

El proyecto de bóvedas tabicadas siguiendo reglas de proporción

Esther Redondo Martínez

La construcción tabicada aparece en la zona de Levante en los últimos años del siglo XIV y a lo largo del siglo XVI se generaliza en buena parte de España. Desde su aparición hay algunos documentos (contratos y pleitos de obra) en los que se describe su construcción. Pero hasta el siglo XVII no lo encontramos en los tratados de arquitectura españoles y aun tardará 100 años más en ser reconocido por los influyentes tratados franceses, lo que supone una gran difusión y su aceptación dentro de la arquitectura «cult».

Desde su aparición hasta bien avanzado el siglo XIX, las bóvedas tabicadas se diseñan empleando reglas de proporción, de la misma forma que el resto de estructuras de fábrica.¹ La fuente principal en la que encontramos estas reglas son los tratados de arquitectura.

Se estudian aquí las que se refieren de manera específica a las bóvedas tabicadas, que son sólo dos: las propuestas por Fray Lorenzo en 1639, en la primera parte de *Arte y Uso de Arquitectura* y las de Joseph Renart en su *4º Quincenario*, manuscrito hacia 1810. Las proporciones que dan ambos autores son muy distintas y al final de la comunicación se busca una explicación de esta diferencia.

Las reglas se refieren siempre al espesor que hay que dar a los muros para soportar el empuje de la bóveda, nunca al de la propia bóveda. Esto se debe a que el espesor constructivo de una bóveda tabicada de 2–3 gruesos de ladrillo (8–10 cm), aunque muy delgado, es suficiente para contener una línea de em-

pujes en el tercio superior de la altura, que es el que queda libre. Por debajo, lengüetas y macizados ayudan a la bóveda que tiene así un espesor superior al de los gruesos de ladrillo.² Ningún constructor tradicional lo hubiera explicado así, pero sabían que el espesor de la bóveda no era el problema.

FRAY LORENZO DE SAN NICOLÁS. 1639

El primer tratado español en que se cita la construcción tabicada es «Arte y Uso de Arquitectura», escrito por Fray Lorenzo de San Nicolás en 1639. Fray Lorenzo nació en Madrid en 1593. Fue fraile agustino y arquitecto de su orden, proyectando y construyendo 16 iglesias y capillas entre 1633 y 1656, según enumera en la 2ª parte de su tratado (San Nicolás 1663). Había aprendido con su padre, igualmente maestro de obras de los agustinos.

A partir de ese momento, la bóveda tabicada se recoge en casi todos los tratados españoles de los siglos XVII y XVIII, aunque en ninguno se describe de manera tan clara y detallada como en Fray Lorenzo, que habla de procesos de ejecución, uso de cimbras así como del tamaño de muros y estribos para sostenerlas. Su punto de vista es el de un constructor de bóvedas: «Todo lo cual experimenté con mis manos antes de escribirlo, siendo este mi ejercicio, como en otras ocasiones he dicho» (San Nicolás 1639, 91).

Las reglas de proporción de Fray Lorenzo

Con respecto a las reglas de proporción, las de Fray Lorenzo son geométricas y muy sencillas: una proporción entre luz y espesor de muro necesario, diferenciando lo que ocurre si el muro tiene contrafuertes y si no los tiene. Sin contrafuertes, Fray Lorenzo recomienda un espesor de $L/5$ para los muros que resisten una bóveda tabicada (frente a $L/4$ para sostener una bóveda de rosca de ladrillo y $L/3$ para una de piedra). Y con ellos, da unas medidas concretas, también menores que las de piedra y rosca de ladrillo.

Quando la bóveda hubiere ser tabicada de ladrillo, basta que lleven las paredes de grueso la octava parte de su ancho y los estribos que cumplan con el grueso hasta la cuarta parte de su ancho. Si en el templo cuyas bóvedas han de ser tabicadas no pudiere haber estribos, tendrán de grueso las paredes la quinta parte de su ancho y aun hay lugar en esta parte de adelgazar más (San Nicolás 1639, folio 30v)

Las proporciones no dependen de la altura del muro, pero Fray Lorenzo era consciente de esta dependencia, estas reglas las da como válidas para la relación altura-ancho de nave habituales en templos: «Y así, este edificio con tres diversidades de bóvedas irá seguro, con tal que en los demás guarde los preceptos que diéremos; y en la altura del Templo no exceda de suerte que parezca mal» (San Nicolás 1639, folio 31).

Además, son válidas para bóvedas de medio punto, igualmente las usuales en las iglesias y templos construidos por Fray Lorenzo. Más adelante en su tratado, habla de cómo «fortificar» otros edificios, indicando que como suelen tener menor altura se podrán usar anchos menores:

Hicimos demostracion de cinco plantas en el cap. 23 y así ellas, como qualesquier otras piezas todas las vezes que hubieren de llevar bobedas guardaran la orden que los Templos: excepto, que como no debantan tanto se puede ahorrar algo de estribos más (San Nicolás 1639, folio 33v)

Varios autores del siglo XVIII reproducen las reglas de Fray Lorenzo sobre el ancho de muros y estribos. En Briguz y Brú (1738),³ sin citar la fuente:

En orden a la gordaria de las paredes de los Templos, no se puede dar regla general, porque los materiales como piedra, ladrillo, cal, yeso, etc. no son igualmente buenos

en todos los países pero sin embargo dire lo que en esto suelen practicar los Arquitectos (...) Si las bóvedas fueren tabicadas, y con estribos, se dará estos algo menos de la quarta parte, y a las paredes la octava parte de la anchura de la nave. Si la bóveda no llevare estribos, se dará a las paredes la quinta parte (Briguz y Brú 1738, 98)

En García Berruguilla (1747)⁴ encontramos la misma repetición, igualmente sin cita:

Quando la bóveda hubiere de ser tabicada y doblada de ladrillo, se le dará a la pared la octava parte de su ancho y los estribos tendrán la cuarta parte de su ancho.

