

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Arquitectura

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

Tesis Doctoral

ESTHER REDONDO MARTÍNEZ
Arquitecta

2013

Departamento de Estructuras de Edificación
Escuela Técnica Superior de Arquitectura

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

por
ESTHER REDONDO MARTÍNEZ
Arquitecta

dirigida por
SANTIAGO HUERTA FERNÁNDEZ
Doctor Arquitecto

2013

*A Irene y a Chefo,
por el tiempo robado.*

Agradecimientos

Esta tesis empezó en realidad hace 14 años, cuando Santiago Huerta me propuso trabajar como documentalista para la exposición *Guastavino Co. (1885-1962). La reinvencción de la bóveda*, presentada en el Museo de América de Madrid en octubre de 2001. Así que para Santiago es mi primer agradecimiento, por hacerme descubrir a Guastavino y a las bóvedas tabicadas. En estos tres últimos años, ya como director de la tesis, me ha dedicado todo el tiempo que ha sido necesario; sus comentarios e ideas siempre me han llevado a mejorar el documento, además de ser una fuente inagotable de bibliografía, imágenes y conocimientos sobre el tema de la tesis.

En el tiempo que llevo trabajando, he contraído muchas deudas, grandes y pequeñas, con muchas personas. Intentaré citarlas a todas a continuación.

En Cataluña, he visitado algunos edificios industriales y colonias obreras, integradas en la red de museos del MNACTEC. Todos los trabajadores de estos museos fueron muy amables y me facilitaron las visitas. Recuerdo especialmente a M^a Angels, que me acompañó por la colonia Puig-Reig un 4 de enero con un frío del demonio. Y, en el MNACTEC de Tarrasa, la bibliotecaria Angeles Dalmases me abrió el recinto fuera de horario y me enseñó todos sus fondos; Magda Fernández me envió una interesante bibliografía sobre la farga catalana y Jaume Perarnau me puso en contacto con ella.

En la Universidad Europea de Madrid, donde trabajo, muchos compañeros me han prestado apoyo. José Jurado ha sido un verdadero todo-terreno: igual escuchaba un rollo sobre el cemento natural en España que se llevaba de paseo a mi hija. Yago, Beatriz y José Agulló, este trimestre, han suplido mi falta de tiempo en las asignaturas que compartimos. Carmen González me ha permitido ajustar horarios y clases, lo que me ha facilitado enormemente la tarea, sobre todo al final.

Algunos amigos han sido traductores o correctores de idiomas espontáneos, en especial Bárbara que me ayudó con los textos de Blondel y Patté.

Rosana Guerra, predecesora en el camino de escribir una tesis aquí y ahora, me ha resuelto muchas dudas administrativas acerca del procedimiento; además, su documento escrito me ha servido de ejemplo en muchos aspectos.

Gema López Manzanares me ha cedido amablemente la transcripción que realizó (aunque no se acuerde) del manuscrito de Ramón Ballesteros que se incluye en el apéndice.

Paula y Fabián, en el instituto Juan de Herrera, han sido compañeros de cafés, dudas y risas, haciendo muy agradable el tiempo de trabajo. Además, Paula me ayudó con las comprobaciones realizadas con el programa SAP, y Fabián me hizo algunos dibujos estupendos.

Mis hermanos, mis suegros y mis padres han estado dispuestos siempre a darme tiempo para trabajar, resolviendo los aspectos logísticos que les he pedido; mi hermana Marta, además, me ha proporcionado algunas de las imágenes que se incluyen. Antes, mis padres pusieron su empeño y sus medios para que yo fuera arquitecta, que no deja de ser el primer paso para llegar hasta aquí.

Y por último, Irene y Chefo, mi pequeña familia, han tenido que aguantar ausencias, despistes y malhumores, sobre todo en los últimos meses. A ellos dedico la tesis, por el tiempo que les he robado.

La bóveda tabicada es el elemento más precioso de nuestra construcción: permite ejecutar con simplicidad y rapidez las formas más complejas, no exige cimbras y tiene gran resistencia en relación con su ligereza y con la simplicidad de sus componentes.

A. Gaudí

INDICE

INDICE.....	xi
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
a. Valencia.....	28
b. Cataluña.....	31
c. Aragón.....	32
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 Patté: Cours d’Architecture.....	77
a. Introducción.....	77
b. Article I: Comment on les construit dans le Roussillon.....	78
c. Article II. Comment on les construits à l’Hôtel du Bureau de la Guerre.....	80
d. Article III: Comment on les construit dans le Languedoc.....	83
e. Article IV: Comment on les construit à Lyon.....	83
f. Article V. Comment elles ont été construites au Palais Bourbon.....	86
g. Article VI: Représentations sur les Voutes plates, & sur les moyens d’operer leur construction avec succès.....	88
h. Chapitre IV: De la Construction des Combles.....	90
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
a. Macizados y lengüetas.....	110
b. Uso de cimbras.....	111
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
a. Bóvedas de escalera.....	115
b. Cúpulas.....	117
c. Bóvedas tabicadas como cimbra.....	119
d. Otras bóvedas.....	120
4.2.2. Comportamiento estructural.....	123
4.2.3. Cúpulas y bóvedas dobles.....	123
a. Cúpulas dobles.....	124
b. Formación de vertientes para tejados.....	126
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
a. Tratados.....	155
b. Procesos de fabricación.....	158
c. Características del hierro y el acero en el s. XIX.....	161
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
a. Tratados del siglo XIX.....	166
b. Joan Torras y Guardiola.....	169
c. El tratado de Sugrañes, 1916.....	173
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
a. Los primeros ejemplo: Adaptación de la fábrica de pisos	
ingleses.....	189
b. La creación de un sistema constructivo propio.....	192
c. Luis Muncunill.....	197
d. La fábrica de cementos Asland.....	201
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

a. Colonia Marsal, en Puig Reig, fundada en 1886.....	216
b. Viladomiu Nou, fundada en 1880.....	217
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
a. Escritos.....	250
b. Proyectos y dibujos.....	254
c. Coppet Berg 1889.....	259
7.3.4. España.....	260
a. Martorell 1910.....	260
b. Moya 1947.....	263
7.4. ANÁLISIS DE EQUILIBRIO DE BÓVEDAS Y CÚPULAS TABICADAS.....	266
7.4.1. Método de los cortes.....	268
a. Los Guastavino.....	271
b. Bosch Reitz 1949.....	274
7.4.2. La teoría de la membrana.....	279
a. Eddy 1878.....	281

b. Dunn 1904.....	284
c. Dunn 1908.....	287
d. Los Guastavino.....	289
e. España.....	297
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
a. Doménech y Estapá 1900.....	310
b. Bayó 1910.....	312
c. Cardellach 1910.....	321
d. Terradas: La llibreta della volta.....	322
e. Goday 1934.....	330
f. Bosch Reitg 1949.....	332
g. Pereda Bacigalupi 1951.....	333
h. Juan Bergós.....	339
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
a. Análisis del experimento.....	363
8.1.2. Ensayo en las bóvedas del Palais Bourbon, hacia 1764.....	364
a. Análisis del ensayo.....	365
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
a. Descripción del ensayo de Olivier.....	372
b. Análisis del ensayo de d’Olivier.....	375

8.2.2. Laroque, 1859.....	385
8.2.3. Fontaine, 1865.....	387
a. Descripción de los ensayos.....	388
b. Análisis de los ensayos.....	393
8.2.4. Collard, 1893.....	394
a. Análisis del ensayo.....	395
8.3. ENSAYOS EN INGLATERRA.....	397
8.3.1. Cubitt, 1841.....	398
a. Análisis del ensayo.....	399
8.4. ENSAYOS REALIZADOS POR GUASTAVINO EN ESTADOS UNIDOS.....	400
8.4.1. Ensayos sobre probetas, 1887.....	401
a. Ensayos de compresión.....	401
b. Ensayo de flexión.....	402
c. Ensayo de tracción.....	403
d. Ensayo de cortante.....	403
e. Análisis de los ensayos.....	404
8.4.2. Máquina para ensayar arcos de ladrillo, 1890.....	404
8.4.3. Ensayos de resistencia a carga y fuego, 1897.....	405
a. Descripción de la bóveda ensayada.....	406
b. Desarrollo del ensayo.....	409
c. Análisis del ensayo.....	415
8.4.4. Ensayos de carga, 1901.....	416
8.4.5. Ensayos de resistencia sobre probetas, 1927-1928.....	419
a. Ensayo de compresión.....	420
b. Ensayo de tracción:.....	422
c. Ensayo de cortante-punzonamiento:.....	423
8.4.6. Ensayos de resistencia sobre probetas, 1935.....	424
a. Ensayo de punzonamiento:.....	424
b. Ensayos de flexión:.....	426
c. Ensayos de compresión.....	429

INDICE

8.5. ENSAYOS EN ESPAÑA.....	431
8.5.1. Ensayos de los ingenieros militares 1891-1892.....	431
a. Primer ensayo, 1891.....	432
b. Segundo ensayo, 1892.....	436
8.5.2. Ensayos en Ger y Lóbez 1898.....	438
a. Análisis del ensayo	439
8.5.3. Ensayos de Juan Bergós.....	439
a. Ensayos en 1953.....	440
b. Ensayos en 1965.....	442
c. Análisis de los ensayos de Bergós.....	452
8.6. ENSAYOS EN BÓVEDAS TABICADAS.....	453
9. CONCLUSIONES.....	457
APÉNDICE	
Transcripción del manuscrito de Ramón <i>Ballesteros Bóvedas Tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas</i> :.....	465
BIBLIOGRAFÍA.....	481
RESUMEN.....	499
ABSTRACT.....	503

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

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 Valencia 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.

Objetivo

Las bóvedas tabicadas experimentan una importante evolución, casi una transformación, en España a lo largo del s. XIX. Al inicio, 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.

Estado de la cuestión

La bibliografía sobre bóvedas tabicadas es muy abundante en España, sobre todo desde los primeros años del siglo XX. Numerosos autores han estudiado este sistema constructivo desde los tres puntos de vista (histórico, constructivo, estructural) que se abordan en esta tesis.

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, además de encontrar ejemplos cada vez más tempranos, desde el siglo XIV, en la zona de Valencia. La tesis no profundiza en este aspecto, pero en el capítulo 1 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.

La mayoría de los estudios sobre el origen de las bóvedas tabicadas se centran en el territorio de la Corona de Aragón (actuales Valencia, Cataluña y Aragón). En relación con esto, una línea de investigación interesante sería rastrear el origen y la evolución

de las bóvedas tabicadas en la zona centro (Madrid, Toledo) y también en Andalucía, donde parecen ser abundantes desde el siglo XVI (Marías 1986, Almagro 2012).

Desde el punto de vista constructivo, los textos son abundantísimos. La mejor fuente acerca de la construcción tabicada tradicional siguen siendo los tratados de arquitectura, especialmente los de los siglos XVII, XVIII y XIX. También hay libros y, más tarde, artículos de revista que describen la nueva construcción tabicada, relacionando las bóvedas con el uso del cemento y los atirantamientos metálicos así como su aplicación a edificios industriales. Estos textos están muy relacionados con Cataluña, por ser la zona de España en la que más se desarrollan estas nuevas bóvedas tabicadas. Pero hay menos escrito sobre como y porqué se produce esa transición, y por eso es una de las preguntas a las que quiero responder con esta tesis. También se han buscado ejemplos de la nueva construcción tabicada, especialmente a la arquitectura industrial en otros puntos de España, con escaso éxito. La aplicación de las bóvedas tabicadas a los edificios industriales fuera de Cataluña también es un camino interesante para seguir investigando. Hay otras regiones con tradición de construcción tabicada y que se industrializaron en la primera mitad del siglo XIX (Valencia y Andalucía, principalmente) en las que debió existir esta unión. La existencia de poca bibliografía sobre arquitectura industrial fuera de Cataluña dificulta el estudio, que requiere de un trabajo de campo. Algo similar ocurre en Francia e Inglaterra.

Y por último, acerca del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas sí 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 los 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.

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.

En el 2^o capítulo se estudia la difusión del sistema tabicado en los tratados de arquitectura españoles de los siglos XVII y XVIII: Fray Lorenzo de San Nicolás, Tosca, Briguz y Brú, García Berruguilla, Plo y Camín; también a través de documentos más prácticos: contratos de obra y pleitos.

Y en el 3^o se analiza la expansión de la construcción tabicada por Francia desde España. Cómo allí es aceptada por académicos y tratadistas; cómo vuelve a España

influenciada por esos tratadistas, los más importantes de la época. Y cómo los tratadistas españoles reproducen las ideas francesas sobre la construcción tabicada en sus escritos. Este aspecto es importante ya que, a pesar de que la construcción tabicada tenía una tradición mucho mayor aquí, las ideas francesas sobre su comportamiento se imponen en España y esto influye en su desarrollo posterior.

La segunda parte indaga en los aspectos constructivos del desarrollo de las bóvedas tabicadas a lo largo del siglo XIX. Se divide también en tres capítulos:

En el 4º capítulo se estudia cómo se mantiene la construcción tabicada tradicional a lo largo del siglo XIX, conviviendo con una línea que avanza en la búsqueda de una nueva forma de construir, separándose cada vez más de la inicial. Para mostrar esta pervivencia, se estudian en esta parte tres documentos que se mueven en la línea tradicional, uno de principio de siglo, otro de los años centrales y otro de final del XIX.

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.

En el capítulo 6º se documenta la creación de dos tipos arquitectónicos nuevos: los edificios industriales y la vivienda masiva. En ambos tipos tiene aplicación la construcción tabicada. Además, estos nuevos tipos son muy importantes en su evolución, ya que sus condicionantes específicos: rapidez de ejecución en ambos casos y búsqueda de luces cada vez mayores y de estructuras incombustibles en el segundo fuerzan al uso de los nuevos materiales disponibles (cemento, hierro) y al proyecto de nuevas formas y soluciones. En este aspecto me he centrado en Cataluña, la primera región industrializada de España y en la que se aplica la bóveda tabicada a los nuevos tipos, especialmente a la arquitectura industrial.

La tercera parte estudia los aspectos estructurales del desarrollo de las bóvedas tabicadas a lo largo del siglo XIX. Se divide en dos capítulos:

El capítulo 7º describe como, relacionado con la nueva mentalidad científica que aparece en la Ilustración, en la primera mitad del s. XIX se desarrolla la teoría de arcos

y bóvedas; en los últimos años del XIX y principios del XX la teoría elástica. Se estudia como todas las teorías se aplican, con más o menos éxito, a las bóvedas tabicadas.

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. La razón de estos ensayos es la necesidad, aparecida con la mentalidad científica, de ofrecer garantías técnicas y numéricas sobre los sistemas constructivos y estructurales.

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.

Metodología y limitaciones del estudio

Esta tesis es principalmente un estudio documental: tratados de arquitectura, libros y artículos de revista escritos en España y en otros países en los que la bóveda tabicada se desarrolla durante el periodo estudiado, así como otros actuales sobre el tema.

Además, se han visitado y fotografiado algunos de los edificios estudiados. En algunos casos se han tomado medidas generales o de aspectos concretos: secciones constructivas, espesor de muros, etc., pero sin intención en ningún caso de realizar un levantamiento, sólo de comprobar las hipótesis de trabajo.

Tampoco se han realizado búsquedas de documentación en archivos, por falta de tiempo y de una adecuada formación en este campo, aunque creo que se encontrarían datos interesantes en algunos aspectos poco estudiados: tanto la difusión de la construcción tabicada en Castilla y Andalucía en el siglo XVI como la aplicación a la arquitectura industrial en otras regiones además de Cataluña en el s. XIX.

Convenios utilizados

Para las referencias bibliográficas se ha seguido la codificación de la 13ª edición del manual de estilo de la Universidad de Chicago.

Los dibujos realizados por la autora tienen más interés técnico que propiamente gráfico. Por ello no se han representado a una escala concreta, sino a aquella en la que se entendía la información lo mejor posible. Todos tienen una escala gráfica en la figura, de longitudes y de fuerzas cuando esta última era necesaria.

Acerca de los sistemas de unidades empleados, se ha utilizado el siguiente criterio: al realizar análisis nuevos se ha utilizado el vigente sistema internacional (SI). Cuando se repasa un cálculo o un ensayo de un autor, se hace en las unidades originales indicando entre paréntesis la equivalencia en SI; en este aspecto he sido rigurosa cuando las unidades originales eran muy distintas a las que empleamos actualmente (ensayos franceses que emplean el *système du roi de France* o ensayos americanos en pies y pulgadas) y algo menos para los autores españoles del siglo XX, que emplean el antiguo «sistema técnico»: kg y cm: en algunos casos era muy farragoso seguir el texto con el doble sistema de unidades y el sistema técnico es aún comprensible por cualquier lector.

En cuanto a las citas textuales de documentos, se ha respetado la ortografía original de la fuente, aunque en algunas palabras no coinciden con la actual. Por último, todos los dibujos e imágenes de los que no se indica autor o fuente han sido elaborados por la autora.

PARTE I

LA CONSTRUCCIÓN TABICADA TRADICIONAL

CAPÍTULO 1.

ORÍGENES Y DESARROLLO EN ESPAÑA

La bóveda tabicada tiene su origen en la unión de varias tradiciones constructivas de la zona mediterránea. Aún no están claras las fechas más tempranas en las que aparece lo que hoy conocemos como bóveda tabicada ni en España ni en otros países. Tampoco como se llega a una solución ingeniosa que permite construir bóvedas muy ligeras, reduciendo el contrarresto, y de manera muy rápida ya que no es necesario cimbrar el intradós.

Como paso previo a la idea, es necesario disponer de los materiales. Para construir una bóveda tabicada, necesitamos:

-piezas cerámicas ligeras y de pequeño tamaño, similares a nuestras actuales rasillas:

la cerámica cocida se utilizó en diversas aplicaciones desde una época muy temprana, pero su uso en la construcción de muros y bóvedas se generalizó en la zona mediterránea con la expansión del imperio Romano, a partir del siglo I d. C.¹

-un aglomerante de fraguado rápido, que permita ejecutarlas con una cimbra muy ligera o incluso sin ella: el yeso cumple estas condiciones y es uno de los materiales de construcción más antiguos.² Las culturas del mediterráneo oriental lo utilizaron con frecuencia, especialmente el imperio Sasánida. También se emplea en la cultura egipcia. Los romanos lo conocían, aunque lo utilizaron principalmente como revestimiento interior.

¹ Según Bassegoda Nonell (1978) hasta la época de Augusto se utilizaban adobes.

² El tema de la aparición del yeso en la construcción, en concreto en España se trata con más detalle en el capítulo 2 de esta tesis.

1.1. Los precedentes

Conocidos los materiales necesarios, hace falta además que se utilicen de la manera precisa para formar una bóveda tabicada. Como todos los avances, es el resultado de un proceso largo y en el que confluyen varias vías que funcionan como «ideas previas». Esto es lo que he llamado precedentes. Todos se desarrollan en la zona mediterránea y en cada uno de ellos se utilizan alguno de los elementos básicos de la bóveda tabicada: los ladrillos colocados de plano en las bóvedas romanas, la idea de construir sin cimbra de las bóvedas bizantinas, el uso de pequeñas piezas unidas con yeso en las bóvedas de tubos huecos y el uso generalizado del ladrillo aglomerado con yeso en la arquitectura islámica.

1.1.1. Armaduras de ladrillo en las bóvedas romanas

Las bóvedas más empleadas por los romanos eran las construidas con una masa de mortero y pequeñas piezas de ladrillo o mampuestos, el hormigón romano. Este tipo de bóvedas necesitaba fuertes cimbras hasta que la masa de hormigón fraguaba. Debido a la escasez de madera en la mayoría del territorio controlado por Roma, reducir su uso en las cimbras fue siempre una prioridad. El método más empleado fue la construcción de armaduras de ladrillos, a veces colocados de canto y otras de plano a modo de cimbra provisional. Estas armaduras no evitaban por completo el uso de cimbras: su función era disminuir su tamaño y aumentar la rigidez del sistema de encofrado mientras fraguaba el hormigón.

El uso de armaduras tabicadas tenía notables ventajas sobre las de canto: el hormigón se vertía sobre una superficie continua y homogénea,³ ver figura 1.1 izq. Además, al ser muy ligeras, permitían que las cimbras para sostener provisionalmente la armadura también lo fueran, ahorrando así al máximo la madera necesaria.⁴

³ Cuando los romanos empleaban ladrillos de canto en las armaduras no cubrían todo el intradós (ver Choisy 1999, fig. 26), como si hacían empleando tabicadas, más ligeras.

⁴ Sobre las armaduras tabicadas en las bóvedas romanas se ha consultado la traducción al español del libro de Auguste Choisy *L'art de bâtir chez les romains* (Paris: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et Cie, 1873), publicada por el Instituto Juan de Herrera en 1999.

En la construcción de la primera hoja se utilizaban ladrillos muy grandes (de 60x60 cm y 4 ó 5 cm de canto). En la segunda, suelen emplearse ladrillos más pequeños (20x20 cm). Ambas hojas se recibían con mortero de yeso. Con frecuencia esta segunda capa no era continua, funcionando solo como protección de las juntas de la primera capa. A veces se intercalan ladrillos puestos de canto para mejorar la adherencia entre la armadura de ladrillo y el hormigón superior, ver figura 1.1 der.

