese tamaño.

*Il n'est donc pas étonnant que la mode de ces Voutes ait duré si long-temps, et qu'on en voye encore aujourd'hui un si grand nombre en Cloîtres, en Eglises, et autres Bâtimens publics, lesquels n'auroient peut être pas été bâtis, si l'objet de la dépense avoit été aussi grand qu'il est aujourd'hui, suivant nôtre Architecture massive; il est vrai aussi, que celle-ci l'emporte sur la Gothique en beauté et en solidité.*¹¹⁴

114. Op. cit., Vol. 3, pág. 31.

7.4.4 Bélidor

Bélidor fue el principal difusor de la teoría de La Hire durante el siglo XVIII y el primero, como hemos visto en la Introducción, en aplicarla a la obtención de tablas de espesores de contrafuertes para los almacenes de pólvora. Sorprendentemente, en su monumental obra póstuma *L'Architecture Hydraulique*¹¹⁵, en vez de aplicar los nuevos métodos de cálculo, recomienda unas reglas empíricas para el dimensionado de las pilas, contrafuertes y arcos de los puentes. Estas reglas tuvieron una difusión extraordinaria, y vinieron a reemplazar las de Gautier, demasiado conservadoras.

7.4.4.a Pilas

Las reglas sobre las pilas de los puentes son válidas, según Bélidor, cuando la altura de éstas desde la cimentación hasta el arranque de los arcos no supera, los seis pies.

Arcos de medio punto: Para los arcos de medio punto da una regla compleja, donde las dimensiones de la pila son función del tamaño, si bien, en una cierta función inversa. Es decir, cuanto más pequeño es el puente mayor es la pila en relación con la luz que cubre. Como vimos en el caso de Gautier, esta relación 'inversa' procede de la influencia cada vez menor de las cargas puntuales a medida que el puente aumenta de tamaño. La regla de Bélidor conduce a pilas más esbeltas. Expresada algebraicamente toma la siguiente forma:

luz (pies)	espesor de la pila (pies)
$L < 48$	$L/6 + 2$
$48 < L < 96$	$L/6 + 2 - [(L - 48)/24]$
$L \geq 96$	$L/6$

Tabla 7.1. Espesores de las pilas para los arcos de medio punto

115. Belidor *Architecture Hydraulique*. Paris: Charles-Antoine Jombert, 1753. 2 Vols.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Belidor lo expresa en forma discursiva y acompaña el texto con numerosos ejemplos:

Lorsque la hauteur des piédroits n'est que d'environ six pieds, et que les arches sont en plein cintre, l'expérience a fait voir qu'il suffisoit de donner aux piles, pour épaisseur, la sixième partie de la largeur des mêmes arches, en y ajoutant deux pieds, c'est-à-dire que les piles des arches de six toises, doivent avoir huit pieds d'épaisseur prise au-dessus de la dernière retraite, et celles de huit toises de largeur, auront leurs piles de dix pieds d'épaisseur.

Cependant comme pour les arches d'une grandeur extraordinaire, on peut borner l'épaisseur des piles à la sixième partie de la largeur des mêmes arches, pour ne point passer subitement à la suppression totale des deux pieds que nous venons de dire qu'il falloit ajouter à ce sixième; on ne pousse cette augmentation que jusqu'aux arches de huit toises, après quoi l'on réduit pour gradation les deux pieds en les diminuant de trois pouces par toises d'augmentation; c'est-à dire par exemple, que pour une arche de douze toises, qui exigeroit selon la règle précédente des piles de quatorze pieds d'épaisseur, voyant que celle de huit toises est augmentée de quatre, qui, à raison de trois pouces de diminution pour chacune, font un pied, le retranchement des deux dont il s'agit réduit les piles à n'avoir que treize pieds d'épaisseur; par conséquent en suivant la même règle, les arches de seize toises donneront seize pieds pour l'épaisseur de leurs piédroits, parce que la diminution de trois pouces sur chacune des huit toises d'augmentation, réduira les deux pieds à zero. N'étant plus de question pour les arches suivantes, celles qui seront de vingt toises auront leurs piles de vingt pieds d'épaisseur: ainsi des autres.¹¹⁶

Arcos rebajados al tercio: Para los arcos rebajados en los que la flecha es un tercio de la luz, da un regla análoga, donde se toma como base en vez del sexto, el quinto de la luz. Expresándola en forma algebraica podemos formar la siguiente tabla análoga a la anterior:

luz (pies)	espesor de la pila (pies)
$L < 48$	$L/5 + 2$
$48 < L < 96$	$L/5 + 2 - [(L - 48)/24]$
$L \geq 96$	$L/5$

Tabla 7.2. Espesores de las pilas para los arcos rebajados al tercio

El texto de Belidor es el siguiente:

Pour les arches surbaissées du tiers qui n'auroient aussi qu'environ six pieds de hauteur de piédroit, il convient de donner à l'épaisseur de leur pile le cinquième de leur diamètre, plus deux pieds jusqu'à huit toises d'ouverture, et de diminuer ensuite ces deux pieds à raison de trois pouces par toise d'augmentation, comme l'on vient de l'expliquer, ensorte que pour

116. Op. cit. págs. 443-444.

douze toises, trois pieds, les piles doivent avoir quinze pieds d'épaisseur, comme celles du Pont Royal.¹¹⁷

7.4.4.b Contrafuertes o cepas

Obtiene el espesor de los contrafuertes en función del de la pila correspondiente, simplemente incrementando éste en un sexto de su propio espesor. Es decir, algebraicamente bastaría multiplicar las expresiones anteriores, en ambos casos, por 7/6.

