



**LA BÓVEDA TABICADA EN ESPAÑA EN EL SIGLO XIX: LA TRANSFORMACIÓN DE
UN SISTEMA CONSTRUCTIVO**

Tesis Doctoral

por **Esther Redondo Martínez**

dirigida por **Santiago Huerta Fernández**

Leída en la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid el 18 de diciembre de 2013



INDICE ORIGINAL DE LA TESIS

INTRODUCCION.....	1
1. ORÍGENES Y DESARROLLO EN ESPAÑA.....	5
1.1. LOS PRECEDENTES.....	12
1.1.1. Armaduras de ladrillo en las bóvedas romanas.....	12
1.1.2. Bóvedas bizantinas sin cimbra.....	15
1.1.3. Bóvedas de «tubos huecos».....	16
1.1.4. La construcción islámica de yeso y ladrillo.....	18
1.2. APARICIÓN EN ESPAÑA: PLEMENTERÍA EN BÓVEDAS DE CRUCERÍA GÓTICAS.....	21
1.2.1. Primeros ejemplos documentados.....	25
1.2.2. Ejemplos tempranos en la arquitectura gótica.....	27
1.3. SIGLOS XVI AL XVIII: GENERALIZACIÓN DEL SISTEMA Y CAMBIO AL LENGUAJE CLÁSICO.....	34
1.3.1. Valencia.....	35
1.3.2. Cataluña.....	39
1.3.3. Aragón.....	40
1.3.4. Castilla.....	42
1.3.5. Andalucía.....	44
2. LA CONSTRUCCIÓN TABICADA EN LAS FUENTES DOCUMENTALES.....	47
2.1. LOS MATERIALES TRADICIONALES: LADRILLOS Y YESO.....	47
2.1.1. Los ladrillos.....	48
2.1.2. El yeso.....	50
2.2. PROCESOS DE EJECUCIÓN.....	52
2.2.1. Formas, cerchas y cimbras.....	54
2.2.2. Macizados y lengüetas.....	58
2.3. MEDIDAS DE LOS ESTRIBOS.....	60
3. LA INFLUENCIA FRANCESA.....	67
3.1. LOS INICIOS DE LA BÓVEDA TABICADA EN FRANCIA.....	67
3.1.1. El libro del conde d’Espie.....	68
3.2. LA DIFUSIÓN DEL SISTEMA.....	73
3.2.1. Los escritos del Abate Laugier.....	74
3.2.2. La presentación de memorias a la Academia de Arquitectura Francesa.....	75
3.2.3 Blondel y Patte: Cours d’Architecture.....	77
3.2.4 Rondelet : L’art de bâtir.....	90
3.3. LA VUELTA A ESPAÑA.....	93
3.3.1. La traducción de Sotomayor.....	94
3.3.2. Benito Bails.....	97

3.3.3. Ortiz y Sanz: la traducción de Los Diez Libros de Arquitectura de Vitrubio.....	101
4. LA PERVIVENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN TABICADA TRADICIONAL.....	105
4.1. Los Quincenarios de Josep Renart, ca. 1810.....	105
4.1.1. Sobre el tamaño de los estribos.....	107
4.1.2. Sobre los procesos de ejecución.....	109
4.1.3. Influencias francesas.....	112
4.2. LOS TRATADOS DE FORNÉS Y GURREA, 1841 Y 1846.....	114
4.2.1. Tipos de bóvedas y procesos de ejecución.....	115
4.2.2. Comportamiento estructural.....	123
4.2.3. Cúpulas y bóvedas dobles.....	123
4.3. GER Y LÓBEZ: CONSTRUCCIÓN CIVIL, 1898	128
5. APARICION DE NUEVOS MATERIALES: EL CEMENTO Y EL HIERRO.....	133
5.1. LOS CEMENTOS	134
5.1.1. Desarrollo de la fabricación de cemento en Europa.....	135
5.1.2. El cemento natural en España.....	137
5.1.3. La aparición del cemento Pórtland en España	143
5.1.4. Características de los primeros cementos españoles.....	146
5.2. EL HIERRO Y EL ACERO.....	151
5.2.1. Avances de la Revolución Industrial: el hierro forjado pudelado y el acero.....	152
5.2.2. Uso del hierro y el acero en España en el siglo XIX.....	154
5.3. APLICACIÓN DEL CEMENTO Y EL HIERRO A LAS BÓVEDAS TABICADAS.....	162
5.3.1. El cemento en la construcción tabicada.....	162
5.3.2. El hierro en la construcción tabicada.....	165
6. LOS NUEVOS TIPOS ARQUITECTÓNICOS DE LA EPOCA INDUSTRIAL.....	179
6.1. EDIFICIOS INDUSTRIALES EN ESPAÑA: TIPOS, APARICIÓN Y DESARROLLO.....	182
6.1.1. Las fábricas textiles en Cataluña.....	183
6.1.2. Otras zonas de España.....	186
6.2. APLICACIÓN DE LAS BÓVEDAS TABICADAS A LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES.....	187
6.2.1. Cataluña.....	188
6.2.2. Las fábricas del barranco del Molinar, en Alcoy.....	205
6.2.3. Países del entorno: Francia e Inglaterra. El problema de la incombustibilidad.....	207
6.3. OTROS TIPOS ARQUITECTÓNICOS.....	211
6.3.1. La vivienda urbana en la época industrial.....	211
6.3.2. Las colonias obreras en Cataluña.....	215

7. EL ENFOQUE CIENTÍFICO DE LAS ESTRUCTURAS: TEORÍA DE LAS BÓVEDAS TABICADAS.....	221
7.1. EL CÁLCULO TRADICIONAL DE ESTRUCTURAS TABICADAS.....	222
7.1.1. Las reglas de Fray Lorenzo.....	223
7.1.2. Validez de las reglas de Fray Lorenzo para tabicadas	224
7.1.3. Las reglas de los Quincenarios de Josep Renart.....	227
7.1.4. Validez de las reglas de Renart para tabicadas.....	228
7.2. LA TEORÍA MONOLÍTICA.....	235
7.2.1. El Conde d’Espie.....	236
7.2.2. Influencia del conde d’Espie.....	237
7.2.3. Rafael Guastavino y la «construcción cohesiva».....	241
7.2.4. Validez de la teoría monolítica-cohesiva.....	242
7.3. ANÁLISIS DE EQUILIBRIO DE ARCOS TABICADOS: LÍNEAS DE EMPUJE.....	245
7.3.1. El desarrollo de la teoría científica de estructuras.....	245
7.3.2. Aplicación de las teorías de Méry y Moseley.....	247
7.3.3. Los Guastavino.....	250
7.3.4. España.....	260
7.4. ANÁLISIS DE EQUILIBRIO DE BÓVEDAS Y CÚPULAS TABICADAS.....	266
7.4.1. Método de los cortes.....	268
7.4.2. La teoría de la membrana.....	279
7.5. ANÁLISIS ELÁSTICO DE BÓVEDAS TABICADAS: EL ENFOQUE DE LA RESISTENCIA.....	301
7.5.1. La aplicación de la teoría elástica a los arcos de fábrica.....	301
7.5.2. Rafael Guastavino Moreno.....	303
7.5.3. España.....	309
7.6. ANÁLISIS DE BÓVEDAS TABICADAS.....	347
8. ENSAYOS EN ESTRUCTURAS TABICADAS: LA NECESIDAD DE VALIDAR EL SISTEMA.....	359
8.1 PRIMEROS ENSAYOS NO CIENTÍFICOS.....	360
8.1.1. Los experimentos del conde d’Espie.....	361
8.1.2. Ensayo en las bóvedas del Palais Bourbon, hacia 1764.....	364
8.1.3. Otros ensayos ante la Academia de Arquitectura.....	369
8.2. ENSAYOS EN FRANCIA DURANTE EL SIGLO XIX.....	370
8.2.1. D’Olivier, 1837.....	370
8.2.2. Laroque, 1859.....	385
8.2.3. Fontaine, 1865.....	387
8.2.4. Collard, 1893.....	394
8.3. ENSAYOS EN INGLATERRA.....	397
8.3.1. Cubitt, 1841.....	398
8.4. ENSAYOS REALIZADOS POR GUASTAVINO EN ESTADOS UNIDOS.....	400
8.4.1. Ensayos sobre probetas, 1887.....	401
8.4.2. Máquina para ensayar arcos de ladrillo, 1890.....	404
8.4.3. Ensayos de resistencia a carga y fuego, 1897.....	405