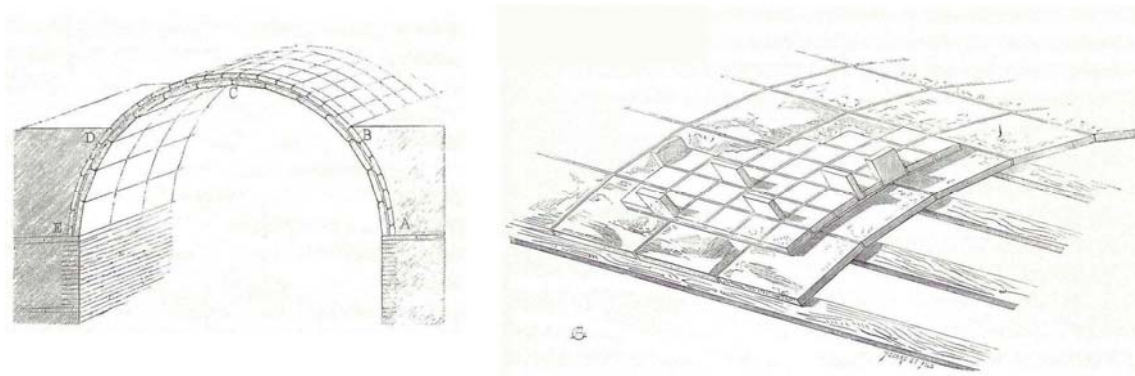


Figura 1.1: Dibujos de Choisy sobre las armaduras tabicadas empleadas por los romanos. A la izquierda, armadura tabicada de dos hojas (Choisy 1999, 53); A la derecha, construcción de la armadura de las termas de Caracalla, de dos hojas continuas (Choisy 1999, 55).

Con frecuencia se ha citado esto como el antecedente de la construcción tabicada. Es evidente que ver los ladrillos colocados de plano pudo dar una idea, pero en la construcción romana faltan aspectos fundamentales de la tabicada: las piezas cerámicas eran demasiado grandes para sostenerse sin cimbra y además la armadura tabicada nunca se consideró un elemento estructural, sino una fase constructiva, confiando la resistencia de la bóveda al hormigón vertido por encima.

Por otro lado, los romanos no parece que tuvieran mucha confianza en el yeso, empleando yesos de fraguado lento y principalmente para blanqueos y revocos. Esto incide en porqué nunca se les ocurrió dejar trabajar solas a las armaduras tabicadas. Sin embargo, este método romano de construir bóvedas se continuó en Italia, donde evoluciona hacia bóvedas muy similares a las tabicadas: las *volte a la volterrana* o *volte a foglio* repartidas por todo el territorio italiano: Volterra, Bolonia, Nápoles, Roma, Sicilia,

etc.⁵ Los primeros ejemplos son de la época renacentista; la técnica va evolucionando y variando por regiones, encontrando desde meras repeticiones de las bóvedas romanas, otras de una hoja de ladrillo pero recibidas con yeso y también de varias hojas de ladrillo recibidas con yeso (Frattaruolo 2000), ver figura 1.2. Las últimas conforman verdaderas bóvedas tabicadas, que sólo se distinguen de las que encontramos en España en el grueso relleno sobre las hojas de ladrillo.

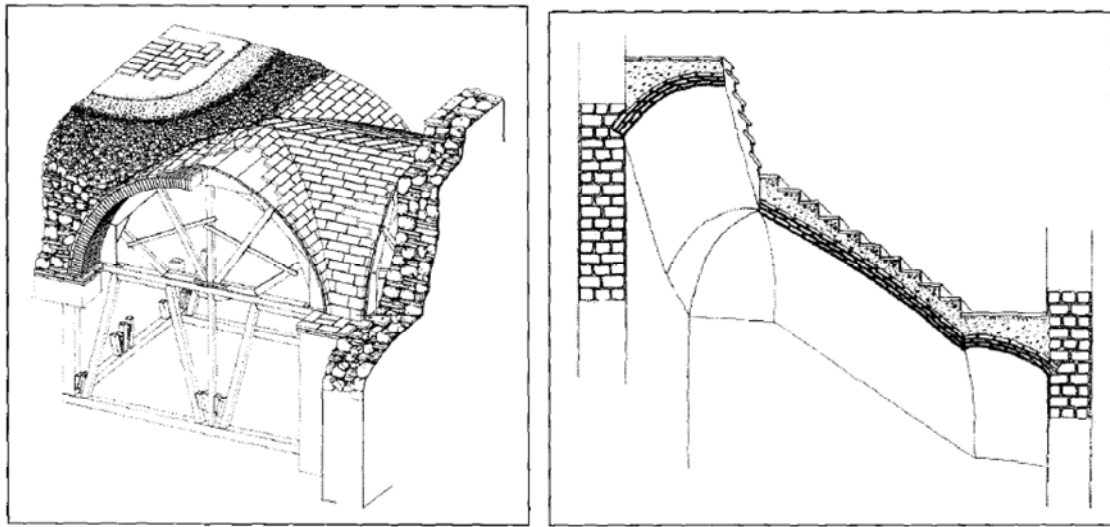


Figura 1.2. Ejemplos de *volte a foglio* en Italia. A la izquierda, bóveda por arista de una sola hoja recibida con yeso y con un relleno hasta alcanzar el piso superior, en la región del Lacio (Frattaruolo 2000, 329). A la derecha, mismo sistema constructivo pero con varias hojas de ladrillo, en Nápoles (Frattaruolo 2000, 328)

También en España hay ejemplos de este tipo de bóvedas: en Almagro (1981, 2001) se describen las bóvedas de la torre de Ambeles, en Teruel, formadas por una hoja de ladrillo de plano y un relleno de mortero de cal. La torre se construye en los siglos XV-XVI, de forma que estas bóvedas son contemporáneas de algunas tabicadas en la misma zona.

⁵ Guillem Abiell fue un importante maestro de obras catalán. Constructor de bóvedas tabicadas, murió en Palermo en 1420. Esta es una posible conexión entre Cataluña y Sicilia en la difusión del sistema tabicado (Bares y Nobile 2012, 121; Conejo 2012, 107).

1.1.2. *Bóvedas bizantinas sin cimbra*

Las bóvedas del imperio romano de oriente son radicalmente distintas de las de occidente. En palabras de Choisy:⁶

Incorporar a la bóveda la mayor parte del molde que la soporta; he aquí, en una palabra, el procedimiento occidental. Entre los orientales, la noción de economía se entiende de una forma más absoluta. Para ellos no se trata de atenuar el gasto en las obras auxiliares; la cuestión es suprimirlas. Los arquitectos bizantinos se plantean sin ambages el problema de abovedar sin cimbras (...) Su método no es en absoluto una variante del de Occidente. Es un sistema bien distinto, de origen asiático, que no procede de ninguna fuente romana (Choisy 1997, 5)

Las bóvedas bizantinas, pues, se construyen en su mayoría sin cimbras y para conseguirlo utilizan ladrillos más pequeños que los romanos. Además, construyen las bóvedas por hojas, de manera que la superficie de contacto entre el mortero y el ladrillo es grande. Por último, inclinan y curvan las hojas de ladrillo para mejorar la adherencia y evitar el deslizamiento, ver figura 1.3. Por todos estos motivos pudieron construir sin cimbra incluso empleando morteros de fraguado lento, principalmente de cal y arena.

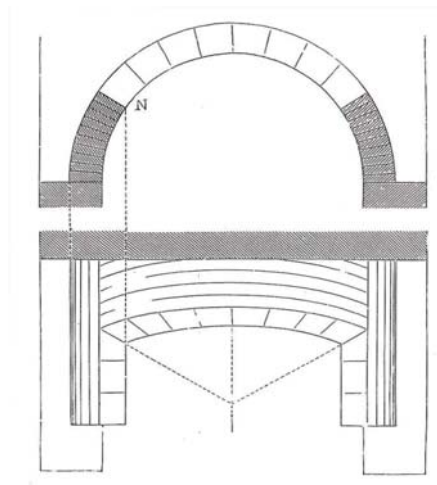


Figura 1.3: Bóvedas bizantinas construidas mezclando hiladas radiales hasta donde no deslizan los ladrillos, con hojas inclinadas y troncocónicas. Este fue el procedimiento más empleado por los bizantinos (Choisy 1997, 36).

⁶ Sobre las bóvedas bizantinas se ha consultado la traducción española del libro de Auguste Choisy *L'art de bâtir chez les byzantins* (Paris: Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques, 1883) publicada en 1997 por el instituto Juan de Herrera (Madrid).

Aunque estas bóvedas bizantinas poco tienen que ver con las tabicadas, ya que los ladrillos no se colocan de plano ni se utiliza el yeso para recibirlos, su evolución a través de las técnicas constructivas árabes sí es un precedente de las bóvedas tabicadas. Por otro lado, las bóvedas bizantinas son el origen de las bóvedas autosostenidas extremeñas, muy similares en cuanto aparejos y mortero empleado a las que describe Choisy. Se generalizan en el siglo XVI, pero hay ejemplos muy tempranos: la iglesia mozárabe de Santa Comba de Bande (Orense), del siglo IX, que presenta un aparejo similar a los extremeños, con ladrillos dormidos (inclinados para mejorar el rozamiento en la junta) y un ligero *retumbo*,⁷ ver figura 1.4. y la iglesia visigoda de San Fructuoso de Montelios, cerca de Braga, en Portugal, del siglo VII (Almagro 2001).

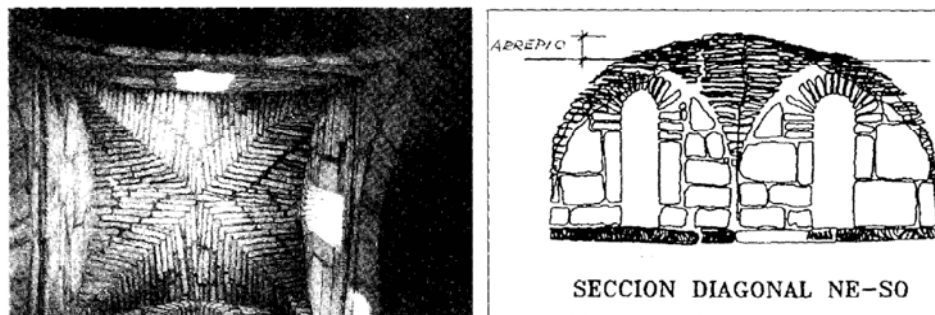


Figura 1.4. Imagen y sección de la iglesia de Santa Comba de Bande, uno de los ejemplos más tempranos (siglo IX) de bóvedas de rosca construidas sin cimbra en España, de influencia bizantina (Sanchez Leal y Pizarro 2004)

1.1.3. Bóvedas de «tubos huecos»

El sistema de bóvedas de tubos huecos aparece en las provincias romanas del norte de África en el siglo II d.C. A través de los canales comerciales del imperio romano, llega a las costas del sur de Europa en el siglo III. Se desarrolla especialmente en Italia durante la época paleocristiana (siglos IV a VI), donde edificios como San Vitale (ver figura 1.5) y el baptisterio de la catedral, ambos en Rávena, están abovedados con este sistema (Storz 1997, 24-25).

⁷ El *retumbo* o *arrepío*, o diferencia de cota entre las claves de los arcos torales y la clave de la bóveda. Es una característica fundamental de las bóvedas extremeñas, que también tienen las bizantinas y no las romanas (Sanchez Leal y Pizarro 2004)

En el norte de África las bóvedas de tubos huecos se siguen utilizando después de la época romana, encontrando construcciones similares incluso en el s. XIX. También las cúpulas de algunas mezquitas medievales se construyen utilizando este sistema de tubos encajados (Bassegoda Nonell 1978, 34).

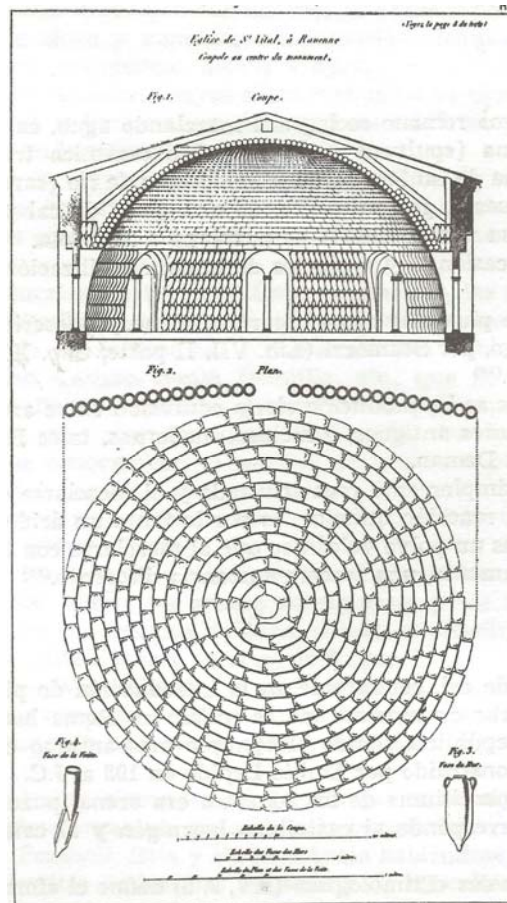


Figura 1.5. Planta y sección de la cúpula central en la iglesia de San Vitale de Rávena, construidas con tubos huecos encajados (Bassegoda 1978, 12). El dibujo original está en Eck (1841). Bassegoda indica en su libro que el aparejo no es helicoidal como lo dibuja Eck.

En estas bóvedas las piezas cerámicas aglomeradas con yeso ya no forman sólo la cimbra, sino que son el verdadero elemento resistente, renunciando al uso del hormigón romano por encima. Las ventajas de estas bóvedas sobre las tradicionales romanas son evidentes: además de utilizar materiales abundantes y de fácil manejo,⁸ se

⁸ El uso de piezas cerámicas huecas, no como hoja portante sino como aligeramiento en las bóvedas, fue muy común en la construcción romana, de donde pasó a la arquitectura paleocristiana, bizantina y gótica, al menos en el ámbito del Mediterráneo. El tema es estudiado por Juan Bassegoda Nonell en su libro *La cerámica popular en la arquitectura gótica* (Barcelona: Ed. Thor, 1978)

reducen al mínimo los medios auxiliares y se consiguen abovedamientos mucho más ligeros, así que los sistemas de contrarresto pueden disminuirse.

Aunque las piezas cerámicas que se utilizan no son ladrillos ni rasillas, la puesta en obra es idéntica a la de las bóvedas tabicadas, como se observa en la figura 1.6 izq.: se utiliza el yeso como aglomerante, las piezas son muy ligeras y se unen entre si y con las filas laterales. Esta adherencia entre filas es lo que permite construirlas sin cimbra, incluso sin cerrar ni inclinar los arcos y utilizando aparejos sencillos.

En España hay algunos vestigios de bóvedas construidas con tubos huecos en las ruinas romanas de Tarragona (Bassegoda Nonell 1978, 34-35).

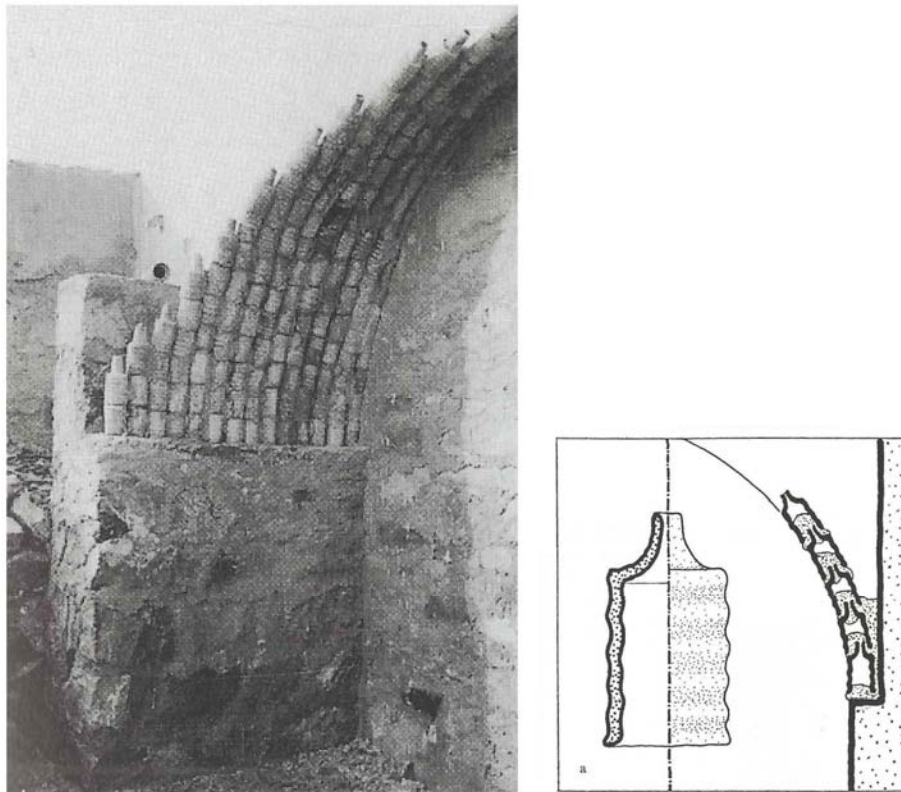


Figura 1.6: Sistema constructivo de las bóvedas de tubos huecos A la izquierda, reconstrucción de una bóveda de tubos huecos en Chemtou (Túnez), dirigida por Sebastian Storz (Storz 1997, 33). A la derecha, arranque de una bóveda y detalle, en alzado y sección, de una pieza cerámica (Storz 1997,25).

1.1.4. La construcción islámica de yeso y ladrillo

Los dos materiales tradicionales necesarios para construir bóvedas tabicadas, yeso y ladrillos, fueron también los más empleados por la arquitectura islámica. El yeso se usa

en abundancia en el imperio sasánida⁹ (226-651 d.C.) de donde pasa a los Omeyas, que lo utilizan en Siria durante el califato de Damasco (661-750).¹⁰ En el periodo Omeya los árabes conquistan el norte de África hasta el Magreb. Cuando el califato de Damasco cae, los Omeyas se llevan sus tradiciones constructivas, entre ellas el uso del yeso, que se generaliza en la península ibérica y en el norte de África, como aglomerante en muros de ladrillo y piedra y también en la realización de revestimientos, algunos de ellos en trabajados relieves, que reciben el nombre de yeserías.

En España, el yeso se utilizó con especial frecuencia en la arquitectura musulmana y después mudéjar, de Aragón y el Valle del Ebro, donde además es muy abundante la piedra de yeso. Se utiliza como aglomerante en fábricas de ladrillo, para construir revoltones entre viguetas en forjados de madera y en el uso más común de revestimientos (Almagro 1986).

El uso del yeso en la arquitectura musulmana se mezcla en España con las bóvedas sin cimbra de origen bizantino: en Almagro (2001) se recogen varios ejemplos de bóvedas construidas mezclando roscas y hojas de ladrillo, como las bizantinas, pero empleando el yeso como aglomerante. Un ejemplo bien documentado por este autor está en la torre de Romilla, en la vega de Granada (Almagro 1991), ver figura 1.7. La torre se construye en la época nazarí, hacia el siglo XIV.

Hay algunos indicios de construcciones tabicadas medievales en otras zonas dominadas por los árabes: la mezquita selyúcida de Ispahán, del s. XI, la *qubba* almorávide de Marrakech (ver figura 1.8), del s. XII¹¹ y la mohammedia de Túnez.¹²

⁹ «La patria original de las arquitecturas de yeso es sin duda el oriente y especialmente Irán, en donde ya desde época parto, pero más extensamente con el imperio sasánida, se desarrolla una técnica constructiva basada en el empleo del yeso como material básico, con la que consiguen logros estructurales capaces de rivalizar con los de la arquitectura romana» (Almagro 1986, 453)

¹⁰ Así ocurre en la ciudadela de Amman, construida por los omeyas sobre una antigua ciudad romana: se aprecia el cambio de material, de los morteros de cal en la ruina romana al yeso en las zonas construidas por los omeyas (Almagro y Arce 1996)

¹¹ «Il semble que des «voûtes cloisons» aient été construites à la grande mosquée seldjoukide d'Ispahan dès la fin du XI^e siècle; aun début du XII^e siècle, les maçons qui édifièrent la petite qoubba almoravide de Marrakech appareillèrent selon ce procédé les voûtains délimités par les nervures

Aunque en estas referencias no está muy clara la fecha de su construcción y en algunos ni siquiera que fueran realmente tabicadas.