A l'égard des culées, leur épaisseur est aisée à déterminer dès que l'on a une fois celle de la première pile qui leur répond, puisqu'il ne s'agit que d'y ajouter le sixième de la même épaisseur; c'est-à-dire, par exemple, que si celle de cette pile étoit de huit pieds, il faudroit y ajouter un pied quatre pouces, afin d'avoir neuf pieds quatre pouces pour l'épaisseur de la culée.¹¹⁸

7.4.4.c Espesor en la clave

Para determinar el espesor de las bóvedas en la clave propone una nueva regla, más afinada que la de Gautier (1/15 luz), que, evidentemente, conducía a espesores excesivos, sin más que comparar con ejemplos de puentes medievales ya construidos.

Arcos de medio punto: Para los arcos de medio punto toma 1/24 de la luz, independientemente del tamaño:

Pour déterminer l'épaisseur des arches à leur clef, on la fait égale à la vingt-quatrième partie du diamètre de celles qui sont en plein cintre;...¹¹⁹

Arcos rebajados: Para los arcos rebajados aplica un procedimiento análogo tomando 1/24 de la luz que tendría un arco de medio punto formado con el radio mayor, y le añade un pie:

...lorsqu'elles sont surbaissées on donne à cette épaisseur la douzième partie du rayon qui a servi à tracer le grand arc ou l'arc supérieur, et l'on ajoute un pied au total;...¹²⁰

117. *Op. cit.* pág. 444.

118. *Ibidem.*

119. *Op. cit.* pág. 445.

120. *Ibidem.*

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Finalmente, advierte que este espesor será suficiente sea la piedra dura (gran resistencia) o blanda (poca resistencia). La precisión venía obligada ya que en sus tablas Gautier distinguía entre ambos casos.

La justificación para no realizar esta distinción la fundamenta Bélidor en que las piedras duras, más resistentes, pesan más, y las blandas, menos resistentes, menos. Sin embargo, el argumento no es válido ya que la variación de resistencias de una piedra dura (granito) a una blanda (caliza blanda) puede ser de 10 a 1, mientras que sus pesos específicos varían en la relación de 1.5 a 1. En realidad, lo que probablemente quería expresar Bélidor, es que para las dimensiones habituales no hay problemas de resistencia, incluso con piedras blandas.

... cette épaisseur sera suffisante, que la pierre soit dure ou tendre, la dernière est à la vérité moins forte et sembleroit exiger plus d'épaisseur, mais aussi elle pese moins à peu près dans le même rapport.¹²¹

7.4.5 Perronet

Jean Rodolphe Perronet, quizá el más grande ingeniero del siglo XVIII francés, director durante 47 años de la prestigiosa *Ecole des Ponts et Chaussées* y autor de algunas de las obras públicas más importantes de su época, como el Puente de Neuilly y el canal de Bourgogne.¹²² Su obra teórica, aunque no muy abundante ejerció una poderosa influencia sobre la evolución del diseño de los puentes en los siglos XVIII y primera mitad del XIX.

7.4.5.a Arcos

Para dimensionar la clave de los arcos de los puentes Perronet da una regla evidentemente inspirada en la de Bélidor, con ligeras modificaciones.

121. *Ibidem*.

122. Existen numerosos estudios sobre la vida y la obra de Perronet. En cuanto a su importancia en la evolución del diseño de los puentes de piedra, véase: B. Heinrich "Jean-Rodolphe Perronet und die Brücke bei Neuilly. Die Vollendung des Steinbrückenbaus in der Aufklärung.", en: B. Heinrich *Brücken. Von Balken zum Bogen*. Hamburg: 1983, pp. 133-171.

La regla aparece mencionada en dos de las memorias de Perronet, publicadas en 1777 (sobre la reducción del espesor de las pilas de los puentes)¹²³ y 1810 (tablas para el dimensionamiento de contrafuertes)¹²⁴, si bien la última de ellas dice expresamente haberse escrito en los años 1750 al 1752.

La regla dice que para determinar el espesor de las bóvedas en la clave se ha de seguir el siguiente procedimiento:

Prendre un vingt-quatrième du diamètre de l'arche, y ajouter un pied et retrancher de cette somme une ligne par pied de diamètre; le reste sera l'épaisseur de la voûte à la clef. Il en est de même pour les voûtes surbaissées en prenant le double du grand rayon pour le diamètre de l'arche.¹²⁵

Si expresamos algebraicamente esta regla (1 pie = 12 pulgadas; 1 pulgada = 12 líneas) obtenemos la siguiente fórmula:

$$C = L/24 + 1 - L/144$$

Es interesante la afirmación de Chezy, responsable de la publicación de la segunda memoria, en el sentido de que se trata de una regla puramente empírica:

... l'épaisseur des voûtes à leurs clefs, celle que M. Perronet a déterminée d'après un grand nombre d'expériences...¹²⁶

7.4.5.b Pilas

Perronet revolucionó el diseño de puentes proponiendo unas proporciones mucho más esbeltas para las pilas de los puentes. Su propuesta fue objeto de una memoria, citada anteriormente, con el título *Mémoire sur la réduction de l'épaisseur des piles et sur la courbure qu'il convient de donner aux voûtes*,

123. 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.