8.4.4. Ensayos de carga, 1901.....	416
8.4.5. Ensayos de resistencia sobre probetas, 1927-1928.....	419
8.4.6. Ensayos de resistencia sobre probetas, 1935.....	424
8.5. ENSAYOS EN ESPAÑA.....	431
8.5.1. Ensayos de los ingenieros militares 1891-1892.....	431
8.5.2. Ensayos en Ger y Lóbez 1898.....	438
8.5.3. Ensayos de Juan Bergós.....	439
8.6. ENSAYOS EN BÓVEDAS TABICADAS.....	453
9. CONCLUSIONES.....	457
APÉNDICE	
Transcripción del manuscrito de Ramón Ballesteros <i>Bóvedas Tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas</i>	465
BIBLIOGRAFÍA.....	
RESUMEN.....	499
ABSTRACT.....	503

RESUMEN DE LA TESIS

Introducción

Las bóvedas tabicadas se construyen con ladrillos ligeros -pequeños y delgados- colocados «de plano», es decir, unidos por sus cantos. Tradicionalmente se recibían con yeso. La rapidez de fraguado de este aglomerante unido al bajo peso de los ladrillos hace posible construirlas sin cimbras, a veces al aire y otras sólo con ayuda de una ligera cercha para controlar la forma

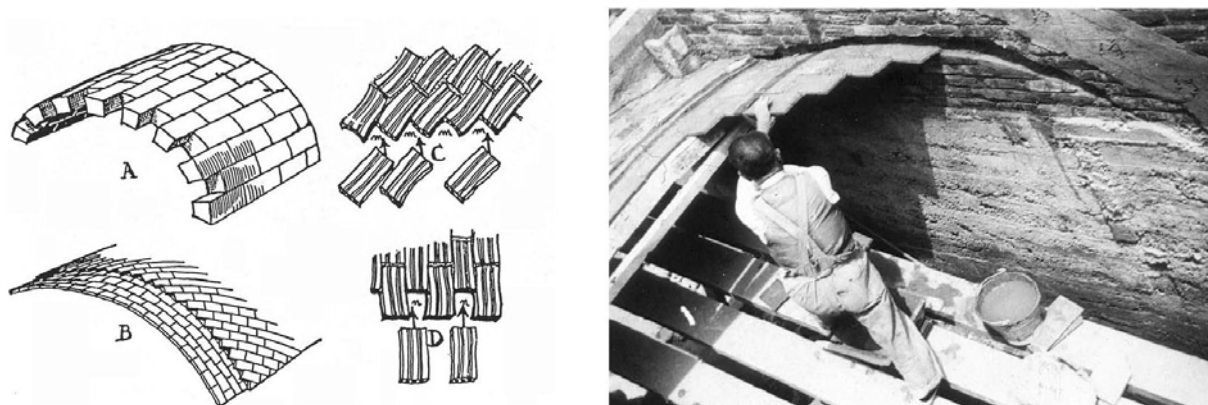


Figura 1: A la izquierda, dibujos explicativos de la diferencia entre una bóveda tabicada y una de piedra (Moya 1957, 19); A la derecha, construcción de una bóveda tabicada de escalera al aire (Truño 2004, 184).

Son bóvedas muy esbeltas, al menos a primera vista. Suelen estar formadas por 2 o 3 gruesos de ladrillo, a veces unidos en una sola hoja y otras separados en varias, dejando un espacio intermedio entre ellas que mejora el comportamiento estructural y climático.

Se encuentran ejemplos en muchos lugares alrededor del mar Mediterráneo, pero en España se desarrollan con singular intensidad, probablemente por la condición de este país de cruce de las tradiciones constructivas árabes (uso del yeso y del ladrillo) con las formas y requerimientos de la arquitectura cristiana.

En España hay ejemplos documentados desde los últimos años del siglo XIV. Aparece en el Levante y se extiende con rapidez por la zona centro y sur de la península, debido a sus evidentes ventajas: bajo peso y rapidez de ejecución. En el siglo XVII es un sistema constructivo usual, como lo demuestra su descripción en distintos tratados. Se emplea principalmente en bóvedas y cúpulas de iglesias. En Castilla son bóvedas de una hoja con armadura de madera por encima; en la zona de Levante son más frecuentes de dos hojas, la exterior funcionando como base del tejado.

En el siglo XIX confluyen en España varios factores que permitirán una importante evolución de estas bóvedas: comienza la fabricación industrial del cemento (que sustituirá al yeso como aglomerante) y del hierro (que permitirá adelgazar muros y estribos); aparecen nuevos tipos constructivos a los que se aplicará la bóveda tabicada exigiendo nuevas formas y mayores tamaños; se desarrolla la teoría de estructuras, lo que permite comprobar la validez de estas formas y tamaños no habituales y por tanto, no recogidas en las anteriores reglas proporcionales.



Figura 2: A la izquierda, bóveda tabicada “tradicional”: la iglesia de San Martín de Belchite, del siglo XVI. (imagen cedida por Paula Fuentes). A la derecha, nueva construcción tabicada: el vapor Aymerich, en Tarrasa, del Luis Muncunill, construido en 1908 (imagen de la autora).

Objetivo

Si una tesis es la respuesta a una pregunta, la que yo planteo es:

Las bóvedas tabicadas experimentan una importante evolución, casi una transformación, en España a lo largo del s. XIX. En sus inicios, son un sistema constructivo tradicional y codificado durante al menos 3 siglos, con usos, formas y tamaños limitados. 100 años después se emplean de manera generalizada en nuevos tipos edificatorios, con soluciones constructivas novedosas, tamaños mucho mayores y una gran libertad formal.

Esta tesis doctoral indaga en el porqué de esta transformación, desde el punto de vista de la técnica, así como en sus consecuencias, que llegan hasta la actualidad.

Estructura de la tesis

El texto se ordena en 9 capítulos, agrupados a su vez en tres partes:

La primera, a la que he llamado «La construcción tabicada tradicional» sirve de punto de partida. En ella se ponen en contexto las bóvedas tabicadas antes del s. XIX, cómo aparecen en España y cuál es su desarrollo y distribución territorial hasta finalizar el s. XVIII.

En el 1^{er} capítulo se documenta la aparición de las bóvedas tabicadas en España, en los últimos años del s. XIV, y cómo se convierten en un sistema constructivo cada vez más frecuente y consolidado, empezando por el territorio de la Corona de Aragón (actuales Valencia, Cataluña y Aragón) y extendiéndose desde ahí a Castilla y Andalucía. El uso inicial es como plementería entre nervios de piedra, en bóvedas de lenguaje gótico. Hacia el siglo XVI se difunde por toda España, se adapta a las formas renacentistas, y se usa como sistema estructural completo, sin apoyo de otros materiales.