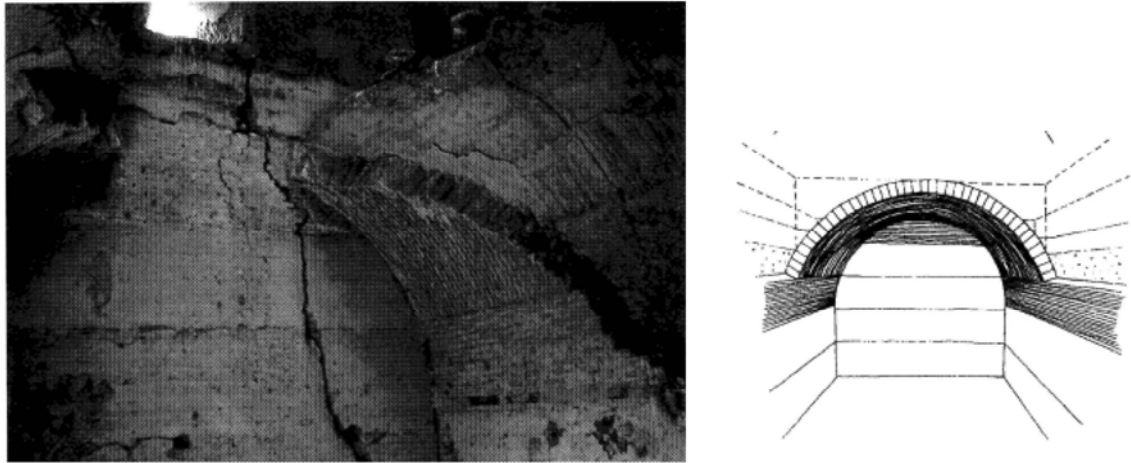


Figura 1.7. Bóveda con técnica constructiva bizantina, pero recibida con yeso, en la torre de Romilla (Granada). A la izquierda, estado actual de la bóveda; a la derecha, fase del proceso constructivo (Almagro 2001, 164)

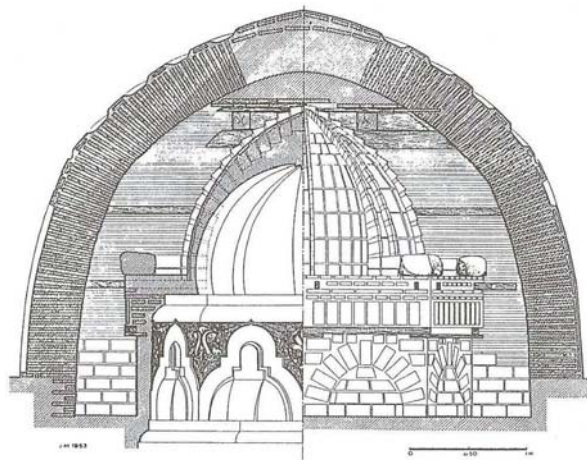


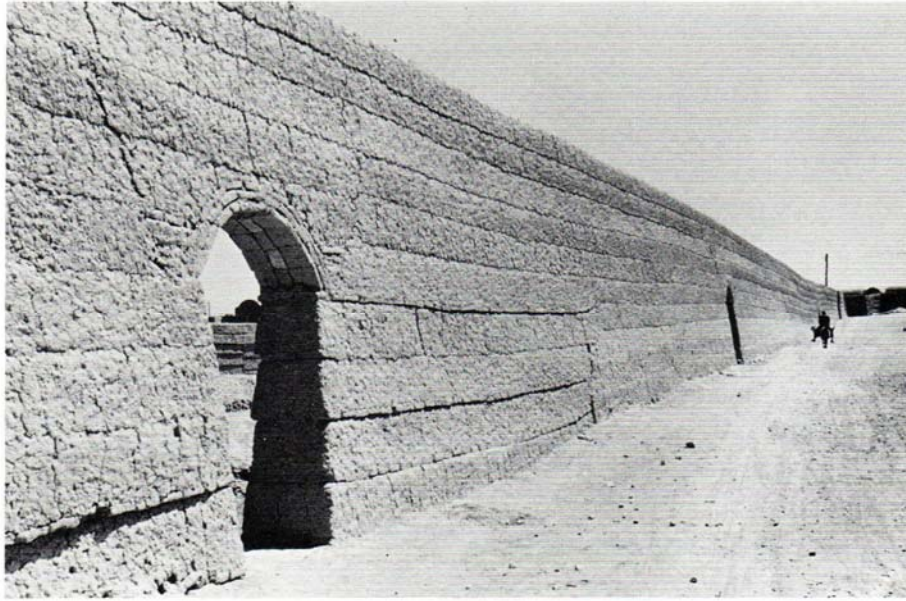
Figura 1.8. Cúpula de la qubba almorávide de Marrakech: la plementería es tabicada entre nervios de canto (Araguas 2003, 99).

entrelacées, constitués de briques de chant, de la coupole» (Araguas 2003, 101). Sobre la mezquita de Ispahán no indica ningún dato más.

¹² Esta referencia, encontrada en una nota de Storz (1997), no indica realmente que fuera tabicada, aunque sí de ladrillo y yeso y construida sin cimbras: «La mohammedia, Tunisia, costruzione tradizionale di una cupola con mattoni e malta di gesso. La costruzione viene eseguita senza usare una centina in maniera autoportante» (Storz 1997, 41). Tampoco hace referencia a la época en que se construye.

También hay ejemplos muy antiguos (sin datación concreta) de bóvedas tabicadas en la zona de Persia e Irak, ver figura 1.9.¹³

Estos son antecedentes probables de la bóveda tabicada. Todos ellos se desarrollan alrededor del mediterráneo y son una mezcla de métodos constructivos romanos y orientales, estos últimos extendidos a través de las invasiones árabes.¹⁴



b. ABARKUH (Iran) : mur en pisé. Le passage est couvert par un arc formé de trois épaisseurs de briques à plat.

Figura 1.9. Arco tabicado en un muro de la ciudad iraní de Abarkuh (Besenval 1984, Pl. 5b)

1.2. Aparición en España: plementería en bóvedas de crucería góticas

Hasta hace unos años, la opinión más extendida sobre el origen de las bóvedas tabicadas en España era por influencia romana, a través de las *volte a foglio* que se

¹³ En Almagro (2012) se defiende que es Persia e Irak el origen más remoto de las bóvedas tabicadas: la zona tiene escasez de madera, se utilizaba el yeso y el ladrillo desde la época sasánida y las bóvedas sin cimbra bizantinas quedaban cerca. Desde esa zona y a través de la expansión árabe se extendería por el Mediterráneo.

¹⁴ «las tradiciones típicas de la construcción de bóvedas sin cimbra mediante el recurso a las propiedades del yeso como aglomerante, llegaron a la península, casi con toda seguridad, a través del mundo islámico que funciona como transmisor entre culturas tan distantes como las de Irán y Mesopotamia y la Península Ibérica» (Almagro 2012, 57)

construían con frecuencia en la Italia renacentista.¹⁵ Actualmente, casi todos los investigadores defienden un origen árabe, al menos a través de sus tradiciones constructivas.¹⁶

No hay ningún dato que nos indique que las primeras bóvedas tabicadas se construyeran en España. Pero lo que si está claro es que aquí alcanzaron un grado de desarrollo mayor que ningún otro país, desde su aparición a finales del s. XIV hasta bien entrado el s. XX. Esto es coherente con la tesis de un origen árabe de la construcción tabicada, ya que lo que diferencia a España es el largo periodo de dominación árabe: durante 800 años extendieron su tradición constructiva, lo que incluía el uso masivo del ladrillo y el yeso como aglomerante y los procedimientos orientales de construcción sin cimbra, vistos en apartados anteriores de este capítulo

Ningún otro país del entorno europeo pasó por unas circunstancias similares. En Sicilia, que fue ocupada por los árabes durante unos 250 años (827-1093) también encontramos bóvedas tabicadas.¹⁷

Por otro lado, la piedra de yeso abunda en España, sobre todo en su mitad oriental y es, además, de muy buena calidad.¹⁸ Las zonas yesíferas de España se indican en la

¹⁵ «L'origen d'aquestes voltes de maó es remunta a l'època romana i la tradició es troba encara persistent avui al migdia de França, a Catalunya, però sobre tot a Italia» (Bassegoda Amigó, 1936). Según este autor, el sistema se introduce en Cataluña a través del arquitecto Pere Blay, que viajó a Italia. «Las bóvedas tabicadas fueron sin duda importadas de Italia; allí las voltes á foglio son muy empleadas en la región de Volterra, la antigua ciudad etrusca; las íntimas relaciones comerciales y políticas que durante la Edad Media mantuvieron catalanes y aragoneses con la repúblicas de Italia explican perfectamente esta importación» (Martorell 1910, 121)

¹⁶ Los autores mas destacados que estudian el origen de la bóveda tabicada, especialmente en España son: Philippe Araguas (1986, 1897, 1998, 2003); Mercedes Gómez Ferrer (2003, 2009, 2012); Arturo Zaragoza (2012) y Antonio Almagro (1986, 1991, 2001, 2012)

¹⁷ Las primeras aparecen en Pozzallo en el siglo XV. Pero es probable que el origen de estas bóvedas venga del largo periodo de dominación aragonesa de Sicilia (1266-1860), no de los árabes, ya que en otras zonas de Italia vinculadas a Aragón (Cerdeña, por ejemplo) también aparecen. Este tema ha sido estudiado por Mercedes Bares y Marco Nobile en «Volte *tabicadas* nelle grande isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo)», dentro del libro *Construyendo bóvedas tabicadas*, editado por Arturo Zaragoza, Rafael Soler y Rafael Marin (Valencia 2012)

¹⁸ La buena calidad del yeso español se conoce desde la época romana: En el libro XXXVI de Plinio el Viejo se cita el hallazgo de un yacimiento de aljez en Segóbriga (Cuenca) que se exportaba a Roma a

figura 1.10. Las zonas de España en las que abunda el yeso coinciden con las de mayor desarrollo de la construcción tabicada. Los lugares en los que aparecen las primeras bóvedas tabicadas en España (Valencia, Cataluña y Aragón) están dentro de la zona yesífera.

Pero también son las regiones más relacionadas con el ámbito mediterráneo y las que permanecieron más tiempo bajo dominio árabe. Además, después de la conquista cristiana quedó la tradición constructiva árabe, a través de los mudéjares y posteriormente de los moriscos, especialmente abundantes en esas regiones. Muchos de estos antiguos musulmanes se dedicaron a la construcción, desarrollando una arquitectura de yeso y ladrillo.¹⁹



Figura 1.10: Principales zonas de extracción de aljéz (rayadas) y zona yesífera de España, que coincide aproximadamente con la mitad este. (Gárate 1999, 48)

través del puerto de Cartagena, para utilizarlo como cerramiento traslúcido en las ventanas (Villanueva y García Santos, 2001)

¹⁹ Los moriscos, árabes obligados a bautizarse en la España ya totalmente cristiana, a partir de 1502 en Castilla y de 1526 en Aragón, fueron un grupo de población muy abundante en Granada, en Valencia (un 30% de la población) y en el valle del Ebro (un 20%). Muchos antiguos musulmanes eran maestros de obras, y cuando fueron expulsados definitivamente de España, en 1610, crearon un grave problema de mano de obra especializada en estas zonas (Borrás Gualis 1985, 35-71)

Lo que no está claro es si los árabes utilizaron bóvedas tabicadas en sus construcciones en España. Hay algunos ejemplos, pero sin confirmación documental:

- En Aznalcollar (Sevilla) hay una capilla en ruinas con una bóveda tabicada, ver figura 1.11 izq. Pero no está clara su datación, según Araguas (2003) no puede ser anterior a 1400, y Aznalcollar se reconquistó en 1247.
- En las ruinas de una vivienda árabe de Siyasa (Murcia) se conserva también el arranque de una escalera tabicada (Almagro 2012), con los mismos problemas de datación que la anterior, ver figura 1.11 der.

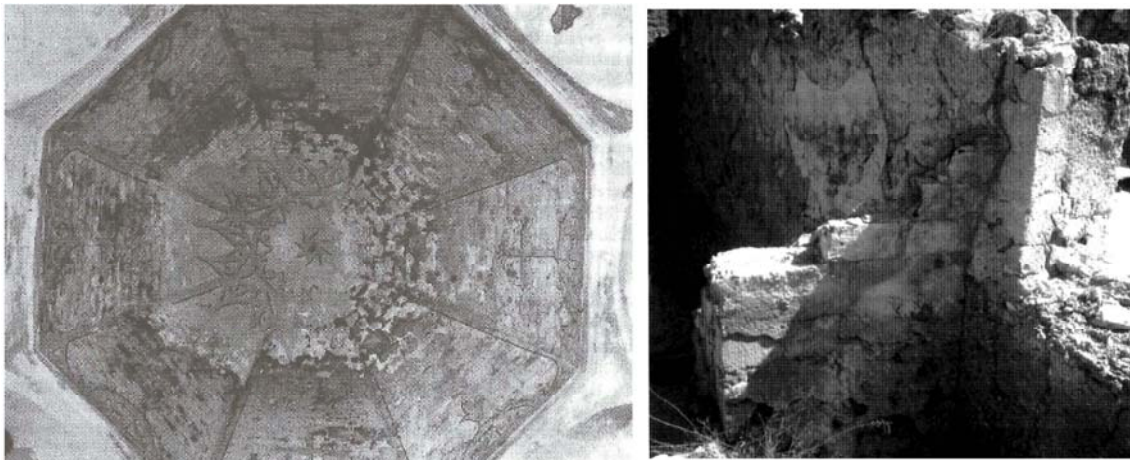


Figura 1.11. A la izquierda, cúpula de la capilla del cementerio de Aznalcollar (Araguas 2003, 98). A la derecha, arranque de una escalera tabicada en una vivienda en Siyasa (Almagro 2001, 168).

Pero el hecho de encontrar arranques, rozas, etc., que indiquen construcciones tabicadas en un edificio datado en una fecha determinada no implica que la bóveda tabicada fuera construida en ese momento. Al ser en muchos casos construcciones menores, pueden ser el resultado de reformas posteriores de las que nadie se ha molestado en dejar constancia. Ese es el principal problema de los investigadores en este tema.

En el siguiente apartado se recogen algunos ejemplos tempranos de bóvedas tabicadas en España de los que se conoce con exactitud la fecha de construcción, bien por la existencia de contratos de obra o porque se han realizado estudios que demuestran su datación.

1.2.1. Primeros ejemplos documentados

Se recogen a continuación aquellos edificios en los que puede asegurarse que se construyeron bóvedas tabicadas en los siglos XIV y XV, que son las fechas más tempranas en las que pueden datarse con seguridad en España.

Según las últimas investigaciones, las primeras bóvedas tabicadas de las que se tiene constancia, en España y en la arquitectura cristiana, son las de la capilla de los Jofre, anexa al claustro del convento de Santo Domingo de Valencia, ver figura 1.12.²⁰ En el contrato de obra, firmado en febrero de 1382 con el maestro Juan Franch, se especifica el sistema constructivo de los abovedamientos: «les dos voltes de la dita capela de dos raioles dobles de pla» (Gómez Ferrer, 2003).²¹



Figura 1.12: Bóvedas tabicadas en la Capilla de los Jofre, en el convento de Santo Domingo de Valencia (Gómez Ferrer 2003, 140)

²⁰ Esto no quiere decir que fueran las primeras en ser construidas. En Zaragoza (2011) se recogen edificios anteriores en el ámbito valenciano en las que también hay bóvedas tabicadas: sala capitular y claustro del convento de Santo Domingo de Játiva, entre 1329 y 1360; el claustro del convento de Santo Domingo de Valencia, hacia 1368; la iglesia de San Juan del Mercado de Valencia, también hacia 1368; la catedral de Segorbe, desde 1370, entre otras. Pero en estos edificios no está tan clara la datación de las bóvedas, que pueden corresponder a una fase posterior o a una reforma.

²¹ En el anexo documental (Gómez Ferrer 2003, 153-54) se reproduce el contrato de obras completo.

En ese mismo año, el mismo maestro Juan Franch está trabajando en el Palacio Real de Valencia. Acerca de la construcción de este palacio se conserva una carta que el rey Pedro el Ceremonioso escribe al merino de Zaragoza, que está dirigiendo las obras de la Aljafería de esa ciudad. En ella le insta visitar la obra del palacio para observar las bóvedas tabicadas que se están construyendo:²²

Merino: fem vos que saber que nos habem començat de fer obrar lo real de Valencia e havem trobada una obra de guix e de rejola fort profitosa, fort espeegada e de pocha messio, per que us manam que façat venir Farayg e un dels millors maestres que y sien per tal que vegem aquesta obra com se fa e que semblant la puscats fer aquí, e si vos voliets e podiets venir ab ells per regonexer la dita obra e veure la a ull, fariet nos en gran plaer e servey. Dada en Algezira sots nostre segell secret a XX de Juny del any MCCCLXXXII Rex Petrus.

Acerca de este mismo edificio, el Palacio Real de Valencia, actualmente desaparecido, se conservan numerosos documentos de la obra que prueban que, en los primeros años del s. XV, se cubrió masivamente con bóvedas tabicadas, probablemente sólo de ladrillo, sin nervios de piedra (Gómez Ferrer 2003; 2009).²³

La siguiente noticia documental es una nueva carta de 1407 que escribe el rey Martín el Humano (hijo del Pedro el Ceremonioso que escribe la primera) acerca de la construcción de la capilla real en la catedral de Barcelona. El maestro de obra Arnau Bagués quiere construir la bóveda con «pedra picada» y es el propio rey quien le manda hacer una «volta de raiola» de tres gruesos:²⁴

²² Archivo de la Corona de Aragón, Reg. 1274, fol. 87v. Publicado en Araguas (1998), en el que se considera a esta carta el «acta de nacimiento» de la bóveda tabicada, dado que no hay ningún documento anterior que pruebe su existencia, ni certeza sobre ninguna construida. Anteriormente fue publicada en Rubió y Lluch (1908).

²³ Gómez Ferrer (2009, 633) indica que las bóvedas eran sólo de ladrillo porque en la contabilidad de la obra del palacio no hay menciones a canteros y las compras son de ladrillo, yeso y cal.

²⁴ La carta fue dada a conocer por Bassegoda Nonell en «El Noticiero Universal» en 1977. En Conejo (2012) se indica que el primero en publicarla fue Girona Llagostera (1909-1910).

Bergués (se refiere al maestro de obras de la catedral, Arnau Bagués) laltre vegada nos doná de concell...que fessem fer la cubierta sobirana (de la) cita capella de volta de pedra picada e nós som d'intenció que assats bastaria que fos de volta de raiola; perquem manam que mentre faran lentaulament de la dita capella façats metre ma tantost en fer la cuberta sobirana de volta de tres raioles (Carta del rey Martín I el Humano acerca de la obra de la Capilla Real en la Catedral de Barcelona, 17 diciembre 1407; en Zaragoza 2012,, 24)

La bóveda no se conserva, desapareció en una obra acometida en la catedral en 1880, pero sí la roza dejada en la pared, por lo que se sabe que era semicircular, rebajada y que tenía encima un tablero de ladrillos con pendiente hacia la calle, que según la carta del rey también era de tres rasillas, ver figura 1.13.



Figura 1.13: Huella de bóveda tabicada y del tejado superior, también de rasillas, en la capilla real de la catedral de Barcelona, mandado construir por el rey Martín I el Humano, en 1407 (Conejo 2012, 113).

1.2.2. Ejemplos tempranos en la arquitectura gótica

A partir de estos primeros documentos, de fecha muy similar, parece claro que la técnica tabicada se extiende con rapidez en el reino de Aragón (actuales Valencia, Cataluña y Aragón).

1.2.2.a. Valencia

En Valencia, numerosos contratos de obra y edificios construidos a lo largo del los siglos XIV y XV indican un uso generalizado de las bóvedas tabicadas. Al principio se utilizaba sólo como plemento entre nervios de piedra; después evoluciona y forma la bóveda completa, con las formas aristadas propias de la arquitectura gótica.²⁵

Una de las primeras bóvedas en las que la técnica tabicada se usa sin ayuda de nervios es en la capilla de la reina María, anexa al claustro del convento de la Trinidad, en Valencia, ver figura 1.14. Esta obra ya es de los últimos años del siglo XV (Gómez Ferrer 2003, 144)



Figura 1.14. Capilla de la reina María en el convento de la Trinidad de Valencia. Uno de los primeros ejemplos de bóveda tabicada trabajando sin nervios de piedra. (Gómez Ferrer 2003, 143)

Un edificio importante en el que se construyen bóvedas tabicadas es la Cartuja de Valldecris, fundada por Martín el Humano en 1385, en Altura (Castellón).

²⁵ En Gómez Ferrer (2003) y en Zaragoza (2012) puede encontrarse un desarrollo completo de las primeras bóvedas tabicadas en Valencia. A título de ejemplo se citan aquí algunos: «acordaren que lo dit pont se fes de rajola doble» (referido al puente que comunica la catedral de Valencia con el palacio arzobispal, en 1429); «tota la dita capella sia cubierta de barandat doble de ragola ag algeps» (sobre la capilla del Rosario, también en el convento de Santo Domingo de Valencia, en 1503); «cloenda ab barandat doble» (en el palacio de los Borja de Valencia, en 1485)

El impresionante conjunto tiene algunos elementos duplicados porque se comenzó de una manera modesta cuando Martín el Humano no era rey, ni siquiera heredero a la corona.²⁶ De esa primera época es la capilla de San Martín (1385-1401) y el Claustro Antiguo, del que no quedan restos. Cuando accedió al trono, en 1396, construyó una nueva iglesia (Iglesia Mayor, 1405-1428) y el Claustro Grande, que también se comienza en 1405 (Simón Aznar 1988).

La Cartuja se abandonó con la desamortización de 1836 y actualmente se encuentra abandonada y en ruinas. Pero en todos los restos de cubiertas que se conservan, se observan bóvedas tabicadas, abarcando un periodo amplio de tiempo.

El más antiguo es la capilla de San Martín, que se construye entre 1385 y 1401, ver figura 1.15: los nervios son de piedra y los plementos son tabicados.



Figura 1.15: Cartuja de Valldescrist, en Altura (Castellón). A la izquierda, exterior de la capilla de San Martín (Serra y Miquel 2009, 69). A la derecha, interior: las bóvedas tienen plementería tabicada entre nervios de piedra (Serra y Miquel 2009, 70)

Del Claustro Antiguo no se conserva ningún resto, pero en 1395 el cillerero Cafábrega escribe al rey comunicándole que están trabajando en los claustros empleando bóvedas tabicadas (Zaragozá e Ibañez 2011). Por la fecha debe ser este claustro y no el mayor.

Del Claustro Grande se conservan algunos arranques tabicados, ver figura 1.16.

²⁶ Martín el Humano era el segundo hijo del rey Pedro IV de Aragón. Accedió al trono por la temprana muerte sin descendencia masculina de su hermano mayor.

Y en la Iglesia Mayor, también en ruinas, se observan los arranques tabicados de las bóvedas, con arcos fajones de ladrillo, ver figura 1.17. Pero esta no es la bóveda original, construida entre 1405 y 1428 (Simón Aznar 1988) sino fruto de una reforma posterior a partir de 1634 (Simón Aznar 1988).

