

Introducción: La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Rafael Guastavino

por Santiago Huerta

La teoría cohesiva de Guastavino se refiere a un tipo de construcción, la construcción tabicada, con una antigua tradición en España. Guastavino intentó interpretar esta forma de construir a la luz de sus conocimientos sobre resistencia de materiales y estabilidad de las construcciones adquiridos en su época de estudiante. Estaba también influido por las teorías francesas del siglo XVIII que se recogieron en manuales de gran difusión como el de Blondel/Patte o el de Rondelet. Estas teorías partían de una base absurda: las bóvedas tabicadas son monolíticas y no empujan. Son, por tanto, esencialmente distintas de las bóvedas de fábrica. Este era el marco de pensamiento aceptado en España en la segunda mitad del XIX. Por supuesto, los constructores colocaban estribos o tirantes, para contener esos empujes «inexistentes». Por otra parte, los edificios históricos presentaban grietas que evidenciaban movimientos.

No se pueden entender ni valorar la teoría cohesiva de Guastavino sin un repaso histórico y un análisis crítico a la luz de la moderna teoría de las estructuras de fábrica. Esta introducción pretende suministrar este marco para que el lector pueda formarse su opinión sobre un asunto, el funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas, sobre el que todavía hoy, a pesar de los avances de la teoría, surgen dudas en el contexto de los trabajos de restauración y consolidación estructural.¹

La bóveda tabicada

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, hechas con ladrillo y mortero. Su singularidad proviene de su construcción: los ladrillos se disponen de plano formando una o varias hojas y se ejecutan sin cimbra. En general, los ladrillos se van sentando cerrando arcos o anillos sucesivos, hasta completar la bóveda (Figura 1). Durante su construcción la sujeción de los ladrillos se consigue por la adhesión del mortero de fraguado rápido con los arcos o anillos previos ya terminados, o con los muros de borde. No hay cimbras pero sí se emplean «formas» (cerchas ligeras), camones, o cintreles diversos con el objeto de controlar la geometría de la bóveda, en particular cuando ésta adquiere ciertas dimensiones o se desea una ejecución esmerada (Moya 1947; Gulli 2001). La técnica es en todo análoga a la construcción sin cimbra de bóvedas de rosca de ladrillo, que se emplearon abundantemente en Bizancio. En este último caso, cuando se emplea mortero de cal, de más lento fraguado, la adhesión se suplementa inclinando las juntas de los ladrillos, pero el proceso constructivo se desarrolla de modo similar formando arcos y anillos. Estas coincidencias sugieren un origen común, pero la cuestión aún está abierta a un estudio más profundo (González 1999; Mochi 2001; Tarragó 2001).

Las bóvedas tabicadas se pueden construir con espesores muy pequeños. Lo normal es que sean de 2 hojas (unos 10 cm en total, incluyendo la capa intermedia de mortero y los recubrimientos), pero también se construyeron de una hoja (unos 5 cm). Las esbelteces, relación entre el radio de curvatura y el espesor, se encuentran en torno a 100, pero las hay mucho más esbeltas. También pueden salvar grandes luces, como en el caso de la bóveda sobre el crucero de la catedral de San Juan el Divino en Nueva York, que con 33 m de luz es la más grande construida (Ramazzoti 2001).

Hasta mediados del siglo XIX, las bóvedas tabicadas se emplearon para distintos tipos de elementos: a) para cubrir las naves de las iglesias. En este caso, sólo deben soportar su propio peso y la carga ocasional propia del mantenimiento. En general van protegidas por una techumbre superior de madera; b) para formar forjados; c) para construir escaleras. En la primera mitad del siglo XIX se empezaron a utilizar en España y Francia para la construcción de cubiertas y

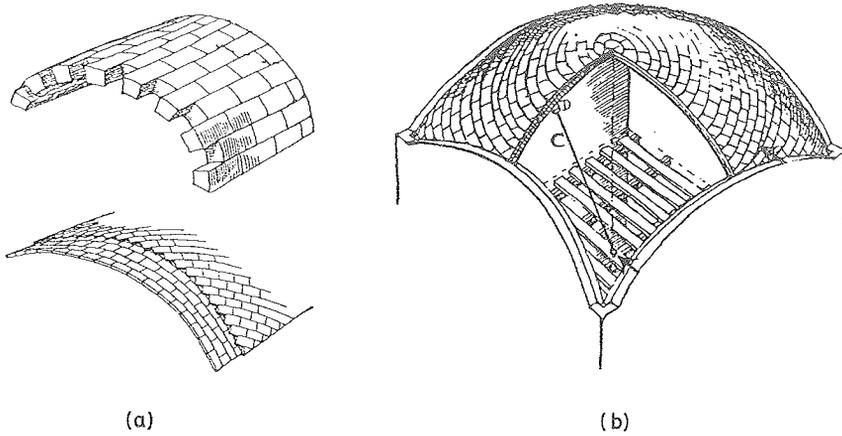


Figura 1

Construcción de bóvedas tabicadas. (a) Comparación entre una bóveda tabicada y una bóveda de piedra de dovelas; (b) Construcción sin cimbra de una cúpula tabicada. La geometría se controla por medio de un cordel atado a un punto fijo (Moya 1947)

suelos de edificios industriales, principalmente de fábricas textiles. El empleo del cemento Pórtland en el doblado permitió usarlas como cubierta, sin necesidad de una techumbre superior u otros métodos de impermeabilización. En la Cataluña de finales del siglo XIX y principios del XX se convirtieron casi en un símbolo nacional (Neumann 1999). Rafael Guastavino las exportó a América, a finales de siglo XIX, y allí les confirió una dignidad que probablemente nunca habían tenido. Las «bóvedas de Guastavino» se construyeron en varios de los edificios más importantes de la zona este de los Estados Unidos de 1890 a 1900 (Collins 1968).

La técnica de la construcción tabicada se conoce bastante bien y puede consultarse a este respecto la amplia bibliografía que aparece en las obras de Collins (1968), Gulli y Mochi (1995), González (1999) y Huerta et al. (2001). No ocurre lo mismo en lo referente a su comportamiento estructural. Los primeros tratados de arquitectura no distinguían entre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas y el de las bóvedas de rosca de ladrillo o piedra. Sin embargo, a partir

del siglo XVIII fueron miradas con desconfianza por algunos arquitectos que aludían a su falta de seguridad y durabilidad. Como se ha dicho, se consideraba que las bóvedas tabicadas tenían un comportamiento estructural esencialmente distinto del de las bóvedas convencionales de ladrillo o piedra: se las consideraba monolíticas y sin empujes. Guastavino las encuadró dentro de las estructuras «cohesivas», en contraposición a las estructuras abovedadas por «gravedad». Se intentaron análisis según el método elástico, que en muchas de las ocasiones fracasaron. En España se las llegó a calificar de «imposibles de calcular», lo que llevó a la demolición de muchas de ellas y a su sustitución por otros sistemas estructurales más convencionales.

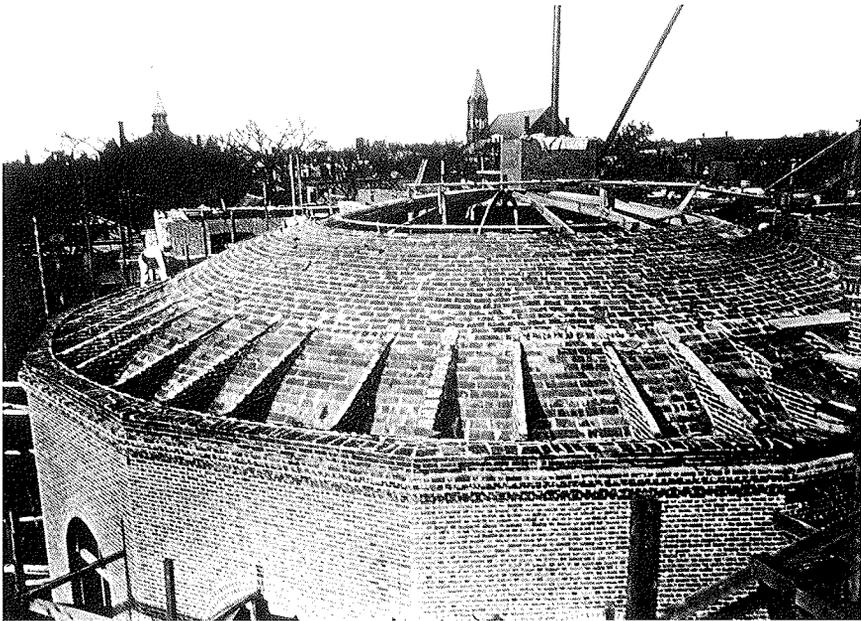


Figura 2

Bóveda tabicada durante su construcción. Las tablas en lo alto no son cimbras sino guías para controlar la geometría durante la ejecución. Nótese los tabiques transversales en los arranques; pueden emplearse para construir sobre ellos la cubierta, pero también son necesarios desde un punto de vista estructural. East Boston High School, Boston, Massachusetts, 1899; de los arquitectos Brown y Moses; el proyecto y construcción de la bóveda se debe a Rafael Guastavino (Avery Library, Universidad de Columbia)

El objetivo principal de este artículo es esbozar la historia de las ideas referentes al comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas, para finalmente devolver a las bóvedas tabicadas a su sitio: las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica. Como cualquier otra estructura fábrica tienen poca resistencia a tracción, se agrietan, y empujan. No son monolíticas ni cohesivas. Pueden y deben calcularse con las mismas herramientas que cualquier otra bóveda de fábrica. No son menos duraderas si reciben el necesario mantenimiento.

La tradición tabicada en España: Fray Lorenzo de San Nicolás.

Los primeros documentos sobre este tipo de construcción se remontan al siglo XIV (Araguas 1999), y todavía se conservan bóvedas de esta época en Cataluña. En el siglo XVI su construcción era habitual (Marías 1991). Eran valoradas por su facilidad de construcción, elevada resistencia, y sobre todo, su menor peso, que permitía reducir considerablemente los muros y machones de contrarresto. Se pueden encontrar referencias directas a las citadas ventajas en algunos informes escritos ca. 1620 durante la construcción del Palacio de Carlos V en Granada (Rosenthal 1988).

El texto más relevante en cuanto a la construcción y mecánica de las bóvedas tabicadas es el tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás, publicado en Madrid en 1639. Fray Lorenzo, que trabajó como arquitecto y construyó muchas bóvedas tabicadas, describe la construcción de los tipos fundamentales de bóveda (de cañón, arista, media naranja, rincón de claustro, etc.) en piedra, rosca de ladrillo y tabicada. No se hacen distinciones en cuanto a la mayor o menor bondad de un material u otro. Fray Lorenzo, al parecer, considera los tres procedimientos igualmente buenos constructivamente y deja al arquitecto la elección en cada caso. Además, resulta muy revelador que, independientemente del material, es preciso dotar a la bóveda de un trasdosado de refuerzo que permita transmitir los empujes hacia los estribos. Así, indica la necesidad de macizar el trasdos en los arranques hasta el primer tercio de la altura de la bóveda y de disponer muros o tabiques de estribo, que llama «lengüetas», hasta alcanzar el segundo tercio. (Este es el método de construcción tradicional, que se utilizó durante más de doscientos años, y en el último periodo por Guastavino; véase Figura 2).

Fray Lorenzo es explícito en cuanto al papel estructural de estos dispositivos: «...y así 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 lengüetas à trechos, que levantan el otro tercio, para que así reciban todo el empujo ò peso de la bobeda». Los rellenos y lengüetas pueden servir para soportar un suelo horizontal pero, además, tienen una función estructural: permiten que la bóveda resista sobrecargas asimétricas o cargas móviles.

Fray Lorenzo se ocupa asimismo del cálculo de los estribos. Da para ello una serie de reglas que se refieren al tipo más habitual en la época: iglesia de una nave con bóveda de cañón de medio punto con lunetos (la planta es de cruz latina, y el crucero se cubre con una cúpula, Figura 3). Procede de forma sistemática, asignando las dimensiones en función del material de la bóveda y considerando dos tipos posibles de estribo: muro continuo o muro con contrafuertes. La exposición es discursiva pero puede resumirse en la Tabla 1.

<i>Material</i>	<i>Muro uniforme</i>	<i>Muro</i>	<i>Muro + estribos</i>
Piedra	$L/3$	$L/6$	$\geq L/3$
Rosca de ladrillo	$L/4$	$L/7$	$L/3$
Tabicada	$L/5$	$L/8$	$L/4$

Tabla 1

Reglas de Fray Lorenzo para el cálculo de estribos. La exposición es discursiva pero es tan sistemática que puede presentarse en forma de tabla (Huerta 2004)

Los antiguos constructores identificaban el empuje de la bóveda con el estribo necesario para resistirlo. La bóveda tabicada empuja menos que la de rosca de ladrillo o piedra, pero empuja, y requiere un sistema de contrarresto.