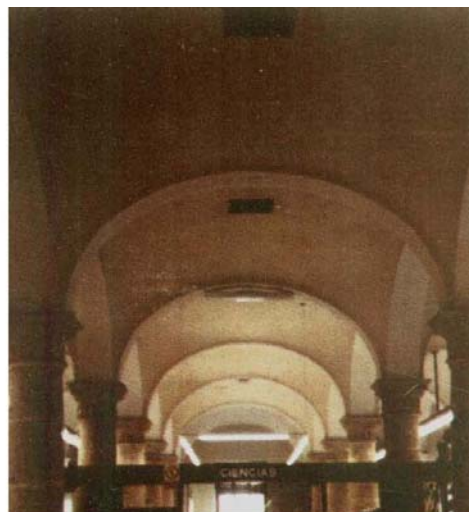
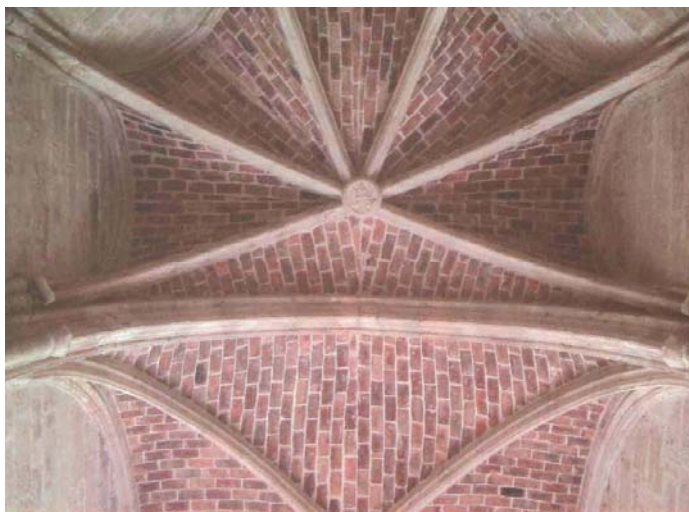


Figura 3: A la izquierda, primer ejemplo documentado en un contrato de obras de bóveda tabicada en España: la Capilla de los Jofre, en el convento de Santo Domingo de Valencia (Gómez Ferrer 2003, 140). Y a la derecha, uno de los primeros edificios en los que se emplea la bóveda tabicada como un sistema estructural completo, en un lenguaje ya renacentista: bóvedas vaídas en el Hospital de Valencia (Gómez Ferrer 2003, 136).

Desde una perspectiva histórica, existe un debate abierto acerca del origen y los antecedentes de estas bóvedas, en España y en general en todo el ámbito mediterráneo en el que se desarrollan principalmente. Frente a la opinión mayoritaria hasta hace unos años, que se decantaba por un origen romano y la llegada a España desde Italia en la época renacentista, en la actualidad la mayoría de los investigadores defienden el origen árabe de estas construcciones, y el desarrollo en España a partir de los 8 siglos de dominio musulmán, con su tradición constructiva de yeso y ladrillo. La tesis no profundiza en este aspecto, pero en este capítulo se ha intentado recopilar el estado de la cuestión acerca del origen de las bóvedas tabicadas en España y su incipiente desarrollo hasta el siglo XVI.

En cualquier caso, como cualquier otro avance en la historia de la técnica, el origen de la bóveda tabicada es el resultado de un proceso largo y en el que confluyen varias vías que funcionan como «ideas previas» o precedentes, que también se estudian en este capítulo.

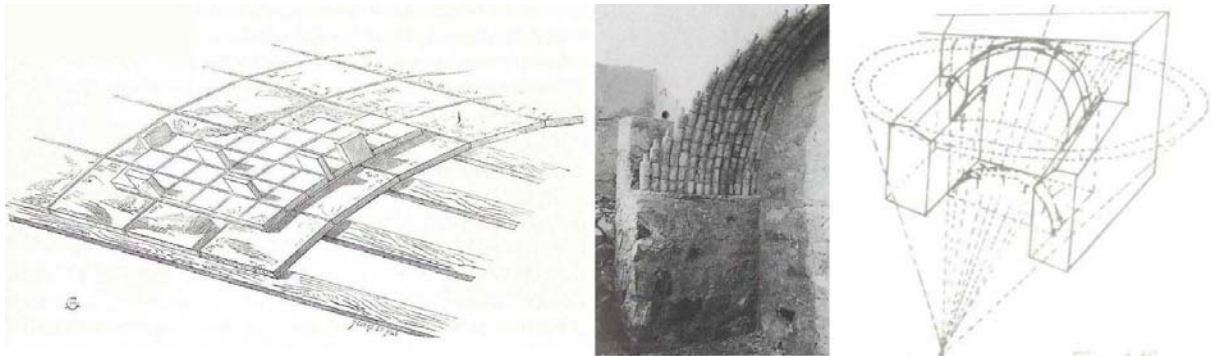


Figura 4: Algunas ideas previas que pudieron intervenir en la «invención» de la bóveda tabicada: las armaduras de ladrillo tabicado que se emplean como encofrado perdido en las bóvedas de hormigón romanas, a la izquierda (Choisy 1999, 53) ; las bóvedas de tubos cerámicos huecos, recibidos con yeso, que se construyen en Túnez y Rávena desde el siglo III d.C, en el centro (Storz 1997, 33); la tradición bizantina de construcción sin cimbra, empleando ingeniosos aparejos, hiladas inclinadas, etc (Sánchez y Pizarro 2004, 83)

En el 2º capítulo se estudia la difusión del sistema tabicado en España a través de fuentes escritas. Desde su aparición (al menos documentada) en el siglo XIV hay algunos contratos y pleitos de obra en los que se describe su construcción. Pero hasta el siglo XVII no lo encontramos en los tratados de arquitectura españoles y aun tardará 100 años más en ser reconocido por los influyentes tratados franceses, lo que supone una gran difusión y su aceptación dentro de la arquitectura «culta».

En el primero en el que aparecen, y el más relevante sobre el tema es *Arte y Uso de Arquitectura*, escrito por Fray Lorenzo de San Nicolás en 1639. A partir de ese momento, la bóveda tabicada se recoge en casi todos los tratados españoles de los siglos XVII y XVIII, aunque en ninguno se describe de manera tan clara y detallada como en el de Fray Lorenzo, que especifica procesos de ejecución, formas y cimbras así como reglas de proporción.

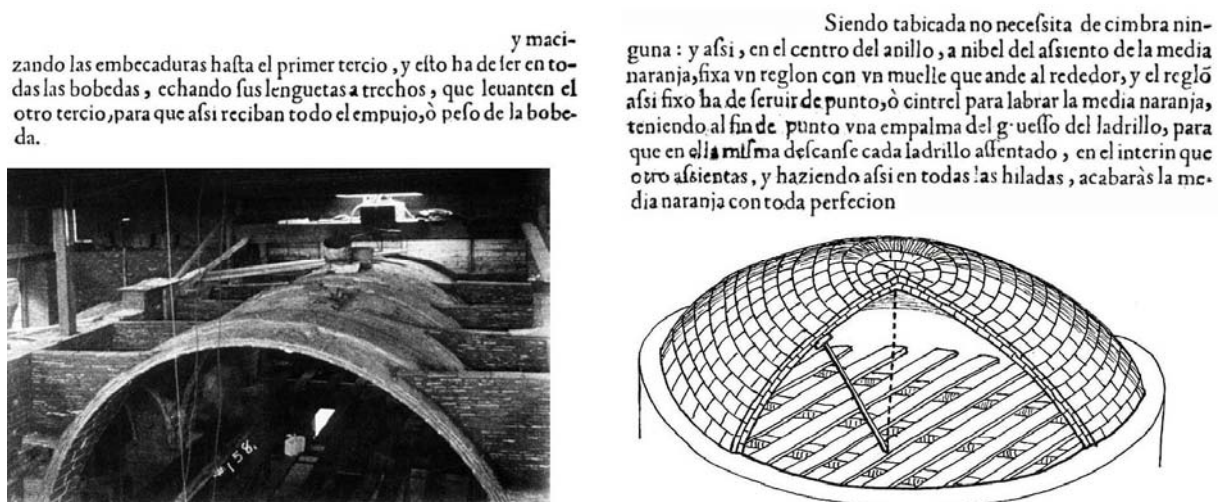


Figura 5: Extractos del tratado de Fray Lorenzo que describen procesos de ejecución y comportamiento estructural de una bóveda tabicada. A la izquierda, necesidad de colocar tabiquillos laterales (a los que llama

esta parte tres documentos que se mueven en la línea tradicional, uno de principio de siglo, otro de los años centrales y otro del final: los *Quincenarios*, manuscrito de Josep Renart, escrito en Barcelona hacia 1810, los dos tratados del valenciano Manuel Fornés y Gurrea, escritos en 1841 y 1846 y el libro *Construcción Civil*, escrito en Badajoz por Florencio Ger y Lóbez en 1898. En este último texto aparecen ya las innovaciones: uso de cemento como aglomerante, empleo de bóvedas tabicadas en forjados metálicos, etc. Pero mezclado con ello, aún siguen estando las bóvedas tabicadas construidas con ladrillos y yeso, en bóvedas de cañón, medias naranjas, escaleras, etc.