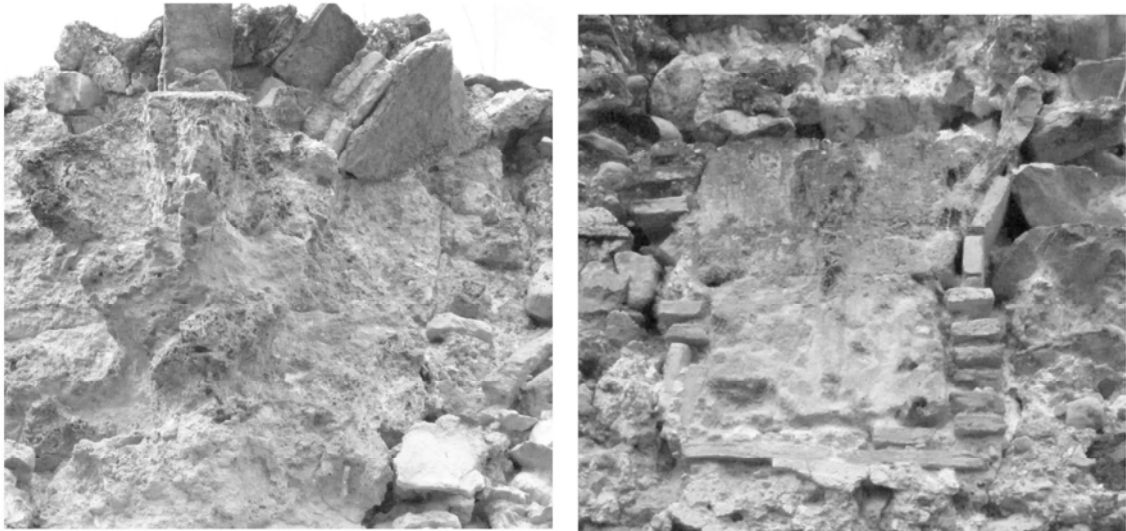


Figura 1.16: Cartuja de Valldescribà, en Altura (Castellón). Arranques de bóvedas tabicadas en el claustro. En la imagen de la izquierda se aprecia un enjarje de piedra²⁷

La obra de la cartuja, que se demoró mucho tiempo, tuvo varios maestros de obras. Uno de ellos fue Pere Balaguer, que había trabajado a las órdenes de Juan Franch en el Palacio Real de Valencia (Serra y Miquel 2009), y pudo ser el que introdujo la técnica tabicada en este edificio. Otro personaje importante en la toma de decisiones de las obras de esta cartuja es el cillerero, Bernat Cafábrega, amigo personal del rey (Zaragozá e Ibáñez, 2011)

El rey Martín el Humano es el mismo que en 1407 ordena al maestro de obras Arnau Bagués construir en la catedral de Barcelona una bóveda tabicada, que Bagués quería

²⁷ Estos enjarjes y otros similares en la comunidad valenciana se estudian en Perez de los Rios y Zaragozá (2013)

realizar con piedra. Es probable que el rey Martín tuviera tan buena opinión de la técnica tabicada a través de este edificio.²⁸



Figura 1.17: Cartuja de Valldescrist, en Altura (Castellón). A la izquierda, bóveda de la iglesia mayor, en ruinas, de ladrillo tabicado entre arcos fajones de rosca. A la derecha, detalle del arranque de la bóveda, en el que se ve que está formada por dos hojas y rellena por encima con cascotes y mortero.

1.2.2.b. Cataluña

Los dos edificios que se citan como los primeros contruidos con bóveda tabicada en Cataluña son el claustro del hospital de Santa Cruz (1406-1417) y la sala capitular del monasterio de Pedralbes (1418-20), ambos en Barcelona y dirigidas las dos por el mismo maestro de obras, Guillem Abiell (Bassegoda 1978).²⁹ El sistema constructivo en ambos es de nervios de piedra y plementos tabicados. En la sala capitular del monasterio de Pedralbes (ver figura 1.18 izq.) se construyen los plementos tabicados tanto de la cripta (muy rebajados) como de la sala superior. En esta última, además,

²⁸ Esta opinión se recoge en Conejo (2012) y también en Zaragoza e Ibañez (2011) Aunque por otro lado, en 1407 se inician las obras del Hospital de Santa Cruz de Barcelona, en las que también se utilizan bóvedas tabicadas.

²⁹ Al igual que ocurre en la zona valenciana, esto no quiere decir que fueran los primeros. En Conejo (2012) se discuten algunos ejemplos anteriores cuya datación no está tan clara.

hay una sobrebóveda también tabicada que apoya en unos muretes de ladrillo que nacen de los nervios de piedra de la bóveda gótica. Según Bassegoda (1978, 82-84), esta variedad de soluciones indica un dominio de la técnica que hace pensar que llevaba tiempo implantada, aunque no hay datos al respecto.

En Conejo (2012) se indaga en el periodo intermedio entre los dos ejemplos citados, de principios del s. XV, y el uso generalizado en el siglo XVI.³⁰

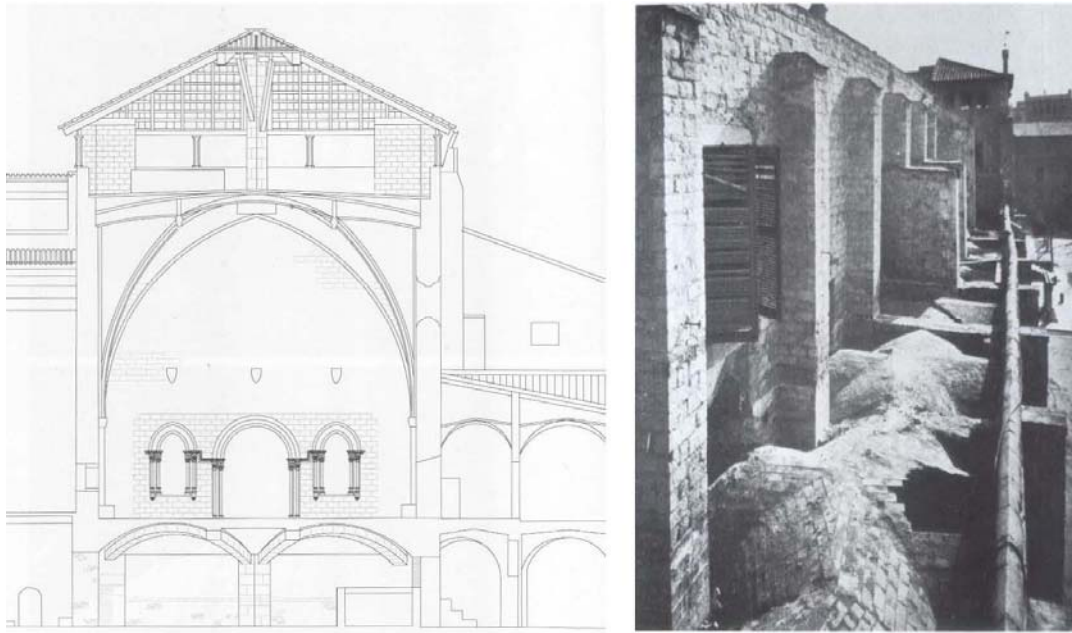


Figura 1.18: A la izquierda, sección de la sala capítular del Monasterio de Pedralbes, en el que se utilizan bóvedas tabicadas tanto en la cripta como en la sala superior (Conejo 2012, 109). A la derecha, trasdós de las bóvedas tabicadas del claustro del hospital de Santa Cruz en Barcelona (Conejo 2012, 103)

1.2.2.c. Aragón.

En Aragón, especialmente en el valle del Ebro, hay un problema básico: la falta de piedra para construir. Por esta razón siempre ha existido una arquitectura basada en el ladrillo y el yeso, muy abundante (ver figura 1.10), en todas sus variantes, incluidas las bóvedas «de algez y rejola». Aún así, el desarrollo de la técnica tabicada debió ser algo

³⁰ Algunos ejemplos serían la sacristía nueva de la catedral de Tortosa (1444), cubierta con «volta de raiola», el claustro, refectorio y cocinas del monasterio de Sant. Jeroni de la Murtra, en Badalona (hacia 1475), el hospital de Santa María de Lleida (1454-ca.1500)

más tardío que en Cataluña y Aragón: la carta que el rey de Valencia escribe al merino de Zaragoza es ilustrativa sobre el momento en que empiezan a utilizarse bóvedas tabicadas en Aragón: en 1382 no eran de uso común, ya que el rey manda llamar a maestros de obras aragoneses para aprender la técnica constructiva.

Los ejemplos aragoneses más tempranos en los que se conservan bóvedas tabicadas son las naves de la Iglesia de Cervera de la Cañada (Zaragoza) terminada en 1426,³¹ y en la iglesia de Santiago de Montalban (Teruel) donde se utilizan en las capillas laterales en una fecha anterior a 1443.³² El maestro de obras de Cervera de la Cañada es el mudéjar Mahoma Ramí, que después trabajará en la Seo de Zaragoza (Iñiguez 2002).³³

Algunas bóvedas de la Seo de Zaragoza también son tabicadas, y es interesante ver cuales y en que fecha: las bóvedas del coro, construidas entre 1405 y 1415, son de piedra; los plementos de las bóvedas de la nave central son tabicadas. Aunque no está clara la fecha en que se construyen estas bóvedas (esta fase de la catedral comienza a construirse en 1318), en Araguas (1998) se cita una datación mediante termoluminiscencia que indica que se construyeron con mucha probabilidad entre 1460 y 1470. En Ibáñez (2012) se apunta que es muy difícil datar estas bóvedas, pudiendo estar construidas entre 1400 y 1500.

En cualquier caso, parece que las primeras bóvedas tabicadas en Aragón son posteriores a los ejemplos valencianos y catalanes; de la carta escrita por el rey Pedro el Ceremonioso al maestro de obras de la Alfajería puede deducirse que la técnica llega desde Valencia, aunque sin afirmarlo con seguridad.

³¹ «Sus bóvedas son todas de crucería, hechas con tres o cuatro (no pude medir exactamente su grueso) roscas de ladrillo a panderete» (Iñiguez 2002, p. 13)

³² «L'église Santiado de Montalban commencée en pierre de taille dans la première moitié du XVI^e siècle selon la datation proposée par Borrás Gualis fut continuée en brique. Les voûtes de la nef sont construites selon la technique traditionnelle mais (...) les voûtains des petites croisées d'ogives qui couvrent les galeries surmontant les chapelles entre les contreforts étaient réalisés en briques posées à plat. Reste à préciser la date de ces éléments qui peuvent dater de la deuxième moitié du XIV^e siècle et qui sont en tout cas antérieurs à 1443» (Araguas 1998, 133)

1.3. Siglos XVI al XVIII: generalización del sistema y cambio al lenguaje clásico

En el siglo XVI se siguen construyendo bóvedas tabicadas, ya extendidas por buena parte de España. En esta época comienza a introducirse el lenguaje del Renacimiento, pero también se mantienen las formas del gótico: Las bóvedas de crucería abandonan los arcos apuntados a favor de los de medio punto y terminan siendo un casquete esférico, algunas ya con decoración renacentista y otras todavía góticas, de crucería estrellada. Cuando desaparecen incluso los nervios, toda la bóveda se construye con ladrillo.

Las bóvedas tabicadas tienen un importante papel en este cambio. Las bóvedas semicirculares del renacimiento y del último gótico español empujan más que las apuntadas.³⁴ Además, el lenguaje clásico quiere abandonar los pilares y contrafuertes góticos para apoyar en columnas con una forma marcada por las proporciones y no por aspectos estructurales. Esta es la opinión defendida por Marías (1991):

con el fin de aligerar el peso de los abovedamientos a la antigua sobre pilares y columnas en claustros; en estos se estaban sustituyendo los pilares góticos por columnas clásicas (...) hacía falta reducir el peso de las bóvedas para no tener que recurrir a los tirantes metálicos empleados en Italia y criticados en España» (Marías 1991, 78)

Las bóvedas tabicadas, al ser mucho más ligeras, permiten despreocuparse del aspecto estructural y concentrarse en la decoración y las proporciones, además de liberar visualmente el espacio interior, ya que columnas y contrafuertes son menores.

El uso de las bóvedas tabicadas en esta transición de un lenguaje medieval, gótico a otro mas «moderno», ya renacentista, en concreto en Aragón, ha sido estudiado en profundidad por Javier Ibáñez (2005):

La generalización y el perfeccionamiento del sistema de bóvedas tabicadas modifica de manera sustancial la práctica constructiva al permitir la progresiva simplificación de las estructuras tectónicas de las fábricas, con lo que se obtienen espacios interiores mucho

³⁴ En el siglo XVI en España conviven las primeras bóvedas de decoración renacentista con el último gótico. Pero las bóvedas del final gótico español tiene un perfil muy rebajado, en muchos casos semicircular, aunque lleven nervios. Este tema ha sido muy estudiado en cuanto a la estereotomía, pero también influye en la albañilería (Zaragozá 2009)

más amplios sobre los que se pueden aplicar diferentes medidas en pos de la proporcionalidad de cada una de sus partes (Ibáñez 2005, 546).

1.3.1. Valencia

Durante el s. XVI la técnica se generaliza en Valencia, encontrándola en diferentes soluciones:

- Como plemento entre nervios de piedra, especialmente en iglesias menores que continúan utilizando el estilo gótico: iglesia parroquial de San Andrés, de 1602 o iglesia de San Esteban, de 1608 (Gómez Ferrer 2003). En algunas de estas iglesias se construían bóvedas sólo de ladrillo (sin nervios de piedra) en espacios auxiliares. El monasterio de San Miguel de los Reyes, que se construye en la segunda mitad del s. XVI siguiendo trazas del maestro castellano Alonso de Covarrubias también sigue este esquema constructivo.³⁵

- Bóvedas construidas enteramente en ladrillo pero en las que se añaden nervios de yeso o ladrillo aplantillado, como la iglesia de la Compañía de los Jesuitas de Valencia, contratada en 1621 (Gómez-Ferrer 2003; Galarza 2009).

- Bóvedas de ladrillo en las que se emplea ya el lenguaje renacentista de bóvedas de cañón, baídas, cúpulas, etc. Así se construyen los abovedamientos del Hospital General de Valencia, ver figura 1.19. Este importante edificio se comenzó a finales del s. XV, cubriéndose con armaduras de madera. En 1545 se quemó por completo y hubo que reconstruirlo de manera muy rápida. Las bóvedas tabicadas eran el sistema perfecto: incombustible y rápido. Desde el punto de vista formal, en el Hospital de

³⁵ Alonso de Covarrubias ya había construido bóvedas tabicadas en algunos edificios de Toledo. En 1546 viaja a Valencia, donde dibuja dos trazas y escribe un extenso memorial de la obra del monasterio. En él se indica que las bóvedas de la iglesia «serán de crucería, con sus perpiaños, arcos cruceros, terceletes y combados, tabicadas y dobladas, jaharradas, blanqueadas y pinceladas al arte de cantería» (Marías 1983-85, vol. 4, 257-258). Las capitulaciones completas se reproducen en el apéndice documental de Gómez Ferrer, 2003)

Valencia encontramos ya la técnica tabicada en un lenguaje renacentista: bóvedas baídas y cúpulas de media naranja, sin nervios ni claves.³⁶



Figura 1.19. Bóvedas baídas renacentistas en el Hospital General de Valencia. A la izquierda, pabellón de enfermería, construido a partir de 1588 y actualmente desaparecido (Gómez Ferrer 2003, 137). A la derecha, edificio actual, convertido en Biblioteca Municipal (Gómez Ferrer 2003, 136).

Además de utilizar la bóveda tabicada como elemento resistente completo y no sólo como plementería, los tamaños que se cubren son cada vez mayores: en la iglesia de los jesuitas de Valencia, las bóvedas tabicadas del crucero forman cuadrados de 10 m. de lado; en el convento de Capuchinos la bóveda de cañón tiene 8 m. de anchura (Galarza 2009). El final de esta evolución en Valencia sería la cúpula interior de la basílica de los Desamparados, construida en 1700: oval, de ejes 19 y 15 m, tiene 8 cm de espesor (Huerta 2012).

Que las bóvedas tabicadas pasaran de ser simples plementos entre nervios de piedra o de rosca de ladrillo a constituir toda la bóveda no estuvo exento de polémica: El maestro de obras Batiste Abril, que había construido bóvedas tabicadas en el convento de San Miguel de los Reyes, tuvo que asegurar en 1574 a los monjes del monasterio de Cotalba, que «Et quoniam timetis que la volta no es segura per estar feta sense archs y

³⁶ En el contrato de obras, de 1592 el maestro Francesc Anton se compromete a construir «voltes per ygual closes de barandat doble per la part de baix llafardades de algeps prims y depesades a comte de piedra». También se pide la construcción de lengüetas: «se han de ygualar tots los carcañols y racons de les voltes de la prima cuberta fent uns carrerons de algeps y rajola» (Gómez Ferrer 2003, 137). Las capitulaciones completas se reproducen en el apéndice documental de Gómez Ferrer, 2003)

ser tota una volta, (...) promitto dictum opus esse tutum securum»³⁷ (Gómez Ferrer 2003, 147).

Otra aplicación interesante, un poco más tardía, de las bóvedas tabicadas en Valencia son las que se construyen en el siglo XVII bajo las primitivas góticas para cambiar el aspecto interior de los templos adaptándolos al estilo barroco con un coste bastante bajo. Este tema ha sido estudiado en profundidad por Rafael Marín (2012), que describe con detalle esta transformación sobre la iglesia de los Santos Juanes.³⁸ En 1693 se escribe un contrato de obra para construir una gran bóveda tabicada de 16 metros de luz y 10 cm. de espesor bajo las bóvedas de crucería originales, que sirven de soporte parcial para la nueva bóveda: la tabicada se adapta a la forma de la crucería gótica en el primer tercio de la altura (tendiéndose inmediatamente por debajo de ella) y queda libre en el los dos tercios restantes. En la zona superior, la bóveda tabicada está conectada con los nervios de piedra de la bóveda original por medio de unos tabiquillos (Marín 2012), ver figura 1.20.

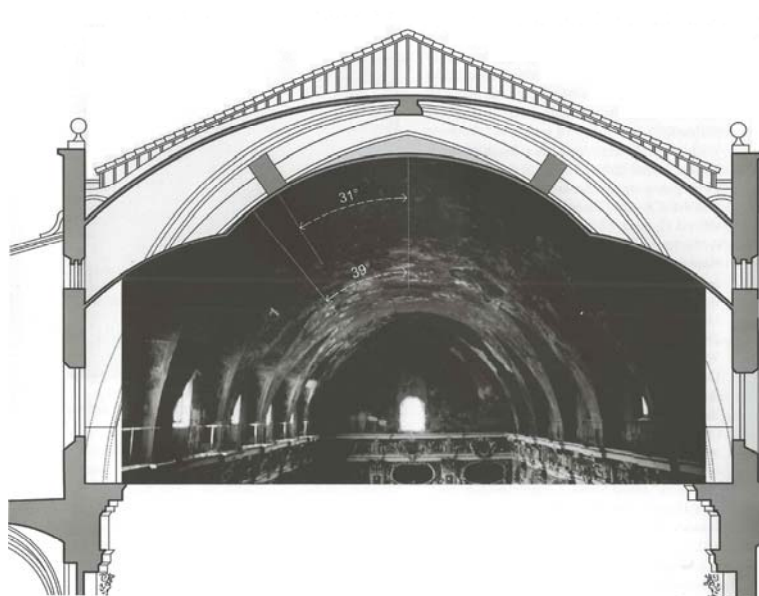


Figura 1.20. Bóveda tabicada barroca sobrepuesta en la sección gótica de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia (Marín 2012)

³⁸ La iglesia original es de 1358 y tiene bóvedas de crucería, con los nervios de piedra y plementos de rosca de ladrillo. En algunos espacios auxiliares ya se emplearon bóvedas tabicadas (Marín 2012; Galarza 2009)

Así, la forma apuntada del gótico se convierte en una bóveda de cañón esférico, o una media naranja. Además, la bóveda tabicada se reviste de yeso y por debajo se puede pintar un fresco, estucar, etc., con lo que la iglesia queda perfectamente adaptada a las nuevas formas barrocas.

En Galarza (2009) se reproduce el contrato de obras de la remodelación, firmado en 1693, interesante por el detalle con que se describe el proceso:

XIX.—Item. En la nave de la iglesia se ha de construir una bóveda de cañón seguido, sin resaltos de arcos, excepto el toral, y se ejecutará de esta forma: se ha de ejecutar una roza, dos dedos por encima de las aristas de las dovelas de los arcos, de medio palmo de ancho y poco más de dos dedos de fondo (...) luego, se construirán las bóvedas entre los arcos, con tres dedos de saliente, haciendo lunetos de cinco o seis palmos más bajos que los tercios [de la bóveda] con el fin de que se tenga más superficie para pintar (...) Y al mismo tiempo que se irán construyendo las bóvedas, se doblarán con ladrillos gruesos con las juntas contrapeadas.

Y, así mismo, se harán una fajas, de dos ladrillos de anchura, por cada lado del arco (...) Y además de esta fajas, se han de hacer otras encima de los formeros de los lunetos; otras desde cada columna del formero al siguiente formero por encima de los lunetos; otras que abracen cada luneto; y otra en medio de la bóveda de parte a parte; y se enlucirá todo de yeso por encima

(..) se han de poner estribos de medio ladrillo y yeso entre los lunetos y los arcos hasta los tercios de las bóvedas, de la forma como se acostumbra, haciendo también estribos de tabique doble sobre los lunetos y cuantos estribos sean necesarios para la mayor seguridad [de la obra] (Galarza 2009, 529-530)

En otras iglesias de Valencia se hicieron transformaciones semejantes, del mismo tipo es la cúpula interior de la basílica de los Desamparados, que se ha citado más arriba (Huerta 2012), en la que en 1701 se construye una delgadísima bóveda tabicada hacia en interior de la basílica, conectada con la exterior mediante piezas de hierro forjado, de manera que forman un conjunto constructivo y estructural. Esta solución de doble cúpula será muy habitual en Valencia a lo largo del siglo XIX, como se verá más adelante.