Si no se pudiere echar estribos, se dará a la pared la quinta parte de su ancho (García Berruguilla 1747, 130)

Por último, en Plo y Camín⁵ volvemos a encontrar una única referencia a las bóvedas tabicadas repitiendo las reglas de Fray Lorenzo, aunque, por fin, Plo y Camín sí le cita

En bobedas, que han de ser tabicadas de ladrillo dicen que se les de a los estribos la cuarta parte de su diámetro, y a las paredes la octava (véase 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 (Plo y Camín 1767, 455–56)

Validez de las reglas de Fray Lorenzo

Podemos plantear un análisis de equilibrio sobre un edificio de las características que describe Fray Lorenzo: bóveda de cañón de medio punto, espesor de muro $1/5$ de la luz libre, relleno hasta $1/3$ de la altura de la bóveda y lengüetas $1/3$ más; espesor de bóveda 10 cm; peso específico de bóveda, relleno y muro 18 kN/m^3 (ver figura 1); la altura del muro se ha considerado hasta la clave de la bóveda.⁶

La línea de empujes está contenida en el muro para las relaciones H/L que propone Fray Lorenzo ($H=L$; $H=1,5 \cdot L$) y también mayores. Midiendo la excentricidad de la resultante (x) para cada altura considerada puede obtenerse el coeficiente de seguridad geométrico (c) como $c=d/2 \cdot x$, siendo d el espesor del muro. Los valores son muy elevados: $c=5$, para $H=L$ y $c=4,38$ para $H=1,5 \cdot L$, las proporciones que indica Fray Lorenzo. Incluso para $H=2 \cdot L$, una proporción poco usual, el coeficiente de seguridad es 4,12. Estos valores son algo más grandes de los que se obtienen en edificios reales, entre 3 y 4.⁷

Excentricidad de la resultante (x) y Coeficiente de seguridad geométrico (c)								
	$e_b=10$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/5, $\gamma=18$ kN/m ³		$e_b=8$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/5, $\gamma=18$ kN/m ³		$e_b=10$ cm; relleno 2/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/5, $\gamma=18$ kN/m ³		$e_b=10$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/5, $\gamma=22$ kN/m ³	
H/L	x	c	x	c	x	c	x	c
0,5	10,5	6,67	8,5	8,24	4,5	15,56	8,5	8,24
1	14	5,00	11	6,36	10	7,00	11,5	6,09
1,5	16	4,38	12,5	5,60	12,5	5,60	13	5,38
2	17	4,12	13,5	5,19	14,5	4,83	14	5,00

Tabla 1

Excentricidad de la resultante y coeficiente de seguridad geométrico para distintas hipótesis de análisis sobre el edificio de la figura 1.

En la tabla 1 se resumen los coeficientes de seguridad del análisis de equilibrio dibujado en la figura 1 (en la columna de la izquierda) junto con algunas variaciones posibles del mismo (en las columnas de la derecha): suponiendo que la bóveda tenga un espesor menor (8 cm en lugar de 10), que el relleno alcance 2/3 de la altura de la bóveda o que el muro sea de piedra maciza (peso específico 22 kN/m³). En todos estos supuestos obtenemos coeficientes de seguridad todavía mayores.

Por tanto, las reglas de Fray Lorenzo son válidas para los edificios que el construía, con valores incluso excesivamente seguros. Fray Lorenzo es consciente de que el valor de L/5 es un poco elevado « Si en el Templo, cuyas bóvedas han de ser tabicadas, no pudiere haber estribos tendran de grueso las paredes la quinta parte de su ancho y aun ay lugar en esta parte de adelgaçar mas» (San Nicolás 1639, 31)

La razón de este exceso puede ser la siguiente: una bóveda tabicada pesa muy poco en relación al muro que la sustenta: en el ejemplo de la figura 1, el peso de la bóveda supone un 7,5% del peso de los muros, por eso permite muros más delgados que otras. Un pequeño incremento del peso sobre la bóveda por razones imposibles de controlar durante la vida útil de un edificio puede incrementar el empuje y hacer necesario el muro de espesor L/5.

Por otro lado, los valores prescritos por Fray Lorenzo son discutidos por otros autores de su época: en Marías (1991) se cita un pleito entre dos maestros de obras acerca de la iglesia de San Martín de Val-

deiglesias: el maestro Pedro Sánchez proyecta la iglesia con bóvedas tabicadas y un espesor de muros de L/9. Hay una controversia con otro maestro Pedro Peña que indica (al igual que dirá unos años después Fray Lorenzo) que son necesarios muros de espesor L/5.⁸ Finalmente, se impone la opinión del arquitecto real Juan Gómez de Mora, que prescribe un espesor de L/6.

El valor de L/9 que defiende Pedro Sánchez para la iglesia de San Martín de Valdeiglesias es claramente inseguro: la línea de empujes no se sale de un muro con este espesor pero el coeficiente de seguridad es muy bajo: 1,47 para H=L y 1,32 para H=1,5·L. Así que tenía razón Pedro Peña al criticar su escaso espesor. Pero el muro de ancho L/6 que finalmente impone el arquitecto real Juan Gómez de Mora sigue dando coeficientes de seguridad válidos: 3,43 para H=L y 3,07 para H=1,5·L. En la tabla 2 se resumen estos valores: en la columna izquierda se repiten los valores obtenidos con el análisis de la figura 1; en la columna central, los coeficientes obtenidos con un muro de espesor L/6 para distintas proporciones H/L y en la columna derecha para el muro de espesor L/9. Estas dos columnas se obtienen de un análisis de equilibrio igual al representado en la figura 1.