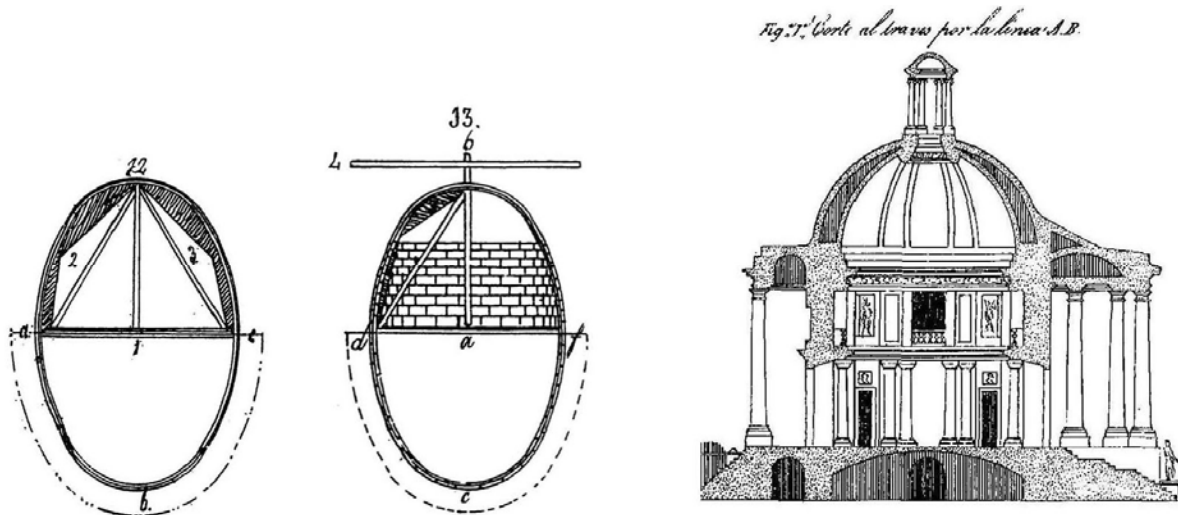


Figura 7: Algunas imágenes de los tratados de Fornés y Gurrea. A la izquierda, procedimientos para construir una cúpula con ayuda de formas giratorias (Fornés y Gurrea 1841, lam. VIII, fig. 12). A la derecha, proyecto de casa de recreo (Fornés y Gurrea 1846, lam. XXII, fig. 1). Estos sistemas de cúpulas de doble hoja tabicada son muy habituales en el Levante; forman una doble cáscara, conectada por tabiquillos, muy rígida y resistente, además de solucionar problemas térmicos, todo ello de manera muy ligera y económica.

El capítulo 5º se dedica a la aparición de dos nuevos materiales: el cemento y el hierro, que en pocos años pasan de tener un uso accesorio en la construcción a fabricarse y utilizarse masivamente. La unión de estos dos materiales con los tradicionales en la construcción de bóvedas tabicadas, yeso y ladrillo, será decisiva en su evolución.

El tipo de aglomerante empleado es básico en la construcción de bóvedas tabicadas. El de la primera capa debe ser de fraguado rápido, tanto si se quieren construir sin cimbras, como si se quiere utilizar una ligera, para controlar la forma, que normalmente se desplaza cada hilada. Hasta 1850 para esta primera capa se utiliza el yeso, y así lo recogen casi todos los autores estudiados. Las siguientes capas se reciben igualmente con yeso o con mortero de cal, el más común hasta finales del s. XIX. Pero el yeso tiene un inconveniente: su mal comportamiento frente a la humedad, lo que no permite su uso en exteriores ni en lugares enterrados. Además, y por influencia francesa, desde la segunda mitad del siglo XVIII se extiende la creencia de que las bóvedas recibidas con yeso empujan más ya que éste aumenta de volumen al fraguar y desplaza los apoyos.

En la segunda mitad del s. XIX se impone de manera creciente el cemento como aglomerante en las bóvedas tabicadas: cemento rápido para la primera capa y cemento lento (o a veces también cal) para las siguientes. Este cambio es decisivo en el desarrollo de la bóveda

tabicada en el siglo XIX: permite nuevos usos (exteriores y otros lugares húmedos) y lo que es más importante, la confianza en el nuevo material acaba con las reticencias que existían respecto a este sistema constructivo por el empleo del yeso.

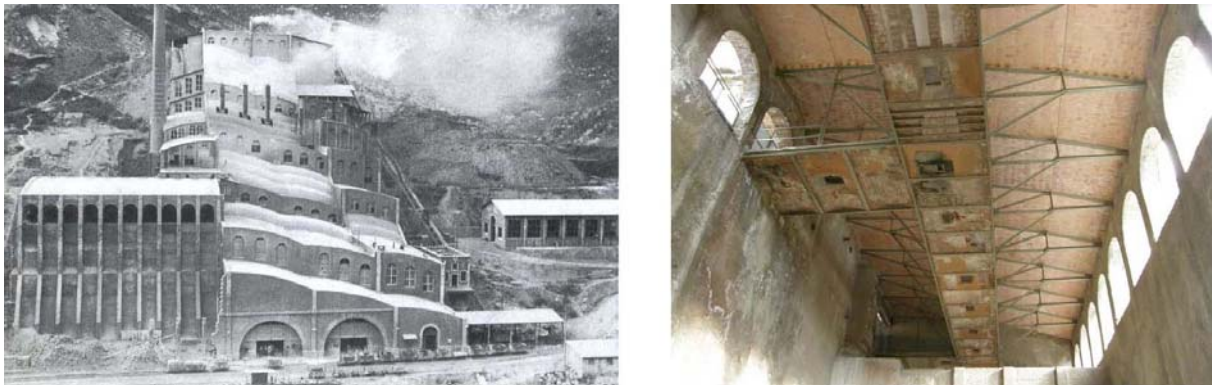


Figura 8: Imágenes de la primera fábrica de cemento Portland española a gran escala: Asland, situada en el pirineo catalán. A la izquierda, vista general del edificio en 1908 (Fernández 2006, 22); A la derecha, vista interior del edificio en 2013, parcialmente restaurado como «Museo del Cemento» (imagen de la autora). El edificio en sí es un buen ejemplo de la nueva construcción tabicada, unida al cemento y al hierro: construido en 1902-1904 según proyecto de Rafael Guastavino, resuelve sus cubiertas con bóvedas tabicadas apoyadas en cerchas metálicas; al exterior, las bóvedas se revisten únicamente con una capa de cemento, dejando ver sus formas sinuosas.

En cuanto al hierro, se emplea en atirantamientos que permiten reducir el espesor de los muros de apoyo. En el tratado de Blondel y Patte *Cours d'Architecture* (1771-78) encontramos esta solución constructiva por primera vez, aplicada a un ejemplo francés. Benito Bails, en su *Tratado de Arquitectura Civil* de 1796 reproduce la misma solución, traducida al español, sin añadir nada nuevo. Hasta los últimos años de los siglos XIX no existe en España un sistema constructivo en el que se mezcle el uso de las bóvedas tabicadas con el hierro. El desarrollo vendrá principalmente de la arquitectura industrial en Cataluña.