1.3.2. Catalunya

Durante el siglo XVI se construyen numerosas iglesias parroquiales en Catalunya, siguiendo la misma técnica: nervios y claves de piedra y plementería tabicada.³⁹

Ya en el siglo XVII aparecen otras iglesias de estilo clásico, como la ampliación de Santa María de Mataró, encargada al maestro Bernat Juli, según contrato de 1686 en el que se indica «les voltes grans i les xiques que están en tota la obra sobredita han de ser treballades d'obra cuita (...) que han de ser de tres gruixos de rajola senzilla, acordades i enlluïdes de guix» (Bassegoda 1936, 97)

Un ejemplo interesante son las celdas de día del Monasterio de Pedralbes, construidas en el siglo XVI: pequeñas bóvedas, tabicadas, sobre las que se superpone una decoración de nervaduras góticas realizadas con yeso (Bassegoda 1978). Esta solución, que imita los nervios góticos pero sin función estructural, será muy empleada en Aragón, como vemos en el siguiente apartado. En la figura 1.21 se ve el trasdós de las bóvedas, al que no llegan los nervios



Figura 1.21. Trasdós de una bóveda tabicada esquifada, sin nervios, en las celdas del Monasterio de Pedralbes (Bassegoda 1978, Lámina X)

³⁹ En Bassegoda (1978) se recogen numerosos contratos de obra de estas iglesias parroquiales en los que se cita el uso de bóvedas tabicadas: «les claus e arcades age de fer de pedra de Montjuic e la volta de terra cuita de rajoles» (iglesia de Santa María y San Nicolás en Calella, contrato con el maestro Pere Suaris, 1539); «fer lo cor de dita església (...) fer les algives y formerets y claus tot de pedra picada y entalentada y fer lo pendent de rajola dobla y guix» (iglesia parroquial de Hospitalet de Llobregat, contrato con el maestro Giralt Gervasi, 1578)

1.3.3. Aragón

En Aragón, las bóvedas tabicadas también evolucionan de ser sólo la plementería apoyada en nervios a formar la estructura resistente. Pero allí no desaparecen los nervios, como ocurre en Valencia, sino que estos van perdiendo poco a poco su misión resistente pasando a ser elementos decorativos, que se construyen después de la bóveda. Además, por la falta de piedra ya citada, los nervios resistentes son normalmente de ladrillo aplantillado. Cuando pasan a ser decorativos se ejecutan con yeso.⁴⁰

Tabicadas y con nervios resistentes de ladrillo las bóvedas de la Lonja de Zaragoza (ver figura 1.22), construida entre 1541 y 1551, a cargo de Juan de Sariñena y en cuya ejecución trabajaron numerosos maestros. Las bóvedas son baídas o de rampante redondo, aunque el lenguaje arquitectónico todavía es gótico.⁴¹

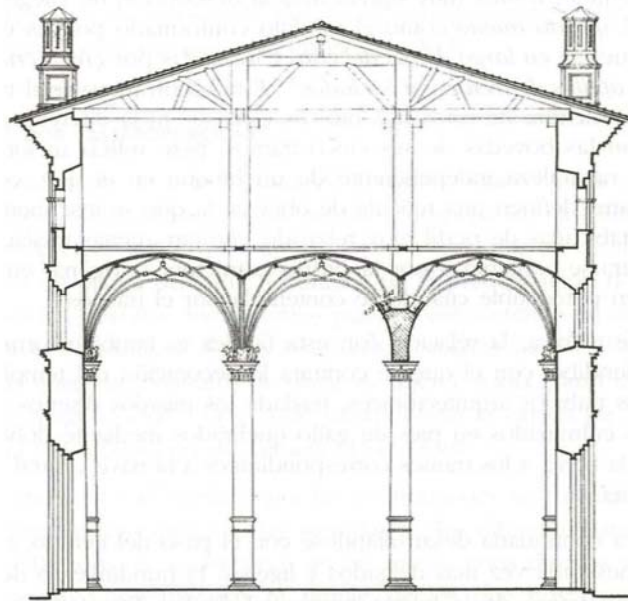


Figura 1.22: Sección de la Lonja de Zaragoza, según F. Iñiguez (Ibáñez 2005, 103)

⁴⁰ Un estudio exhaustivo y muy interesante de esta evolución en Aragón lo encontramos en Ibáñez (2005)

⁴¹ La forma de las bóvedas de este edificio es muy representativa de la evolución del gótico en España en el siglo XVI: pasan de ser una serie de planos entre los nervios a formar una superficie esférica. En la misma medida, los nervios van perdiendo su función resistente.

Un poco posteriores a la Lonja, emplean el mismo sistema la iglesia de El Pozuelo de Aragón, en 1545,⁴² o la del monasterio de Trasobares, en 1563,⁴³ las dos en la provincia de Zaragoza.

Pero ya en la última ampliación llevada a cabo en la Seo de Zaragoza, el *quarto nuevo*, entre 1546 y 1550, se ha completado la separación entre estructura y decoración: primero se construyen las bóvedas tabicadas y después los nervios, que ya no son de ladrillo sino de yeso y los ejecutan otros maestros (Ibáñez 2005, 212). Otro ejemplo de esta fase de nervios decorativos la encontramos en la iglesia parroquial de Los Fayos (Zaragoza), una obra contratada en 1570 (Ibáñez 2005, 105), ver figura 1.23.



Figura 1.23: Bóveda tabicada en la iglesia de Los Fayos (Zaragoza), con las bóvedas tabicada de ladrillo y los nervios decorativos de yeso. (Ibáñez 2005, 105)

También con nervios de yeso sin función resistente se construyen las capillas de la iglesia de San Martín de Belchite, estudiado por Araguas (1986) y en el que es fácil identificar el sistema constructivo de las bóvedas ya que están arruinadas desde la guerra civil.

⁴² En el contrato de obra con el maestro Charles de Mendibe se especifica que las bóvedas de las naves se construirán con «unos arcos de ladrillo y medio de grueso de respaldo a respaldo» y sobre ellos «una bobeda al mismo cincel del arco por encima, de dos faldas de ladrillo» (Ibáñez 2005, 179-80)

⁴³ Contratada en 1563 con Martín de Miteza, se indica que los tramos de nave serán de «cruzetas de ladrillo y algez» y sobre ellos «dos faldas de rejola» (Ibáñez 2005, 270-72)

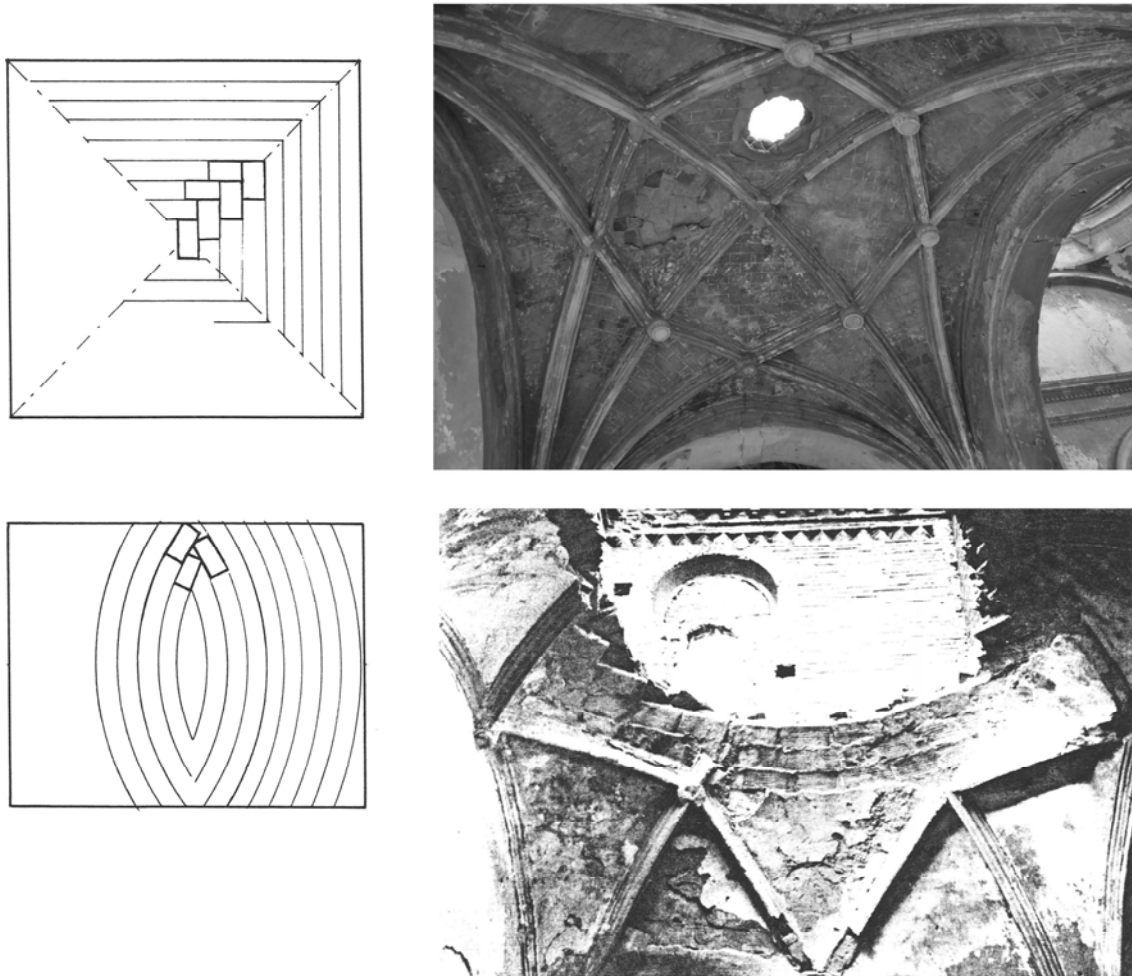


Figura 1.24. Capillas de la iglesia de San Martín en Belchite. A la izquierda, dibujo en planta de los aparejos (Araguas 1986, 92). A la derecha, fotografías, en las que se aprecia que los nervios se han construido por debajo de la bóveda. La fotografía superior ha sido cedida por Paula Fuentes. La inferior es de Araguas (1986, 95)

1.3.4. Castilla

En Castilla, los documentos que prueban la existencia de bóvedas tabicadas son algo más tardíos, de la primera mitad del s. XVI, pero a partir de ese momento su uso fue bastante general.

Este sistema barato y sencillo sustituyó, en la arquitectura monumental, el de falsas bóvedas de yeso y cañizo que se utilizaba principalmente en obras de arquitectura civil (..) la documentación arquitectónica quinientista y seis centista es meridiana en su utilización generalizada en la mayoría de las construcciones de la época; una y otra vez los contratos reiteran su empleo, por lo menos desde los años centrales del siglo XVI (Marías 1991, 77)

La primera referencia la encontramos en el memorial de obras acerca del monasterio de San Miguel de los Reyes que presenta el maestro castellano Alonso de Covarrubias. Según este informe, Covarrubias había construido bóvedas de crucería con plementos tabicados en el convento de Nuestra Señora de la Piedad (Guadalajara) en 1526 (Gómez Ferrer 2003).

Un poco más tarde se construyen bóvedas tabicadas, estas ya renacentistas, en las galerías de los patios del Hospital de Tavera (Toledo), hacia 1540 y a cargo del mismo Covarrubias.⁴⁴

Primeramente que las dichas vobedas que an de ser en el corredor vaxo an de yr labradas por arista de ladrillo

Iten que en el corredor alto que debe ser hecho e acavado según e la forma y manera que el dicho corredor bajo en cuanto a la horden de la lavor y obra de abajo e alto que las dichas vobedas en der ser de ladrillo taibicadas e dobladas y acavadas segun dicho es (Marías 2007, 272)

Otros ejemplos un poco más tardíos son la iglesia del monasterio de Santo Domingo el Antiguo de Toledo,⁴⁵ el colegio Bernardo de los Jesuitas, en Oropesa⁴⁶ y la iglesia del monasterio de San Pedro Mártir, en Toledo.⁴⁷ Encontramos bóvedas tabicadas incluso

⁴⁴ Marías 2007. Extenso anexo documental sobre la obra del Hospital de Tavera.

⁴⁵ Construida entre 1576 y 1579. Las primeras condiciones las escribe Nicolas Vergara el 14 de mayo de 1576, pero después se anulan y se firman unos nuevos el 10 de agosto, según trazas de Juan de Herrera, aunque Nicolas Vergara sigue a cargo de la obra. Con las nuevas trazas y condiciones de Juan de Herrera el coste de la iglesia se redujo de 32000 a 25000 reales, entre otras cosas por la supresión de cimbras (Marías 1983-85, vol. III). Quizá fue Juan de Herrera el que propuso las bóvedas tabicadas para esta iglesia, con idea de reducir su precio.

⁴⁶ Construida entre 1590 y 1613, aunque la capilla mayor no se termina hasta la segunda mitad del s. XVII (Marías 1983-85, vol. IV)

⁴⁷ Se construye entre 1605 y 1611. Las condiciones de albañilería, fueron escritas por Nicolas Vergara el Mozo, las firmaron el alarife Juan de Orduña y el maestro de obras madrileño Juan Martínez de Encabo el 1 de mayo de 1605 (Marías 1983-85, vol. III)

en lugares donde hay una fuerte tradición de construir en piedra: así se construye la parroquia del Escorial de Abajo, a cargo de Francisco de Mora.⁴⁸

1.3.5. Andalucía

La primera referencia conocida a una bóveda tabicada en Andalucía es la capilla del cementerio de Aznalcollar, citada más arriba y que Araguas (1998) fecha hacia 1400. Se conserva el edificio pero no documentación acerca de su construcción, así que la bóveda podría ser resultado de una remodelación.

Muy posterior, de 1614, es el siguiente texto, que se refiere a la construcción de la catedral de Granada. Las capillas de la nave mayor se proyectan con nervios de piedra y plementos tabicados y posteriormente se quieren construir sólo de ladrillo. Se muestran una vez más las reticencias que provocaban las bóvedas tabicadas como estructura resistente completa:

Pregunta...si el crucero se podría cubrir de ladrillo y no de cantería...Respuesta: se pudian hacer bóvedas de ladrillo porque la crucería son de piedra, pero todo de ladrillo, de ninguna manera. Otro dice que se podría hacer de ladrillo todo el casco liso de la capilla y después de cerrado liso hacerle unos repartimientos (..) y será menos carga para los estribos, paredes y pilares y estará muy fuerte. Otro dice que se puede reducir el cerramiento de estas bóvedas a lo romano y se pueden cubrir de ladrillo y yeso y estarían muy fuertes (...) Con ello estará muy fuerte y muy seguro y de menos costa y riesgo que podría tener con el mucho peso y empuje de la piedra. Así está cerrada la iglesia mayor de Córdoba y la de la Compañía de la misma ciudad; la iglesia del Escorial que su majestad hizo en el pueblo, tiene 50 pies de hueco y es de tabique. Lo mismo otros muchos templos importantes en Madrid, Valladolid, Toledo Y Andalucía son de bóvedas de ladrillo y están muy fuertes y seguras (Rosenthal 1990, Documento 214)

En Almagro (2012) se estudia la construcción de la Cartuja de Granada, un proceso largo en el que los abovedamientos a partir del s. XVII (iglesia y sagrario) son tabicados. En la iglesia, de la primera mitad del s. XVII, hay tres bóvedas de arista con paños de doble curvatura y una cúpula oval; por el trasdós se refuerzan con lengüetas pero los riñones no se rellenan. En la sacristía, comenzada en 1732, hay una cúpula

⁴⁸ Así se indica en un texto relativo a la construcción de la catedral de Granada (Rosenthal 1990), citado más abajo

esférica tabicada de dos hojas conectadas por lengüetas radiales y unidas en la base y en la coronación, siguiendo el sistema de doble cúpula tan habitual en Valencia, ver figura 1.24.



Figura 1.25. Cartuja de Granada, cúpula tabicada en la sacristía. A la izquierda, fotografía del trasdós con las lengüetas que unen cúpula y muros laterales. A la derecha, sección, en la que se aprecia que la cúpula es de doble hoja (Almagro 2012, 53)

CAPÍTULO 2.

LA CONSTRUCCIÓN TABICADA EN LAS FUENTES DOCUMENTALES

La construcción tabicada, como se describe en el capítulo 1, aparece en España en la zona de Levante en los últimos años del siglo XIV y a lo largo del siglo XVI se generaliza en buena parte de España. Desde su aparición hay algunos documentos (contratos y pleitos de obra) en los que se describe su construcción. Pero hasta el siglo XVII no lo encontramos en los tratados de arquitectura españoles y aun tardará 100 años más en ser reconocido por los influyentes tratados franceses, lo que supone una gran difusión y su aceptación dentro de la arquitectura «cult».¹

En el primero 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 Fray Lorenzo. Otros autores que citan o describen las tabicadas en estos siglos son: Fray Vicente Tosca, Atanasio Briguz y Brú, Juan García Berruguilla y Antonio Plo y Camín. Ya en los últimos años del s. XVIII, algunos tratados españoles recogen las ideas francesas sobre la construcción tabicada, un país con menor tradición que España en este campo. Estos tratados se estudian en el capítulo siguiente.

2.1. Los materiales tradicionales: ladrillos y yeso

Una bóveda tabicada está formada por ladrillos colocados de plano unidos por un aglomerante de fraguado rápido. Los ladrillos deben ser ligeros para quedar sujetos por el aglomerante sin una cimbra continua; el aglomerante debe ser rápido por la

¹ Esta diferencia temporal se explica porque durante muchos años las bóvedas tabicadas fueron consideradas un sistema constructivo menor, popular y poco digno de figurar en los tratados: «Leur reconnaissance par l'histoire de l'architecture occidentale est assez tardive; jusqu'au XVIII^e s., en effect, ce type de voûte, abondamment utilisé tant en Espagne qu'en Italie depuis deux siècles, n'a pas encore reçu ses lettres de noblesse» (Araguas, 1986)

misma razón. Hasta la aparición del cemento en el siglo XIX, el único que cumplía estas características era el yeso.

2.1.1. Los ladrillos

El invento del ladrillo se remonta a los orígenes de la civilización. El ladrillo secado al sol, o adobe se conoce desde el año 10000 a. C, el ladrillo moldeado se desarrolla en Mesopotamia hacia el 5000 a. C. Y el ladrillo cocido se inventa aproximadamente en el 3500 a. C. (Campbell 2004).

Los griegos y los romanos hasta el imperio utilizaron sobre todo adobes, secados simplemente al sol.² Desde la época de Augusto, los romanos ya emplean masivamente las piezas de arcilla cocida, y fueron ellos los difusores del material por su amplio territorio.³ Los romanos usaban ladrillos cuadrados de tamaños muy diversos: *bessalis* (20x20x4,5 cm), *pedalis* (30x30x6,5 cm), sesquipedales (45x45x5 cm) y bidepales (60x60x6 cm); rectangulares (*lydion*) y triangulares; los mezclaban con el hormigón romano en bóvedas y muros utilizándolos en parte como encofrados.

Los bizantinos heredaron los ladrillos romanos, pero los utilizaban solos, como elemento resistente. En la época bizantina se desarrolla un ladrillo macizo, más grueso que el romano y de proporción rectangular (30x15x8 cm; 43x25x10 cm) que se utilizará durante la época medieval y hasta la actualidad. (Campbell 2004, 67)

El imperio islámico recoge las técnicas constructivas de muchos de los pueblos conquistados: el uso del ladrillo lo toman de los sasánidas, que habitan en Persia y de los bizantinos, que ocupaban la zona oriental del Mediterráneo (Campbell 2004, 72).

² En la antigua Grecia no se generalizó el uso del ladrillo cocido, pero tenía algunas aplicaciones menores, como los zócalos de las viviendas. Se conocen ejemplos del 400 a.C. Respecto a Roma, algunos edificios importantes del siglo I a. C ya se construyeron con ladrillo cocido (Campbell 2004, 42-43)

³ En el tratado de Vitrubio (30-20 a.C.) apenas se cita el ladrillo, que debía ser una novedad en Roma (Campbell 2004, 44). El primer edificio romano de importancia construido con ladrillo cocido es el Panteón de Agripa, que data de la época de Augusto (Espinosa 1859, 169). Se extendió durante el siglo I d.C.: «A finales del siglo I d.C. el empleo del ladrillo estaba muy extendido, y las legiones que levantaban ladrillares allá donde iban llevaron la tecnología por todo el Imperio» (Campbell 2004, 43)

Hacia el año 1000, el ladrillo se había extendido por todo el mundo conocido, desde China hasta Europa Occidental.

En España es de uso muy frecuente desde la época romana. También se utiliza en la arquitectura árabe y después de la reconquista cristiana. Una buena parte de la arquitectura medieval en España es de ladrillo, especialmente en Levante, Aragón y zonas de Castilla, asociada a lo que se ha llamado «arquitectura mudéjar».⁴

Para las bóvedas tabicadas se emplea un ladrillo lo más ligero posible. Con los ladrillos macizos usuales hasta la mitad del XIX, esta ligereza se consigue con ladrillos más finos de lo habitual, lo que en la zona de levante llaman raiolas o rajolas ; en Castilla rasillas y en Aragón rejolas.

En los tratados escritos en España en los siglos XVII y XVIII el ladrillo se describe como un material muy habitual: «El ladrillo tosco es una especie de piedra artificial, cuyo uso es muy frecuente en la construcción de los edificios» (Briguz y Brú 1738, 123). El tamaño y la forma es ya similar a los actuales. La proporción rectangular se instaura en España en el siglo XII, y se mantiene sin muchas variaciones hasta la actualidad.⁵

Los ladrillos toscos en unas partes tienen 12 dedos de longitud, sobre cinco o cinco y medio de latitud, y dos de grosseza, ò espessura; en otras partes 12 dedos de longitud, 4 de latitud y dos de grueso (Briguz y Brú 1738, 125)⁶

El ladrillo común tiene 27,7 cm (12 pulgadas) de longitud, 13,5 centímetros (6 pulgadas) de ancho y 1,7 cm de grueso.