El tratado de Fray Lorenzo gozó de gran difusión en los siglos posteriores en España (al parecer era empleado por los constructores todavía a principios del siglo XX). No es extraño, se trata de un libro excepcional por la abundancia de temas tratados y por la claridad de su exposición. Sus reglas para los estribos se ci-

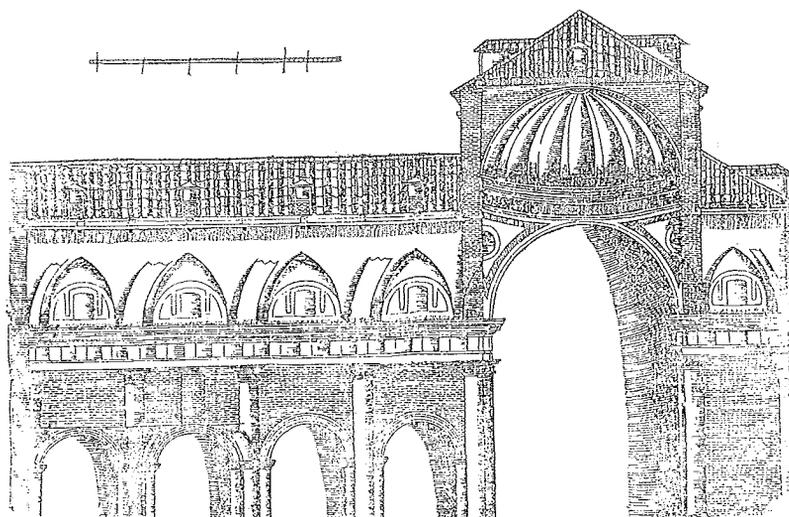


Figura 3

Típica sección longitudinal de una iglesia española del siglo XVII. Nótese el escaso grosor de la cúpula, que puede corresponder a una bóveda tabicada (Fray Lorenzo)

tan en muchos tratados de arquitectura posteriores, por ejemplo el de García Berenguilla (1747) y el de Plo y Camín (1767).

Por supuesto, Fray Lorenzo y el resto de los constructores educados en la construcción tabicada sabían que, una vez terminada la bóveda tabicada, la única diferencia en el comportamiento estructural en relación con las de rosca de ladrillo o de piedra era el menor empuje por la reducción en peso. Seguían haciendo falta estribos, aunque menores. El resto de las circunstancias eran idénticas. En particular las bóvedas tabicadas también se agrietan y las patologías son idénticas a las de ladrillo o piedra.

La tradición tabicada en Francia: El conde D'Espie y el mito del «monolitismo»

En Francia existió una tradición tabicada de influencia española en la región del Rosellón que Bannister (1968) ha estudiado exhaustivamente. Hacia 1700 esta

tradición constructiva pasó al Languedoc francés y, en particular, el duque de Belle Isle construyó una serie de bóvedas tabicadas en su castillo empleando para ello albañiles de Perpiñán. La construcción de estas bóvedas tan ligeras causó gran sensación en aquel momento y fueron discutidas en la Académie Royale d'Architecture tras una memoria presentada el 19 de junio de 1747 por M. Tavenot (Lemmonier 1920). La Académie no aprobaba esta nueva (para ellos) práctica constructiva, pero la memoria presentada por Tavenot era relativamente extensa y se incluyó información adicional en los apéndices.

Este tipo de construcción estimuló la curiosidad de un noble ilustrado, ya retirado, el conde D'Espie. Le interesaba la posibilidad de construir forjados y cubiertas tabicados por su excelente resistencia al fuego. Estudió edificios con este tipo de construcción y finalmente construyó un edificio con este tipo de construcción antiincendio. Todas sus experiencias y opiniones las recogió en un pequeño libro, publicado en 1754, titulado «Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la Construction des Voutes, faites avec des briques et du plâtre, dites Voutes plates; et d'un Toit de brique, sans Charpente, appellé Comble Briquete» (Manera de construir toda suerte de edificios incombustibles, o tratado de la construcción de bóvedas, hechas con ladrillo y yeso, llamadas bóvedas planas, y de un tejado de ladrillo, sin madera, llamado «comble briqueté.») El libro tuvo una gran acogida y en pocos años se tradujo y publicó al inglés (1756), alemán (1760), y español (1775). La segunda edición en francés vio la luz en 1776.²

Espie comienza su libro tratando las ventajas de la construcción tabicada, haciendo hincapié en su incombustibilidad, así como en su reducido peso y adaptabilidad. Escribe también una detallada descripción del método constructivo. Pero lo que tiene mayor interés para el objetivo de esta introducción es que dedica un capítulo a comparar las bóvedas tabicadas con las bóvedas convencionales: «Parallele des Voutes ordinaries Avec les Voutes Plates» (Espie 1754: 40–58). Empieza describiendo de forma cualitativa la forma en que empujan las bóvedas de fábrica. Así indica que hay que considerar el espesor de la bóveda, su altura o flecha y la altura del estribo. Cita a Bélidor (1729) en relación con el cálculo de empujes y advierte de los peligros de basar los proyectos en una práctica que no se basa en la teoría. Inmediatamente observa que las citadas reglas no se aplican a

las bóvedas tabicadas pues estas son de una naturaleza diferente y no empujan contra los muros: «Les Voutes plates étant d'une nature différente n'ont pas besoin qu'on suive dans leurs constructions les mêmes regles & les mêmes principes que dans les précédentes, il est donc inutile d'examiner si les murs sont épais ou non . . . car je ne suis pas de ceux qui croient que ces Voutes poussent les murs . . .» (Espie 1754: 44).

Espie atribuye esta ausencia de empujes al carácter monolítico de la bóveda terminada, que forma una masa sólida gracias a la buena calidad del mortero empleado. Como no es posible que se produzcan grietas o se divida en trozos la bóveda no produce empujes: «. . . car le Plâtre lorsqu'il est bien lié avec la Brique fait de toute la Voute entière un corp massif qui n'a aucun jeu dans ses parties: elles ne se pousseront jamais les unes contre les autres, puisque le tout ensemble ne fait qu'une masse solide qui se contiendra toujours d'elle-même sans se diviser, pour peu qu'elle soit soutenue» (Espie 1754: 57).

A continuación cita una serie de observaciones, unas realizadas por él personalmente, otras referidas por terceras personas, que ratifican la teoría monolítica de ausencia de empujes. En un caso realiza una prueba de carga; en otro, corta la bóveda salvo en las cuatro esquinas. Realiza agujeros en bóvedas construidas para comprobar su resistencia. También relata la experiencia de un conocido que construyó una pequeña bóveda sobre un marco de madera y, una vez fraguado el mortero, la hace rodar por una estancia y la golpea con un martillo. Resulta evidente que quien escribe no es un constructor familiarizado con la técnica tabicada. Es interesante notar el enfoque «científico», intentando obtener conclusiones de los experimentos. Sin embargo los experimentos se pueden interpretar de muchas maneras y, de hecho, muchos de los ensayos que relata se pueden realizar con bóvedas de fábrica convencionales con los mismos resultados. Ninguna teoría es una consecuencia directa de una serie de experimentos.

De cualquier forma, las ideas y experiencias recogidas por Espie fueron aceptadas, en general, sin crítica por los autores posteriores. La ausencia de empujes y la invulnerabilidad al fuego eran argumentos poderosos que suscitaron un interés inmediato, no sólo en Francia sino también en el resto de Europa. El hecho de que hubiera traducciones al español, inglés y alemán en pocos años es un hecho

inusual. Además importantes tratadistas franceses y europeos se hicieron eco de este nuevo sistema constructivo, basándose en el libro de Espie y recogiendo sus ideas. Este es el caso de Laugier (1755) y de Rieger (1763), pero tuvo particular importancia que las bóvedas tabicadas recibieran un extenso tratamiento en el tratado de Blondel/Patte (1771–1777), uno de los más influyentes de su época. En el tomo sexto se le dedica un capítulo completo, con 40 páginas y 7 estupendas láminas, que sin duda contribuyeron a difundir la construcción tabicada (Figura 4).

Dos decenios más tarde Rondelet (1802) resumió esta información en un apartado de su *Traité de l'art de bâtir*, incluyendo ilustraciones. El tratado de Rondelet fue uno de los más influyentes del siglo XIX; se imprimieron numerosas ediciones y fue traducido al alemán e italiano. De este modo a finales de siglo XVIII en

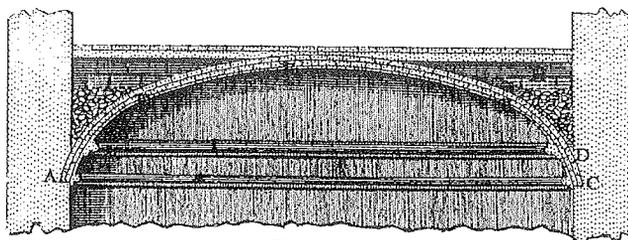


Fig. X.

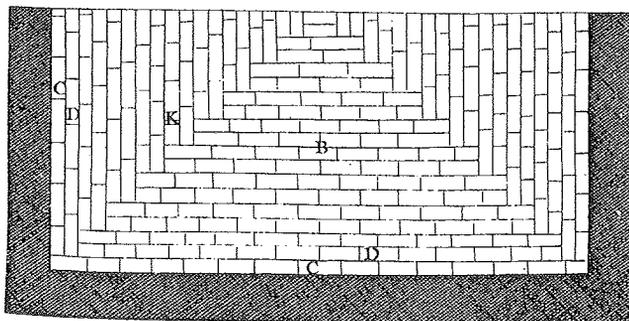


Figura 4

Bóveda tabicada para el forjado de un edificio. Nótese el relleno en los riñones y la existencia de tabiques transversales para soportar el suelo. En planta el tipo de aparejo de los ladrillos formando arcos sucesivos paralelos a los muros (Blondel 1777: vol. 6, Lámina 95)

Francia había una teoría de la construcción tabicada que se basaba principalmente en las opiniones de un noble ilustrado que quería «servir a la comunidad».

Algunas de las ideas más fantásticas sobre las bóvedas tabicadas (monolitismo, ausencia de empuje, etc.), que se difundieron con rapidez por toda Europa (incluso volviendo a España donde la influencia francesa era muy grande entonces), tenían su origen en el tratado del conde de Espie. Estas ideas llegaron a formar el marco de referencia para aproximarse a estas estructuras.

La edición española de Sotomayor y la «Censura» de Ventura Rodríguez

El libro de Espie fue traducido al castellano por Joaquín de Sotomayor (1776). Sotomayor incorpora, entre corchetes, sus propias opiniones y experiencias. Resulta interesante que el libro vaya precedido de una «Censura de D. Ventura Rodríguez, Arquitecto mayor de Madrid», uno de los arquitectos españoles más importantes del siglo XVIII. El comienzo marca el tono de la censura: «Lograría considerables ventajas el arte de edificar, si todas las ideas que nos proponemos asequibles tuvieran en la práctica el buen éxito que a la fantasía aparece». A continuación sigue una crítica acerba de las ideas fundamentales de Espie: el monolitismo y la consiguiente falta de empujes. Ventura Rodríguez cita varios casos de agrietamientos y desplomes en edificios construidos que demuestran el empuje de las bóvedas: «Pero esta suposición [de ausencia de empujes], o creencia, es lijonjera no obstante las experiencias que cita, y no se verifica efectiva, como acreditan los evidentes ejemplos que tenemos en casi todos los Templos de Madrid, cuyas bóvedas son tabicadas de ladrillo y yeso, de curvatura más elevada, y con paredes más gruesas, amparadas de estrivos, que a favor de la firmeza son grandes ventajas . . . y las vemos quebrantadas por muchas partes, y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje . . .».

Insiste varias veces en la necesidad de dar contrarresto suficiente a las bóvedas tabicadas y recalca la importancia de la «firmeza», además de la «hermosura» y la «comodidad», pues si aquella falta «todo es perdido». Ventura Rodríguez, pues, no comulga con las opiniones de Espie y Sotomayor, considerándolas incluso peligrosas. Hay que resaltar que Sotomayor, como Espie, era un aficionado a la construcción, no un constructor. Ventura Rodríguez, un arquitecto de gran

experiencia vio inmediatamente los errores de la teoría «monolítica», sin empujes, del conde de Espie.

Los primeros ensayos científicos en Francia

Aparentemente el interés por la construcción tabicada se mantuvo en Francia durante el siglo XIX. Faltan estudios históricos sobre este tema y la única evidencia que hemos encontrado es la realización de ensayos tratando de determinar el empuje y resistencia de las bóvedas tabicadas: D'Olivier (1837) y Fontaine (1865). Es reseñable que en los dos casos se considera el empuje de la bóvedas (contrariamente a lo que indicaban las teorías de Espie) y los cálculos realizados seguían las reglas de la teoría convencional de bóvedas de fábrica. De particular interés son los ensayos de rotura a gran escala descritos por Fontaine. Uno de los ensayos es sobre tres bóvedas tabicadas de 4 m de luz y 0,4 m de flecha, entre perfiles en I de hierro forjado (de 47 cm de canto) con una luz de 6,25 m, cubriendo una superficie total de 72 m². El ensayo se llevó hasta la rotura, produciéndose para una sobrecarga de 1.250 kg/m². En otro ensayo anterior sobre una bóveda tabicada de un solo vano de 3,75 m (de nuevo con una proporción flecha/luz de 1/10), se alcanzó una sobrecarga de 2.700 kg/m², sin llegar a la rotura. Ensayos de tal magnitud no se hacen de manera aislada, siendo más probable que se produjeran en el contexto de la construcción de bóvedas incombustibles para fábricas (de hecho la modulación en planta del ensayo de tres bóvedas coincide con la habitual para fábricas textiles).

Tratados españoles de la primera mitad del siglo XIX: Bails y Fornés

En el siglo XIX español, la influencia de Espie es evidente en dos tratados que se ocupan de la construcción tabicada, los de Benito Bails (1796) y Manuel Fornés y Gurrea (1841, 1846). Bails fundamentalmente compila y plagia tratados franceses anteriores, en particular el de Blondel/Patte (Navascués 1983). Dedicar un capítulo a la construcción tabicada. En primer lugar transcribe los párrafos correspondientes del tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás, pero luego copia

directamente, traduciendo al español, del de Blondel/Patte. Aparentemente no percibe la contradicción entre los dos textos.

Los tratados de Fornés son originales. El primero publicado en 1841, y revisado en 1857, expone la manera de construir bóvedas tabicadas haciendo una nueva aportación. Explica con gran detalle el modo de construir los principales tipos de bóvedas tabicadas: de cañón (con y sin lunetos), de escaleras (a montacaballo y de caracol), cúpulas y pechinas, etc. En cuanto a los empujes, Fornés considera que las bóvedas tabicadas empujan, aunque menos, debido a su menor espesor, siguiendo la tradición de Fray Lorenzo de San Nicolás y Ventura Rodríguez.