Figura 9: A la izquierda, primera referencia una bóveda tabicada atirantada con hierro (Blondel y Patte, 1771-77, Pl. CIV, Fig XXIII). A la derecha, primer edificio construido en España con bóvedas tabicadas atirantadas y empleando cemento como aglomerante, en 1868: la fábrica Batlló, de Rafael Guastavino, en Barcelona. En la imagen vemos la sala de telares (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia)

En el capítulo 6º se documenta la creación de dos tipos arquitectónicos nuevos, derivados de la Revolución Industrial: los edificios fabriles y la vivienda masiva. En ambos tipos tiene aplicación la construcción tabicada.

Las bóvedas de ladrillo y en especial las tabicadas encontraron un importante campo de aplicación en la arquitectura industrial. La primera razón fue la búsqueda de estructuras incombustibles, aspecto en el que el ladrillo aventaja a la madera tradicional. Los edificios industriales son además especialmente sensibles a los incendios, ya que almacenan material muy inflamable. Debido a esto, en las primeras fábricas inglesas ya se usan bóvedas de ladrillo para los forjados. Por su tradición constructiva, estas bóvedas se construyen con ladrillos de rosca. Cuando el tipo de fábrica inglesa se copia en España, especialmente en Cataluña, las bóvedas se adaptan a los modos constructivos locales convirtiéndose en tabicadas, más ligeras y fáciles de construir.

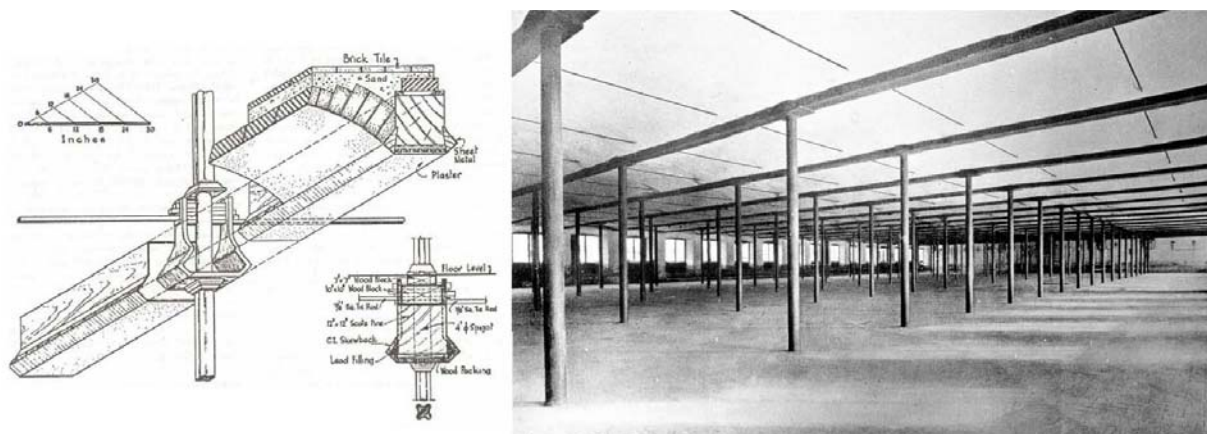
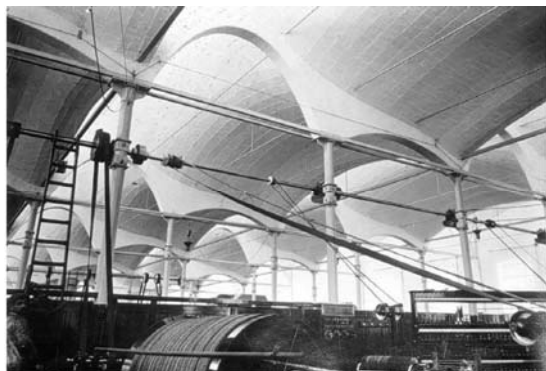


Figura 10: A la izquierda, sistema constructivo clásico de las fábricas de pisos inglesas: vigas de madera apoyadas en pilares de fundición y bóvedas de rosca de ladrillo como forjado; en los primeros años del siglo XIX se sustituyen las vigas de madera por otras de fundición, por miedo a los incendios (Skempton y Johnson 1997, 24). A la derecha, adaptación del sistema inglés en Cataluña: la gran sala de hilatura de la fábrica Batlló, de 1868, que se construye con vigas y pilares metálicos y bóvedas tabicadas entre ellos (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia)

La arquitectura industrial, frente a otras más representativas, es utilitarista, buscando unos objetivos muy concretos (grandes espacios libres y bien iluminados) con un mínimo coste. Eso favoreció el desarrollo de grandes bóvedas y arcos tabicados, un sistema con materiales baratos y rápido de ejecutar. Estas bóvedas se atirantan donde es necesario, sin preocuparse de que los tirantes queden a la vista. Además en algunos casos se deja visto el ladrillo, tanto al interior como al exterior.

En Cataluña se dan las condiciones óptimas para este desarrollo del sistema tabicado aplicado a la arquitectura industrial: las bóvedas tabicadas eran un sistema constructivo tradicional, bien conocido en sus materiales y forma de ejecutar. Además Cataluña es, con diferencia, la región más industrializada del país y el centro de su industria textil. El sistema de arcos y bóvedas tabicados es especialmente adecuado para las fábricas textiles, que necesitan grandes extensiones y buena iluminación pero no necesariamente grandes luces estructurales, ya

que ni las maquinarias ni las piezas que se fabrican son muy grandes, como sí ocurre en la industria siderúrgica.



En Cataluña aparece hoy una nueva estructura arquitectónica. Se funda, en equilibrar los empujes, por tirantes de hierro, cruzando el espacio, ó bien ocultos en el grueso de los muros, en lugar de emplear masas constructivas; combinar la obra de ladrillo con el hierro, de modo que aquella forme los muros y cubiertas, los elementos sujetos á compresión, empleando el hierro atirantado, para dominar los esfuerzos oblicuos que se desarrollen.

Figura 11: A la izquierda, el Vapor Aymerich, construido por Luis Muncunill en Tarrasa en 1908 y, en mi opinión, el mejor exponente de la maestría que se alcanza en Cataluña unificando los requerimientos de la arquitectura industrial y la construcción tabicada: un sistema de arcos principales tabicados, de forma parabólica, atirantados, y apoyados en pilares de fundición; sobre ellos, bóvedas tabicadas igualmente atirantadas (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia). A la derecha, extracto del artículo «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana», escrito por el arquitecto Jerónimo Martorell en 1910; es el texto que mejor expone esta manera de construir.

Otra particularidad catalana, ya del final del siglo XIX, es la aparición del Modernismo, ligado además al nacionalismo catalán. Ambos movimientos harán de las bóvedas tabicadas una de sus señas de identidad, que pasan a llamarse en muchos textos de la época *voltas catalanas*. En ese contexto se construyen algunas de las más importantes y espectaculares fábricas de Cataluña, que usarán la bóveda tabicada, explicitando el sistema constructivo: ladrillo sin revestir, atirantamientos a la vista. El principal exponente de esta corriente es Luis Muncunill.



Figura 12: Cubiertas del Vapor Aymerich, citado en la imagen anterior. Las bóvedas tabicadas se dejan vistas al exterior, sin ocultar el sistema constructivo. Este espectacular edificio está rehabilitado, funcionando como Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de Cataluña (imagen de la autora en 2013)



Figura 13: El Vapor Amat, otro edificio de Luis Muncunill en Tarrasa, de 1914. Aquí el sistema constructivo son bóvedas vaídas apoyadas sobre un entramado de vigas y pilares metálicos, con grandes lucernarios en la parte superior de cada una. Al exterior quedan vistas. Este edificio es ahora el «Espacio Muncunill», una sala de exposiciones (imagen de la autora en 2013)

La tercera parte de la tesis estudia los aspectos estructurales del desarrollo de las bóvedas tabicadas a lo largo del siglo XIX. Se desarrolla en dos extensos capítulos dónde se centran los avances de esta tesis y la respuesta a muchas de las preguntas iniciales.