Ladrillo rasilla.-Es el ladrillo fino delgado
(Espinosa 1859, 170)

⁴ El libro de Philippe Araguas *Brique et architecture dans l'Espagne Medievale* (2003) es un completo estudio de esta arquitectura

⁵ En Cristini (2009) encontramos un estudio de las medidas de los ladrillos empleados en Valencia desde 1200 hasta 1950. En todo ese tiempo el tamaño y la proporción es muy similar, y su origen es árabe «el ladrillo de módulo rectangular de 30x15,5 que surgió en el siglo XII a raíz de la legislación de los Almohades» (Cristini 2008, 244)

⁶ Un dedo equivale a 1,74 cm, así que las medidas habituales expresadas por Briguz y Brú son: longitud 21 cm; ancho entre 7 y 9,5 cm; espesor 3,5 cm.

Hasta la aparición, a mediados del siglo XIX, de los ladrillos huecos fabricados industrialmente el material se mantendrá sin muchos cambios.

2.1.2. *El yeso*

El yeso, debido a la abundancia de aljez (piedra de yeso) en la naturaleza y a la baja temperatura necesaria para calcinarlo (unos 200°C),⁷ es uno de los materiales de construcción más antiguos.⁸ Las culturas del mediterráneo oriental lo utilizaron con frecuencia.⁹ También se emplea en el Antiguo Egipto, ya que es muy abundante en el delta del Nilo. Griegos y romanos lo conocían, aunque lo utilizaron principalmente en revestimientos.¹⁰

El yeso se usa en abundancia en el imperio sasánida¹¹ (226-651 d.C.), de donde pasa a

⁷ El resto de aglomerantes necesita temperaturas mucho más altas en su fabricación: la cal y el cemento rápido, alrededor de 1000°C; el cemento Pórtland, unos 1300°C.

⁸ Se conocen guarnecidos de yeso en techos, suelos y paredes del año 6000 a.C., en la ciudad neolítica de Catal-Hüyük, Turquía. En la cultura egipcia se utilizó con mucha frecuencia ya que era muy abundante en el valle del Nilo. Los sillares de la pirámide de Kheops (2600 a. C) están recibidos con yeso, y también se conservan restos de guarnecidos de yeso como base para pinturas al fresco en tumbas egipcias (Gárate 1999)

⁹ Todos los pueblos que habitaron Persia en la época medieval construyeron una arquitectura de ladrillos recubiertos con yeso (Campbell 2004)

¹⁰ José Ortiz y Sanz, que traduce al español el tratado de Vitrubio incluyendo numerosos comentarios, afirma en uno de ellos: «Parece que los antiguos hicieron muy poco uso del yeso en los enlucidos, al menos en tiempo de Vitrubio. Acaso después se introdujo, por ser más barato que el estuco, como leemos en Plinio 36, 24. En Roma no se gasta otro yeso que el que nosotros llamamos espejuelo, y ellos scagliola, ó escallola. Es bastante sufrido y tarda en hacer presa; pero sumamente blanco. Emplease sólo en blanqueos, en las juntas verticales y obliquas de la cantería, y en algunas otras cosas de poco momento; pero no en la construcción de paredes, tabiques &c, como nosotros» (Ortiz y Sanz 1787, 172-73)

¹¹ «La patria original de las arquitecturas de yeso es sin duda el oriente y especialmente Irán, en donde ya desde época parta, pero más extensamente con el imperio sasánida, se desarrolla una técnica constructiva basada en el empleo del yeso como material básico, con la que consiguen logros estructurales capaces de rivalizar con los de la arquitectura romana» (Almagro 1986, 453)

los Omeyas, que lo utilizan en Siria durante el califato de Damasco (661-750).¹² En el periodo Omeya los árabes conquistan el norte de África hasta el Magreb. Cuando el califato de Damasco cae, los Omeyas se llevan sus tradiciones constructivas, entre ellas el uso del yeso, que se generaliza en la península ibérica y en el norte de África, como aglomerante en muros de ladrillo y piedra y también en la realización de revestimientos, algunos de ellos en trabajados relieves, que reciben el nombre de yeserías.

En España, el yeso se utilizó con especial frecuencia en la arquitectura musulmana y después mudéjar, de Aragón y el Valle del Ebro, donde además es muy abundante la piedra de yeso. Se utiliza como aglomerante en fábricas de ladrillo, para construir revoltones entre viguetas en forjados de madera y en el uso más común de revestimientos (Almagro 1986)

En los tratados españoles escritos en los siglos XVII y XVIII encontramos numerosas referencias al yeso, para revestimientos y como aglomerante en muros y bóvedas. En Fray Lorenzo de San Nicolás lo encontramos ligado a las bóvedas tabicadas, a las que llama de «yeso tabicado».¹³

El único problema que presenta el yeso es su mal comportamiento con la humedad y así lo recoge también Fray Lorenzo:

Es nocivo y dañoso a todo yeso cocido la humedad, y agua vientos: más es importantísimo para edificios defendidos de ello: porque no sólo fortifica con su fortaleza el edificio sino que da lugar para hermosearle(...): fuera desto es presto y aligera las fábricas assi de gastos como de peso (...) pueden hacerse lienzos de pared gruesos y delgados, y son fortísimos y se pueden cargar brevemente, y hacer bóvedas de cuantas maneras hay en el arte (San Nicolás 1639, 90)

En el libro de Espinosa *Construcciones de Albañilería*, escrito ya en 1859 encontramos algunos datos sobre el material:

¹² Así ocurre en la ciudadela de Amman, construida por los omeyas sobre una antigua ciudad romana: se aprecia el cambio de material, de los morteros de cal en la ruina romana al yeso en las zonas construidas por los omeyas (Almagro y Arce 1996)

¹³ «de tres materias se hacen bóvedas, que es de yeso tabicado, de rosca de ladrillo y de cantería» (San Nicolas 1639, 91).

Resistencia a compresión: entre 42 y 90 kg/cm².

Resistencia a tracción: entre 5 y 12 kg/cm².

Adherencia al ladrillo: 3 kg/cm².

(Espinosa 1859, 165-66)

Con yeso se recibía al menos la primera capa de las bóvedas tabicadas y la mayoría de las veces, todas. Debido al mal comportamiento del yeso en exposiciones húmedas, esto restringió su uso a interiores protegidos.

A veces las siguientes capas, una vez endurecida la primera, se recibían con mortero de cal. Hasta la aparición y generalización del cemento a lo largo del siglo XIX, no se ha encontrado ningún registro del uso de otros aglomerantes en bóvedas tabicadas, aunque sí se conocían las propiedades de algunos materiales (puzolanas, arcilla cocida pulverizada, etc.) para añadir propiedades hidráulicas al mortero de cal.

2.2. Procesos de ejecución

El autor que más se extiende sobre los procesos de ejecución es Fray Lorenzo de San Nicolás, con su punto de vista de constructor de bóvedas: «Todo lo cual experimenté con mis manos antes de escribirlo, siendo este mi ejercicio, como en otras ocasiones he dicho» (San Nicolás 1639, 91).¹⁴

En los capítulos 51 a 57 de la 1ª parte de *su Arte y Uso de Arquitectura*, describe los distintos tipos de bóvedas, que agrupa en cinco: de cañón, media naranja, vaída, esquifada, por arista, además de las bóvedas con lunetos. En cada caso, describe con mucho detalle la forma en que deben construirse, explicitando como proceder si son tabicadas, de rosca de ladrillo o de piedra.

¹⁴ Fray Lorenzo de San Nicolás nació en Madrid en 1593. Fue fraile agustino y arquitecto de su orden, proyectando y construyendo 16 iglesias y capillas entre 1633 y 1656, según enumera en la 2ª parte de su tratado. Había aprendido con su padre, igualmente maestro de obras de los agustinos.

Fray Vicente Tosca no dedica mucho espacio de su tratado,¹⁵ más dedicado a la cantería que a las bóvedas tabicadas. Por otro lado, las trata como un orden menor.

Puedese fabricar el Arco de Albañilería o de piedra siendo de Albañilería o es tabicado, que solo sirve para falseado y apariencia o de ladrillo de rosca; si es tabicado se irán juntando, y viniendo los ladrillos por sus lados siguiendo la cimbra o cerchon y no ha menester mas habilidad (Tosca 1727, 96)

A pesar de la frecuencia con que se utilizaban las bóvedas tabicadas en Valencia, tiene sentido que Tosca las considere sólo «para falseado y apariencia»: como se ha citado en el capítulo 1, en los siglos XVII y XVIII fue frecuente en Valencia cubrir con una bóveda tabicada las primitivas cubiertas góticas. Esta bóveda apoyaba en parte en las nervaduras góticas. Estas reformas iban encaminadas a conseguir una estética barroca, ya que la bóveda posteriormente se enlucía y recibía decoración pictórica.

Fray Lorenzo también describe el uso de las bóvedas tabicadas «de sencillo» para fabricar una especie de «falso techo» colgado de un forjado de madera superior (ver figura 2.1):

Demás de lo dicho se puede ofrecer en algún salon hacer alguna bóveda rebaxada y esta unas veces se hace encamonada, haciendo camones de madera, que son unos pedazos de viguetas o tablones y fixanse en el asiento de la bóveda y rematan en un tercio de su lado y de unos a otros se tabican y queda la bóveda con menos peso y por el exemplo precedente lo entenderas mejor, aunque no es la misma traza. Supongo, que en el hueco AB quieres hazer la bobeda rebaxada ACB. y que es su suelo de madera MN clava en el suelo de parte a parte dos ristreles con buenos clavos, en el lugar que demuestra ST después a cada madero echa las cancas o tornapuntas PQ LV y desde el asiento de la bobeda AB ve tabicando de sencillo hasta los ristreles y lo que hay de uno a otro ristrel entre madero y madero, pasarás el tabicado de bóveda y lo demas del suelo bien

¹⁵ Tomás Vicente Tosca (Valencia 1651-1723) fue matemático, cartógrafo, filosofo, teólogo y arquitecto y uno de los fundadores del movimiento científico valenciano Novatores. Participó en varias obras arquitectónicas: Iglesia de Santo Tomás, San Felipe Neri, iglesia de los Santos Juanes, todas en Valencia. Escribió un importante tratado de matemáticas *Compendio Mathematico*, en 9 volúmenes, de 1707 hasta 1715. El volumen 5 de dicho compendio, dedicado a la arquitectura civil y a la cantería, es el que se ha estudiado (en una edición posterior, de 1727).

entomicado, jaharrarás segun queda dicho en el cap.50 y quedara como el diseño lo demuestra.

Es bobeda segura de poco peso, por ser tabicada de sencillo; y yo la tengo echa de quarenta pies de largo y diez y ocho de ancho; con solos tres pies de buelta (San Nicolás 1639, folio 92)

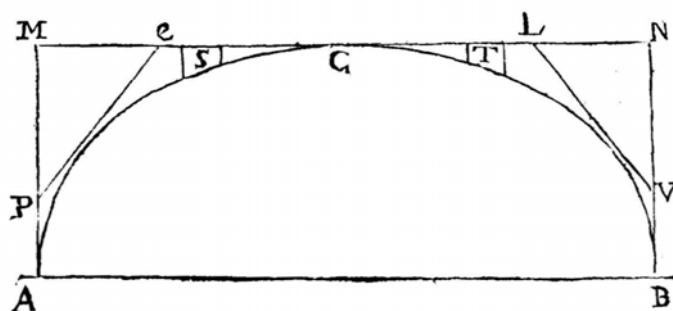


Figura 2.1: Dibujo que explica la construcción de una bóveda tabicada «de sencillo» colgada de piezas de madera (San Nicolás 1639, folio 92)

2.2.1. Formas, cerchas y cimbras

Las bóvedas tabicadas siempre se han asociado a la construcción sin cimbras: la ligereza de los materiales empleados y el uso de conglomerantes de fraguado rápido para la primera capa lo hacen posible.

Pero incluso así es difícil encontrar ejemplos que no apoyen la construcción en algún tipo de medio auxiliar, ya que es mucho más sencillo el replanteo y el control de la forma. Se citan con nombres diversos: cerchas, cerchones, formas, camones, sarchones y también cimbras.

Todos los autores de tratados recogen estos métodos, distintos en función de la forma de la bóveda: cerchas desplazables según la directriz para bóvedas de cañón, camones según las diagonales en bóvedas de arista y esquifadas, simples cintreles en las medias naranjas. Los métodos recogidos son muy ingeniosos, buscando siempre un máximo ahorro de material: solo se colocan elementos rígidos donde son estrictamente necesarios, para el resto se utilizan hilos; además, hay muchos elementos móviles, que se reutilizan.

De los autores anteriores al siglo XIX, el más explícito es Fray Lorenzo, que describe los métodos de cimbrado agrupados por tipos de bóvedas:

No las considera necesarias en absoluto en la construcción de la media naranja, que se puede cerrar con ayuda de un reglón atado a su centro si es esférica, ver figura 2.2.

Siendo tabicada no necesita de cimbra ninguna y así, en el centro del anillo, a nivel del asiento de la media naranja, fija un reglón con un muelle que ande alrededor y el reglón así fijo ha de servir de punto o cintrel para labrar la media naranja, teniendo al fin de punto una empalma del grueso del ladrillo para que en ella misma descansen cada ladrillo asentado, en el interín de que otro asientas y haciendo así en todas las hiladas, acabarás la media naranja con toda perfección (San Nicolás 1639, folios 93v y 94)

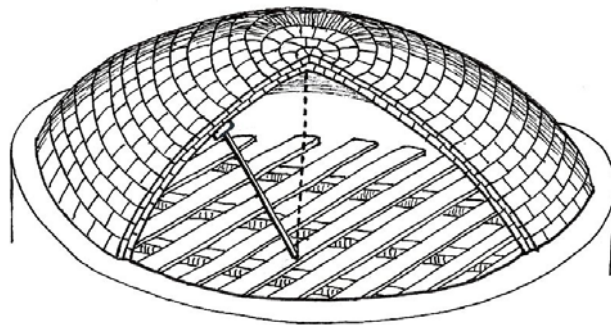


Figura 2.2. Procedimiento para construir una media naranja esférica de ladrillo tabicado, según Fray Lorenzo de San Nicolás. El dibujo se ha hecho tomando como base el que dibuja Luis Moya (1957, 12). Fray Lorenzo propone utilizar una pieza rígida «reglón» en lugar de un cordel, con una «empalma» al final, nueva pieza de madera en la que apoya el ladrillo hasta que fragüe. Dibujo de Fabián López Ulloa.

Y con varios reglones si es prolongada en planta:

Si fuere prolongada, la labrarás con dos puntos semejantes al dicho, y el asiento dellos ha de ser de tal suerte, que el prolongo quede entre uno y otro, y tabicarás con cada uno la parte que le toca de su media circunferencia, y lo demás con un cordel, que tenga por centro la mitad del prolongo.

El procedimiento al que hace referencia Fray Lorenzo tiene relación con los trazados de óvalos en planta que también explica en su tratado, ver figura 2.3.

Nota que podrás hazer y trazar qualesquiera obalos, sean grandes quanto quisieres, con solo guardar los puntos según quedan demostrados, y trazandolos con cordel sera lo mismo; y si se ofreciere labrarlos de cantería o albañilería lo harás, echando cintreles en los puntos, y con cada uno labrarás la parte que le toca (San Nicolás 1639, fol. 150v)
Diximos al principio, que la bóveda prolongada de media naranja, se avia de labrar con dos puntos, esto es, suponiendo passa de uno, ò dos pies; mas siendo más el prolongo,

que venga a ser figura obal, ò obalo: en tal caso se ha de labrara con quatro puntos, ò cintreles, que con otros tanto se traça el obalo, como en su lugar dirèmos. He advertido esto, porque se vâ introduziendo en España este genero de bobeda: y assi la tiene la Encarnacion de Alcalá de Henares (San Nicolás 1639, fol. 95v)

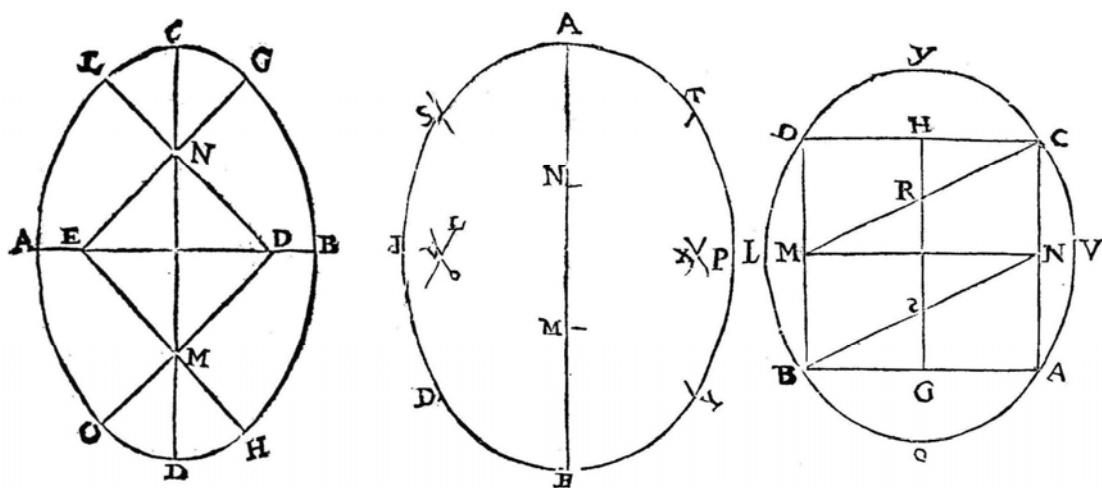


Figura 2.3. Procedimientos explicados por Fray Lorenzo para trazar óvalos, con ayuda de cintreles (San Nicolás 1639, fol. 150-151). El más habitual indica que es el del centro. El trazado de la planta, con ayuda de hilos, es muy similar al que describe para bóvedas tabicadas.

Para construir una media naranja rebajada y con planta circular:

Si la media naranja fuere rebaxada y tabicada, repartiràs las hiladas que en toda ella te cabe por el pitipie, y repartidas, ò conocidas, miraràs los que quieres rebaxar, y repartirlo has en otras tantas partes quantas fuere las hiladas, y señalarlas en el punto, ò reglon, y a cada hilada la iras cortando la parte que la toca, y llegando a cerrar, hallaràs aver rebaxado la bobeda la parte que querías

Si además de rebajada es prolongada:

Y si acaso huvieres de rebaxar la bobeda, y fuere prolongada, señalando el rebaxo con los dos puntos, ò reglones, y cortando los dos a cada hilada la parte que le toca, saldrá como en la passada; y assi haràs las semejantes.

Para otros tipos de bóvedas, Fray Lorenzo recomienda el uso de cimbras ligeras que ayuden a controlar la forma de la bóvedas.

En las bóvedas de cañón, puede hacerse una cercha de tablas siguiendo la directriz de la bóveda. Pero para Fray Lorenzo es mejor hacer dos iguales y situarlas en paralelo, ya

que así pueden trabarse las hiladas. Recomienda que la cercha pueda dividirse en dos para facilitar su manejo:

Y según su buelta, en una parte llana harás las cerchas de tablas, por lo menos dos de ellas, para que a trechos la vayas tabicando y un trecho cerrado, empezaras otro, llevando trabadas las hiladas como si fuese sillería, cada hilada de ladrillo de una parte a otra; aunque también puedes echar la hilada según va la vuelta y esto se puede hacer con una sola cercha, más por mejor tengo la que se tabica por el asiento de una parte a otra, y así como la vayas tabicando, la irás doblando. (...) Las cerchas haras de suerte, que queden en dos medias, para que con facilidad las asientes y quites (San Nicolás 1639, folio 91v)

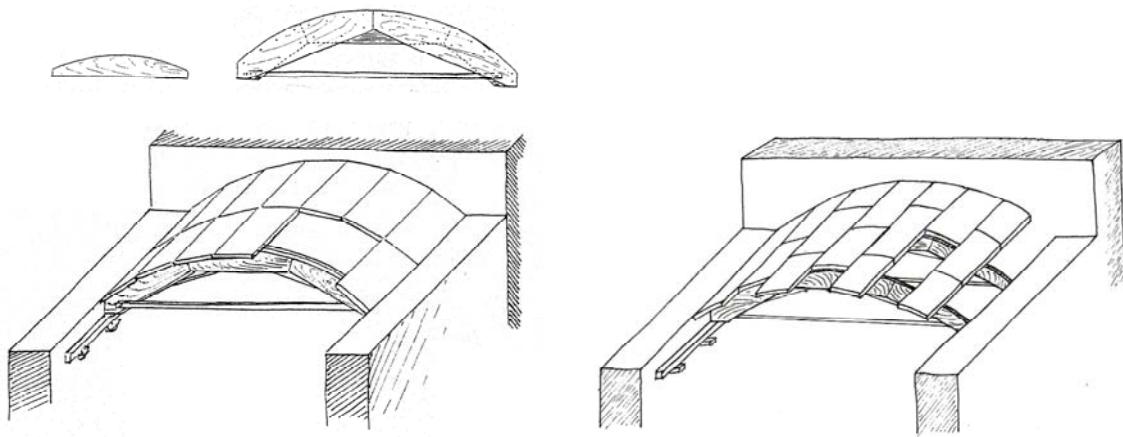


Figura 2.2. Procedimientos para construir una bóveda tabicada de cañón. A la izquierda, dibujo de Folguera (ca. 1915), con una sola cercha y las hiladas sin trabar. Folguera dibuja también las cerchas, en este caso un camón de madera formado por una o varias piezas si va creciendo de tamaño. A la derecha, según Fray Lorenzo con dos cerchas paralelas que permiten trabar las hiladas. Fray Lorenzo también habla de los camones divididos en dos piezas, para ponerlas y quitarlas más fácilmente. Dibujo de Fabián López Ulloa.