LOS QUINCENARIOS DE JOSEP RENART. CA 1810.

Josep Renart (1746–1824), maestro de obras barcelonés, desarrolla su carrera en los últimos años del si-

Excentricidad de la resultante (x) y Coeficiente de seguridad geométrico (c)						
	$e_b=10$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/5, $\gamma=18$ kN/m ³		$e_b=10$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/6, $\gamma=18$ kN/m ³		$e_b=10$ cm; relleno 1/3 bóveda y relleno $\gamma=18$ Kn/m ³ muro L/9, $\gamma=18$ kN/m ³	
H/L	x	c	x	c	x	c
0,5	10,5	6,67	13	4,49	20,5	1,90
1	14	5,00	17	3,43	26,5	1,47
1,5	16	4,38	19	3,07	29,5	1,32
2	17	4,12	20,5	2,85	31	1,25

Tabla 2

Excentricidad de la resultante y coeficiente de seguridad geométrico para espesores de muro menores que los prescritos por Fray Lorenzo.

glo XVIII, en los que en Barcelona se produce un importante incremento demográfico y, derivados de él, algunos cambios en la forma de construir.⁹

En los primeros años del siglo XIX recoge su saber constructivo en unos manuscritos (*Cartas y Quincenarios*, estos últimos escritos cada quince días) que manda a su hijo Francesc, también maestro de obras. Estos documentos están escritos en los primeros años del siglo XIX. El norte de España está inmerso en la Guerra de la Independencia y Renart aprovecha este momento de paro forzoso para escribir lo que sabe sobre construcción y enviárselo a su hijo, que está destinado en Tarragona también por la guerra. El documento que se estudia es el 4º *Quincenario*, dedicado a las técnicas constructivas.

Es un texto interesante porque Renart, que es un hombre culto pero a la vez un constructor experimentado, mezcla trozos de tratados con su propio saber constructivo.¹⁰

Renart dedica un buen espacio de su manuscrito a hablar de bóvedas tabicadas, desde la página (32) hasta la (87), en un manuscrito de 122 páginas. Esto deja ver la importancia que tenía este sistema constructivo en Barcelona y en la época en que Renart escribe. Se mezclan reproducciones íntegras de opiniones de otros autores que han tratado las tabicadas: Fray Lorenzo (1639), Bails (1796) y Espie (1754),¹¹ con textos propios de Renart. Muchas veces entran en contradicción unos con otros, lo que es frecuente en este momento y en este tema. Hay que entender que lo que escribe Renart de su cosecha es lo que realmente construía, mientras que los textos copiados

de otros autores, normalmente tratadistas influyentes, era lo que había que escribir.

Las reglas de proporción de Josep Renart

Renart, a lo largo de su manuscrito, hace bastantes referencias al tamaño necesario para los muros que soportan bóvedas, tanto de piedra como de rosca y tabicadas.

Sobre las tabicadas comienza discutiendo el asunto de su falta de empujes «Entre los arquitectos se disputa cada día sobre si esta especie de bóvedas tienen o no tienen empuje» (Renart, 40). A continuación de esta frase reproduce los «experimentos» de Espie (1754) para demostrar el escaso empuje de las estas bóvedas y después da unas reglas propias para calcular el estribo necesario en las bóvedas tabicadas. Son reglas de proporción, similares a las que escribe para bóvedas de otros materiales y a las que enuncia Fray Lorenzo 150 años atrás. Pero las proporciones de estribos que ofrece Renart son mucho más esbeltas que las de Fray Lorenzo: frente a L/5 que recomendaba Fray Lorenzo para una pared sin contrafuertes, Renart dice que basta con un espesor entre L/9 y L/12, en función de la forma de la bóveda y de si lleva o no lunetos.

El hijo de Renart, el destinatario de estos escritos, aún apura más las medidas necesarias para soportar una bóveda tabicada: en algunos casos escribe anotaciones al margen o tacha las de su padre, dando proporciones menores: respecto a la media naranja: «ha-

biendo lunetos bastará a la bóveda circular el onzeno y a la rebajada el 1/10» (Renart, 56); respecto a la baída tacha la proporción de $L/10$ y apunta en su lugar $L/12$. Renart cita y dibuja esquemáticamente en su texto unos cuantos edificios construidos por él en los que se cumplen estas proporciones, como la casa de campo de Narciso Plandolit: 30×50 palmos en planta, bóveda en cielo de coche, rebajada, $f=L/6$, espesor de muros $3,5$ palmos ($L/8,5$).

Validez de las reglas de Josep Renart

En la figura 2 se analiza un edificio de las características que describe Renart. El tipo de análisis es el mismo que en la figura 1: se dibuja una bóveda de cañón seguido, pero en este caso rebajada, con flecha $L/6$. Los riñones están rellenos hasta $1/3$ de la altura y hay lengüetas en $1/3$ de la altura más. El peso específico del conjunto es 18 kN/m^3 y se ha despreciado el peso de las lengüetas. Los muros laterales reciben el empuje de esta bóveda, que puede analizarse por rebanadas ya que funciona de manera unidireccional. El espesor del muro es $L/9$, que es el indicado por Renart para una bóveda de esta geometría. Las alturas consideradas son menores que en el análisis de la figura 1: $H=L$ y $H=0,5 \cdot L$, ya que los edificios que construía Renart, principalmente viviendas en Barcelona, no parece razonable que fueran más altos (aunque en los *Quincenarios* no se cita cual es esta proporción)

La bóveda no es estable, ni siquiera con un pequeño coeficiente de seguridad: tanto para $H=L$ como para $H=0,5 \cdot L$, la línea de empujes se sale del muro.