El capítulo 7º se estudian las distintas maneras de enfrentarse al «cálculo» de las bóvedas tabicadas, tomando como punto de partida las reglas de proporción tradicionales, empleadas en la práctica al menos hasta 1850.



Figura 14: Reglas proporcionales para obtener el tamaño de los estribos, habituales en la construcción tradicional. A la izquierda, del tratado de Fray Lorenzo (San Nicolás 1639, 30). A la derecha. Del manuscrito de Josep Renart (ca. 1810, 20-21)

A lo largo del siglo XVII los arquitectos e ingenieros comienzan a necesitar una justificación teórica de sus decisiones acerca de las dimensiones de los edificios. Las reglas de proporción anteriores parecen erróneas por su falta de demostración científica. Comienza entonces el desarrollo de la teoría científica de estructuras, basada en las leyes de la Mecánica. Estas nuevas teorías coexisten durante 200 años con las reglas de proporción geométrica que se habían usado hasta entonces, aunque no empiezan a aplicarse en la práctica a las bóvedas, incluidas las tabicadas, hasta los últimos años del siglo XIX.

Lo que distingue a las bóvedas tabicadas de otras estructuras de fábrica es la aparición, en la segunda mitad del siglo XVIII, de la teoría monolítica. Iniciada por el conde d'Espie en su libro, publicado en 1754, defiende la falta de empujes de estas bóvedas por su carácter compacto, como una «tapa de puchero», debido a la composición en varios gruesos de ladrillo unidas por una importante capa de mortero. Después de Espie, numerosos autores defienden esta teoría con mayor o menor convicción, aunque ninguno es capaz de demostrarla. La aplicación del cemento como aglomerante para las bóvedas tabicadas, con su supuesta resistencia a tracción enreda aún más el debate y en los últimos años del siglo XIX y los primeros del XX casi todos los autores defienden, al menos de manera teórica, que las bóvedas tabicadas soportan tracciones.

Pero una lectura más cuidadosa de los textos, así como, donde ha sido posible, de los planos de construcción, revela que esta defensa es solo eso, teórica: los autores que además son constructores defienden esta supuesta resistencia a tracción en sus textos pero calculan sus bóvedas y cúpulas adaptando la forma a la línea de empujes de las cargas, de manera que el material trabaje exclusivamente a compresión. En este sentido, los dibujos más reveladores son los de Rafael Guastavino Moreno, un valenciano formado en la escuela de Maestros de Obras de Barcelona, que emigra a Nueva York en 1881 y construye en Estados Unidos mas de 1000 edificios empleando la técnica tabicada, algunos de ellos muy relevantes en la historia de la arquitectura americana.

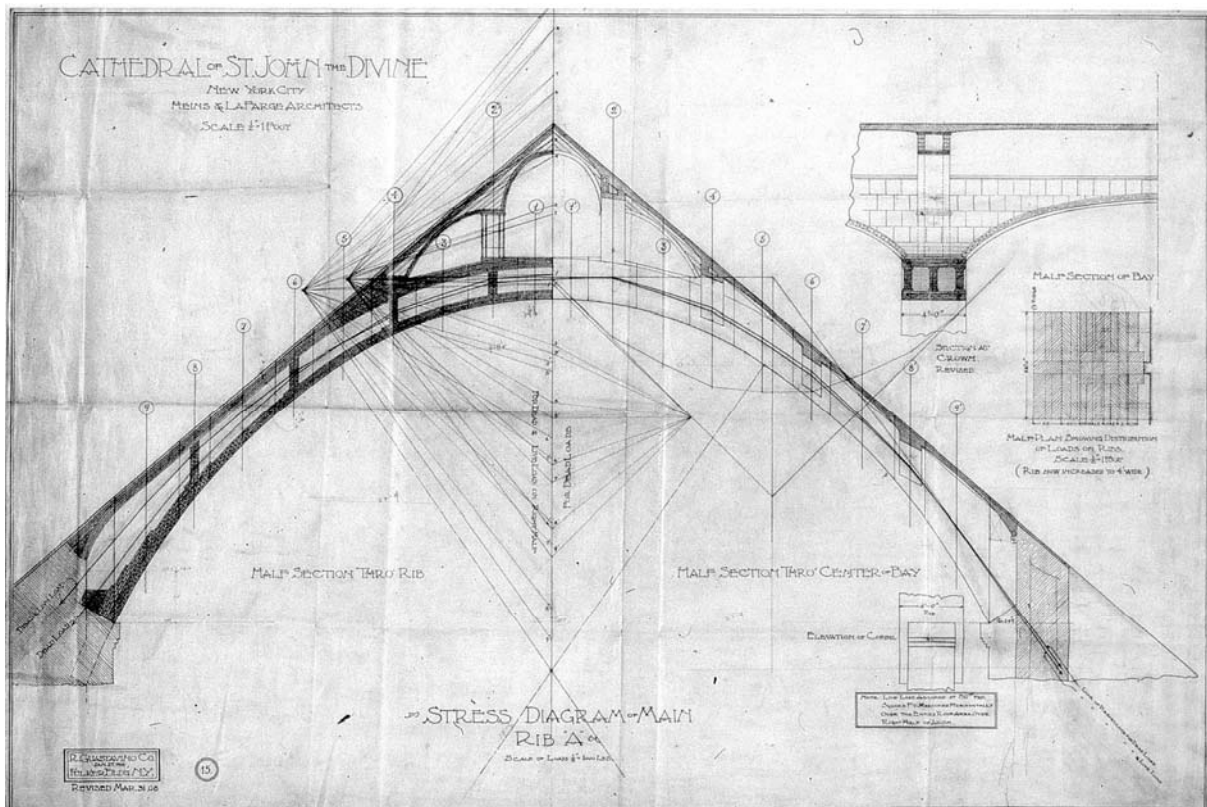


Figura 15: Plano de Rafael Guastavino en el que se comprueba la estabilidad de la nave de la catedral de st. John the Divine, en Nueva York. El procedimiento consiste en dibujar en el grosor de la bóveda las líneas de empuje de los diferentes estados y combinaciones de carga posibles. Este método implica suponer que la bóveda está trabajando sólo a compresión (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia).

Cuando la superficie es de doble curvatura, por ejemplo, en cúpulas, Guastavino emplea la recién desarrollada «teoría de la membrana», adaptando la forma de la cúpula para que sólo soporte compresiones. Consigue así construir esbeltísimas cúpulas de gran tamaño.