En bóvedas baídas, los procedimientos son muy similares a los de la media naranja, ya que la forma es la misma y sólo se diferencia en que arranca sobre planta cuadrada:

conocido el centro, que es donde se cruzan, fixaras un reglon semejante al de la media naranja, y con el irás tabicando (...) Puede ofrecerse, que tambien tenga esta bóveda algun prolongo, y que sea rebaxada: en tal caso sentaras los dos puntos, dexando el prolongo entre los dos, como en la media naranja diximos (San Nicolás 1639, folio 96)

Pero para las bóvedas baídas, Fray Lorenzo recomienda el uso de cimbras según la diagonal:

Puédese tabicar sin cimbras esta bóveda, más por mejor tengo que asientes cuatro cerchones en diagonal, dando la vuelta de medio punto por el mismo diagonal, para que así obres con más seguridad. (...) Si fuere rebaxada, de necesidad lo han de ser los arcos que la acompañan, y assi haràs los cerchones rebaxados, según los arcos lo estuvieren, y en el tabicarla guardaràs el orden de la media naranja (San Nicolás 1639, folio 96-96v)

En las bóvedas esquifadas, también indica el uso de cimbras en las diagonales para asegurar la forma correcta. Pero pueden ser mucho más ligera que con otros materiales en los que se disponen más cerchones y se cuaja de tablas el espacio entre ellos, en lugar de fijar la posición del ladrillo con un cordel como se hace en las tabicadas.

Aviendo de ser tabicada, haràs cerchones en diagonal (...) Asentados los cerchones iràs tabicando, empezando de cuadrado, sobre los cuatro lienzos, tirando el cordel de un ángulo a otro, y las cimbras son las que van gobernando toda la bóveda, formando sobre ellas los cuatro rincones o ángulos (...) Abiendo de ser de rosca de ladrillo, porqué tiene mayor peso, habrá menester más cimbras, y así, además de las cuatro que tiene por diagonal, echaràs otras dos por frente en la mitad de los lienzos (...) y quaxadas de tablas (San Nicolás 1639, folio 98v)

En las bóvedas de arista, igual que en las esquifadas, se colocarán cimbras en las esquinas: «Sentadas las, cimbras monteadas las formas, se va tabicando de la forma a la cimbra» (San Nicolás 1639, folio 101b)

Otro aspecto a destacar es el uso de las propias bóvedas tabicadas como cimbra de otras más pesadas. Muchos autores posteriores, del siglo XIX, describen esta función de las tabicadas, y también lo hace Fray Lorenzo:

Si esta bóveda hubiere de ser de rosca de ladrillo, será necesario que toda ella vaya bien fortalecida de cerchones y mientras mas mejor (...) Sería mi parecer que los cerchones dejases un grueso de ladrillos más bajos y encima la tabicases de ladrillo, para que quedase por cimbra lo tabicado y encima sentases tu rosca de ladrillo. (San Nicolás 1639, folio 96v)

2.2.2. *Macizados y lengüetas*

Fray Lorenzo es muy insistente en la necesidad de macizar los riñones hasta $1/3$ de la altura de la bóveda y construir lo que llama «lengüetas» (costillas de ladrillo por el extradós) hasta $2/3$ de la altura. Estos recursos son especialmente importantes en las

bóvedas tabicadas, ya que incrementan su pequeño espesor con un material de comportamiento similar al ladrillo lo que les permite resistir cargas móviles, concentradas, asimétricas, etc. Fray Lorenzo es consciente de la función estructural de estos elementos y así lo observa en varios puntos de las descripciones del proceso de ejecución de las distintas bóvedas.¹⁶

En bóvedas de cañón:

y macizando la embocaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bóvedas, echando sus lengüetas a trechos, que levanten el otro tercio, para que así reciban todo el empuje o peso de la bóveda (San Nicolás 1639, folio 91v)

En medias naranjas:

Esta, y la passada y la que siguiere [se refiere a medias naranjas de rosca de ladrillo, tabicadas y de cantería], sacaràs sus enjarjados, ò embecaduras, hasta el primer tercio; y hasta el segundo, las lengüetas (creo que nadie ignorarà que sean lengüetas, y por esso no me he detenido en declararlo.) (San Nicolás 1639, folio 94)

En bóvedas baídas, siguiendo las diagonales:

macizaras el primer tercio de la embecadura, ò trasdosados, y doblada según la necesidad lo pidiere, echaràs lengüetas, que sirven de estribos y estas han de coger la tirantez de la diagonal, para que resistan a su empujo y queden con seguridad y firmeza (San Nicolás 1639, folio 96v)

En las bóvedas de arista o con lunetos es en las únicas en las que no ve esta necesidad, ya que los pliegues hacen una función similar:

Puedese hazer en los quatro lienços de pared, en la misma bobeda, hazer lunetas (...) mas si llevare estas, no ay que echar lenguetas para su fortaleza, sino solo macizarla hasta su primer tercio (San Nicolás 1639, folio 98v)

Trata del quinto genero de bobeda que llamamos Capilla por arista (...) No necesita esta bobeda de lengüetas, o estribos, por causa que tienen los empujos contra sus mismas diagonales: mas necesita de macizar las embecaduras hasta el primer tercio, y con esto tiene lo suficiente (San Nicolás 1639, folio 101v)

¹⁶ La función estructural de las lengüetas se estudia con detalle en el capítulo 7 de esta tesis.

En todas las bóvedas que sus vueltas son cañón seguido o por esquilfe, están muy bien las lunetas, y no sólo adornan y hermosean el edificio, sino que fortalecen las bóvedas, y la que lleva lunetas, poca necesidad tiene de estribos o lengüetas (San Nicolás 1639, folio 103v)

No sólo en el tratado de Fray Lorenzo aparecen lengüetas y macizados, también se describen en contratos de obra de fecha bastante anterior:

El contrato de obras para la iglesia del Monasterio de los Capuchinos de la Sangre, en Valencia, se firma en 1597, a cargo del maestro de obras Francesc Anton.¹⁷ Está cubierta por una bóveda baída tabicada, de cañón y con 8 metros de luz, reforzada con arcos fajones hacia arriba. En él se recoge la construcción de lengüetas hasta el tercio de la altura de la bóveda:

Se ha de hazer la buelta de la cubierta de dicha yglesia, la qual ha de ser de buelta por ygual, hecha en dos repartitiones, con hun arco en medio de la dicha cubierta, que no se muestre nada del por la parte de la yglesia (...) y dicha cubierta ha de ser de taybique doble lafardado, y ensima de la dicha cubierta se han de hazer sribos hasta el tercio de dicha cubierta de medio ladrillo de grueso paredado de ladrillo y alges hasta el tercio de las bueltas (Galarza 2009, 524)

En el contrato para la remodelación de la Iglesia de los Santos Juanes, ya citada en el artículo anterior, también se especifican lengüetas, para conectar las bóvedas nuevas con los nervios de las antiguas. En Marín (2012) se estudian con detalle estas conexiones.

(..) se han de poner estribos de medio ladrillo y yeso entre los lunetos y los arcos hasta los tercios de las bóvedas, de la forma como se acostumbra, haciendo también estribos de tabique doble sobre los lunetos y cuantos estribos sean necesarios para la mayor seguridad [de la obra] (Galarza 2009, 529-530)

2.3. Medidas de los estribos

Nuevamente es Fray Lorenzo el más explícito sobre el tema de los estribos. Las reglas de Fray Lorenzo son geométricas y muy sencillas: una proporción entre luz y espesor

¹⁷ Galarza 2009. Este es el mismo maestro que firma el contrato del monasterio de San Miguel de los Reyes

de muro necesario, diferenciando lo que ocurre si el muro tiene contrafuertes y si no los tiene.¹⁸ Sin contrafuertes, Fray Lorenzo recomienda un espesor de $L/5$ para los muros que resisten una bóveda tabicada (frente a $L/4$ para sostener una bóveda de rosca de ladrillo y $L/3$ para una de piedra). Y con ellos, da unas medidas concretas, también menores que las de piedra y rosca de ladrillo.

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

La regla de $L/3$ para estribos es muy habitual en el Renacimiento: «Comúnmente se lleva que cualquiera Templo tenga de grueso en sus paredes la tercera parte de su ancho (...). También ha de llevar este grueso siendo la bóveda de piedra, por ser materia más pesada» (San Nicolás 1639, folio 31) pero Fray Lorenzo es el único que explicita medidas para otros materiales.

Frente a estas proporciones, Fray Lorenzo también deja claro lo que ocurre cuando un muro no tiene que resistir empujes

Porque estas quatro paredes no hacen sino sustentarse a si mismas, sin que bóveda alguna cargue en ellas, sino sólo las armaduras (...) tendrá de grueso la séptima parte de su ancho; y siendo de ladrillo las paredes, tendrán de grueso la octava parte de su ancho (San Nicolás 1639, folio 31v)

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

En el capítulo 26, habla de cómo «fortificar» otros edificios. Como suelen tener menor altura se podrán usar anchos menores.

¹⁸ Los valores son válidos para la bóveda de cañón de un templo, en las que lo habitual era el arco de medio punto.

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

Incluso especifica que usando bóvedas tabicadas, en edificios de pisos, no es necesario colocar estribos porque los propios suelos sirven de tirantes.

Tambien en las que fueren tabicadas no necesitan de ningun estrivo porque los suelos olladeros sustentan sus empujos, sirviendo de tirantes, de que trataremos adelante: mas en las piezas que no llevan bobedas ningunas, se debe guardar diferente grueso y asi no se le dara más que la sexta parte de su ancho: con tal que, los suelos no excedan de dos tres, que excediendo arbitrariamente podras echar el grueso que te pareciere (San Nicolás 1639, folio 33v)

En Tosca (1727) encontramos algunas indicaciones, mucho menos explícitas: cita la regla renacentista del tercio y en concreto sobre las tabicadas, sólo indica que su empuje es menor que el de otras.

Otros dan por regla general que sean los estrivos el tercio del diametro AC, que es algo mas de lo que se determina por la regla primera. Pero lo cierto es que en este punto se ha de estar a lo experimentado por los artifices, que prudentemente atienden las varias circunstancias que pueden ocurrir. Parece requiere mas estribos el arco o boveda de piedra que la de ladrillo de rosca y esta mas que la de tabicado. (Tosca 1727, 117)

Varios autores del siglo XVIII reproducen las reglas de Fray Lorenzo sobre el ancho de muros y estribos:

En Briguz y Brú (1738)¹⁹ se reproducen las reglas sin citar la fuente:

En orden a la gordaria de las paredes de los Templos, no se puede dar regla general, porque los materiales como piedra, ladrillo, cal, yeso, etc. no son igualmente buenos en todos los paises pero sin embargo dire lo que en esto suelen practicar los Arquitectos (...) Si las bóvedas fueren tabicadas, y con estribos, se dará estos algo menos de la quarta parte, y a las paredes la octava parte de la anchura de la nave. Si la bóveda no llevare estribos, se dará a las paredes la quinta parte (Briguz y Brú 1738, 98)

¹⁹ Atanasio Briguz y Bru fue arquitecto y en 1738 publica en Valencia el tratado *Escuela de Arquitectura Civil*.

En Berruguilla (1747)²⁰ encontramos la misma repetición, igualmente sin cita:

Cuando la bóveda hubiere de ser tabicada y doblada de ladrillo, se le dará a la pared la octava parte de su ancho y los estribos tendrán la cuarta parte de su ancho.
Si no se pudiere echar estribos, se dará a la pared la quinta parte de su ancho.
Las paredes del frontispicio y la del testero y las de los laterales que son quatro, si son de cantería, les daras la séptima parte de su ancho; y siendo de ladrillo se le dara la octava parte de su ancho (García Berruguilla 1747, 130)

Por último, en Plo y Camín²¹ volvemos a encontrar una única referencia a las bóvedas tabicadas repitiendo las reglas de Fray Lorenzo, aunque, por fin, Plo y Camín sí le cita

En bobedas, que han de ser tabicadas de ladrillo dicen que se les de a los estribos la cuarta parte de su diámetro, y a las paredes la octava (véase Fray Laurencio de San Nicolás en su primera parte de Arte y Uso de Arquitectura, cap 20, fol 52 y 53) donde supone sea la vuelta de medio punto (Plo y Camín 1767, 455-56)

El tratado de Plo y Camín es bastante extenso en lo que se refiere a la medida que debe darse a los estribos. Cita muchas reglas de tratados anteriores, incluida una muy extendida en el momento y de posible origen gótico, consistente en dividir en tres partes iguales la longitud del arco cuyo estribo queremos obtener, unir una de las divisiones con el arranque y prolongar esta recta la misma distancia hacia el otro lado. Esta regla la citan casi todos los autores estudiados, pero da unos espesores insuficientes para bóvedas de cantería y es improbable que realmente se utilizara.²²

²⁰ Juan García Berruguilla fue un arquitecto, cartógrafo y matemático español del siglo XVIII, natural de Granada. Se dedicó principalmente a la inspección de obras y proyectos. Escribió en 1747 un libro de geometría para arquitectos y agrimensores. Este tratado habla poco de construcción, únicamente en el último capítulo, dedicado a las reglas sobre los estribos de los arcos.

²¹ Antonio Plo y Camín fue arquitecto. Su obra más destacada fue la iglesia de San Francisco el Grande de Madrid, en la que intervino para cerrar la cúpula, la mayor de España, con 33 m de diámetro (Huerta, 2004). Su reconocimiento público era muy amplio, y destacó como tratadista de arquitectura, con su obra *El Arquitecto Práctico, Civil, Militar, y Agrimensor*, dividido en tres libros y publicado en 1767

²² Un estudio del origen y difusión de esta reglas proporcional puede consultarse en Huerta (2004)

Plo y Camín, que era un constructor experimentado, encuentra incoherencias entre las reglas que reproduce en su tratado «Digo, pues, que según unas opiniones y las otras no se halla conformidad entre ellas ni altura determinada para los pies derechos, sobre quien han de cargar los arcos» (Plo y Camín 1767, 456) y además se da cuenta de que algunas llevan a unos espesores muy pequeños, incluso para las bóvedas tabicadas que Plo y Camín tiene claro que empujan menos que el resto por su menor peso «que ninguna de las tres estrivaciones son suficientes para tales arcos, y que escasamente podrán sufrir las bóvedas tabicadas; aunque sus arcos torales sean de ladrillo de rosca» (Plo y Camín 1767, 459)

Acerca del tamaño de los estribos necesarios para las bóvedas tabicadas resulta muy interesante el pleito acerca de la iglesia de San Martín de Valdeiglesias, en 1630, que se cita en Marías (1991):

El maestro Pedro Sánchez proyecta la iglesia con bóvedas tabicadas y un espesor de muros de $L/9$. Hay una controversia con otro maestro Pedro Peña que indica (al igual que dirá unos años después Fray Lorenzo) que son necesarios muros de espesor $L/5$.²³ Finalmente, se impone la opinión del arquitecto real Juan Gómez de Mora, que indica un espesor de $L/6$ (Marías 1991). Lo más interesante es la defensa del maestro de obras Pedro Sánchez, afirmando que, al usar bóvedas tabicadas:

se pueden hacer en paredes más delgadas como tenemos experiencia de todas las obras que se han fabricado a lo moderno en Madrid que es donde mejor lo han entendido de toda España de 100 años a esta parte que se han adelgazado todos los costes y perfeccionado y fortalecido muchísimo más de lo que dicen los autores (Marías 1991, 76)

²³ Con este maestro Pedro Peña, que en este pleito opina como él, tuvo Fray Lorenzo otras desavenencias, ya que Pedro de la Peña critica algunos aspectos de la primera parte de su tratado (San Nicolás 1639), y Fray Lorenzo responde a sus críticas al inicio de la segunda parte (San Nicolás 1663, 2-21). Una de las críticas se refiere en concreto al tamaño y la necesidad de colocar estribos en las iglesias: «quien me podrá negar, que ha de tener el Templo, o muy gruesas paredes, o estribos? Y todos los que no han guardado en sus edificios estas reglas, las ruinas de ellos lo han manifestado; y aunque pudiera yo referir algunos descuidos de Pedro de la Peña» (San Nicolás 1663, 11)

Este texto es muy revelador, ya que de él se deduce que en Madrid llevan 100 años construyéndose bóvedas tabicadas, que hay una identificación entre ellas y el estilo «moderno» y que los tratadistas no han recogido todavía esta forma de construir, o al menos han sido muy conservadores hacia esta novedad.

En el mismo texto, Pedro Sánchez indica algunos edificios contruidos de esta manera: San Pedro Mártir de Toledo, San Sebastián y el convento de Atocha en Madrid (Marías 1991)

CAPÍTULO 3

LA INFLUENCIA FRANCESA

Durante los siglos XVIII y XIX, la cultura francesa fue la más influyente en Europa. En la misma medida lo fueron la arquitectura y los tratados que sobre ella se escribieron. La bóveda tabicada se extendió por Francia a lo largo del siglo XVIII desde la zona del Rosellón, donde se construía tradicionalmente por influencia catalana.¹ El sistema tabicado despertó el interés de algunos personajes influyentes y acabó siendo reproducido en los más conocidos tratados franceses, con algunas incorrecciones derivadas de la falta de esta tradición constructiva en el país. Finalmente, varios tratadistas españoles traducen o reproducen las ideas escritas por los autores franceses, extendiendo por España algunas ideas erróneas, especialmente acerca de su comportamiento estructural.

3.1. Los inicios de la bóveda tabicada en Francia

En Francia las bóvedas tabicadas se construían tradicionalmente en la región del Rosellón, que formó parte de la Corona de Aragón hasta 1659. Desde allí se extendió al resto del país en la segunda mitad del siglo XVIII, comenzando por las regiones limítrofes (Languedoc y Provenza), principalmente en la construcción de conventos de ordenes con origen español.² En 1718, el Duque de Belle Isle³ atraviesa el Rosellón en una campaña militar y queda impresionado por este sistema constructivo, que

¹ El Rosellón es una región histórica, que se corresponde con el actual departamento francés de los Pirineos Orientales. Perteneció a la Corona de Aragón desde 1172 hasta 1659.

² En 1707, un fraile catalán introduce las bóvedas tabicadas en el convento Capuchino de Castelnaudary, en el Languedoc. En 1713, los Carmelitas Descalzos construyen bóvedas tabicadas en su iglesia de Toulouse. Hacia 1740 hay numerosos ejemplos construidos en el Languedoc y la Provenza. (Bannister 1968)

³ Charles Fourquet (1684-1762), oficial y diplomático francés. Fue Duque de Belle Isle por herencia y Mariscal de Francia desde 1741 por sus méritos en la guerra de la Sucesión Austriaca (1740-1748)

reproducirá en 1742 en su castillo de Bizy, cerca de Paris,⁴ ver figura 3.1. Más tarde (1759-1762), impulsará su uso en los importantes edificios del Ministerio de la Guerra, en Versailles.

En 1754 el conde d'Espie, un militar retirado residente en Toulouse al que han llamado la atención las bóvedas tabicadas que allí se construyen, escribe el libro *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles...* que dará a conocer el sistema en toda Francia. En él recoge las realizaciones tradicionales en el Rosellón y Languedoc, las bóvedas de Bizy construidas por el Mariscal de Belle Isle y otras más construidas por él mismo en su vivienda de Toulouse. Poco después, las ideas de Espie fueron recogidas por Pierre Patte, que continuó el tratado iniciado por Blondel (Blondel y Patte 1771-77), añadiendo nuevos ejemplos construidos en Francia con el sistema tabicado: las bóvedas del Ministerio de la Guerra y las del Palais Bourbon.⁵ También se recogen las construcciones en Lyon, donde se edificaban viviendas de varios pisos cubiertas por bóvedas *à la Roussillon*. Finalmente, Rondelet reproduce en las numerosas ediciones de su tratado *L'art de bâtir* los contenidos sobre bóvedas tabicadas que aparecen en Blondel y Patte (1771-77)

3.1.1. El libro del conde d'Espie

El conde d'Espie es un militar retirado originario de la región de Toulouse, interesado por las bóvedas tabicadas que allí se construían. En 1754 escribe el libro *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles ou traité sur la construction des voutes, faites avec des briques & du plâtre, dites voutes plates, & d'un toit de brique, sans charpente, appellé Comble Briqueté*.