124. J. R. Perronet y Chezy "Formule générale pour déterminer l'épaisseur des piles et culées des arches des ponts, soit qu'elles soient en plein cintre ou surbaissées." *Recueil de divers mémoires extraits de la bibliothèque impériale des ponts et chaussées à l'usage de MM. les ingénieurs*, editado por P. Lesage. Paris: Chez Firmin Didot, 1810. Vol.2, pp. 243-273, lám. XVII

125. Lesage, op. cit., Vol. 2, pág. 246.

126. *Ibidem*.

*le tout pour que l'eau puisse passer plus librement sous les ponts.*¹²⁷ En ella se argumentaba que una de las causas más frecuentes de ruina en los puentes se debe precisamente al excesivo tamaño de las pilas, que reducen la sección de paso del caudal. Esto hace que aumente su velocidad y que se produzcan unas turbulencias en la parte baja de las pilas que terminan socavando sus cimientos. La propuesta de Perronet es la siguiente: dado que en un puente de varios arcos de parecidas luces en las pilas los empujes se anulan unos con otros, produciendo una reacción prácticamente vertical, solamente es preciso dar a las pilas el espesor estrictamente necesario para soportar esta carga. De esta forma se gana espacio para el paso del agua y se reduce considerablemente el problema de las turbulencias. Solamente precisan tener el espesor de un contrafuerte las pilas extremas, cepas.

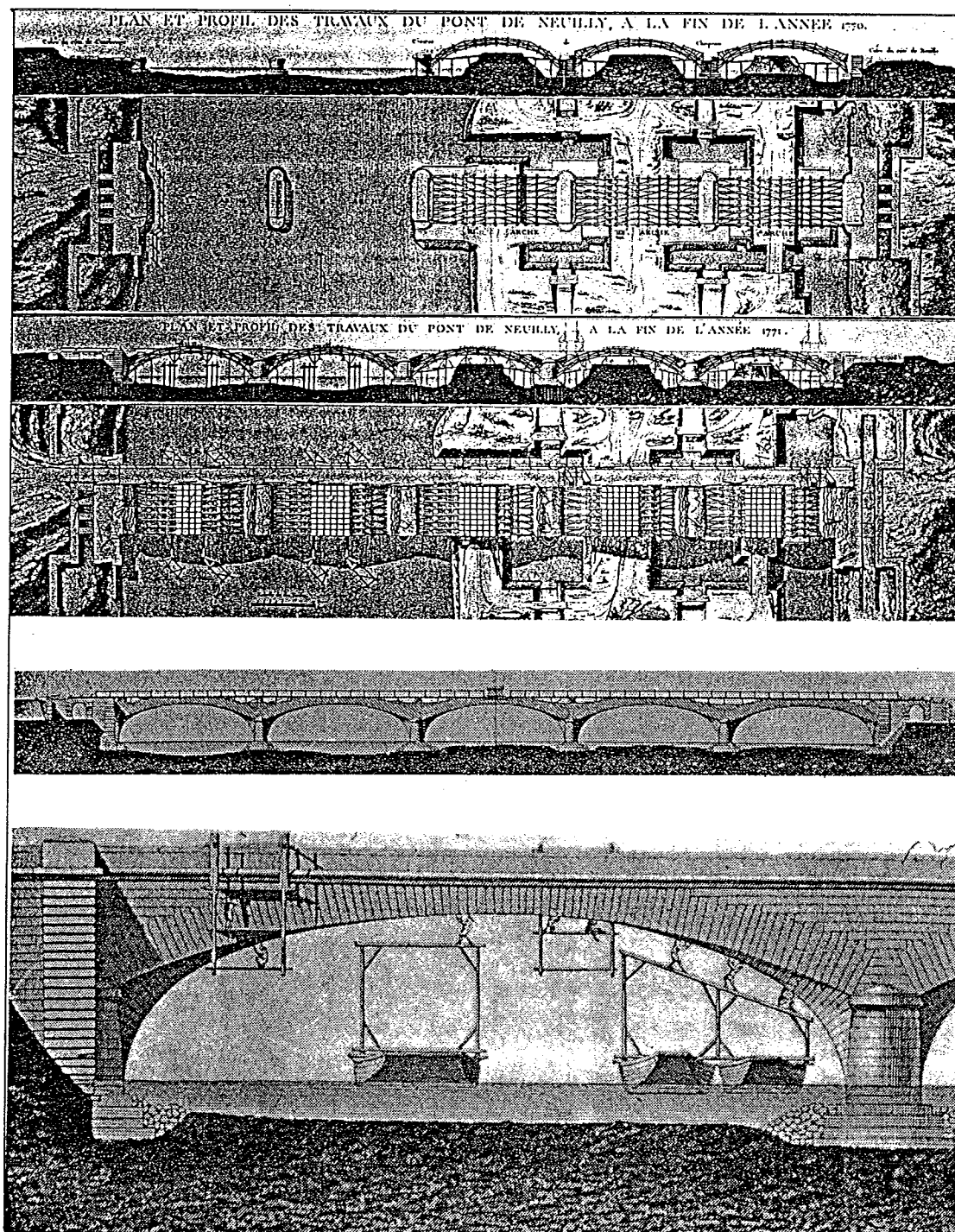
Este sistema tiene dos inconvenientes sobre el tradicional de hacer cada pila estable con el empuje de su arco: a) es preciso construir y descimbrar todos los arcos a la vez; b) el fallo de una de las cepas, conduciría al colapso del puente entero por un mecanismo de 'fichas de dominó'.