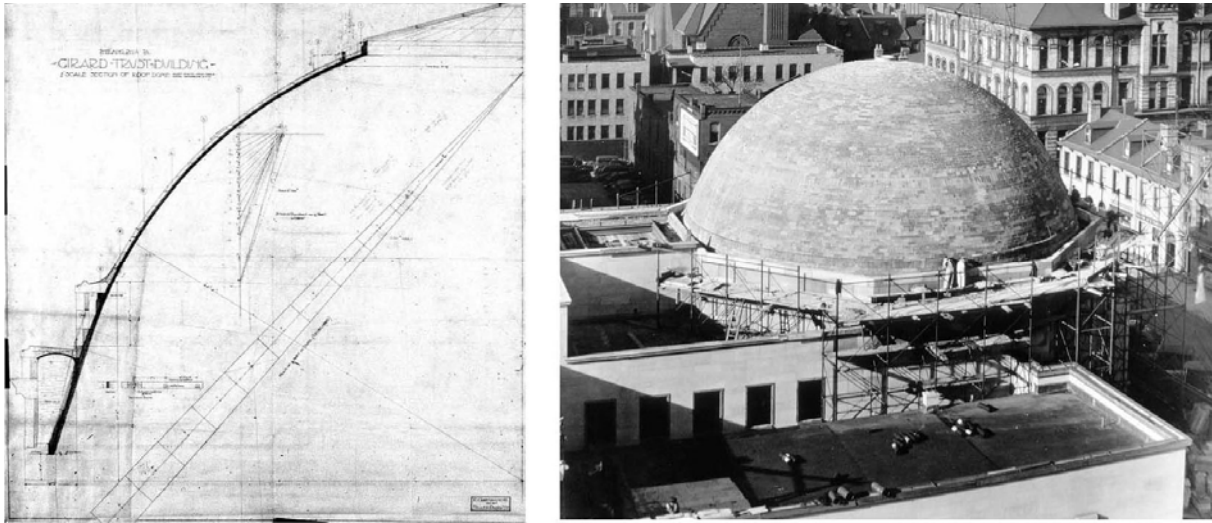


Figura 16: A la izquierda, plano de Rafael Guastavino en el que se diseña la forma de la cúpula del Girard Trust Company (30 m. de luz, 10 cm de espesor), empleando un análisis de membrana. A través de él, se modifica la forma de la cúpula, que es semiesférica en la parte superior y catenaria en la inferior; de esta manera trabaja sólo a compresión. A la derecha, otra gran cúpula construida por los Guastavino, el planetario Buhl (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia).

De manera más o menos simultánea, autores más teóricos intentan utilizar la supuesta resistencia a tracción de las bóvedas tabicadas. Esto implica emplear la recién desarrollada teoría elástica. La limitación en el desarrollo matemático y la falta de herramientas informáticas dificulta este camino, prácticamente inaplicable en geometrías complejas, más allá de un arco de perfil circular. Esteban Terradas, el ingeniero más brillante de la época, fracasa en su intento de desarrollar un análisis elástico para una bóveda de escalera, de difícil geometría pero sin embargo con un proceso de ejecución conocido por cualquier modesto constructor del momento.

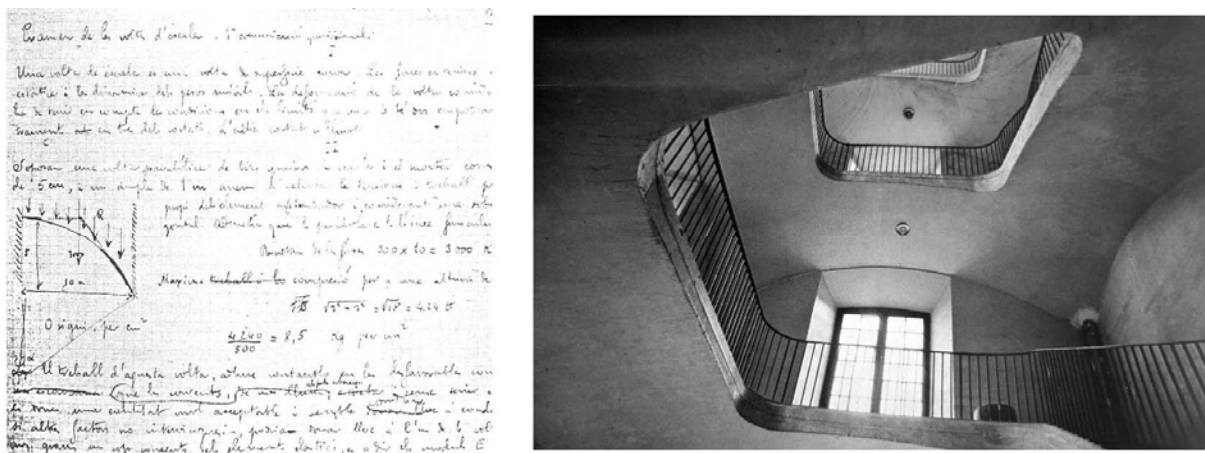


Figura 17: A la izquierda, cuaderno de cálculo de Esteban Terradas, en el que aplica complejas ecuaciones diferenciales para hallar una solución elástica al cálculo de una escalera tabicada. A la derecha, escalera en la que

se basa Terradas para hacer los cálculos. Pertenece a la fábrica Batlló, construida por Rafael Guastavino en 1868, unos 50 años antes de los cálculos de Terradas. (Archivo Guastavino/Collins, Univ. Columbia).

El capítulo 8º, muy relacionado con el anterior, es un estudio exhaustivo de los ensayos de resistencia que se realizan sobre estructuras tabicadas a lo largo de los siglos XIX y la primera mitad del XX.

Los primeros ensayos documentados sobre bóvedas tabicadas son del final del s. XVIII. El inicio de los ensayos coincide con la Ilustración, y es un momento en que los arquitectos comienzan a tener una actitud científica frente a la construcción, que desembocará en la moderna teoría de estructuras. Por esto también los primeros ensayos se realizan en los países en los que el pensamiento ilustrado comienza antes, como Francia e Inglaterra.

Este es el contexto histórico en el que se realizan los ensayos que se estudian en la tesis, buscando, por un lado, una teoría que respalde la práctica que llevaba siglos construyéndose y por otro, responder a la duda planteada por las tesis de Espie y su teoría monolítica acerca del empuje de las bóvedas tabicadas.

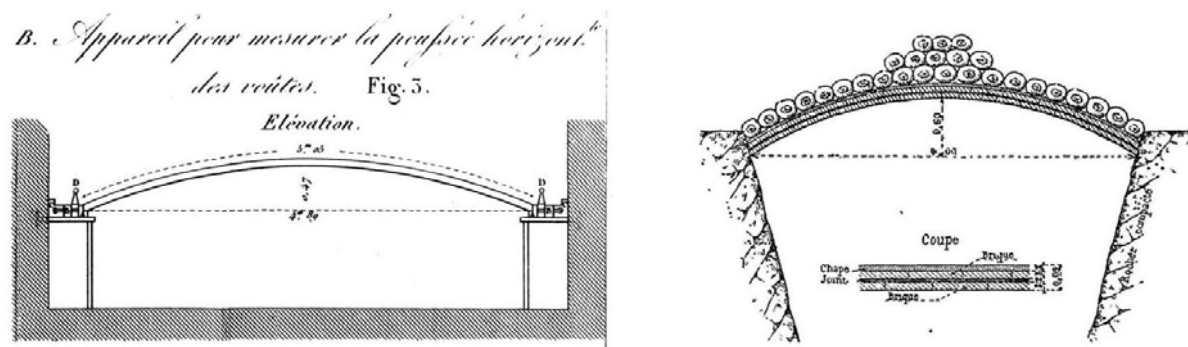


Figura 18: Algunos ensayos iniciales en Francia. A la izquierda, el realizado por el militar D'Olivier en 1837, que, al contrario que otros, intenta demostrar que las bóvedas tabicadas sí empujan, midiendo la fuerza que ejercen por medio de un dinamómetro que intercala en los apoyos (D'Olivier 1837, Pl. 129, fig.3). A la derecha, ensayo de carga realizado por el ingeniero Collard en 1893. Es un ensayo práctico: quiere construir una bóveda similar a la ensayada para un depósito de agua (Collard 1893, 875)

Rafael Guastavino, a su llegada a Estados Unidos, realiza una importante campaña de ensayos: la construcción tabicada era allí desconocida y necesitaba una justificación teórica. Realiza multitud de ensayos, desde los primeros, en 1887, que buscan la resistencia unitaria a tracción, compresión, flexión y cortante de pequeñas probetas o los ensayos espectaculares de carga que lleva a cabo en 1901.