¿Cómo es posible que Renart, un constructor experimentado, propusiera unas reglas inseguras en un texto dedicado a instruir a su hijo?

Una explicación posible es la situación y el uso de los edificios que construía Renart, muy diferentes a las iglesias para las que Fray Lorenzo prescribe el espesor de $L/5$. Esto tiene dos consecuencias:

- Una menor relación H/L en los edificios que construye Renart, principalmente viviendas. Este aspecto ya se ha tenido en cuenta en el análisis de la figura 2, realizado para proporciones $H=L$ y $H=0,5 \cdot L$. Pero para ninguno de estos valores la bóveda es estable.
- La situación de las bóvedas en un edificio de viviendas, con varios metros de muro por enci-

ma. Repitiendo el análisis de la figura 2, ya sólo para una proporción $H=0,5 \cdot L$, más adecuada para una vivienda, y considerando cierto peso de muro por encima (ver figura 3) se obtienen los siguientes datos: para conseguir un coeficiente de seguridad de 2 es necesario colocar $5,70$ metros de muro por encima; para conseguir $c=3$ hay que colocar $11,20$ m de muro por encima

Estas alturas de muro no son descabelladas a la vista de algunos ejemplos de los propuestos por Renart en su *Quincenario*: la bóveda del coro de una iglesia; las bóvedas de la planta baja del Cuartel de las Atarazanas de Barcelona. En los últimos años del siglo XVIII y principios del XIX, a la vez que la ciudad aumenta de población, se desarrolla en Barcelona la casa de vecinos o *casa d'escaleta*, de varias plantas. En Rosell (1996) se describe la forma habitual de construir estas viviendas, con algunos ejemplos construidos por Renart. Aunque Rosell describe los forjados con vigas de madera y revoltones de ladrillo, es probable que, al menos en plantas bajas y bajo rasante, se sustituyeran por bóvedas tabicadas, para evitar el uso de madera en sitios húmedos.

La otra explicación para las propuestas de Renart es el comportamiento espacial de las bóvedas que construye, que son principalmente baídas, en rincón de claustro o de tipo imperial.¹² Para valorar este efecto, se analiza el ejemplo concreto, descrita por Renart varias veces en su *Quincenario*, de la casa de campo de Narciso Plandolit (ver cita más arriba). Es una bóveda de perfil imperial, con dimensiones en planta 50×30 palmos (10×6 m) y 5 palmos (1 m) de monte. No se indica la altura hasta los arranques, se ha supuesto 4 m. Los muros son de $3,5$ palmos (70 cm).

Dada la forma de construir las bóvedas que propone Renart, con unas lengüetas muy rígidas en las esquinas, podemos suponer que el grueso del empuje se transmite por ellas, y, dado que el espesor de la lengüeta es grande, que la línea de empujes que se forma es el funicular de las cargas, una parábola para carga repartida. Este es el método de cálculo que propondrá Ignacio Bosch Reigt (1949) para sus bóvedas de doble curvatura, construidas de manera similar, ver figura 4 izq.

A continuación se analiza la bóveda de la casa de

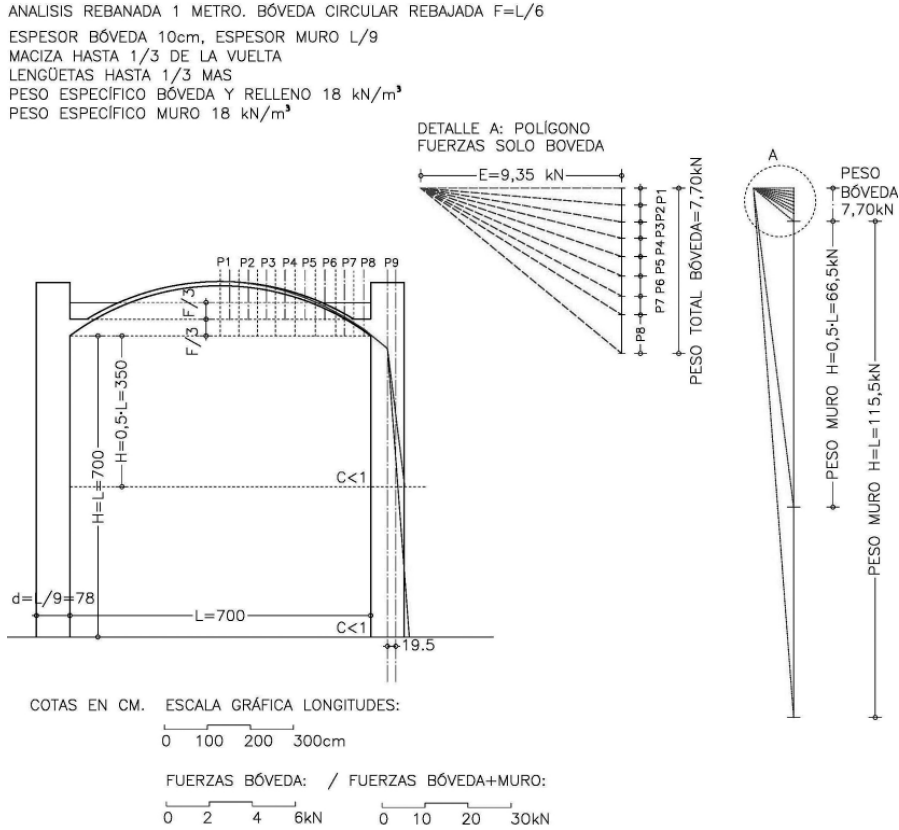


Figura 2
 Análisis de equilibrio unidireccional sobre un edificio de las características descritas por Renart (dibujo de la autora).