No obstante, Fornés conoce las ideas de Espie, probablemente a través de Bails, y empiezan a aparecer contradicciones. Así, en una primera parte del tratado discute la geometría y el espesor de las bóvedas que determinarán los empujes y por tanto la sección de los muros para soportarlos. Pero más adelante escribe: «[la bóveda tabicada] . . . cubierta la obra y paredes enjutas, su fábrica se reduce a un cuerpo sólido, igual por ejemplo a una cobertera de puchero, sin más empuje que el de su peso» (Fornés 1841: 47). Del mismo modo que Bails parece no darse cuenta de estas contradicciones. Sin embargo todos los proyectos de abovedamiento que incluye en su segundo tratado tienen el contrarresto habitual de las estructuras de fábrica.

La teoría de la «construcción cohesiva» de Rafael Guastavino

Rafael Guastavino Moreno fue el primero en intentar formular una teoría que explicase de forma científica el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. Para encuadrar su obra es necesario dar primero una breve reseña biográfica de su fascinante vida. Nacido en Valencia en 1842, viajó a Barcelona en 1861 donde comenzó sus estudios de maestro de obras, y, después, de arquitecto. En 1866 ya había construido un bloque de pisos y en 1868 comenzó la construcción de la gran Fábrica Batlló. Aquí empleó la técnica tabicada de modo extensivo (Figura 5); para entonces ya estaba convencido que el progreso futuro y la perfección de la construcción de fábrica se basaba en este tipo de edificación. Esta idea se convirtió en el objetivo de su vida.

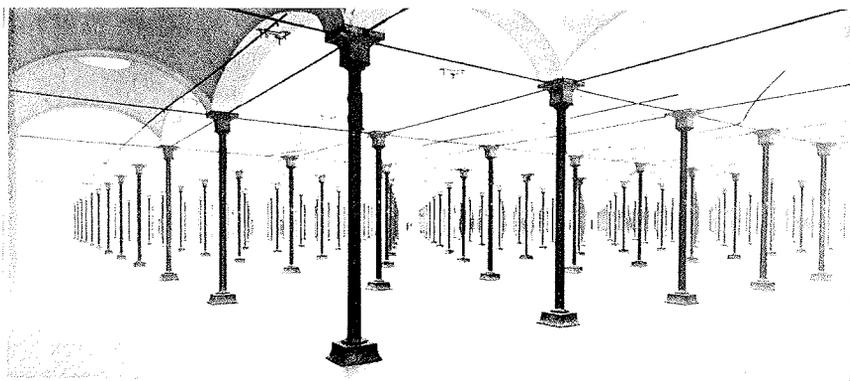


Figura 5

Fábrica Batlló en Barcelona (1868–1870). Vista del interior con un uso extensivo de las bóvedas tabicadas (Archivo Histórico de la Diputación de Barcelona)

Más tarde construyó algunos edificios en Barcelona (Bassegoda 2001). Luego, ganó un premio en la Exposición de Filadelfia en 1876 y finalmente decidió emigrar a América, llegando a Nueva York en 1881 con su hijo mayor también llamado Rafael. Tras un breve periodo en el que ejerció como arquitecto, decidió que el mejor modo de promocionar el uso de la construcción tabicada era trabajar como constructor. En 1889 fundó la Guastavino Fireproof Construction Company. En ese mismo año comenzó su primera gran obra: la construcción de las bóvedas de la Biblioteca Pública de Boston de los arquitectos McKim, Mead y White. La audacia y ligereza de esta nueva estructura obtuvo gran admiración. Debemos recordar que antes de Guastavino muchas de las bóvedas que se construían en América eran falsas, encamionados que colgaban de armaduras de madera o hierro, lo que era más barato que las bóvedas usuales de piedra o ladrillo. Las bóvedas tabicadas, de mucho menor peso y construidas sin necesidad de pesadas cimbras, resultaron muy atractivas para muchos arquitectos. Tras la Biblioteca Pública de Boston, Guastavino trabajó para algunos de los arquitectos más importantes del momento (Collins 1968). Pero no fue todo tan fácil; este tipo de abovedamiento era completamente desconocido en América y era mirado con reticencia por muchos constructores. Lo primero que tuvo que hacer Guastavino, por tanto, fue convencer a los arquitectos e ingenieros americanos de la resistencia y

alta calidad de estas estructuras, y demostrar su parentesco con grandes obras maestras de la historia de la arquitectura, como el Panteón de Roma o Santa Sofía de Constantinopla.

Guastavino necesitaba una teoría tanto histórica como técnica, algo que sintió desde el principio de su carrera en Barcelona. En primer lugar expuso sus ideas en una serie de conferencias en la Sociedad de las Artes del Instituto Tecnológico de Massachussets en 1889. También en este año publicó una serie de artículos en revistas, y finalmente, presentó sus ideas en un libro. *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timber arch* (Ensayo sobre la teoría e historia de la construcción cohesiva, con particular atención a la bóveda tabicada) publicado en 1892 y vuelto imprimir con mínimas modificaciones en 1893 [Primera parte del presente libro.] (Sobre la génesis de este libro véase Parks (2001)). Con posterioridad Guastavino publicó otros artículos adicionales y ponencias en congresos (para una bibliografía completa véase (Huerta et al. 2001)), y también otro libro titulado *La función de la fábrica en la construcción moderna* (Parte I, 1896; Parte II, 1904) [Segunda parte de este libro.]. Este último libro es clave para entender el pensamiento arquitectónico de Guastavino, pero no incluye ninguna novedad en cuanto a las ideas y cálculos sobre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. En lo que sigue nos referiremos al *Ensayo* de 1893, que es donde se recoge su teoría estructural sobre la bóvedas tabicadas.

La primera parte es autobiográfica y en ella Guastavino explica las fuentes en las que basa sus ideas. Menciona las clases que recibió en la Escuela de Arquitectura de Barcelona de sus maestros Juan Torras y Elías Rogent. Según dice, fueron ellos quienes le llamaron la atención sobre esta forma de construcción que, según afirma en varios lugares de su libro, había sido olvidada durante largo tiempo. Esta última afirmación resulta dudosa.³ No sabemos en que pudieron consistir estas clases en Barcelona pero es probable que se tratara de las ideas de monolitismo y continuidad del conde de Espie, recogidas como hemos visto en algunos tratados españoles de entonces (Sotomayor 1776; Bails 1796; Fornés 1841).

Guastavino divide las construcciones de fábrica en dos grupos en función de su comportamiento mecánico: «Podemos dividir la construcción de fábrica en

dos tipos: 1) la construcción mecánica, o construcción por gravedad, y 2) la construcción cohesiva, o por asimilación. La primera se basa en la resistencia de cualquier sólido a la acción de la gravedad cuando es contrarrestado por otro sólido. De este conjunto de fuerzas, más o menos opuestas entre sí, resulta el equilibrio de la masa total, sin tener en cuenta el poder cohesivo del material existente entre los sólidos. La segunda tiene por fundamento las propiedades de cohesión y asimilación de distintos materiales que, por una transformación más o menos rápida, imitan el proceso de formación de conglomerados en la Naturaleza» [p. 25 del presente libro].

La construcción tabicada es cohesiva, pero no es el único tipo de construcción cohesiva. En la segunda parte de su *Ensayo* realiza una revisión histórica que resulta algo confusa. Así, la construcción romana de hormigón es evidentemente cohesiva, pero Guastavino también considera cohesivas la bizantina e islámica de ladrillo y menciona la Edad Media como la época en que se desarrolló verdaderamente el sistema cohesivo. También las grandes cúpulas del Renacimiento son cohesivas. De hecho la lista de edificios citados incluye algunos de los edificios más notables de diferentes épocas y estilos: las termas de Caracalla, Santa Sofía, la catedral de Zamora, Santa María del Fiore y el Baptisterio en Florencia, San Pedro de Roma, Santa Genoveva en París, San Pablo de Londres, y dos cúpulas tabicadas valencianas, la de la basílica de los Desamparados y la de los Escolapios. Aparentemente, cualquier edificio construido con un material que presente una buena adhesión con el mortero, ya sea hormigón romano, una fábrica de ladrillo o una bóveda tabicada, entra dentro de la construcción cohesiva. No hay duda de que Guastavino está buscando argumentos históricos a favor de la construcción tabicada.

Otro punto de gran importancia es su puntualización sobre el carácter «natural» de la construcción cohesiva de bóvedas tabicadas. Guastavino estaba fascinado por la posibilidad de construir edificios por la aglomeración de pequeñas piezas, como la naturaleza hace al formar sus conglomerados. Describe la profunda impresión que le produjo una visita a la gran cueva del Monasterio de Piedra: «Mientras contemplaba la cascada de agua en aquella inmensa estancia, me invadió el pensamiento de que todo ese espacio colosal estaba delimitado por un único elemento constituido por una sólida masa de cimientos, muros y techo, y

de que se había construido sin cimbras o andamios . . . Esta gruta es realmente un ejemplo magnífico de la construcción cohesiva. ¿Por qué no hemos construido con este sistema?» [p. 4]

Este pasaje es clave a la hora de entender el pensamiento estructural de Guastavino. La idea de que la construcción cohesiva (incluyendo la construcción tabicada) es una construcción «natural» y, por tanto, «más racional, duradera y económica», le vino como una revelación y fue la fuerza motriz que le impulsó en su trabajo durante toda su vida. Como veremos, el carácter cohesivo no influye en el comportamiento esencial de las fábricas tabicadas, pero los trabajos e investigaciones destinadas a mejorar la cohesión se tradujeron en una perfección en la ejecución del sistema tabicado, como nunca antes se había conocido.⁴ Por otra parte, en la observación acerca del carácter monolítico de la estructura (cubierta «por un único elemento») se aprecia la influencia de las ideas de Espie, que Guastavino pudo haber escuchado en sus clases en Barcelona. Sin embargo, la característica esencial de la construcción tabicada, la posibilidad de prescindir de cimbras, aunque mencionada, pasa a un segundo plano en el *Ensayo*.

Ventajas de las bóvedas tabicadas «cohesivas»

Guastavino explica las diferencias entre la construcción por gravedad y la cohesiva en relación con las bóvedas tabicadas, con el fin de poner de manifiesto las ventajas de esta última [pp. 29–31]. Compara un arco tabicado de una hoja con otro arco tabicado de dos hojas (Figura 6). En el arco de una hoja hay juntas entre los ladrillos y, por tanto, dice que funcionan como lo hacen las dovelas en un arco un tradicional por gravedad. El arco de dos hojas, con mortero entre ellas, y sentando siempre los ladrillos a matajunta, constituye un arco que funciona al modo de las estructuras cohesivas, capaz de resistir momentos flectores. La evidencia de esta afirmación, dice Guastavino, es que es posible construir arcos de 6 m de luz y sólo 7,5 cm de espesor y al cabo de unas pocas horas los obreros pueden caminar sobre ellos sin ningún peligro, lo que implica sin duda cierta resistencia a los momentos flectores. Finalmente, observa que la forma empleada para la construcción puede correrse sin dificultad bajo la bóveda terminada, prueba de que ésta no se ha deformado. Guastavino atribuía gran importancia a

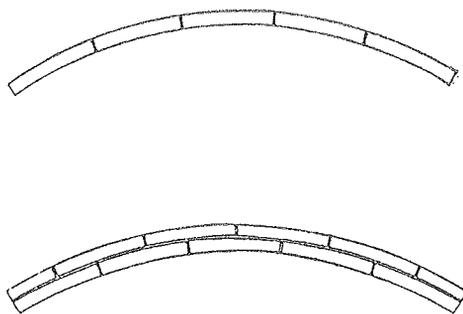


Figura 6

Comparación entre un arco «mecánico» (arriba) y un «arco cohesivo» (abajo)

esta característica de los arcos tabicados, y no es casualidad que él mismo se fotografiara de pie sobre uno de los arcos tabicados de la Biblioteca Pública de Boston que estaban recién ejecutados (Figura 7).

Guastavino atribuía muchas de las ventajas estructurales de las bóvedas y arcos tabicados a la disminución del número de juntas. De hecho si fuera posible construir sin juntas esto sería idóneo: «Es evidente que si fuéramos capaces de construir una bóveda sin juntas, sería lo mejor, ya que no sufriría asientos» [p. 29]. Otra vez aparece el mito del monolitismo. Por supuesto los arcos y bóvedas de fábrica se agrietan debido a cambios en su geometría; este es el único modo en que las estructuras de fábrica se adaptan a los cambios en las condiciones de contorno.⁵

Guastavino resume las ventajas de los arcos y bóvedas tabicados en relación con los arcos mecánicos: Las juntas verticales quedan protegidas contra el agrietamiento por el doblado a juntas encontradas; hay un menor número de juntas verticales; cuentan con capacidad de resistir momentos flectores. [p. 31]

Por supuesto, los arcos de hormigón en masa son arcos cohesivos sin juntas verticales, pero Guastavino los descarta por el coste excesivo y por los problemas que podría plantear un fraguado irregular.