Perronet llevó su esquema hasta sus últimas consecuencias en el proyecto y la construcción del puente de Neuilly, donde los arcos muy rebajados (flecha = $L/8$) y las pilas excepcionalmente esbeltas (espesor = $L/9.2$), dan una sensación de extraordinaria ligereza.¹²⁸

El problema, en una época donde la resistencia de materiales no estaba suficientemente desarrollada, en particular en lo que se refiere a la resistencia de las piedras, era determinar el espesor de estas pilas.

127. Op. cit. más arriba.

128. Todo el proceso constructivo aparece descrito con extraordinario detalle en grabados tamaño folio en: J. R. Perronet, *Description des projets et de la construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orleans...* Paris: Firmin Didot père et fils, 1820. 2 vols, texto y atlas de 66 láms.



PERRONET (1820)

Figura 7.22. Puente de Neuilly de Perronet

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

Perronet, tras un razonamiento más que dudoso, propone una regla en función de la luz que le parece aceptable:

On sait que les voussoirs les plus comprimés sont ceux de la partie supérieure des voûtes, sur-tout dans celles qui sont le plus surbaissées. On est dans l'usage de leur donner en longueur de coupe, pour les grandes arches qui sont surbaissées du tiers, la vingt-quatrième partie de leur diamètre; mais comme une pile soutient deux demi-voûtes, on a cru en conséquence devoir leur donner au moins pour épaisseur le double de cette longueur de coupe, et lui ajouter, pour plus de solidité, le tiers ou le quart de cette épaisseur.¹²⁹

Expresando esta regla algebraicamente, obtenemos que el espesor de las pilas debe estar comprendido entre $[L/12 + 1/3(L/12)]$ y $[L/12 + 1/4(L/12)]$, es decir entre:

$$\frac{L}{9} \quad \text{y} \quad \frac{L}{9.6}$$

(Como hemos visto las pilas del puente de Neuilly tienen la proporción 1/9.2)

Perronet realizó una comprobación rápida de la resistencia para el caso del puente de Neuilly y concluyó que las pilas estaban sobradas de resistencia, por un factor de 12, y que podrían haberse hecho todavía más esbeltas, dada la resistencia de las piedras empleadas que habían sido ensayadas por Soufflot.

On a conclu, d'après les experiences qui ont été faites chez M. Soufflot ... et que j'ai répétées depuis chez moi, que pour écraser un pied carré de la pierre de Saillancourt, que j'ai employée au pont de Neuilly, laquelle pèse cent cinquante-deux livres le pied cube, il faudrait la charger d'un poids de deux cent quarante mille livres, ou d'une colonne de même base de 1580 pieds de hauteur de la même pierre: mais j'ai reconnu, par le calcul que j'en ai fait, que la même surface d'un pied des piles du nouveau pont de Neuilly n'était chargé, à la hauteur de la naissance des arches, que d'un poids d'environ vingt mille livres, ou d'une colonne de 121 pieds; en sorte que chaque pile se trouve encore douze fois plus forte qu'il est nécessaire pour supporter le poids dont elle est chargée.¹³⁰

Sin embargo, como hemos visto la resistencia de una fábrica puede ser, normalmente, hasta un orden de magnitud inferior a la de las piedras o ladrillos que la componen. Así pues, parece que desde el punto de vista resistente

129. J. R. Perronet "Mémoire sur la réduction de l'épaisseur...", *Oeuvres*, Paris: Didot, 1820 (1a ed. 1788), pág. 567.

130. *Ibidém*, nota 2.

las pilas estaban casi estrictamente dimensionadas.

7.4.5.d Cepas o contrafuertes

Para el dimensionado de las cepas (contrafuertes) de los puentes, Perronet abandona las reglas empíricas de sus antecesores y emplea el método de la Hire, corrigiendo el punto de rotura en los arcos rebajados (la Hire lo fijaba siempre a 45°) y situándolo en el punto de encuentro de los arcos de distinto radio.