Narciso Plandolit siguiendo el método de Bosch Reigt:

$$E = \frac{Q \cdot a \cdot b \cdot l}{2 \cdot 8 \cdot f}$$

Siendo Q la carga superficial en la bóveda, a y b sus lados, l la luz del arco diagonal y f la flecha común a todos los arcos.

Como carga superficial se toman los 110 kg/m^2 que indica Bosch, ver figura 4. der. más 200 kg/m^2 de carga de uso,¹³ en total $3,1 \text{ kN/m}^2$.

$$E = \frac{3,1 \text{ kN/m}^2 \cdot 6 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 11,66 \text{ m}}{2 \cdot 8 \cdot 1 \text{ m}} = 135,6 \text{ kN}$$

Este valor del empuje se transmite por la diagonal y tiene que ser equilibrado por el peso de la esquina que forma la mitad del muro hacia cada lado. Plantando un sencillo equilibrio de momentos sobre la esquina:

$$M_{des} = E \cdot H = 135,6 \text{ kN} \cdot 4,00 \text{ m} = 542,4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

E es el empuje obtenido según la fórmula anterior y H es la altura considerada hasta el arranque de la bóveda, $4,00 \text{ m}$, ver esquema en figura 5.

La estabilidad de la bóveda depende de la longitud de los muros laterales que deben movilizarse para que la bóveda caiga. La opción más favorable sería considerar la totalidad del muro, de manera

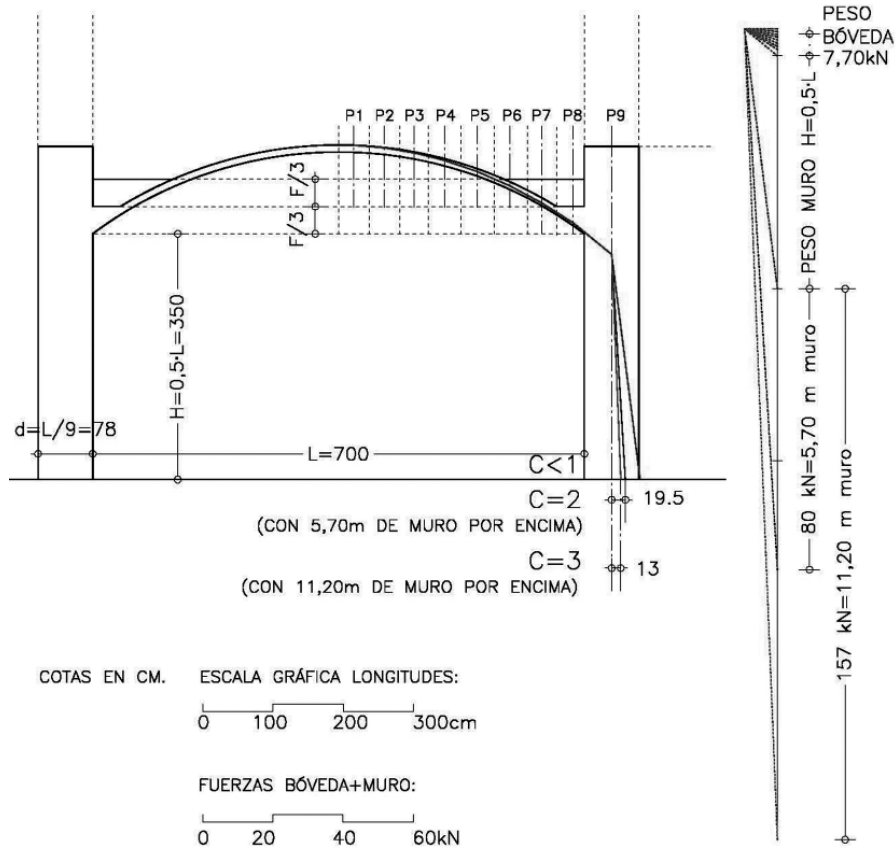


Figura 3
El mismo análisis de la figura 2 pero añadiendo el peso de cierta altura de muro por encima (dibujo de la autora).

que la mitad de la longitud hacia cada lado desde las esquinas contribuye a resistir el empuje de la bóveda.

En estas condiciones, el momento equilibrante es:

$$M_{eq} = P \cdot D = 890 \text{ kN} \cdot 2,22 \text{ m} = 1976,5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Para calcular P se ha considerado la mitad del muro hacia cada lado ($A=0,5 \cdot L_A=3,00 \text{ m}$ y $B=0,5 \cdot L_B+e_{muro}=5,70 \text{ m}$), una altura de 8,12 m (4 m para la planta baja, 3 m para la superior más la montea de la bóveda) y un peso específico de muro de 18 kN/m³.

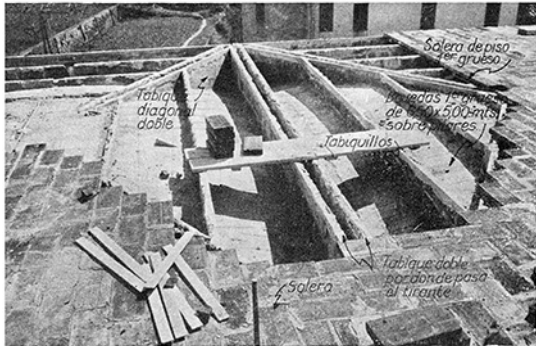
D es la distancia del centro de gravedad de la figura rallada a la esquina A , ver esquema en figura 5.