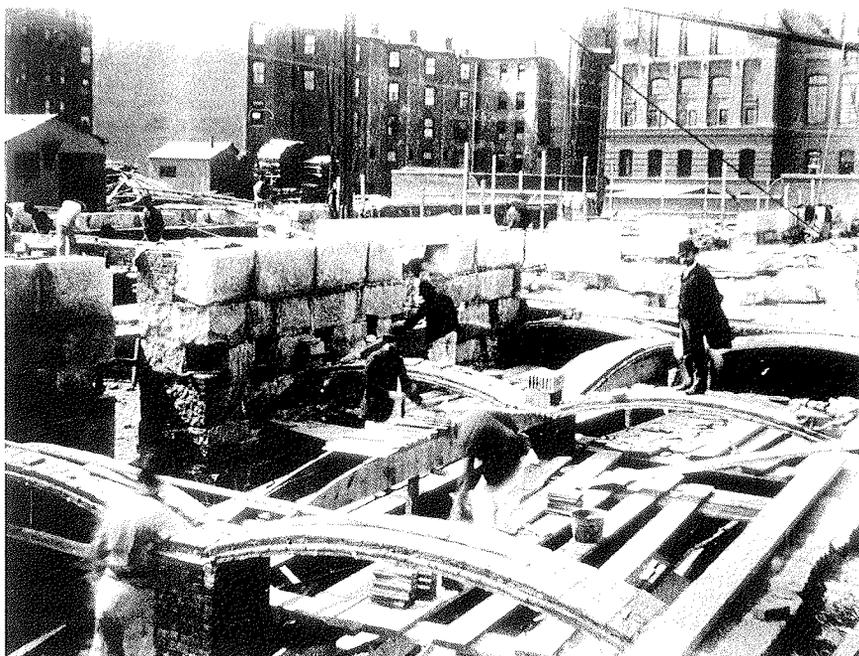


Figura 7

Construcción de arcos tabicados. El hombre de pie es Rafael Guastavino, demostrando la resistencia de estos delgados arcos. Boston Public Library, 1889–1890, de los arquitectos McKim, Mead y White (Avery Library, Universidad de Columbia)

Ensayos de resistencia

Guastavino era muy consciente del problema que supondría convencer a los arquitectos americanos de las bondades del sistema tabicado de construcción. Incluso en España, donde la práctica se remontaba a varios siglos atrás, estas estructuras eran vistas a menudo con desconfianza. Las especulaciones teóricas e históricas eran necesarias pero había, sobre todo, que realizar ensayos científicos. Aunque, como se ha visto, se realizaron ensayos con anterioridad en Francia, Guastavino no los conocía y realizó sus propios ensayos. Los primeros ensayos sistemáticos se hicieron en 1887 sobre probetas (Figura 8) [p. 33]. Con posterioridad, en 1901, llevó a cabo ensayos de carga y ensayos de incendios para demostrar la resistencia y la invulnerabilidad al fuego características de la construcción

tabicada. En los ensayos sobre probetas trató de obtener unos valores de las tensiones de rotura a compresión, tracción, cortante y flexión, que le permitieran verificar la seguridad de sus bóvedas por comparación con las tensiones de trabajo. Se trata, pues, del enfoque de resistencia de Navier (Heyman 2001). Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 2. Es interesante que no se cite ningún intento de determinar las constantes elásticas como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

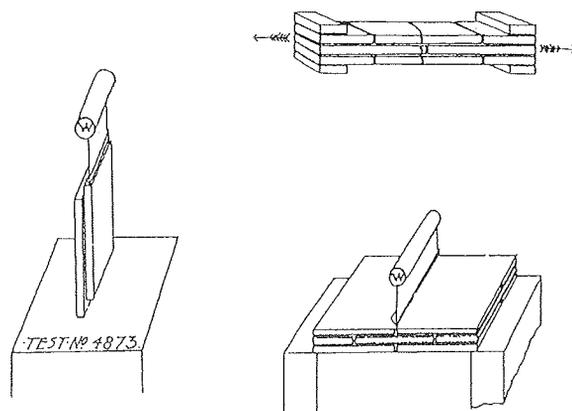


Figura 8

Probetas para los ensayos de resistencia realizados por Guastavino: (a, arriba derecha) tracción; (b, abajo derecha) momento flector; (c, izquierda) cortante

Resistencia	N/mm ²
compresión	14,6
tracción	2,0
cortante	0,9

Tabla 2

Tensiones de rotura de probetas tabicadas

Para contrastar estos resultados con estructuras reales, realizó ensayos de rotura sobre bóvedas tabicadas con una flecha de $l/10$ de la luz. En la Figura 9 se

muestra la foto de uno de estos ensayos. La foto es espectacular y dice más en favor de la resistencia de las bóvedas tabicadas que cualquier teoría o conjunto de ensayos de laboratorio. En este caso, es evidente que los ensayos tenían una parte propagandística que, por otra parte, era algo frecuente a finales del siglo XIX.⁶ En otras ocasiones los ensayos de carga se realizaban en obra durante la construcción (Figura 10).



Figura 9

Ensayo de resistencia sobre una bóveda de cañón tabicada, 1901 (Avery Library, Universidad de Columbia)



Figura 10

Ensayos de carga realizados por Guastavino en una escalera durante la construcción, 1903 (Avery Library, Universidad de Columbia)

El empuje de las bóvedas y cúpulas tabicadas

Prácticamente la única información sobre los métodos de cálculo empleados por Guastavino se encuentra en el *Ensayo*. (Los métodos gráficos parece que deben atribuirse a su hijo Guastavino Expósito y se tratarán más adelante). Guastavino trata dos temas típicos: la bóveda de cañón rebajada y la cúpula esférica, también rebajada. Para obtener el empuje de un arco o bóveda de cañón rebajada da la siguiente fórmula [p. 34]:

$$A\sigma_c = \frac{Pl}{8f} \quad (1)$$

donde A = área por unidad de longitud transversal a la bóveda en la clave; σ_c = tensión de rotura a compresión; P = carga total (peso propio más relleno y sobre-

carga) que actúa sobre la bóveda por unidad de longitud; l = luz de la bóveda; f = flecha de la bóveda.

La fórmula relaciona la carga P , con el área A (esto es, con el espesor) y la tensión de rotura σ_c del material para una determinada geometría del arco. Se trata de la conocida expresión del empuje de un arco parabólico sometido a una carga uniformemente repartida, aunque la «demostración» de Guastavino es difícil de comprender. La fórmula es aproximada ya que la carga real no es exactamente uniforme, pero para bóvedas rebajadas es suficientemente buena. Guastavino da un ejemplo de aplicación: calcular el espesor de un bóveda con una luz de 4,5 m, con una relación flecha/luz de 1/10 que ha de soportar una carga uniformemente repartida de 12 kN/m². El material tiene una tensión de rotura 14,21 N/mm². Guastavino considera que la tensión de trabajo admisible es 1/10 de la tensión de rotura. Entrando en la fórmula con la tensión admisible de 1,42 N/mm² se obtiene un espesor de 4,8 cm, esto es dos hojas de ladrillos o rasillas de una pulgada (2,54 cm) de espesor. Por supuesto, considerar 10 como coeficiente de seguridad es, quizá, excesivo incluso para un material irregular como la fábrica tabicada y más adelante Guastavino reconoce que se podría considerar como tensión de trabajo 1/4 ó 1/5 de la tensión de rotura [p. 96].⁷ De hecho, en las fábricas, también en las tabicadas, el criterio que rige el proyecto de la estructura no es de resistencia sino de estabilidad. La seguridad se obtiene dando un espesor suficiente. Puede ser que la oscilación entre 10 y 4 del coeficiente de seguridad le permitiera a Guastavino obtener el espesor que le parecía adecuado en cada momento.

La fórmula proporciona el espesor en la clave. El esfuerzo será mayor en los arranques y para hallar el nuevo espesor aplica la «fórmula de Dejaridin» (Dejaridin 1860), que determina el incremento de los esfuerzos desde la clave a los arranques [p. 34]. El cálculo de Guastavino es, evidentemente, un cálculo de equilibrio por el que obtiene un valor del empuje, para luego hacer comprobaciones de resistencia (normalmente innecesarias) y para calcular el sistema de contrarresto, ya sea mediante estribos de fábrica o, con mayor frecuencia, mediante algún sistema de tirantes de hierro forjado.

No obstante, a finales del siglo XIX el cálculo elástico era considerado como la mejor opción para analizar arcos de fábrica y el enfoque de equilibrio,

aunque se empleaba en la práctica, era mirado con suspicacia por los ingenieros. Guastavino con toda probabilidad no tenía la formación suficiente para realizar un cálculo elástico que incluso en los casos más sencillos conduce a complicadas integrales. Por este motivo encargó a un profesor de mecánica aplicada del MIT, Gaetano Lanza (1891), la elaboración de una tabla para el cálculo elástico de las tensiones en arcos tabicados teniendo en cuenta el esfuerzo normal y el momento flector. La tabla se incluye, sin ninguna explicación, al final del libro [p. 95]; otro paso más a la hora de dar respetabilidad científica al cálculo de bóvedas tabicadas. Comparando los resultados de la aplicación de su fórmula con la tabla de Lanza no se aprecian, como es lógico para arcos rebajados, diferencias significativas.

Trata a continuación las cúpulas, que considera la forma por excelencia: «La cúpula es la forma mejor de la construcción cohesiva para techos, forjados y cubiertas, así como para la construcción de bóvedas tabicadas» [p. 38]. Para calcular su empuje Guastavino acude a otra aproximación, razonando (erróneamente) de forma geométrica al comparar las áreas de una esfera y un semicilindro de la misma directriz desarrollados en planta. En efecto, cortando el cilindro como se indica en la figura [p. 43] y juntando las lunas rayadas se podría formar un cúpula poligonal de forma muy aproximada a una esfera y, viendo la planta, Guastavino considera que el peso de la cúpula es la mitad que el de la correspondiente bóveda de cañón y que por tanto el empuje será la mitad. De hecho, el peso es diferente y también cambia la posición de los centros de gravedad, pero el considerar el empuje de la cúpula mitad que el de la bóveda de cañón de la misma directriz, va a favor de seguridad, puesto que es normalmente menor. La idea proviene de Frézier (1760: 3, 406), se difundió después en algunos manuales de arquitectura y construcción, y Guastavino pudo haberla aprendido en sus clases de Barcelona. Si en el caso de los arcos rebajados la fórmula (1) daba una buena aproximación del empuje, en este caso puede haber desviaciones notables (véase nota 17 en p. 170), como él mismo reconoce: «No pretendemos dar un fórmula matemática absoluta, sino una regla práctica que sea suficiente para garantizar la seguridad del edificio».

Guastavino está empleando el conjunto de reglas sencillas que eran habituales en el cálculo de los empujes de arcos de dovelas, bóvedas y cúpulas de fá-

brica, pero aparentemente no es consciente de ello. Por otra parte, tras calcular el empuje de la forma indicada, sin considerar flexiones, incurre en una contradicción al afirmar: «Consideramos nuestro arco no como un arco de dovelas, sino como un arco simple de fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro» [p. 40] y, más adelante, «Tampoco estamos considerando aquí una cúpula de dovelas, sino una tabicada que funciona como una simple cúpula de fundición, trabajando como una pieza única» [p. 44]. A continuación dedica unos párrafos a explicar por qué el empuje de un arco tabicado existe pero es menor que el de un arco de dovelas y, siguiendo el razonamiento aplicado a las cúpulas, observa que las cúpulas cohesivas, que resisten tracción, forman sus propios zunchos y en consecuencia la cúpula apenas empuja. Sin embargo, en cualquier sección constructiva de una cúpula de Guastavino puede observarse un zuncho metálico para resistir el empuje. En los archivos de Guastavino se encuentran numerosos planos de tales zunchos, que también se aprecian en todas las secciones de cúpulas que se conservan en la Avery Library.

El tratado contiene más observaciones sobre el funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas y algunas de ellas denotan un profundo conocimiento, pero, como se ha visto, el texto está también lleno de incoherencias fruto de querer aplicar su teoría cohesiva. Así, tras haber deslumbrado al lector con una observación penetrante sobre un aspecto del comportamiento estructural de algún elemento, incurre de nuevo en contradicciones o hace afirmaciones dudosas.

Teoría y práctica en la obra de Guastavino

Tras un examen de la teoría de bóvedas de Guastavino, muchas veces incorrecta y con numerosas contradicciones se podría pensar cómo es posible que fuera, con su hijo, uno de los más grandes constructores de bóvedas y cúpulas de fábrica. La enorme variedad de soluciones constructivas, el ingenio y la maestría que demuestran, la audacia de proyectar cúpulas con formas sin precedente, todo ello contrasta con el carácter ciertamente algo tosco de la teoría. ¿Cómo es esto posible?

Por un lado Guastavino trata de pensar dentro del marco de referencia del monolitismo, la cohesividad, la resistencia a tracción y flexión: es el marco que le ha

sido dado en la época en que vivió, la segunda mitad del XIX, la época del desarrollo de la teoría de la elasticidad, dentro de la que se incorporan con comodidad los conceptos anteriores de Espie (cámbiese monolitismo por continuidad, homogeneidad e isotropismo).

Por otro lado Guastavino es un gran constructor y arquitecto de bóvedas. Posee la intuición que nace del conocimiento de que el problema crucial en el proyecto de las fábricas no es la resistencia sino la geometría. Es la antigua tradición del proyecto de estructuras de fábrica. Además cuando calculaba empleaba el enfoque habitual, y correcto, del equilibrio utilizando reglas sencillas o análisis gráficos. En la Figura 11, por ejemplo, vemos el análisis gráfico de los grandes arcos de fábrica huecos que deberían haber sustentado la cubierta de ladrillo de St. John the Divine (la solución finalmente construida consistió en unas cerchas metálicas convencionales).