Dimensionando los arcos por la fórmula más arriba citada, y suponiendo los riñones cargados hasta la clave Perronet calculó, en los años 1750-1752, unas tablas de espesores de contrafuertes para arcos de 1 a 100 metros. Estas tablas tuvieron gran difusión y fueron la base para el dimensionamiento de las cepas de los puentes hasta casi 100 años después.¹³¹

7.4.6 Influencia sobre los tratados españoles del XVIII

La mayoría de los tratados españoles de arquitectura y construcción de la segunda mitad del siglo XVIII, muestran una clara influencia de las prácticas y teorías de los tratadistas franceses, en particular de los que se han estudiado más arriba. Así, en la mayoría de los casos, a la hora de estudiar las teorías y métodos sobre construcción y dimensionamiento de bóvedas aplicadas en esa época en España, la cuestión se limita (con las excepciones más arriba estudiadas) a buscar el libro o libros de donde se han tomado éstas. Repasaremos los tratados españoles que nos han parecido más importantes por su contenido o difusión (en cuanto al tema que nos ocupa).

131. En su siglo ya fueron recogidas en uno de los tratados de arquitectura de más difusión: véase, J. F. Blondel y Patte *Cours d'Architecture*. Paris: Vve Desaint, 1777, Vol. 6, págs. 191-205, si bien Patte no cita su procedencia. Ya en el siglo XIX, continuaron empleándose: véase, por ejemplo, el libro de J. M. Sganzin *Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions, avec des applications tirées spécialement de l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées*. 5a ed. Liege: Dominique Avanzo, 1840-44, uno de los manuales más populares del siglo pasado todavía las recoge.

7.4.6.a El padre Pontones

El tratado del padre Pontones no se llegó a publicar y solamente se conserva una copia manuscrita en la Biblioteca del COAM. La copia está muy cuidada, tanto el texto como las figuras y, parece dispuesta para pasar directamente a imprenta. Desconocemos los motivos por los que no se llevó a efecto.

De la consulta de la parte dedicada a la construcción y teoría de bóvedas, se deduce con claridad que la obra está inspirada en *La science des ingenieurs* y en la *Architecture Hydraulique*, ambas de Bélidor¹³², sin embargo, Pontones no se limita a copiar literalmente de sus fuentes, sino que expresa con frecuencia sus opiniones sobre los temas de que trata y alude con frecuencia a obras construidas en España.

A la vida de Fray Antonio Pontones le dedica Llaguno un apartado, y por lo que allí dice parece haber sido un constructor experimentado¹³³. El manuscrito, como aparece en la portada, se empezó a escribir en 1759 (solamente 6 años después de la publicación de la *Architecture Hydraulique*) y se terminó en 1768. El padre Pontones murió en 1774.

Sobre los conocimientos estructurales: elogio de los constructores góticos:
Quizá la parte más interesante del libro sea la introducción donde el padre Pontones expone sus opiniones sobre el problema del dimensionamiento de las estructuras.

Critica, en primer lugar, el estado actual de conocimientos de los que trabajan en el campo de la construcción, y la ignorancia por sus contemporáneos de las leyes de la estática y del equilibrio:

... Ninguno sabe los principios, para hallar las fuerzas activas y resistentes, ignorase que grueso devan tener las murallas, para reforzar los terraplenes a las entradas y salidas de los Puentes, a las de los muelles y calzadas, a los pies derechos de las bobedas, para que

132. Op. cit. más arriba.

133. Llaguno, op. cit., vol. 4, págs. 310-311.

esten en equilibrio por su resistencia, con las pujanzas que estos diferentes trozos de fabrica, deven mantener...¹³⁴

Esta ignorancia, dice, lleva en muchas ocasiones a sobredimensionar las estructuras con el consiguiente gasto. Como Frézier es un admirador de los constructores góticos y pone sus estructuras como ejemplo:

...[las] obras [que] deven sacar toda su firmeza mas de las reglas del Arte que de la abundancia del material, pues si se conociera bien lo que es el mecanismo particular de este asunto se levantarían edificios mas ayrosos que la mayor parte de aquellos que hacen tanto honor a los siglos pasados y no se percibiría cierta timidez quasi propia de las obras modernas: Parecian en esto mas inteligentes los antiguos Architectos: Si les faltavan reglas ciertas y demostradas, obraban con un juicio que participaba de ellas como acreditan los bellos monumentos que nos han dexado...¹³⁵

La admiración por la audacia y equilibrio de las iglesias góticas le lleva a suponer que los maestros góticos disponían de algún tipo de conocimientos que se perdieron. Esta hipótesis, ha sido compartida, como hemos visto, por otros autores, como Hasak¹³⁶ y Hertwig¹³⁷, pero creemos que aquí se enuncia por primera vez. Pontones tras examinarla la descarta y atribuye su éxito a la buena ejecución material y a la adecuada proporción de los contrafuertes.

...son sus Yglesias de una ligereza admirable, parece que se valian de algunos medios extraordinarios que se perdieron con ellos; sin embargo repárese bien y se hallará que todo lo mejor que han hecho no es otra cosa que el buen enlace de los materiales. La situacion y extension de los contrafuertes o estrivos de que usaban con tanto acierto, merecen la admiracion de las gentes que no saben a que atribuirlo por falta de conocer todo el merito de su efecto.¹³⁸

Por último, lanza un sarcástico ataque a los edificios de su época, por lo que el considera un derroche innecesario de materiales, y se maravilla de que en tan poco tiempo se haya perdido la capacidad de realizar estructuras

134. Op. cit. pág. 5.

135. Op. cit. pág. 6.

136. M. Hasak, "Haben Steinmetzen unsere mittelalterliche Dome gebaut?", *Zeitschrift für Bauwesen*, Vol. 45, 1895, 183-218; 363-388.