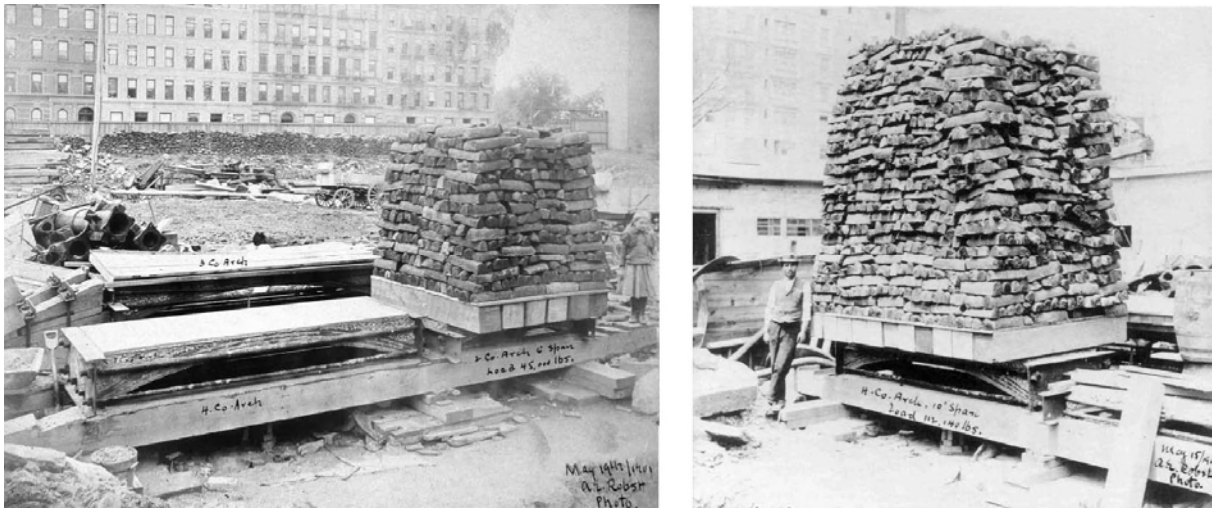


Figura 19: Ensayos de carga realizados por Rafael Guastavino en 1901. Las bóvedas descansan sobre apoyos doble T fuertemente atirantados. En la parte inferior de las fotos se indica la carga que soporta cada bóveda, alrededor de 500 kN.

Todos los autores franceses e ingleses destacan sus propiedades incombustibles, frente a los forjados de madera habituales. Guastavino, en Estados Unidos, también realiza un ensayo específico para demostrar la resistencia al fuego de las estructuras tabicadas.



Figura 20: Desarrollo de un ensayo de carga y fuego realizado por Rafael Guastavino en Nueva York en 1897: (1) y (2) se construye una bóveda tabicada similar a las que construye habitualmente, pero con cuatro huecos-chimenea en las esquinas, sobre muros también de ladrillo (3) se coloca sobre la bóveda una carga habitual (6,30 kN/m²), se prende en su interior un fuego, que dura 4 horas. Se miden temperaturas durante el proceso, alcanzándose máximos de 1300° C.

(4) se apaga el fuego y se coloca sobre la bóveda una sobrecarga elevadísima, de 25 kN/m². Se miden deformaciones, que son muy bajas; y daños en el interior.

Acerca del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas aún existen dudas y preguntas por responder. En la actualidad, en el campo de las estructuras de fábrica en general conviven dos líneas:

- el Análisis Límite, desarrollado por Jacques Heyman en numerosos artículos desde 1966, que defiende que una estructura de fábrica es estable si es posible encontrar una línea de empujes contenida en el espesor de la bóveda.

- el enfoque Elástico-resistente, que busca una solución única para el equilibrio de la estructura de fábrica, lo que requiere ecuaciones más complejas e introducir datos acerca del material que la conforma y de sus condiciones de apoyo. Este enfoque cada vez es más fácil de aplicar con la ayuda de programas informáticos (Elementos Finitos, Elementos Discretos y otros)

En el campo de las estructuras tabicadas, cobra fuerza el enfoque elástico, ya que su reducido espesor y su bajo peso propio hacen que, a primera vista, sean de más difícil aplicación los principios del Análisis Límite. Otro debate en marcha acerca de las bóvedas tabicadas es la posibilidad que resistan tracciones, debido a su particular sistema de construcción, a pesar de estar formadas por materiales (ladrillo, cemento) que no las resisten.

En estos dos últimos y más largos capítulos de esta tesis se estudian ejemplos de bóvedas tabicadas, intentando demostrar que el Análisis Límite también es de aplicación a las bóvedas tabicadas, como en cualquier otra estructura de fábrica: que siempre existe una solución de equilibrio en compresión para ellas y que por tanto, si resisten pequeñas tracciones como algunos ensayos parecen atestiguar, esta resistencia no es necesaria para asegurar su estabilidad.

Además de estas tres partes, el capítulo 9º sirve de conclusiones y síntesis de los 8 anteriores, intentando responder a la pregunta inicial: ¿cómo y por qué se transforman las bóvedas tabicadas en España en el siglo XIX?

Se incluye, en un apéndice, la transcripción completa de un manuscrito: *Bóvedas tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas*, escrito por un ingeniero militar en 1869. El texto es representativo del momento de cambio que supone la segunda mitad del XIX y permanecía inédito. Por último, en la Bibliografía se listan las fuentes consultadas: las citadas y aquellas que se consideran de interés aunque no han llegado a consultarse..

OPERACIONES DE ADAPTACIÓN PARA LA EDICIÓN COMO LIBRO

La tesis se ha escrito como un texto académico, con un programa de edición de texto normal y una maquetación sencilla, en la que las imágenes se colocan intercaladas con los párrafos de texto. En este resumen he mantenido la maquetación y los estilos de texto de la tesis para que sirva de ejemplo de la manera en la que se hizo y del trabajo que será necesario para ser adaptado

a un formato libro siguiendo la maquetación habitual de la colección arquia/tesis. Dada su sencillez, resultará fácil de adaptar a cualquier formato, ya que de alguna manera ahora no tiene ninguno.

La longitud del texto es excesiva para un libro: la tesis ocupa más de 500 páginas en A4. Evidentemente, requiere un resumen. En ese sentido, se pueden recortar bastante los primeros capítulos: 1, 2, 3 y 4; ya que lo que se recoge en ellos no aporta grandes novedades sobre otras publicaciones más allá de poner en contexto el tema. Los capítulos 5 y 6 son interesantes y aportan datos nuevos; además, especialmente el capítulo 6, tiene buenas imágenes sobre la aplicación de la bóveda tabicada al interesantísimo patrimonio industrial de Cataluña. Los capítulos 7 y 8 son el núcleo central de la tesis y donde se explican los temas más novedosos; no obstante son los más técnicos y exhaustivos, lo que puede convertir su lectura en algo farragoso. La solución sería elegir de manera conveniente unos cuantos ejemplos, representativos del resto, tanto de análisis estructurales como de ensayos sobre bóvedas tabicadas y explicarlos a fondo. Por otro lado, la teoría del Análisis Límite de fábricas que se defiende en la tesis, basada en desarrollos gráficos, es bastante más intuitiva y fácil de entender que los cálculos estructurales a los que estamos acostumbrados.

Como en otras tesis, habrá que reducir notas a pie de página, referencias bibliográficas, citas textuales, etc. Así como eliminar el capítulo de conclusiones, que debe quedar incluido en el resto; y reformular la introducción (que incluye metodología seguida, fuentes, etc.) para que sea la de un libro, y no la de una tesis.

Para terminar, quería destacar que la tesis incluye imágenes interesantes, algunas de ellas inéditas, con buena calidad, y abundante información procedente del Archivo Guastavino/Collins, depositado en la Universidad de Columbia, con impresionantes planos de construcción e imágenes de obras de la compañía Guastavino. Solicitando los correspondientes derechos, una selección de estas imágenes podrían aparecer en el libro.