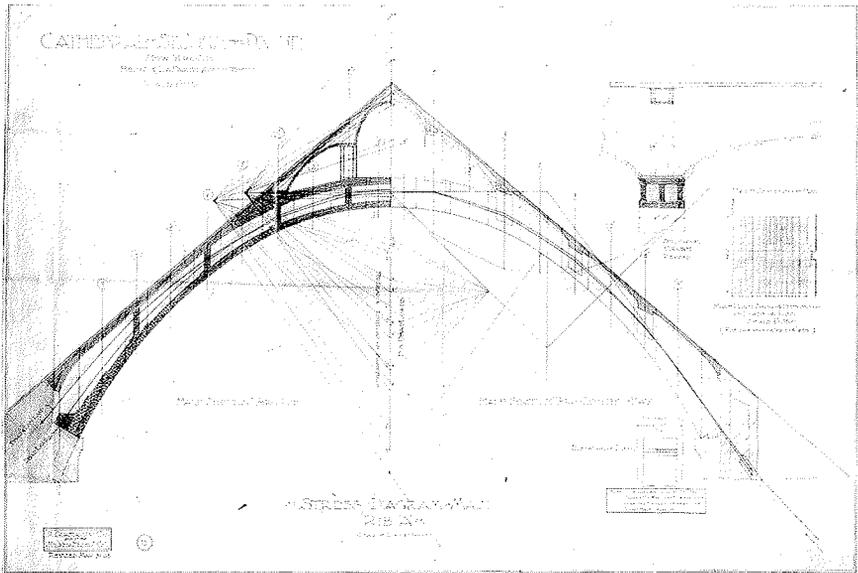


Figura 11

Análisis gráfico de equilibrio de los arcos proyectados para la cubierta de la nave de St. John the Divine (1892–1932). Al final, los arcos no se construyeron y la nave se cubrió mediante cerchas metálicas (Avery Library, Universidad de Columbia)

Realmente, para proyectar una cúpula de fábrica no hace falta saber muchas cosas: hay que poder calcular aproximadamente los empujes (para esto bastan las fórmulas anteriores) para poder dimensionar los contrarrestos, tirantes o anillos; y hay que identificar el punto de aparición de las tracciones para disponer tabiques, rellenos, etc., que permitan el «escape» de los esfuerzos fuera de la cáscara tabicada o, en el caso de las cúpulas, anillos que permitan anular o variar la dirección de los esfuerzos. Todo lo anterior está relacionado estrechamente con la forma geométrica de las bóvedas y el propio Guastavino afirma: «El material de una bóveda no sólo trabaja a compresión, sino que como resultado de su forma, también lo hace a tracción, *porque el empuje depende de la forma y no del material*». [p. 44]

Guastavino empleaba, con extraordinaria habilidad zunchos de hierro forjado para controlar la trayectoria de los empujes dentro de la fábrica. Con el mismo objetivo también recurría a otros sistemas como arbotantes, pequeñas bóvedas o pesadas cornisas. El estudio de los dibujos de secciones constructivas de las cúpulas de Guastavino que se conservan en la Avery Library es fascinante. Estos proyectos son evidentemente obra de un gran maestro de la construcción abovedada; véase por ejemplo la Figura 12.

De cualquier forma, hay una contradicción evidente entre ambas matrices de pensamiento y la «esquizofrenia» consiguiente se manifiesta en la expresión verbal pero no en la obra construida, que es la mejor prueba de la maestría de Guastavino.

Análisis de membrana aplicado a las bóvedas tabicadas:

Rafael Guastavino Expósito

Las cúpulas tabicadas son cáscaras delgadas. Parece, pues, obvio para un arquitecto o ingeniero de hoy en día el empleo del análisis de membrana para calcular las fuerzas internas. Esencialmente el análisis de membrana es un análisis de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara (Heyman 1977). Ya Rankine en 1858 (Rankine 1864: 265–8) propuso una formulación sencilla para el análisis de membrana de cúpulas de revolución. Schwedler (1866) desarrolló un método analítico para cúpulas de barras que puede

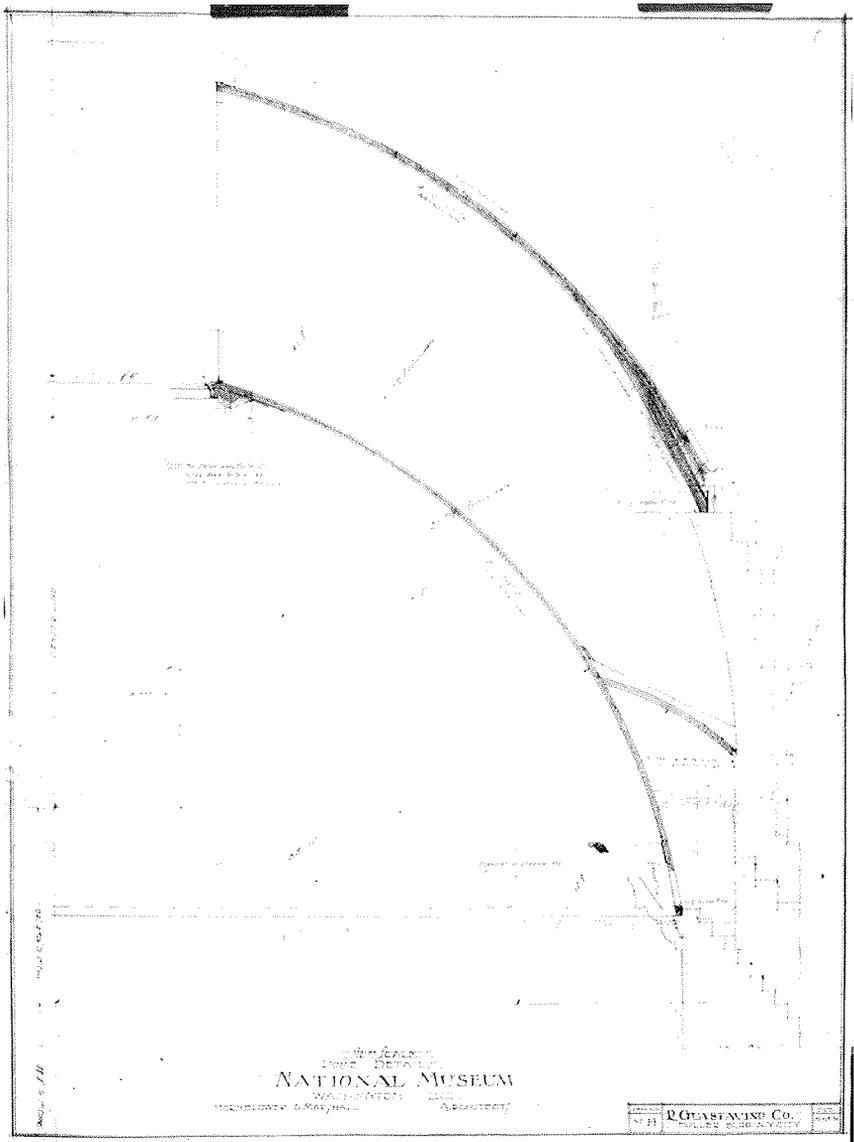


Figura 12

Cúpula tabicada doble en el National Museum de Washington, 1906. Nótese las variaciones en la curvatura de ambas cáscaras para evitar las tracciones y los distintos dispositivos para el empuje de las bóvedas, como zunchos metálicos, arbotantes, pequeñas bóvedas o pesadas cornisas (Avery Library, Universidad de Columbia)

extrapolarse a cáscaras. El primer método gráfico fue propuesto por Eddy (1878), y fue divulgado en dos artículos de Dunn (1904 y 1908). El método de Eddy permite un análisis aproximado de cúpulas de revolución de cualquier forma (Figura 13).⁸

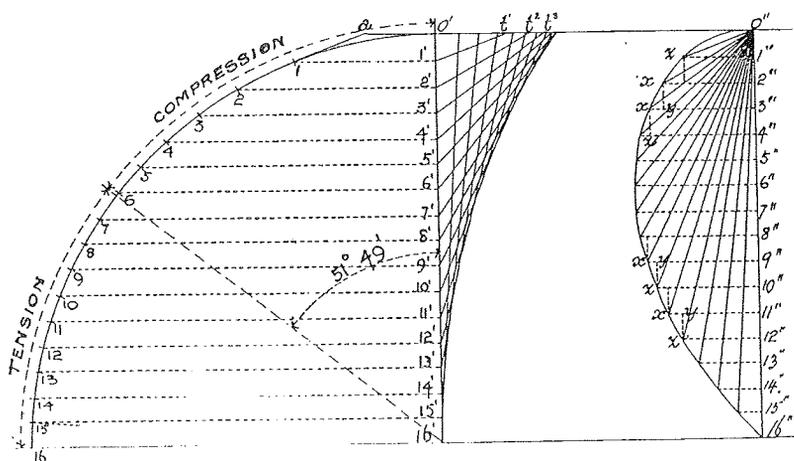


Figura 13

Análisis gráfico de membrana de Eddy para cúpulas metálicas o de fábrica (Dunn 1904)

Rafael Guastavino Expósito (1873–1950) trabajó con su padre en la empresa desde los quince años de edad. Recibió, pues, una formación «medieval» viviendo y trabajando con su padre como los aprendices medievales lo hacían con su maestro. Además, simultaneó esta tarea con estudios sobre arte, arquitectura y estructuras que realizó de manera autodidacta. Es muy probable que leyera a Dunn y decidiera aplicar el método al análisis de cúpulas tabicadas. Particularmente pretendía estimar las tensiones de tracción para poder calcular y disponer refuerzos de hierro forjado. Hay dos zonas críticas: en los óculos cuando existe linterna y en la base (por debajo de los 52° desde la clave en cúpulas hemisféricas cerradas). El método permite, de modo sencillo, determinar las zonas de tracción y en consecuencia colocar los refuerzos. Guastavino hijo patentó esta idea en 1910 (Figura 14).

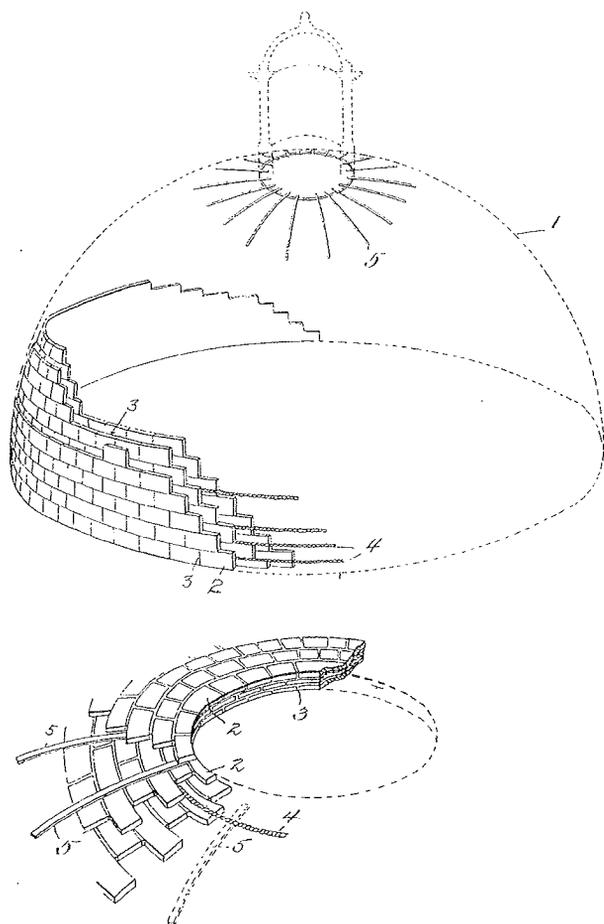


Figura 14

Disposición de refuerzos metálicos en las bóvedas tabicadas. (Patente de Guastavino hijo de 1910)

Guastavino Expósito realizó este tipo de análisis para muchas cúpulas, y en particular para la gran cúpula temporal de St. John the Divine, donde se dispusieron refuerzos metálicos. La Figura 15 muestra lo que parece ser uno de los cálculos previos de una bóveda con una luz de 100 pies (30 m). Guastavino hijo empleaba el método modificado de Dunn (1904). Es interesante ver que en la parte

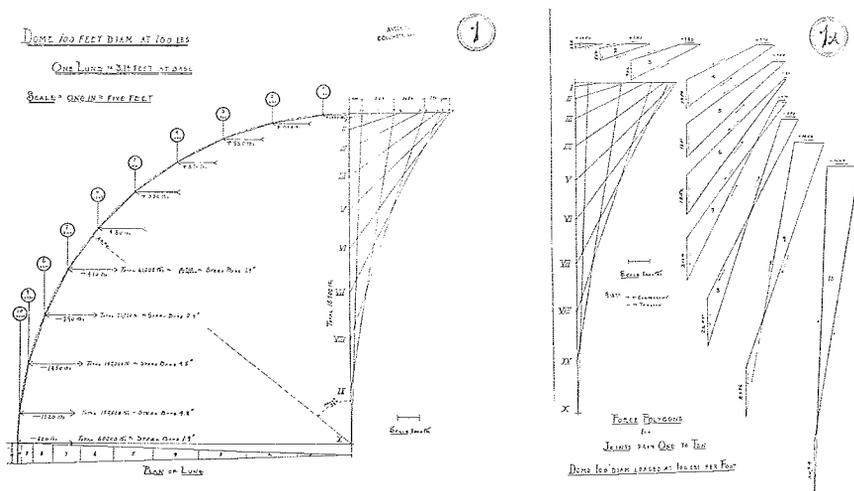


Figura 15

Análisis gráfico de una delgada cúpula con una luz de 100 pies (30 m) (Avery Library, Universidad de Columbia)

derecha de la figura, el polígono de fuerzas se divide en partes para entender mejor el método. El análisis de esta cúpula podría haber sido un ejercicio de estudio.

Además, la observación de Eddy, recogida por Dunn, de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantenía constante (en una cúpula construida en fábrica sin refuerzos), proporcionó la idea para un método de proyecto de cúpulas sin tracciones. La parte superior era un casquete esférico y, desde el punto donde aparecen las tracciones, se podía trazar la forma inferior a partir del diagrama de fuerzas, de manera que la forma resultante correspondiera a una cúpula sin tracciones. En este caso no eran necesarios los refuerzos y los zunchos de la base se podían calcular fácilmente. Los Guastavino hicieron un uso extensivo de este descubrimiento en el proyecto sus cúpulas (Figura 16); véanse también numerosos ejemplos en Huerta (2001: 303–313). De hecho el enfoque es mejor que el enfoque catenario puro (por ejemplo utilizado por Gaudí). La cúpula tiene una única forma geométrica sencilla en la zona superior y sólo se desvía de ella cuando es necesario, en la zona de la base.