137. A. Hertwig, "Aus der Geschichte der Gewölbe. Ein Beitrag zur Kulturgeschichte." *Technikgeschichte*, Band. 23, 1934. pp.86-93.

138. Op. cit. págs. 6-7.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS

de un coste razonable.

Algunos edificios de nuestros tiempos si causan admiracion, es verlos tan materiales que parecen haver acabado con todas las canteras del Pais. Es posible que el intermedio de algunos siglos haga los hombres tan opuestos sobre una misma cosa? jamas se confesare, en todo lo que se sabe admite el mas y el menos, haber un cierto punto fijo, del qual depende las mas perfecta execucion, que se puede llegar a conseguir.¹³⁹

Teoría de bóvedas: La teoría sobre las bóvedas que expone está sacada de *La science des ingenieurs* de Bélidor. Tanto el contenido como el orden de exposición son idénticos, excepto en que se han suprimido los ejemplos numéricos de aplicación, por considerarlos demasiado complicados, y solamente se mencionan las reglas algebraicas simplificadas.

Se muestra decidido partidario de aplicar este análisis a la hora de determinar el espesor de los contrafuertes:

Para dar las medidas a los gruesos de los pies derechos en los edificios que llevan arcos o bobedas, no se debe contar sobre la experiencia de sugetos sin theoria por mas versados que esten en la practica, sino tienen el exemplar para la imitación de otro semejante: por esto un viejo practico es siempre un viejo ignorante. Esto no es mas de un conocimiento que resulta de la theoria, porque la practica no puede jamas producirle, ni sacar mas que una razon de comparacion respecto a las obras que han visto executadas, en lo que estan sugetos a engañarse por poca variedad que encuentren. Con muchos años de exercicio no pudieron los artifices escusar las ruínas que experimentaron en sus fabricas antes de concluiras.¹⁴⁰

A continuación expone las reglas simplificadas de Bélidor:

...mas como el calculo Algebrico, en que establecen la demostracion es largo y mui compuesto de igualaciones, creo hacer mucho servicio los Artifices procurandoles soluciones mas simples, y mas propias para la practica de los menos estudiosos, recogiendo lo mejor que se halla establecido y proporcionandome a la claridad que deseo dirè lo que sea bastante a dar susceptible quanto conduce al intento, insinuando primero de que manera se hace el empujo en los arcos: manifestando si el concepto que se debe tener puede concordar con las reglas arbitrarias de muchos Maestros que proyectan cada uno diferentemente sobre su palabra la firmeza de los edificios.¹⁴¹

Puentes: La doctrina sobre los puentes, se recoge en el cap. III *Sobre los arcos de los puentes*, y está tomada de la *Architecture Hydraulique* de Bélidor. Pontones, tras lamentarse de la dispersión en la práctica habitual,

139. Op. cit. pág. 7.

140. Op. cit. págs. 67-68.

141. Op. cit. pág. 69.

recomienda las reglas empíricas que allí proponía Bélidor, incurriendo en la misma contradicción que éste al no aplicar el método de cálculo antes expuesto al problema de los contrafuerces en los puentes.

En todos los puentes fabricados que tengo vistos se conoce que los Artífices nada tuvieron arreglado para determinar el grueso de los pilares cada uno executó segun su medida, los mas reflexivos dieron al pilar la quarta parte del diametro, algunos, la tercera, otros la mitad y la madura ignorancia llegó a dar tanta anchura a los pilares como tenían de diametro los arcos y se pueden ver en el puente de San Esteban de Gormaz y otros cuias ideas fueron con toda propiedad a mucho coste disparates de cal y canto.¹⁴²

Además, confecciona unas tablas que no aparecen en la obra de Bélidor, y que facilitan la aplicación de las reglas.

...y por que no se halle como hasta aqui burlado el mal de las prevenciones de su remedio pongo en las siguientes tablas facilitados los principales puntos para quales quiera proyectos, esto es el grueso correspondiente a los pilares, a las cepas y a la rosca o grueso que deven tener los arcos, calculados todos los diametros desde doze pies hasta ciento y veinte tanto para las bueltas semicirculares como elipticas ...¹⁴³

....
Tabla primera que muestra el grueso de los Pilares y Cepas para los Puentes segun todos los diametros de medio punto u semicirculares, desde doze pies hasta ciento y veinte juntamente el grueso de la bobeda o rosca de su buelta.¹⁴⁴

....
Tabla segunda que determina el grueso de los Pilares y Cepas para los Puentes segun todos los diametros Elipticos desde doze pies hasta ciento y veinte juntamente el grueso de la bobeda o rosca de su buelta.¹⁴⁵

7.4.6.b Rieger

Merece citarse aunque sea brevemente la obra del Padre Rieger. La primera edición se publicó en latín en 1756¹⁴⁶, pero ya en 1763 aparece la traducción al castellano¹⁴⁷.