Puede obtenerse un coeficiente de seguridad dividiendo el momento equilibrante entre el desequilibrante:

$$c = \frac{M_{eq}}{M_{des}} = \frac{1974,56 \text{ kN} \cdot \text{m}}{542,4 \text{ kN} \cdot \text{m}} = 3,64$$

El coeficiente de seguridad es bastante elevado, pero también es demasiado a favor de seguridad considerar que todo el muro contribuye a resistir a el empuje de la bóveda.

Planteando un análisis similar pero con un área menor de muro, obtenemos los siguientes resultados (ver tabla abajo a la derecha, en figura 5)



Carga permanente con bóvedas.

Peso propio de la bóveda con tablero de enrasado... ..	80 kg/m. ²
Peso propio de pavimento de mosaico.	30 »
TOTAL... ..	110 kg/m.²

Figura 4

A la izquierda, bóvedas construidas por Ignacio Bosch Reitz: doble curvatura, tabiques dobles en las esquinas y enrasado con tablero de ladrillo superior. A la derecha, peso propio de esta solución constructiva, que es muy parecida a la empleada por Renart en la casa de Narciso Plandolit (Bosch Reitz 1949)

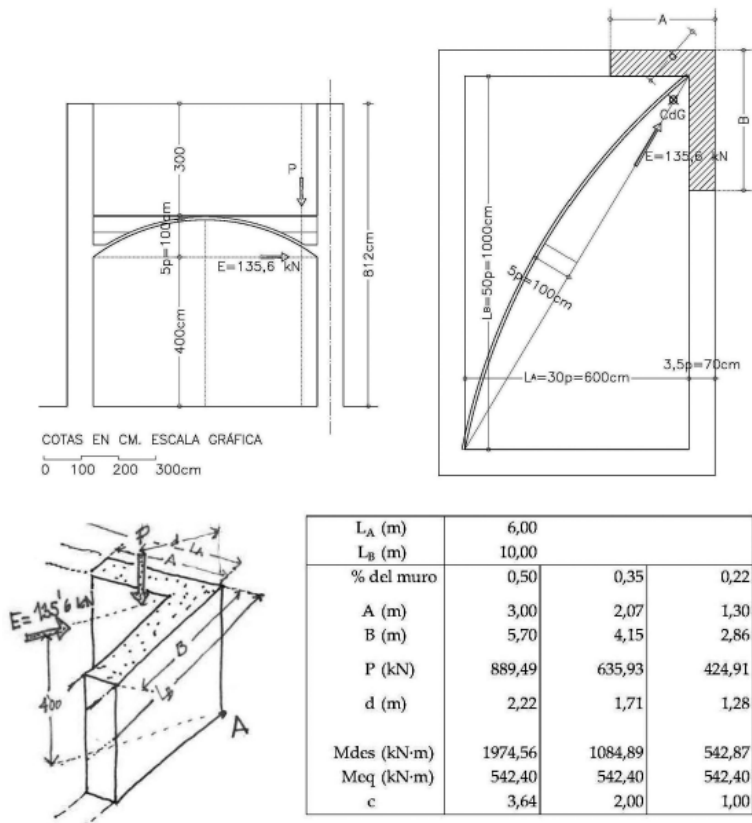


Figura 5

Análisis biridiccional de una bóveda en la vivienda de Narciso Plandolit. Arriba, planta y sección. Abajo, esquema de cálculo y tabla de resultados (dibujo de la autora)

- Para conseguir un coeficiente de seguridad de 2,00 necesitamos la colaboración de un 35% de la longitud del muro hacia cada lado de la esquina
- Para coeficiente 1 (equilibrio estricto) basta con que colabore el 22% del muro hacia cada lado de la esquina.

COMPARATIVA Y CONCLUSIONES

Como resumen, se expresan en forma de tabla las relaciones entre luz cubierta y ancho de estribo propuestas por Fray Lorenzo en 1639 (tabla 3) y por Josep Renart en 1810 (tabla 4). Como ya se ha adelantado en el apartado anterior, son muy diferentes.

¿Por qué son tan distintas las proporciones de Renart que las indicadas por Fray Lorenzo? Ambos son

constructores experimentados, no teóricos de la arquitectura. Ambos construyen bóvedas tabicadas «tradicionales», de ladrillos recibidos con yeso. No utilizan cemento ni atirantamientos metálicos.

Pero las reglas proporcionales, como las que formulan Fray Lorenzo y Renart, no suelen ser universales, sino válidas para una situación concreta. Las de Fray Lorenzo están pensadas para los edificios que construía, para los que funcionan bien, incluso con un exceso de seguridad, como se ha explicado más arriba

Los ejemplos que cita Renart en su manuscrito son diferentes: la bóveda del coro de la iglesia del Pino y la casa de campo de Narciso Plandolit. En ambos casos son rebajadas y con curvatura en dos direcciones: baída, con flecha L/4 en la iglesia del Pino y de perfil imperial, con flecha L/6 en la casa de Narciso Plandolit. Además, ninguna está situada en cubierta: la de

Tipo de bóveda	Estribo necesario
Tabicada, sin contrafuertes	L/5
Tabicada con contrafuertes (muro)	L/8
Tabicada con contrafuertes (contrafuerte)	L/4

Tabla 3
Dimensiones que deben tener los estribos para bóvedas tabicadas de diferentes formas, según San Nicolás (1639)