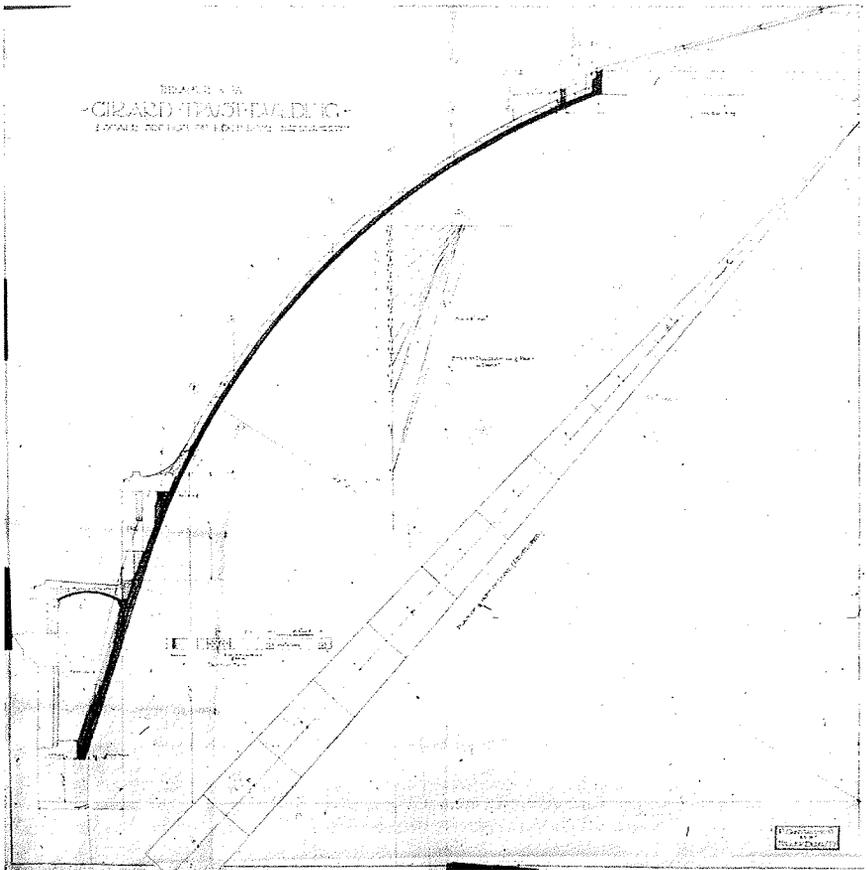


Figura 16

Proyecto de una cúpula libre de tracciones. Nótese el cambio de curvatura por debajo del punto de tensión cero. A partir de este punto la componente horizontal del empuje permanece constante, como se aprecia en el polígono de fuerzas. Cúpula del Girard Trust Building 1905–1907; 101 pies de luz (31 m) (Avery Library, Universidad de Columbia)

Guastavino Expósito no realizó ninguna publicación, aunque sí dio varias conferencias.⁹ De hecho, le tocó vivir la decadencia del modo de construcción de fábrica que había aprendido y practicado desde niño. Para mantener la empresa, debió investigar con las posibilidades cromáticas de los ladrillos y, sobre todo, realizó una investigación pionera sobre materiales acústicos colaborando con el

mejor especialista de la época W. C. Sabine. En los años 1930, con el auge de la construcción de cáscaras delgadas de hormigón intentó competir con éstas, y en el Archivo Gustavino de la Avery Library se conservan documentos y recortes que atestiguan un interés activo. Finalmente, construyó una cúpula tabicada para el Planetario Buhl en 1938, aunque desde Dischinger (ca. 1925) se venían construyendo de hormigón armado. Pero ya no era la época de la construcción de fábrica y la empresa vivió sus últimos años de los materiales acústicos y de construir bóvedas para los últimos edificios historicistas, cuya construcción se prolongó en América hasta los años 1960.

El análisis elástico: Domenech, Bayó, Terradas

La tabla elaborada por G. Lanza para el *Ensayo* de 1893 supone, probablemente, la primera evidencia del cálculo elástico de un arco tabicado. De hecho, a finales del siglo XIX el análisis elástico ya se consideraba el mejor enfoque para los arcos de fábrica (Huerta 1996, 2001). El carácter de la fábrica, heterogéneo y discontinuo, la dificultad para obtener las constantes elásticas, los desplazamientos durante la ejecución, los agrietamientos, etc., eran obvios, y algunos ingenieros eran conscientes de lo dudoso de los presupuestos elásticos aplicados a los arcos de fábrica (véase por ejemplo (Swain 1927: 425; agradezco al profesor Foce esta referencia), pero la potencia de las ideas elásticas era tan fuerte como para vencer cualquier resistencia. Las ideas elásticas de continuidad, tensión y resistencia a los momentos flectores, encajaban muy bien con la ideas de monolitismo de Espie o la teoría cohesiva de Guastavino. La única diferencia fundamental era que los arcos elásticos sí que tenían empuje. De este modo el énfasis estaba en la resistencia de las bóvedas tabicadas a la tracción y a los momentos flectores. Según Bergós, Gaudí llevó a cabo algunos cálculos para tener en cuenta la resistencia a flexión de los arcos tabicados. Sin embargo, Gaudí no publicó nada sobre el tema y el testimonio indirecto de Bergós podría estar influido por sus propias ideas. Surge una pregunta: si Gaudí creía en la resistencia a flexión de las fábricas, ¿por qué empleaba modelos catenarios? (Sobre los modelos catenarios de Gaudí, véase Tomlow (1989)).

Domenech fue el primero en discutir la necesidad de considerar la resistencia a flexión de las bóvedas tabicadas. Para Domenech no hay duda que la única expli-

cación del éxito de las delgadas bóvedas tabicadas proviene de su capacidad de resistir flexiones que pueden llegar a anular el empuje horizontal: «El secreto mecánico de la construcción de estas bóvedas . . . está en no limitar el cálculo de los muros a la resistencia al esfuerzo de compresión de los materiales empleados, sino aprovechar también las resistencias a la tensión y al esfuerzo transversal que ofrecen nuestros ladrillos auxiliados por los morteros de cal o cemento. Utilizando estas dos resistencias pudo atreverse el constructor catalán a sujetar sus bóvedas a cargas incompresibles en otro sistema . . . siempre con pequeño empuje horizontal en sus apoyos y hasta algunas veces reduciéndose éste a cero». (Doménech 1900: 38–39)

De nuevo aparece la idea del monolitismo rígido de Espie, el mito de la ausencia de empujes y de la resistencia cohesiva a los momentos flectores. Más adelante, sin embargo, Doménech hace un análisis lúcido del funcionamiento de los arcos tabicados tomando como ejemplo el caso de una carga uniforme, caso para el que la línea de empujes es una parábola. Observa que si la directriz del arco coincide con la de la línea de empujes (arcos exactamente parabólicos), sólo habría compresiones, pero no lleva más allá este enfoque. A continuación explica la forma de hallar los momentos flectores y los esfuerzos cortantes y normales, para una línea de empujes dada. Finalmente, discute el problema de la posición de la línea de empujes, considerando la posibilidad de la formación de grietas o «juntas de rotura» en el arco (Figura 17).

El dibujo de Doménech muestra las líneas de empujes fuera de la fábrica y produciendo flexiones. De hecho, Doménech comete un error muy frecuente: identifica como estructura sólo la bóveda, olvidándose de los rellenos de los riñones y de los tabiquillos transversales o lengüetas. Estos elementos son también estructura y ofrecen a los empujes caminos alternativos para alcanzar los contrarrestos (estribos o muros de fábrica, una viga horizontal metálica sujeta por tirantes, etc.). Una bóveda tabicada sin rellenos ni lengüetas no se mantendría en pie mucho tiempo debido a la escasa resistencia a tracción de la fábrica, a su carácter frágil que que posibilita la formación de grietas fácilmente, pero por encima de todo, a la ineludible necesidad de agrietarse para adaptarse a pequeños desplazamientos de los apoyos.

Martorell escribió otras consideraciones análogas en cuanto a la resistencia a flexión y la consiguiente reducción del empuje: «Los procedimientos de mecáni-

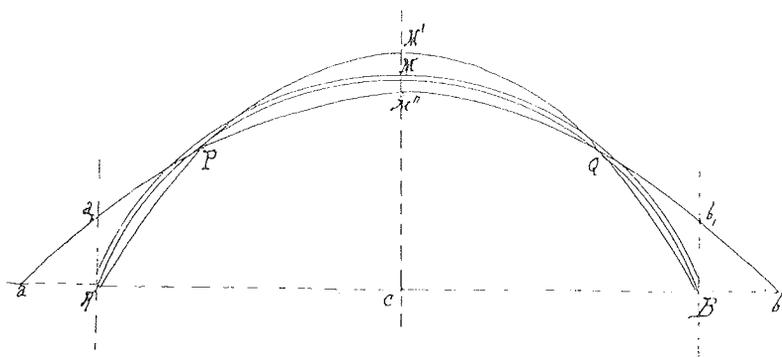


Figura 17

Posibles posiciones de la línea de empujes en arco tabicado (Domenech, 1900)

ca gráfica utilizados generalmente, aplicados a los arcos de ladrillo y de un modo especial a las bóvedas tabicadas, dan resultados más desfavorables de los que en realidad corresponden . . . La cohesión, la rigidez de las bóvedas tabicadas, disminuye en gran manera su empuje y a la vez permite darles formas inverosímiles, tal si fueran láminas metálicas». (Martorell 1910: 143)

Alude a las distintas posiciones de la línea de empujes e , implícitamente, a la aparición de flexiones, resaltando la necesidad de realizar ensayos que permitan calcular «los coeficientes que se usen en el cálculo para evaluar la resistencia a la flexión y los esfuerzos transversales de las bóvedas tabicadas».

Jaime Bayó (1910) es el primero, en España, en proponer el análisis elástico de las bóvedas tabicadas. En su artículo las asimila a arcos metálicos biarticulados, criticando el empleo de los métodos tradicionales de cálculo de arcos de dovelas: «[Al] calcular esta bóveda [tabicada] . . . sujetándola a la curva de presiones de la bóveda dovelada, nace un error, que es suponer que sólo trabajan a la compresión, y no es así, puesto que trabajan también a la tensión, siendo cual lámina metálica sujeta a la flexión». (Bayó 1910: 165)

Para Bayó las bóvedas tabicadas empujan, pero este empuje es el del arco biarticulado elástico correspondiente. Se trata, pues, de hallar lo que él denomina el «funicular de las fuerzas elásticas», esto es, la línea de empujes que

además de estar en equilibrio con las cargas cumple las condiciones de compatibilidad elástica de deformación. Bayó da las fórmulas con las integrales usuales y, luego, explica un procedimiento gráfico de resolución, aplicándolo primero a arcos simétricos de espesor constante o variable, y después a arcos asimétricos. Explica también cómo calcular las tensiones de compresión y tracción y cita los ensayos de resistencia de Guastavino como referencia a la hora de considerar los siguientes valores de tensiones admisibles: compresión $1,5 \text{ N/mm}^2$, tracción $0,4$ ó $0,5 \text{ N/mm}^2$ y cortadura $0,6 \text{ N/mm}^2$. El artículo termina con algunas consideraciones sobre el proyecto de bóvedas tabicadas en las que recomienda ajustar el espesor (el número de hojas) a las tensiones de flexión. Observa que en el caso de las bóvedas rebajadas se puede calcular el empuje como si fueran de dovelas, trabajando sólo a compresión, pero que si son peraltadas es preciso adaptar su forma a la de la línea de empujes. Termina el artículo exponiendo un método para proyectar bóvedas tabicadas de cualquier forma: «Si . . . se quieren construir bóvedas equilibradas o de igual resistencia, que respondan al proyecto sugerido por la imaginación del artista, se procederá como en la figura . . . en que después de determinar el funicular de las fuerzas elásticas, se dan a la bóveda espesores relacionados con los momentos». (Bayó 1910: 184) (Figura 18).

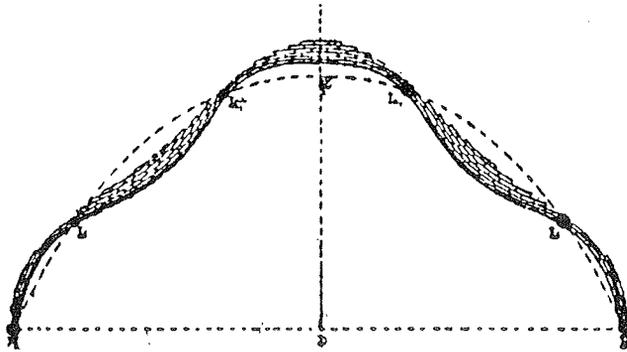


Figura 18

Bóveda tabicada de forma singular (e imposible en la práctica) donde los espesores se proporcionan a los momentos que resultan de un análisis elástico (Bayó, 1910)

No tenemos noticia de que Bayó o cualquier otro arquitecto construyeran nunca una bóveda tabicada con esta forma, pero el dibujo muestra, mejor que ninguna otra imagen, la fe en la resistencia a tracción, en el cálculo elástico y en las propiedades cohesivas de las bóvedas tabicadas.