142. Op. cit. pág. 123.

143. Op. cit. pág. 124.

144. Op. cit. págs. 132-139.

145. Op. cit. págs. 140-147.

146. Ch. Rieger, *Universae architecturae civilis elementa*. Viena, Praga, Trieste: Ioannis Thomae Trattner, 1756.

147. Ch. Rieger, *Elementos de toda la Architectura Civil, con las más singulares observaciones de los modernos...*, los quales aumentados por el mismo, da traducidos al castellano el P. Miguel Benavente, Maestro Mathematico en el mismo Colegio. Madrid: Joachim Ibarra, 1763.

INVENTARIO DE REGLAS EMPÍRICAS

El tratado tuvo una gran popularidad en España; al mismo tiempo sirve, para comprobar la internacionalidad en la época de que se trata, de los métodos y procedimientos constructivos para las fábricas.

En cuanto al tema que nos ocupa, el diseño estructural de bóvedas y contrafuertes, si hubiera que buscar una palabra para definirlo esta sería la de *ecléctico*. En su tratado se mezcla la antigua tradición de reglas proporcionales (citando, como no, la regla de Martínez de Aranda/Derand, véase Figura 7.23), con las nuevas reglas aritméticas deducidas de las hipótesis de La Hire y formuladas por Bélidor. Sin embargo, el espíritu es el mismo, se trata de dar una regla que permita dimensionar los contrafuertes a una persona sin conocimientos estructurales.

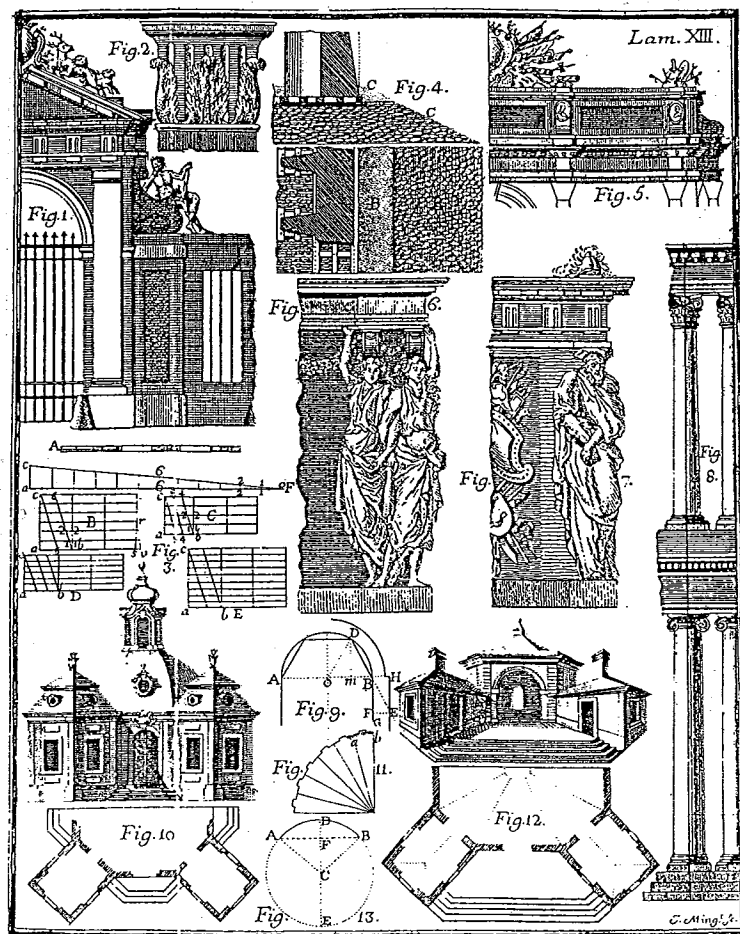


Figura 7.23. La regla de Martínez de Aranda/Derand en el tratado de Rieger

7.4.6.b Benito Bails

Benito Bails publica en los años 1779 y 1787 sus *Elementos de Matemáticas*,¹⁴⁸ obra enciclopédica en 10 volúmenes donde se pretende recoger todo el saber de la época. El volumen IX, parte I, corresponde a la Arquitectura Civil y es el que nos interesaba a efectos de la presente Tesis.

Como ya ha señalado Navascués en su introducción a la edición facsímil de 1983¹⁴⁹, el tratado tiene una fuerte influencia francesa. En efecto, siguiendo la tradición enciclopedista clásica, Benito Bails, se ha limitado a recoger de cada fuente, en forma casi literal, la parte correspondiente al esquema de su obra. El resultado es un 'collage' de porciones, a veces copiadas, a veces extractadas, de otros tratados franceses en su mayoría (a veces, emplea tratados españoles como por ejemplo Fray Lorenzo para las bóvedas tabicadas), singularmente los de Frézier¹⁵⁰ y, Blondel/Patte¹⁵¹.