Tipo de bóveda	Estribo necesario
Medio punto sin lunetos	L/10
Medio punto con lunetos	L/11
Rebajada ($f=L/6$) sin lunetos	L/9
Rebajada ($f=L/6$) con lunetos	L/10
Media naranja de medio punto	L/10
Media naranja rebajada	L/9
Bóveda baída, bóveda de arista, esquifada medio punto	L/10
Bóveda esquifada medio punto, con lunetos	L/12
Bóveda esquifada rebajada	L/9
Bóveda esquifada rebajada, con lunetos	L/11
Bóveda elíptica, en «cielo de coche», rebajada ($f=L/7$)	L/9

Tabla 4
Dimensiones que deben tener los estribos para bóvedas tabicadas de diferentes formas, según Renart (ca. 1810)

la iglesia del Pino es un coro y la de Narciso Plandolit es el salón de su casa y tiene al menos una planta encima:

En la torre o casa de campo de Don Narciso Plandolit (...) se hizo bajo mi dirección una bóveda a vuelta de coche a la española, en el salón de su casa encima de unas paredes de tapia de 3 palmos y $\frac{1}{2}$ de ancho, de 50 palmos de largo y 30 de ancho y 5 de monte, con tres capas de ladrillo y enladrillado por encima en donde continuamente sirva para poner diferentes frutos de dicha heredad (Renart, 4º Quincenario, 80)

Además de la doble curvatura, la forma en que Renart construye estas bóvedas refuerza su comportamiento bidireccional. Tanto en el texto de sus *Quincenarios* como en alguno de los escasos dibujos que incluye, se insiste en que las lengüetas deben coincidir en la diagonal, incluso cuando eso supone forzar mucho las distancias entre ellas, ver figura 6.

la bóveda baída empuja en los ángulos (...). Las bóvedas en pastera, esquifadas o en rincón de claustro o que formen como un cielo de coche a la española empujan en todas las partes de su ámbito y aunque es verdad que en todo alrededor de ella se han de hacer lengüetas o estribos de en seis palmos (...) se ha de fortificar más en el rincón de ellos con un estribo a cada lado y llenar el hueco de entrambos en dicho rincón de yeso y piedras, más allá de los tercios, como hicimos en la boveda (..) a Don Narciso de Plandolit (Renart, 4º Quincenario, 28–29)

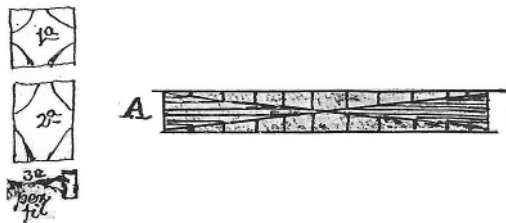


Figura 6
Situación y manera de construir las lengüetas en bóvedas tabicadas. A la izquierda: cuartel de las Atarazanas, con contrabóvedas en las esquinas (Renart, 60). A la derecha, coro de la Iglesia del Pino: lengüetas siguiendo la pendiente y contrabóvedas por encima. Esta bóveda es en planta un rectángulo muy desigual (85×28 palmos), a pesar de ello Renart hace coincidir las lengüetas en la diagonal, para forzar los ángulos (Renart, 61).

A la vista de todo lo anterior, se puede concluir que las reglas de Renart, aunque aparentemente más arriesgadas que las de Fray Lorenzo, son válidas para los edificios que construía: proporciones H/L menores, bóvedas situadas en las plantas inferiores de los edificios y comportamiento bidireccional, debido a la geometría de las bóvedas y a la forma en que las construía, con lengüetas en las diagonales muy rígidas que dirigen el empuje hacia las esquinas.

NOTAS

1. El más completo desarrollo de las reglas de proporción empleadas en estructuras de fábrica, puede consultarse en Huerta (2004, 2ª parte)
2. Todos los autores y tratadistas, empezando por Fray Lorenzo, son muy insistentes en la necesidad de macizar los riñones hasta $\frac{1}{3}$ de la altura de la bóveda y construir lo que llama «lengüetas» (costillas de ladrillo por el extradós) hasta $\frac{2}{3}$ de la altura. Fray Lorenzo es consciente de la función estructural de estos elementos y así lo observa en varios puntos de las descripciones del proceso de ejecución de las distintas bóvedas: a trechos en las de cañón (San Nicolás 1639, folio 91v), radiales en las medias naranjas (San Nicolás 1639, folio 94), y siguiendo la diagonal en de arista (San Nicolás 1639, folio 96v). Estos recursos son especialmente importantes en las bóvedas tabicadas, ya que incrementan su pequeño espesor con un material de comportamiento similar al ladrillo, lo que les permite resistir cargas móviles, concentradas, asimétricas, etc.
3. Atanasio Briguz y Bru fue arquitecto y en 1738 publica en Valencia el tratado *Escuela de Arquitectura Civil*.
4. Juan García Berruguilla fue un arquitecto, cartógrafo y matemático español del siglo XVIII, natural de Granada. Se dedicó principalmente a la inspección de obras y proyectos. Escribió en 1747 un libro de geometría para arquitectos y agrimensores. Este tratado habla poco de construcción, únicamente en el último capítulo, dedicado a las reglas sobre los estribos de los arcos.
5. Antonio Plo y Camín fue arquitecto. Su obra más destacada fue la iglesia de San Francisco el Grande de Madrid, en la que intervino para cerrar la cúpula, la mayor de España, con 33 m de diámetro (Huerta, 2004). Su reconocimiento público era muy amplio, y destacó como tratadista de arquitectura, con su obra *El Arquitecto Práctico, Civil, Militar, y Agrimensor*, dividido en tres libros y publicado en 1767
6. El peso específico de 18 kN/m^3 es el que se indica en la normativa actual para ladrillo macizo; este dato no puede variar mucho con el tiempo, por eso se ha utilizado tal cual. En cuanto al muro, puede ser de ladrillo o