Finalmente, hay que hacer notar que el cálculo del arco tabicado corresponde al caso más elemental de estructura tabicada. Bayó no menciona ni siquiera el cálculo de formas más complejas y muy habituales: bóvedas vaídas, bóvedas de cañón con lunetos, bóvedas de arista y cúpulas. Para el cálculo de los esfuerzos en estos casos la única aproximación viable y práctica habitual era el cálculo de equilibrio mediante estática gráfica o los modelos colgantes.

Consolidación del enfoque elástico-cohesivo. Bóvedas «imposibles de calcular»

Las ideas cohesivas formuladas primero por Espie, recogidas, ampliadas y difundidas por Guastavino, aplicadas después al cálculo elástico, se convirtieron en un dogma. En un libro de 1910 sobre la filosofía de las estructuras, Cardellach encuadra a las bóvedas tabicadas dentro de la construcción cohesiva, resalta la capacidad de resistir flexiones y, como Bayó, insiste en la infinita variedad de formas que se pueden construir.

Esteve Terradas, gran ingeniero y matemático, fue el primero en intentar un análisis elástico de una bóveda tabicada más compleja: una bóveda de escalera. La aportación de Terradas ha sido analizada en detalle por Rosell y Serrá (1987). En este contexto hay que resaltar que el estudio de Terradas tuvo su origen en un encargo de Puig y Cadafalch, en 1919, con el fin de resolver el problema que entonces planteaba el cálculo de las bóvedas tabicadas. Pues, como dice Rosell, «las bóvedas de siempre, construidas por los albañiles ‘a sentimiento’, eran consideradas como imposibles de calcular». Terradas reunió sus croquis, anotaciones y cálculos en una libreta bajo el título «llibreta de la volta».¹⁰

Terradas intentó realizar un análisis elástico de la bóvedas y examinó problemas elásticos que el conocía muy bien, en particular el del pandeo. Fracaso en su intento. El planteamiento de las ecuaciones de equilibrio elástico para una estructura espacial como una bóveda de escalera a montacaballo es muy complejo. El

la imposibilidad de calcular las bóvedas tabicadas éstas se seguían construyendo y los arquitectos o ingenieros realizaban cálculos sencillos para determinar las dimensiones de los elementos principales: el espesor de las bóvedas, y la dimensión de los sistemas de contrarresto.

Que los constructores pensaban que las bóvedas tabicadas empujaban queda demostrado por la existencia, desde siempre, de estos sistemas de contrarresto. Tanto los ingenieros franceses del siglo XIX como los Guastavino realizaban cálculos de equilibrio aunque las hipótesis que originaban las fórmulas estaban en frontal oposición a su teoría cohesiva. Luis Moya (1947) el último gran constructor de bóvedas tabicadas reconoce la insuficiencia del cálculo debido a la falta de datos sobre las constantes elásticas de las bóvedas tabicadas, pero después realiza, o manda realizar, cálculos de equilibrio en base a líneas de empujes que le bastaron para proyectar y construir sus asombrosas bóvedas.

Bosch (1947) defendía el análisis de membrana, pero para los casos prácticos propone un ingenioso sistema (inspirado, sin duda, en los manuales del siglo XIX sobre la teoría de bóvedas) para calcular el empuje de las bóvedas vaídas tabicadas, imaginando la formación de nervios cruceros virtuales sobre los que apoyarían a su vez unos arcos elementales producidos dando cortes paralelos a los arcos del contorno. De nuevo, es un método de equilibrio que busca encontrar un estado posible de compresiones dentro de la fábrica.

Bergós (1936; 1953; 1965) dedicó varios decenios a investigar las propiedades mecánicas de los muros y bóvedas tabicadas. Realizó ensayos sobre arcos tabicados de varios tamaños (hasta 3,20 m de luz) tratando de justificar la aplicación de la teoría elástica. Pero en los ejemplos prácticos de cálculo que aparecen en sus libros emplea métodos gráficos de líneas de empujes, esto es, métodos de equilibrio.

Ángel Pereda Bacigalupi (1951) publicó uno de los últimos libros sobre cálculo de bóvedas tabicadas. Como Bayó supone los arcos biarticulados, sobre apoyos rígidos, y los calcula con las fórmulas habituales de los arcos elásticos. Aunque lleven tirante no introduce su deformación en el cálculo lo que conduciría a unas tensiones de flexión importantes. De hecho, Pereda es consciente que un cálculo elástico no puede pretender contar con la resistencia a flexión de la bóveda tabicada. Explícitamente busca un espesor tal que la línea de empujes

elásticos esté contenida dentro del tercio central. Para ello Pereda reduce las tensiones admisibles de tracción, mostrando un conocimiento de las propiedades del material superior a sus predecesores en el cálculo elástico.

El empleo de los métodos de elementos finitos

En la actualidad se ha aplicado el Método de los Elementos Finitos (MEF) al análisis de estructuras de bóvedas tabicadas. Gulli (1993, 1994, 1995) ha hecho ensayos sobre bóvedas de cañón, realizando después, un análisis elástico por medio del método de los elementos finitos. El método de los elementos finitos, como el cálculo elástico tradicional, asimila la fábrica a un continuo al que atribuye ciertas propiedades elásticas lo que requiere prefijar unas condiciones en los apoyos. Estas afirmaciones de compatibilidad y sobre el material, junto con las de equilibrio estático, forman un sistema de ecuaciones que da una solución única. Este enfoque presenta varios problemas. En primer lugar, la resolución del sistema es muy sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno. Un pequeño asiento o giro, por ejemplo, en uno de los apoyos, aunque imperceptible a la vista, conducirá a una variación notable del sistema de esfuerzos internos (y el analista puede usar su programa de MEF para verificar este aserto). En segundo lugar, la fábrica tabicada dista mucho de ser un continuo y, además, está frecuentemente agrietada. El empleo de programas de MEF que permiten un análisis no-lineal, por supuesto mejora el modelo, pero éste sigue siendo muy sensible a las variaciones en las condiciones de contorno, a la historia de carga de la estructura, a la formación de grietas en zonas inesperadas, etc. En resumen, el resultado de un análisis elástico o de MEF puede que sea poco significativo, o no lo sea en absoluto, a la hora de entender el funcionamiento resistente de la estructura tabicada o de fábrica en cuestión.

Conclusión: La bóveda tabicada como bóveda de fábrica

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, con una buena resistencia a compresión, una baja resistencia a tracción y la posibilidad de agrietarse, formar articulaciones, debido a la imposibilidad de deslizamiento. De hecho, en una estruc-

tura hiperestática de fábrica la formación de grietas es inevitable, y las bóvedas tabicadas tradicionales muestran las mismas patologías que las de piedra o rosca de ladrillo.

Es cierto que la resistencia a tracción permite también una cierta resistencia a flexión. Por ejemplo, un albañil puede andar sobre un delgado arco tabicado. La explicación de la resistencia de cargas mayores o por largos periodos de tiempo hay que buscada en la existencia de otros dispositivos resistentes. Así, las lengüetas o tabiques transversales, o el relleno consistente, que forman la base de un forjado, son en realidad parte de la estructura resistente y permiten soportar cargas móviles de cierta entidad. El principio es siempre el mismo: bien dar una vía de escape a los empujes cuando sea necesario, bien cargar de manera que aquéllos estén siempre contenidos en la fábrica.

La posibilidad de perforación de una bóveda sin que colapse, que se cita desde los tiempos de Espie como una característica de las estructuras cohesivas, la poseen también otras bóvedas de fábrica. Con cierta frecuencia un pináculo cae de un botarel y perfora una bóveda gótica de crucería sin que ésta se hunda.

El carácter cohesivo no es relevante desde el punto de vista estructural. Sí lo es desde el punto de vista constructivo. Permite la construcción sin cimbra, empleando sólo ligeros elementos auxiliares de control de la forma. Las bóvedas tabicadas presentan, además, una cierta resistencia a la flexión que permite el paso de pesos ligeros apenas terminadas, facilitando aún más el proceso constructivo.

En resumen, las observaciones fundamentales sobre el material «fábrica» (buena resistencia a compresión, baja resistencia a tracción e imposibilidad de fallo por deslizamiento) son aplicables también a las bóvedas tabicadas. El profesor Heyman ha sistematizado estas afirmaciones con el fin de poder englobar la teoría de estructuras de fábrica dentro del marco más general del Análisis Límite. Desde su primer artículo de 1966 hasta la actualidad ha expuesto la teoría con claridad aplicándola después a elementos estructurales básicos: arbotantes, cúpulas, bóvedas de crucería, agujas y torres, puentes, etc. (Los artículos se ha recopilado en Heyman (1995), así como una exposición de su teoría en (1999).)

Dentro del marco del Análisis Límite, el teorema de la seguridad da validez al enfoque del equilibrio: si podemos encontrar una solución de equilibrio para la estructura de fábrica con el material trabajando a compresión, entonces la estruc-

tura es segura. La potencia del teorema reside en la posibilidad de «elegir» la solución de equilibrio. Si el analista es capaz de encontrar una solución de equilibrio a compresión, la estructura también será capaz de ello. De hecho el analista considerará sólo algunos de los infinitos estados de equilibrio posibles en una estructura hiperestática.

Los análisis de equilibrio de la antigua teoría de bóvedas resultan ser, dentro del marco del Análisis Límite, perfectamente correctos (Huerta 2001, 2004).¹¹ Las fórmulas simplificadas de Guastavino padre, los análisis gráficos y el empleo de modelos catenarios de Gaudí, el análisis de membrana de estados de compresión de Guastavino hijo, son correctos. Los análisis elásticos «a compresión», como los de Pereda citados con anterioridad, son también correctos. Para hablar con mayor precisión, son «seguros»: una estructura proyectada en base a ellas no se caerá y se puede emplear el mismo enfoque para medir su seguridad. No podría ser de otra manera, pues, de hecho, habían conducido a estructuras que llevan en pie más de cien años y esto es una demostración experimental concluyente.

Más aún, las reglas proporcionales tradicionales de proyecto de bóvedas y estribos (del tipo de las de Fray Lorenzo) también son esencialmente correctas (Huerta 2004). El problema de la seguridad de una bóveda de fábrica, ya sea de piedra, rosca de ladrillo, adobe, tabicada o de hormigón romano, es un problema de la forma geométrica de la estructura. Las formas estables contienen líneas de empujes en equilibrio con las cargas. Las reglas tradicionales codifican estas formas y su empleo es racional y correcto.

Notas

1. El presente artículo es una versión revisada y actualizada de Huerta (2003).
2. En Lemma (1996) se incluye una reproducción facsímil y la traducción al italiano.
3. Esta afirmación de Guastavino parece más que discutible. Ya se ha visto la presencia constante en los tratados españoles desde el siglo XVII. Es también un hecho significativo que una parte importante del tratado de Fornés y Gurrea, publicado en Valencia en 1841 (2ª ed. 1857), esté dedicado a la construcción tabicada. Fornés usa sistemáticamente bóvedas tabicadas en las especificaciones constructivas de su *Album de proyectos* de 1846. Parece, pues, que la construcción tabicada era bien conocida en Valencia a mediados del siglo XIX, por no hablar de las extraordinarias cúpulas tabicadas que existen en la ciudad. En cuanto al resto de España, hay que decir que en el tratado de Ger y Lóbez, publicado en Badajoz en 1869, también se explica la construcción tabicada, al mismo nivel que la de rosca de ladrillo o piedra.
4. No es de ningún modo una excepción en la historia del desarrollo de las ciencias y de las técnicas. En ocasiones, la idea motriz, aquella que entusiasma al científico o al artista es falsa, pero el impulso permite desarrollar otras ideas, estas correctas, que suponen un avance en la disciplina en cuestión. Koestler (1964) cita, entre otros ejemplos, el caso de Kepler que, obsesionado toda su vida por la armonía geométrica del movimiento de las esferas, descubrió unas leyes que destruyeron para siempre el ideal geométrico griego del movimiento de los astros.
5. Las primeras interpretaciones de los agrietamientos como resultado de movimientos de los apoyos aparecen a mediados del XIX. Los primeros estudios sistemáticos se deben a Heyman. Ver, por ejemplo, Heyman (1999).
6. Es interesante comparar los ensayos y las fotos de Guastavino, con los realizados por Hennebique sobre el hormigón armado. Véase Delhumeau (1999).
7. El coeficiente de seguridad de 10 aplicado a las fábricas tiene, en realidad, un origen distinto. La resistencia de una fábrica depende de la resistencia de las piedras, de la forma y dimensión de las juntas de mortero, y de la resistencia del propio mortero, como demostraron los ensayos de Tourtay (1885). Así, para sacar coeficientes de rotura habría que ensayar bloques de fábrica de cierto tamaño. Sin embargo, los primeros ensayos se hicieron sobre pequeñas piezas de piedra. Sabiendo que la resistencia de la fábrica sería mucho menor, los ingenieros del XIX tomaban, de forma empírica, como resistencia admisible de la fábrica 1/10 de la resistencia a rotura de la piedra. Por supuesto, la regla no se aplica a los ensayos que se realizan sobre probetas de fábrica, como es el caso de Guastavino. Este hecho condujo a una confusión considerable en los manuales de ingeniería de finales del siglo XIX y, muchas veces, a valores de la tensión admisible de las fábricas absurdamente bajos. (Ver cap. 2 en Huerta 2004).
8. La historia de este método resulta interesante. El libro de Eddy se tradujo al alemán en 1880, Föppl (1881) lo emplea sin citarlo. Cuarenta años después, Dischinger (1928) lo expone como un método gráfico analítico para el cálculo de esfuerzos en cáscaras de forma cualquiera, sin citar origen. A partir de entonces aparece en muchos manuales.
9. En el archivo Guastavino de la Avery Library, se conserva un manuscrito de un artículo de revista de 1929 y el texto de una conferencia impartida en torno a 1914.
10. El profesor Rosell me facilitó una copia de esta libreta y tuvo la amabilidad de comentar conmigo distintos aspectos del trabajo de Terradas.
11. El enfoque del equilibrio ha sido aplicado al cálculo del empuje de bóvedas de arista tabicadas por Fortea y López (1998).