En cuanto al problema estructural de las bóvedas tanto las láminas como los comentarios están entresacados en su mayor parte de este último. Como excepción, en el apartado de contrafuertes reproduce las fórmulas simplificadas de Bélidor, si bien no hace mención alguna de las hipótesis a partir de las cuales se deducen (a diferencia, por ejemplo, del Padre Pontones). Para su comentario, nos remitimos, pues, a los realizados a la hora de estudiar las fuentes originales.

148. B. Bails, *Elementos de Matemáticas*. Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra, 1787-1796. 10 tomos en 11 vols.

149. B. Bails, *Elementos de Matemáticas*. Murcia: C.O. Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983. Vol. I, P. Navascués, *Estudio crítico*.

150. A. F. Frézier, *La théorie et la pratique de la coupe de pierres...*, op. cit. más arriba.

151. J. F. Blondel y P. Patte, *Cours d'Architecture ou Traité De la Décoration, Distribution et Construction des Bâtimens*. Paris: Chez Vve Desaint, 1771-1777.

7.6 La tradición inglesa: Juan Muller y la escuela de Woolwich

La historia de la influencia de las escuelas de ingeniería extranjeras sobre la formación teórica en el cálculo de estructuras de los arquitectos e ingenieros españoles del XVIII está, creo, todavía, por escribir. La consulta de los tratados y manuscritos españoles de la época revela, como hemos dicho, una clara influencia francesa. En este contexto, parece una anomalía la traducción, por Sánchez Taramas, y su publicación en España en el año 1769 del tratado de John Muller¹⁵² de la escuela militar inglesa de Woolwich¹⁵³.

La tradición inglesa de la enseñanza de la ingeniería es completamente diferente a la francesa. En cuanto a la teoría de arcos y bóvedas, podemos decir exactamente lo mismo. Puede decirse que la escuela inglesa ha ido siempre detrás de la francesa en este terreno y la historia de la teoría estructural de las bóvedas (expuesta en la introducción) así lo confirma.

La obra de Muller acusa, sin embargo, una fuerte influencia de las obras de Gautier y de Bélidor, si bien él reinterpreta sus teorías de forma personal, aunque con una corrección teórica más que dudosa.

El enfoque teórico de Muller conduce a unos resultados todavía más conservadores que los obtenidos por la aplicación de la teoría de la cuña de La Hire, popularizada por Bélidor.

Merece destacarse la publicación de la quizá, primera tabla 'científica' para el dimensionamiento de las cepas o contrafuertes de los puentes (véase Figura 7.24.). Sin embargo, a la hora de diseñar los arcos recurre a la regla

152. J. Muller *Tratado de Fortificación ó Arte de construir los Edificios Militares, y Civiles. Escrito en ingles por Juan Muller. Traducido en castellano, dividido en dos tomos, y aumentado con notas, adiciones y 22 láminas finas sobre las 26 que ilustran el original por D. Miguel Sánchez Taramas, Capitán de Infantería e Ingeniero Ordinario de los Exercitos de S. M., actualmente empleado en la enseñanza de la Real Academia Militar de Mathematicas establecida en Barcelona.* Barcelona: Thomas Piferrer, 1769. 2 vols.

153. Sobre esta academia véase el capítulo X 'Woolwich Academy' en 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. 138-148.

la regla empírica de Gautier, en exceso conservadora y superada, en breve por la regla de Bélidor que, como hemos visto, tuvo una vigencia de 100 años.

El libro está enriquecido por los comentarios de Sánchez Taramas y por su descripción de numerosos puentes y obras de ingeniería españolas.

	6	9	12	15	18	21	24
20	4.574	4.918	5.165	5.350	5.492	5.610	5.698
25	5.490	5.913	6.216	6.455	6.645	6.801	7.930
30	6.386	6.816	7.225	7.513	7.746	7.939	8.102
35	7.258	7.786	8.200	8.532	8.807	9.037	9.233
40	8.113	8.691	9.148	9.523	9.835	10.101	10.328
45	8.965	9.579	10.077	10.489	10.837	11.136	11.394
50	9.805	10.454	10.987	11.435	11.817	12.146	12.434
55	10.640	11.245	11.882	12.364	13.019	13.149	13.218
60	11.400	12.110	12.718	13.281	13.723	14.109	14.314
65	12.265	13.025	13.648	14.185	14.654	15.082	15.433
70	13.114	13.869	14.517	14.949	15.573	16.011	16.400
75	14.000	14.705	15.336	15.965	16.480	16.940	17.354
80	14.747	15.542	16.234	16.842	17.381	17.864	18.298
85	15.513	16.328	17.041	17.674	18.237	18.742	19.198
90	16.373	17.201	17.929	18.578	19.157	19.679	20.152
95	17.184	17.826	18.772	19.438	20.036	20.577	21.068
100	17.991	18.848	19.610	20.293	20.908	21.466	21.976

MULLER / TARAMAS (1769)

Figura 7.24. Tabla de Muller para el dimensionado de las cepas de los puentes. La primera línea horizontal expresa la altura de los pilares desde 6 hasta 24 pies. La primera columna de la izquierda contiene la luz de los arcos desde 20 hasta 100 pies.

INVENTARIO DE REGLAS EMPIRICAS