- de sillería con un relleno en su interior. En este último caso, quizá el peso sería algo mayor de los 18 kN/m³ considerados, pero difícil de estimar. El valor empleado va un poco a favor de seguridad.
7. Aunque un edificio es teóricamente estable si la línea de empujes está contenida en el espesor del muro, cuando la línea se acerca al borde el estribo puede girar ligeramente abriéndose en la zona superior. Esta apertura de los apoyos produce grietas en la bóveda e incluso su derrumbe, además de incrementar el empuje sobre el muro. Estos coeficientes de seguridad tan elevados mantienen el muro sin desplomes y evitan estos problemas (Huerta 2004, 104–126)
 8. Con este maestro Pedro Peña, que en este pleito opina como él, tuvo Fray Lorenzo otras desavenencias, ya que Pedro de la Peña critica algunos aspectos de la primera parte de su tratado (San Nicolás 1639), y Fray Lorenzo responde a sus críticas al inicio de la segunda parte (San Nicolás 1663, 2–21). Una de las críticas se refiere en concreto al tamaño y la necesidad de colocar estribos en las iglesias: «quien me podrá negar, que ha de tener el Templo, ò muy gruessas paredes, ò estribos? 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» (San Nicolás 1663, 11)
 9. Un estudio exhaustivo de Josep Renart y de los cambios experimentados en la forma de construir de Barcelona a finales del s. XVIII se puede encontrar en Rosell (1996). También allí está transcrito completo el 4º Quincenario de Josep Renart, dedicado a materiales y técnicas de construcción, que se estudia en este apartado
 10. También en Rosell (1996) se relata la formación intelectual de Josep Renart y los libros que manejaba. En la introducción de su 4º quincenario, cita como influencias a Milizia, Daviler, Bails y Belidor. En la parte dedicada a las bóvedas tabicadas se ve claramente la influencia de Benito Bails (1796).
 11. A Espie lo conoce a través de la traducción de Sotomayor (1776), de la que cita textos literalmente. Según se indica en Rosell (1996), Renart había leído la traducción de Sotomayor a través de otro autor que lo reproduce: Francese Vidal y Cabassés, en un libro titulado *Conversaciones instructivas en que se trata de fomentar la agricultura por medio de riegos*, publicado en Barcelona en 1778.
 12. El propio Renart hace referencia a esta diferencia: hablando de bóvedas de cantería en forma de cañón seguido, propone un ancho de estribo entre $L/2$ y $L/4$, en función de la forma del arco. Pero más adelante, Renart propone un ancho de estribo mucho menor: $L/7$, indicando que es válido para bóvedas baídas, esquifadas o de arista: «El empuje de las bóvedas baídas o bufadas

de rosca de mahones y de sillería será en sus paredes y en sus rincones de las paredes y ángulos pilares, el séptimo de su ancho» (Renart, 4º Quincenario, 71).

13. Este valor es difícil de estimar. Renart indica que la planta de arriba es un almacén para los frutos de la finca. Se toma 200 kg/m² como el valor actual de sobrecarga de uso en vivienda.

LISTA DE REFERENCIAS

- Bails, B. 1796. *Elementos de Matemáticas. Tomo IX. Parte I. Que trata de la arquitectura civil*. Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra. Facs. ed. Murcia: C.O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983.
- Bosch Reitg, Ignacio. 1949. La bóveda vaida tabicada. *Revista Nacional de Arquitectura*. : pp.18599.
- Brizguz y Bru, A. G. 1738. *Escuela de Arquitectura Civil, en que se contienen los ordenes de Arquitectura, la distribución de los planos de templo y casas, y el conocimiento de lo materiales*. Valencia: Oficina de Joseph de Orga. Edición fasc. Zaragoza: Colección Arquitecturas de los Precursores, COA de Aragón, 1992.
- Espie, F.-F., comte d'. 1754. *Maniere de rendre toutes sortes d'edifices incombustibles, ou traîé sur la construction des voltes, faites avec des briques el du platre, dites voutes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briquette*. Paris: Vve. Duchesne.
- García Berruguilla, J. 1747. *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría...*Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados. Facs. ed. Murcia: C.O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1979.
- Huerta Fernández, S. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Marías, F. 1991. «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI». *Les chantiers de la Renaissance*. J. Guillaume (ed.). Paris: Picard: pp. 7183.
- Plo y Camín, A. 1767. *El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor, dividido en tres libros...El II (contiene) la práctica de hacer y medir todo género de bóvedas y edificios de arquitectura*. Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar. Facs. ed. Valencia: Librería Paris-Valencia, 1995.
- Redondo Martínez, E. 2013. La boveda tabicada en España en el siglo XIX. Tesis doctoral. Departamento de Estructuras de la Edificación. ETSAM. UPM
- Renart, J. 4º Quincenario. Manuscrito inédito, ca. 1810. Barcelona.
- Rosell, J. 1996. *La construcció en l'arquitectura de Barcelona a finals del segle XVIII*. Tesis Doctoral presentada en el Departamento de Composició Arquitectónica de la ETSAB.

San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y uso de arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i. Fasc. Madrid: Albatros Ediciones, 1989.

San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1663. *Arte y uso de arquitectura. Segunda parte*. Madrid: s.i. Fasc. Madrid: Albatros Ediciones, 1989.

Sotomayor, J. de. 1776. *Modo de hacer incombustibles los edificios sin aumentar el coste de la construcción. Extractado del que escribió en francés el Conde de Espié*. Madrid: Oficina de Pantaleón Aznar.