Referencias

- Araguas, Philippe. 1999. Voûte a la rousillon. *Butlleti de la Reial Academia Catalana de Belles Arts Sant Jordi*, vol. 13: 173–185.
- Bails, Benito. 1796. *Elementos de Matemáticas. Tomo IX. Parte I. Que trata de la Arquitectura Civil*. Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra (ed. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983).
- Bannister, T.C. 1968. The Roussillon vault. The apotheosis of a ‘folk’ construction. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27:163–75.
- Bassegoda Nonell, Joan. 2001. La obra arquitectónica de Rafael Guastavino en Cataluña (1866–1881). En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 373–393.
- Bayó, Jaime. 1910. La bóveda tabicada. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 157–84.
- Béldor, B.F. 1729. *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et architecture civile*. Paris.
- Benvenuto, Edoardo. 1991. *An Introduction to the History of Structural Mechanics. Part II: Vaulted Structures and Elastic Systems*. New York/Berlin: Springer Verlag.
- Bergós Massó, Juan. 1936. *Formulario técnico de construcciones*. Barcelona: Bosch.
- Bergós Massó, Juan. 1953. *Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental*. Barcelona: Bosch.
- Bergós Massó, Juan. 1965. *Tabicados huecos*. Barcelona: Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares.
- Blondel, J.F. 1771–77. *Cours d’Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte*. Paris: Chez la Veuve Desaint.
- Bosch Reigt, Ignacio. 1949. La bóveda vaida tabicada. *Revista Nacional de Arquitectura*: 185–99.
- Cardellach, Félix. 1970. *Filosofía de las estructuras*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados (1ª ed. 1910).
- Choisy, Auguste. 1883. *L’art de bâtir chez les Byzantines*. Paris. (Edición en español: *El arte de construir en Bizancio*, S. Huerta y F. J. Girón (eds.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1997.)
- Collins, George R. 1968. The transfer of thin masonry vaulting from Spain to America. *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 27: 176–201. (Traducción al castellano en *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 19–45.)
- Dejardin, M. 1860. *Routine de l’établissement des voûtes*. 2ª ed. Paris: Dalmont et Dunod.
- Delhumeau, G. 1999. *L’invention du béton armé: Hennebique 1890–1914*. Paris: Éditions Norma.
- Dischinger, Franz. 1928. *Schalen und Rippenkuppeln*. (4ª ed. Handbuch der Eisenbetonbau. VI Band, Zweiter Teil., F. von Emperger ed.). Berlín: Wilhelm Ernst und Sohn.
- D’Olivier. 1837. Relatif à la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi du recherches expérimentales sur la poussée de ces sortes des voûtes. *Annales des Ponts et Chaussées, 1er série*: 292–309, Pl. 129.
- Domenech y Estapá, José. 1900. La fábrica de ladrillo en la construcción catalana. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 37–48.

- Dunn, William. 1904. Notes on the stresses in framed spires and domes. *Journal of the Royal Institute of British Architects, Third series*, vol. 11 (nov. 1903 - oct. 1904): 401–412.
- Dunn, William. 1908. The principles of dome construction. *Architectural Review*, vol. 23: 63–73, 108–112.
- Eddy, Henry T. 1878. *Researches in Graphical Statics*. New York: Van Nostrand.
- Espie, Comte d'. 1754. *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briqueté*. Paris: Duchesne.
- Fontaine, H. 1865. Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques *Nouvelles Annales de la Construction*, 11: 149–159, lám. 45.
- Föppl, August. 1881. *Theorie der Gewölbe*. Leipzig: Felix.
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1841. *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Imprenta de Cabrerizo (ed. facs. Valencia: Librería París-Valencia, 1993).
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1846. *Álbum de proyectos originales de arquitectura, acompañado de lecciones explicativas*. Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo (ed. facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).
- Fornés y Gurrea, Manuel. 1857. *Observaciones sobre el arte de edificar*. Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo (ed. facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).
- Fortea Luna, Manuel y Vicente López Bernal. 1998. *Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Badajoz: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura.
- Frézier, A.F. (1754–69). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois. . . ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture*. Strasbourg/Paris: Charles-Antoine Jombert (1ª ed. 1737–1739).
- García Berruguilla, Juan. 1747. *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría...* Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados (ed. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1979).
- Ger y Lobe, Florencio. 1915. *Manual de construcción civil*. 2ª ed. Badajoz: La Minerva Extremeña (1ª ed. Badajoz, 1869).
- Goday, Josep. 1934. *Estudi històric i mètodes de càlcul de les voltes de maó de pla*. Barcelona: Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi.
- González Moreno-Navarro, José Luis. 2004. La bóveda tabicada: Pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial. En *Construcción de bóvedas tabicadas*, A. Truñó. Madrid: Instituto Juan de Herrera, xi–lx.
- Guastavino, Rafael. 1893. *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timber vault*. Boston: Ticknor and Company (1ª ed. 1892).
- Guastavino, Rafael. 1896. *Prolegomenos on the function of masonry in modern architectural structures*. New York: Record & Guide Press.
- Guastavino, Rafael. 1904 *The Function of Masonry in Modern Architectural Structures*. Boston: America Printing Co.
- Gulli, Riccardo. 1993. Le volte in folio portanti: Tecnica costruttiva ed impiego nell'edilizia storica e moderna. In *Atti del I Convegno Nazionale Manutenzione e Recupero nella Città Storica, ARCO*, 595–604. Roma.
- Gulli, Riccardo. 1993. Il sistema tabicado. Una tecnica tradizionale per il recupero. En *Atti del Convegno Internazionale: Il recupero degli edifici antichi, manualistica e nuove tecnologie*, 198–208. Napoli.

- Gulli, Riccardo. 1994. Una ipotesi di intervento conservativo per il recupero delle volte in folio portanti. En *Atti del Convegno di Studi: La ricerca del recupero edilizio, Ancona*, 51–62. Bolonia.
- Gulli, Riccardo and Giovanni Mochi. 1995. *Bóvedas tabicadas: Architettura e costruzione*. Roma: CDP Editrice.
- Gulli, Riccardo. 2001. Arte y técnica de la construcción tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 59–85.
- Heyman, Jacques. 1977. *Equilibrium of shell structures*. Oxford: Oxford University Press.
- Heyman, Jacques. 1982. *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 2001. *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2001.
- Huerta, Santiago. 1996. La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico. *Obra Pública*, nº 38: 18–29.
- Huerta, Santiago. 2001. Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach. *Structural analysis of historical constructions III. Possibilities of numerical and experimental techniques*. P. B. Lourenço and P. Roca, eds. Guimarães: Universidade do Minho.
- Huerta, Santiago (Ed.). 2001. *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Avery Library.
- Huerta, Santiago; Gema López and Esther Redondo. 2001. Bibliografía seleccionada y comentada sobre Guastavino y la construcción tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 373–393.
- Huerta, Santiago. 2001. La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 87–112.
- Huerta, Santiago. 2003. The mechanics of timber vaults: a historical outline. En *Essays in the History of Mechanics*. A. Becchi, M. Corradi, F. Foce y O. Pedemonte (eds.). Basel: Birkhäuser, pp. 89–133.
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Koestler, Arthur. 1964. *The act of creation*. New York: Macmillan.
- Lanza, Gaetano. 1891. *Applied mechanics*. New York: John Wiley and Sons (1ª ed. 1885).
- Lemma, Massimo. 1996. *Dei tetti ammattonati. Nuova edizione critica del trattato scritto da Felix François d’Espie (1754)*. Venezia: Il Cardo.
- Lemmonier, M. Henry. 1920. *Procès-verbaux de l’Académie Royale d’Architecture, 1671–1793. Tome VI: 1744–1758*. Paris: Édouard Champion.
- Marías, Fernando. 1991. Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI. En *Les chantiers de la Renaissance*, J. Guillaume ed. Paris: Picard: 71–83.
- Martorell, Jerónimo. 1910. Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana moderna. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 119–146.
- Mochi, Giovanni. 2001. Elementos para una historia de la construcción tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 113–146.

- Moya Blanco, Luis. 1947. *Bóvedas Tabicadas*. Madrid: Dirección General de Arquitectura (ed. facs. Madrid: C. O. de Arquitectos de Madrid, 1993).
- Navascués Palacio, Pedro. 1983. Estudio crítico de la Arquitectura Civil de Benito Bails. En *La arquitectura civil*, B. Bails. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos. Vol. I.
- Neumann, Dietrich. «The Guastavino system in context: History and dissemination of a revolutionary vaulting method», *APT (Association of Preservation Technology) Bulletin* 30, 4 (1999): 7–13. (Traducción castellana en *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 147–154.)
- Newlon, Howard (Ed.). 1976. *A Selection of Historic American Papers on Concrete, 1876–1926*. Detroit: American Concrete Institute.
- Parks, Janet y Alan G. Neumann (Eds.). 1996. *The Old world builds the New. The Guastavino Company and the technology of the catalan vault, 1885–1962*. Exhibit catalogue. New York: Avery Architectural Library and the Miriam and Ira D. Wallach Art Gallery, Columbia University.
- Parks, Janet. 2001. Génesis del *Ensayo sobre la construcción cohesiva* de Rafael Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera: 173–175.
- Pereda Bacigalupi, Angel. 1951. *Bóvedas tabicadas. Cálculo y ejemplos resueltos*. Santander: Editorial Cantabria.
- Plo y Camín, Antonio. 1767. *El Arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor...*. Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar (ed. facs. Valencia: Librería París-Valencia, 1995).
- Ramazotti, Luigi. 2001. La cúpula para San Juan el Divino de Nueva York de Rafael Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 187–200.
- Rankine, W. J. M. 1864. *A Manual of Applied Mechanics*. 3ª ed. London: Charles Griffin (1ª ed. 1858).
- Rieger, P. Christino. 1763. *Elementos de toda la arquitectura civil*. Madrid: Joachim Ibarra.
- Rondelet, Jean. 1834–48. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: Chez Firmin Didot (1ª ed. Paris: 1802).
- Rosell, Jaume e Isabel Serra. 1987. Estudis d'Esteve Terradas sobre la volta de maó de pla. En *Cinquanta anys de ciència i tècnica a Catalunya*, Barcelona: Institut d'Estudis Catalans: 23–33.
- Rosell, Jaume. 2001. Rafael Guastavino Moreno. Ingenio en la arquitectura del s. XIX. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 201–215.
- Rosenthal, E. E. 1988. *El palacio de Carlos V en Granada*. Madrid: Alianza Forma.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i. (ed. facs. Madrid: Albatros, 1989).
- Schwedler, J. W. 1866. Die Konstruktion der Kuppeldächer. *Zeitschrift für Bauwesen*, 16: 7–34, lám. 10–14.
- Sotomayor, Joaquín 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.
- Swain, George F. 1927. *Structural Engineering. Stresses, graphical statics and masonry*. New York: McGraw-Hill Book Company.

- Tarragó, Salvador. 2001. Las variaciones históricas de la bóveda tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 217–240.
- Tomlow, Jos. 1989. *Das Modell. Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell*. Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke. Universität Stuttgart.
- Tomlow, Jos. 2001. La bóveda tabicada a la catalana y el nacimiento de la «cerámica armada» en Uruguay. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 241–251.
- Torroja, Eduardo. 1956. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- Tourtay, C. 1885. Sur l'influence des joints dans la résistance à l'écrasement des maçonneries de pierres de taille. *Annales des Ponts et Chaussées*, 2: 582–592.
- Truñó, Ángel. 2004. *Construcción de bóvedas tabicadas*, S. Huerta, J. L. González y E. Redondo (eds.). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Adenda

Durante la última fase de corrección de las pruebas de imprenta he tenido noticia de tres libros sobre Guastavino que, si bien no he podido usar, creo que deben ser reseñados:

- Guastavino IV, Rafael. 2006. *An architect and his son. The immigrant journey of Rafael Guastavino II and Rafael Guastavino III*. Westminster, Maryland: Heritage Books.
- Gulli, Riccardo. 2006. *La costruzione coesiva. L'opera dei Guastavino nell'America di fine Ottocento*. Venezia: Marsilio.
- Ochsendorf, John A. *Guastavino vaulting: The art of structural tile*. New York: Princeton Architectural Press. (en prensa)

Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura

Rafael Guastavino

edición a cargo de:
Santiago Huerta

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

CEHOPU
Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo

CEDEX
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
Ministerio de Fomento

El presente libro incluye la traducción al español de los siguientes escritos de Rafael Guastavino Moreno:

Essay on the theory and history of Cohesive Construction, applied especially to the timber vault. 2ª ed. Boston : Ticknor and Company, 1893.

Prolegomenos on the Function of Masonry in Modern Architectural Structures (Part I.). New York: Record and Guide Press, 1896.

The Function of Masonry in Modern Architectural Structures (Part II.). Boston: America Printing Co., 1904.

Para los dos últimos se ha utilizado, completamente revisada, la edición española de ca. 1904: *Función de la fábrica en las modernas construcciones arquitectónicas.* s.l., s.a.

Traducción del *Essay*: Gema López Manzanares
Universidad de Alcalá de Henares

Revisión de la *Función de la fábrica* partes I y II: Ignacio Javier Gil Crespo
Universidad Politécnica de Madrid

© Instituto Juan de Herrera 2006

© CEHOPU, Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo

© CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
NIPO: 163-06-012-4

Tapas duras: ISBN-10: 84-9728-223-X; ISBN-13: 978-84-9728-223-9

Rústica: ISBN-10: 84-9728-237-X; ISBN-13: 978-84-9728-237-6

Depósito Legal: M. 51.370-2006

Cubierta: Sección de la cúpula del hall de los estudiantes en el Columbia College

Fotocomposición e impresión: EFCA