⁴ Para construir estas bóvedas al norte de Francia tuvo que «importar» trabajadores de la zona de Perpiñán (Bannister 1968, 164)

⁵ En 1759, por ordenes del duque de Belle Isle y bajo la supervisión de J. B. Berthier (jefe de los ingenieros topógrafos reales) comienza la construcción de una gran edificio para Ministerio de la Guerra, en Versailles, en el que buena parte de las estancias se cubre con bóvedas *à la Roussillon*, especialmente en las zonas de archivo. En el Palais Bourbon (Paris) se construyen a partir de 1764 bóvedas siguiendo el sistema propuesto por Espie, aunque éstas van atirantadas (Bannister, 1968)

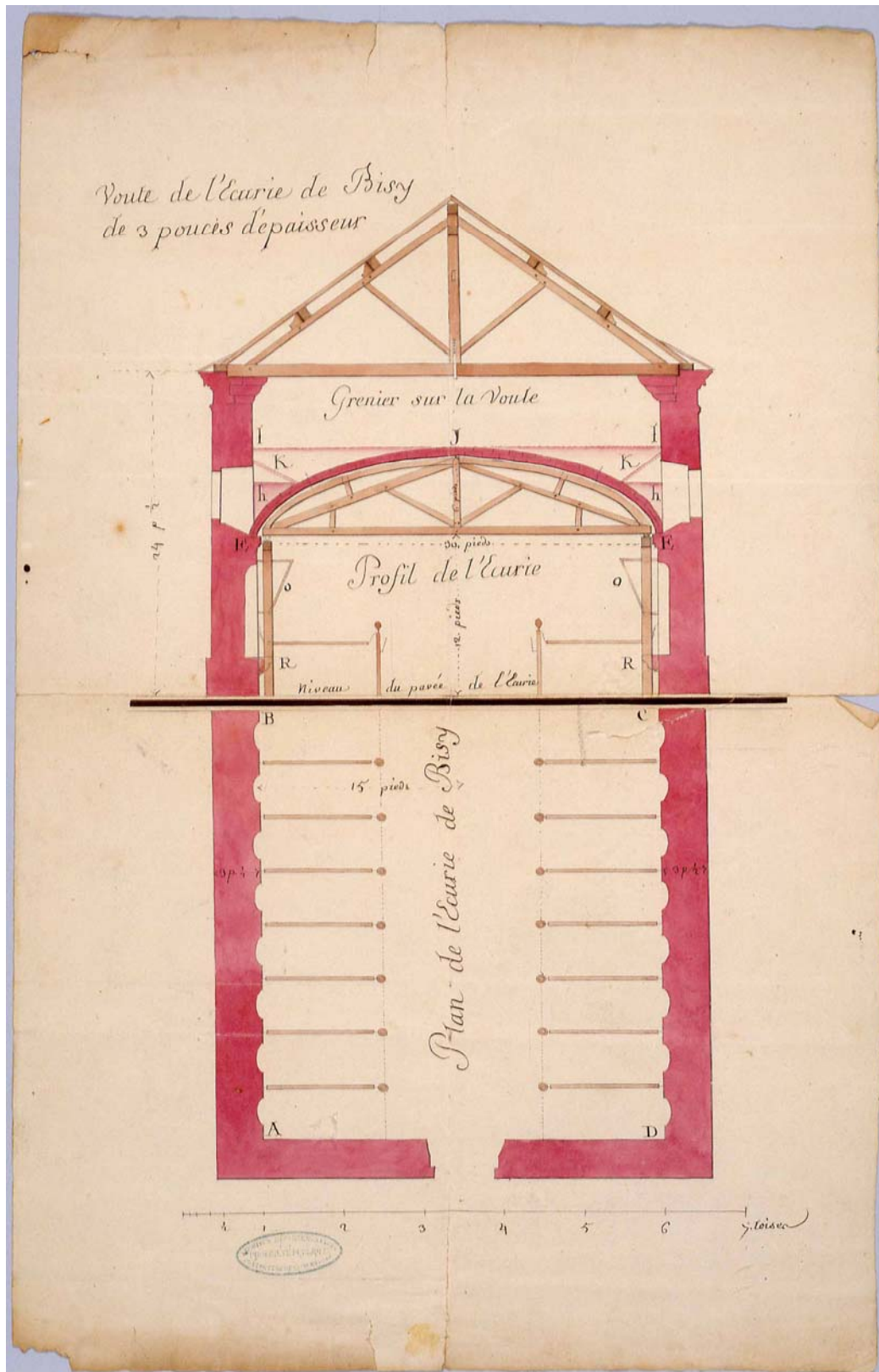


Figura 3.1. Planta y sección de las caballerizas de Bizy, construidas con bóvedas tabicadas en Francia en 1741, a iniciativa del duque de Belle Isle. La bóveda cubre 30 pies de luz con 2 hojas de ladrillo (3 pulgadas de espesor). Es un arco carpanel con una flecha $L/5$. Encima tiene un suelo plano para granero, apoyando en costillas de ladrillo. (Fuente desconocida)

Este libro, a pesar de estar escrito por un aficionado a la arquitectura y de contener numerosas incorrecciones acerca de su construcción y sobre todo de su funcionamiento estructural, será el que dé a conocer el sistema tabicado en Francia y en otros países de Europa.⁶

Espie llama al sistema general *Comble Briqueté*, lo que incluye la propia bóveda tabicada y toda la obra de albañilería sobre ella para la formación del tejado, ver figura 3.1.

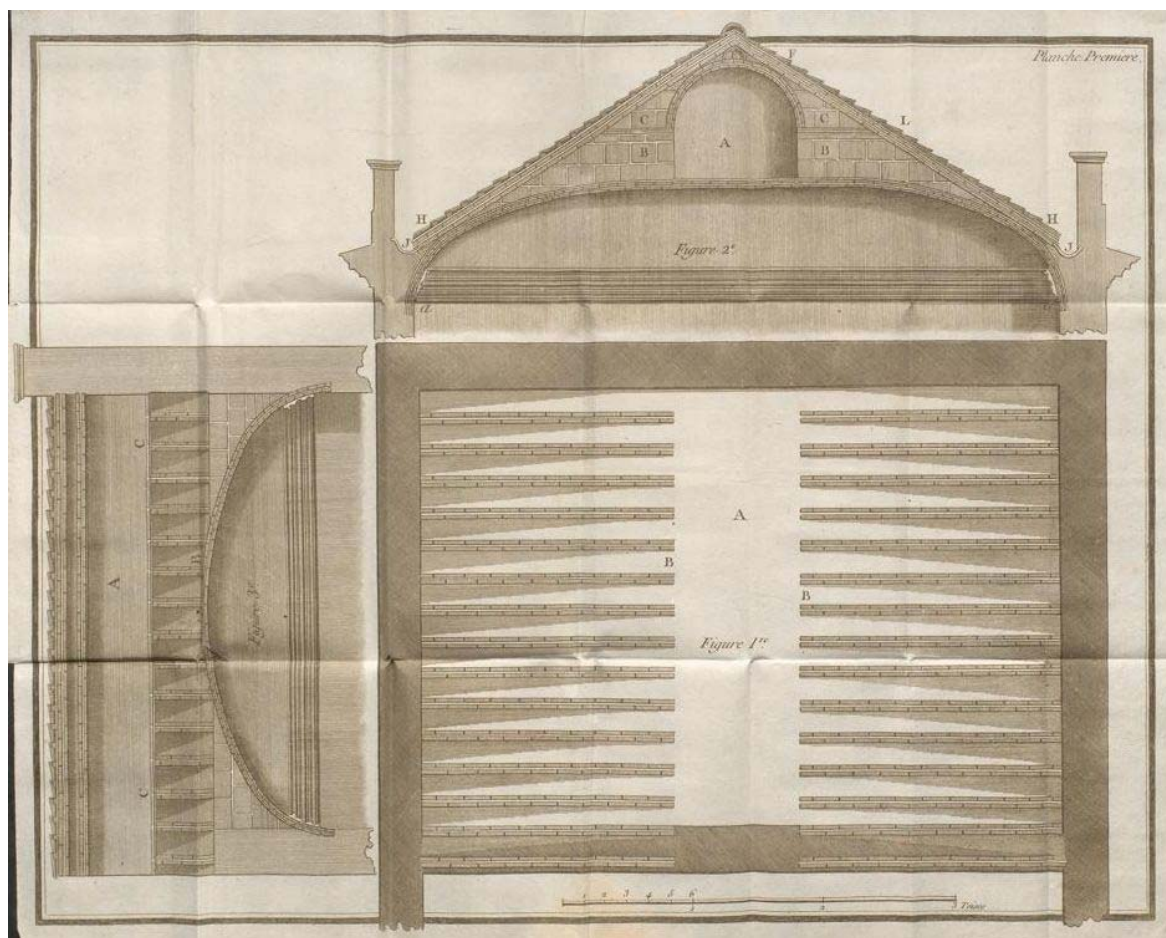


Figura 3.2: Sistema de formación de tejados incombustible con albañilería, llamado por Espie *Comble Briqueté*: la bóveda cubre un espacio rectángulo de perfil elíptico, con una flecha de $L/4$ en el sentido menor del rectángulo. Se rellena casi hasta la clave y encima se construyen tabiques cada 1 pie para llegar al tejado, dejando un corredor central para poder recorrer el bajo cubierta. El tablero que recibe las tejas es también de dos hojas de ladrillo (Espie 1754, Lam. I)

En la introducción al libro, Espie cita las cuadras del castillo de Bizy, construidas por iniciativa del Duque de Belle Isle unos años antes, ver figura 3.1: «C'est M. le Maréchal

⁶ El libro se traduce al inglés en 1756, al alemán en 1760 y al español en 1776 (Huerta 2000, 89). De la traducción española, a cargo de Sotomayor, se hablará más adelante.

de Belleisle qui a donné dans ce Pays-ci la première idée de ces Voutes: il a fait venir pour en construire dans son Château de Biszy, des Ouvriers de Perpignan» (Espie 1754, 10).

En el primer capítulo del libro: *Des Voutes plates*,⁷ Espie describe detalladamente la forma en que hay que construir estas bóvedas. Destaca que deben usarse buenos materiales: «Il faut observer de n'employer dans ces Voutes que des Briques bien cuites (...) & que le Plâtre ne soit point éventé (..) afin qu'il soit dans toute sa force» (Espie 1754, 20) y que pueden construirse bóvedas de cualquier forma, aunque la que a Espie le parece más adecuada es la *impériale de carosse*, que cubre un espacio rectangular con una bóveda elíptica o carpanel según la dimensión menor del espacio cubierto, e igual curvatura en los arranques en la dimensión mayor, de manera que en ésta tendrá una zona central horizontal. Esta geometría de bóveda es la que dibuja en la primera lámina de su libro, ver figura 3.2.

Las cimbras a utilizar serán ligeras «ces ceintres ne sont pas faits pour porter ou soutenir la Voute; mais seulement pour guider & conduire l'Ouvrier» (Espie 1754, 23).

En cuanto al proceso constructivo, piensa que las bóvedas deben construirse sobre muros viejos, al menos tras seis meses de reposo desde su construcción, «afin de leur laisser faire leurs affaissements naturels» (Espie 1754, 23) y que es importante apoyar la primera fila de ladrillos en una roza abierta en el muro en todo el perímetro, de esta manera «ces Voutes soient solides & qu'elles ne fassent point de poussée contre les murs» (Espie 1754, 23-24). Se van colocando los ladrillos por filas siguiendo el perímetro, mojándolos antes de poner yeso en dos juntas, las que tienen que tocar con los ladrillos ya puestos. Para controlar bien la posición se tiran unos hilos en paralelo a los muros perimetrales que marcan las hiladas. Es importante que las juntas estén contrapeadas y, aunque la bóveda puede ser de una sola hoja, son más sólidas con dos, construidas de manera que la hoja superior también presente las juntas contrapeadas con la inferior. La segunda hoja también se recibe con yeso y se coloca igualmente por

⁷ El nombre *voûte plate* que aparece en el libro de Espie será una de las acepciones más extendidas como traducción de bóveda tabicada en Francia, junto con *voûte à la Roussillon*. Posteriormente en España se las llamará también bóvedas llanas, traducido a su vez del francés.

filas, empezando la primera fila del doblado en cuanto se termina la segunda fila de la primera hoja. Se va avanzando así hacia el centro, donde se cerrará con la clave.

Una vez construida la bóveda, es necesario rellenar la parte inferior de la misma con yeso y trozos de ladrillo y construir unos tabiquillos de refuerzo, las *lengiüetas* que ya citara Fray Lorenzo.

Le petit espace qui reste entre le mur & de a courbure de la Voute, est garni avec du Plâtre & des petits morceaux de Briques appellés riblons, jusques à la hauteur de dix à douze pouces, alors on faifit les reins de la Voûte par des petits contreforts placés à 4 ou 5 pieds de distance les uns des autres; on observe d'en construire principalement à chacun des quatre angles de la Voute (Espie 1754, 32)

Por último, se remata la bóveda al interior con una cornisa de ladrillo que oculta la zona de mayor curvatura. Esto es importante para Espie dado que una de las ventajas que destaca de estas bóvedas es que son tan rebajadas que pueden imitar a un forjado de madera.⁸

En el texto de Espie aparecen por primera vez algunos aspectos sobre la construcción de bóvedas tabicadas: el apoyo sobre paredes viejas que ya hayan hecho su asiento y la necesidad de introducir el ladrillo en una roza hecha en la pared. Ningún autor anterior hace mención del primer tema. Sobre el segundo, en el tratado de Fray Lorenzo encontramos una breve cita relativa a las bóvedas baídas: «Es de advertir que en los arcos torales, assi como vayas tabicando, harás una roza, para que estribando en ella quede la bóveda con suficiente asiento» (San Nicolás 1639, folio 96v). Estas recomendaciones, introducidas por una persona con escasos conocimientos prácticos, se repetirán en los tratados posteriores, tanto franceses como españoles.

También es interesante comparar la descripción del proceso constructivo de Espie con la que hace Fray Lorenzo en su tratado: Espie escribe muchos más detalles, insistiendo en aspectos mínimos como cuanto yeso amasar de una vez, donde hay que aplicarlo, etc. Fray Lorenzo, aun siendo claro y preciso, no llega a tanto detalle. La razón es que

⁸ En el momento en que se escribe este libro, el único material con el que podían construirse forjados planos era la madera, que tenía el inconveniente de su mal comportamiento ante el fuego. Por eso es importante destacar que estas bóvedas de ladrillo, incombustibles, son prácticamente planas.

en España a ningún tratadista se le ocurría escribir lo que todos los albañiles sabían hacer, mientras que en Francia el proceso era más desconocido; pero Espie es un lego en la materia, con lo que le es más difícil discriminar la importancia de cada tema, además de que sus lectores es probable que tampoco tuvieran mucha experiencia en el asunto, ya que en Francia el sistema tabicado no era de uso tan general como en España.

En el siguiente capítulo, *Parallele des Voutes ordinaires avec des Voutes Plates*, Espie expresa sus ideas acerca del funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas, dando lugar a la teoría monolítica (ver capítulo 7 de esta tesis).

Termina este capítulo asegurando el autor que, si alguna de estas bóvedas ha fallado o ha derribado las paredes en las que apoyaba, es por que no se han seguido al pie de la letra las recomendaciones para su construcción que se describen en el primer capítulo, porque los albañiles no eran experimentados. Este comentario viene al caso de un ensayo que Espie realiza en París (que se estudia con detalle en el capítulo 8 de esta tesis), en el que los muros se abrieron y la bóveda se cayó.

3.2. La difusión del sistema

A partir de la publicación del libro de Espie, en Francia crece el interés por las bóvedas tabicadas de manera muy rápida. Algunos autores muy conocidos (Laugier, Rieger) hablan de ellas y otros (Patte, en la continuación del tratado de Blondel y después Rondelet) les dedican capítulos enteros de sus tratados. Un aspecto importante en la difusión del sistema tabicado es la presentación de memorias a la Academia Francesa de Arquitectura y su aprobación por parte de ella, que tardará en llegar y con modificaciones. Algunos ensayos de los que se estudian en el capítulo 8 se enmarcan en esta demostración de la bondad y solidez de las bóvedas tabicadas ante los miembros de la Academia.

3.2.1. *Los escritos del Abate Laugier*

El abate Laugier cita las bóvedas tabicadas en el contexto de su defensa de la arquitectura arquitrabada. Laugier se opone a arcos y bóvedas por su gran peso, que empuja a las paredes obligando a colocar contrafuertes y gruesos muros. Las bóvedas tabicadas, mucho más ligeras, son una buena solución, y más todavía leyendo las afirmaciones de Espie acerca de su falta de empujes.⁹

Cette invention ancienne dans certains pays, & nouvelle pour nous, fait voir qu'il n'est point nécessaire qu'une voûte soit épaisse pour être solide. (...)

M. le Comte d'Espie vient de donner au Public un petit Ouvrage fort instructif sur la maniere de construire les voûtes dont je parle. (...) Les expériences dont il est question dans l'Ouvrage que je cite, prouvent d'une maniere très apparente que ces voûtes n'ont aucune sorte de poussée (Laugier 1755, 132-133)

Une voûte ainsi bridée est d'une force 'a toute épreuve; & s'il est vrai qu'elle n'a point de poussée, elle devient d'une utilité inestimable. Or la preuve qu'elle n'a point de poussée, c'est qu'elle n'exige aucune épaisseur dans les murs qui la supportent. (Laugier 1755, 134)

Laugier, como otros autores franceses, defiende también las bóvedas tabicadas por su carácter incombustible, frente a los forjados de madera habituales en su país:

Cette méthode qui excluroit des bâtimens tous les bois que jusqu'ici on y a jugés nécessaires, ne peut qu'être approuvée de ceux qui connoissent en France le prix du bois , & les divers dangers inséparables de l'emploi qu'on en fait dans le bâtimens. (Laugier 1755, 135-136)

Aunque los libros de Laugier citan las bóvedas tabicadas de manera tangencial, y no añaden nada nuevo sobre su forma de ser construidas o su comportamiento estructural, la gran influencia de estos escritos en sus contemporáneos los hacen importantes en esta fase de difusión del sistema tabicado.

⁹ El libro de Espie, publicado en 1754, debió ser la fuente de Laugier para conocer estas bóvedas, dado que en la primera edición del *Essai sur l'Architecture* (1753) no aparecen y sí en la segunda, de 1755 (González Moreno-Navarro 1993, 135, nota 13)

3.2.2. *La presentación de memorias a la Academia de Arquitectura Francesa*

El rastreo de las comunicaciones acerca de bóvedas tabicadas a la Academia Real de Arquitectura por parte de tratadistas, constructores u observadores del proceso es la mejor manera de seguir la difusión del sistema tabicado en Francia. Dado que no era una forma de construir habitual, conseguir la aprobación de la Academia era importante para convertir un sistema vernáculo en algo oficial, aplicable en grandes obras.

La primera noticia de estas comunicaciones es una carta escrita por M. Duplessy de Montlaur en 1740, en la que describe las caballerizas de Bizy que está construyendo Charles Fourquet en ese momento (Bannister 1968, 164).

En junio de 1747, Michel Tannevot, perteneciente al cuerpo de constructores del rey, presenta a la Academia Real de Arquitectura una memoria en la que describe las bóvedas tabicadas. El sistema no es aprobado, pero se registra la memoria para leerla en la siguiente sesión:

Du lundi 19^e Juin 1747

L'Académie étant assemblée, M. Tannevot a lu u mémoire qui lui a été envoyé au sujet des voûtes avec des briques posées à plat et doublées avec de nouvelles briques posées a plat. Quoique cette pratique ne soit pas approuvée par la Compagnie, on a cependant jugé à propos de faire enregistrer le mémoire pour la conférence suivante (Lemmonier 1920, 74)

El 3 de Julio de 1747 la Academia lee la memoria de Tannevot, reafirmando al inicio su desaprobación del sistema tabicado:

Du lundi 3^e Juillet 1747

Le mémoire dont il est question dans la conférence du 19 juin dernier, la Compagnie a ordonné qu'il seroit enregistré dans la conférence de ce jour, quoiqu'elle n'approuve pas la pratique contenue dans ce mémoire (Lemmonier 1920, 74-75)

A continuación se transcribe la memoria de Tannevot, que describe el sistema tabicado como una novedad en Francia, conocido desde hace 40 años y con origen español. Se citan las construcciones de edificios religiosos en Languedoc y Provenza: conventos de capuchinos en Castelnaudary, Montauban y Narbona, iglesia de Carmelitas Descalzos en Toulouse, de Jesuitas en Perpignan. Después cita el castillo de Bizy. Continúa con

una descripción muy detallada de la forma en que hay que construir estas bóvedas, del estilo de la que encontramos en el libro de Espie.

A pesar de no aprobar el sistema de construcción, es importante que se leyera esta memoria en la Academia, ya que los académicos eran importantes arquitectos del momento. Entre los asistentes a la lectura estaba Blondel, que incluirá las bóvedas tabicadas en su tratado unos años después.

Años más tarde, en 1754 el mismo Tannevot presenta el libro de Espie a la Academia, que por fin aprueba el sistema después de muchas deliberaciones y algunas modificaciones importantes, como la sustitución de las rasillas por ladrillos macizos colocados de canto, con un espesor total de 15 cm (Bannister 1968). De esta manera se construirán algunas bóvedas en Francia, como la que se describe en Blondel y Patte (1771-1777) para el Ministerio de la Guerra.

En Blondel y Patte (1771-77) se describe un ensayo sobre una bóveda tabicada en el Palais Bourbon al que asisten miembros de la Academia Real de Arquitectura. El ensayo es posterior, hacia 1764, y se describe con detalle en el capítulo 8 de esta tesis. Este ensayo, realizado sobre una bóveda tabicada y no con ladrillos de canto, sí convence a los miembros de la Academia.

Por otro lado, el conde d'Espie invita a los miembros de la Academia de Arquitectura de Toulouse a visitar su casa, construida con bóvedas tabicadas, en marzo de 1753. Ellos sí dan su aprobación a esta forma de construir y Espie reproduce el informe que escriben al final de su libro:

Nous avons trouvé qu'ils ne sont faits qu'avec des briques, du plâtre, qu'il n'entre dans leur construction aucune sorte de bois ni fer, que par-là ils se trouvent à l'abri de toute sorte d'incendie, qu'ils sont de plus très-solides, ne s'évant démentis en rien depuis qu'ils ont été construits. Nous avons jugé que tous ces avantages doivent leur donner la préférence sur les Toits ordinaires (Espie 1754, 76)

Parece lógico que la Academia de Toulouse aprobaran el sistema tabicado antes que la de Paris, dado que en el Languedoc era una forma de construir más conocida.

3.2.3 Blondel y Patte: *Cours d'Architecture*

El tratado de Blondel, continuado por Patte,¹⁰ abarca numerosos campos de arquitectura y construcción. Fue un manual muy conocido y utilizado por los arquitectos de la época.

Las bóvedas tabicadas se describen en el capítulo 2 del tomo 6: *De la maniere de construire les planches en briques, dits voutes plates*. El capítulo tiene una introducción y está estructurado en 6 artículos, describiendo en cada uno de ellos los métodos de construir estas bóvedas en diversas regiones de Francia. El último artículo, *Refléxions sur les Voûtes plates, & sur les moyens d'operer leur construction avec succès*, es un resumen de lo que trata en el resto de capítulos, con las ventajas e inconvenientes que presenta cada una de las maneras de construir bóvedas tabicadas en Francia y unas recomendaciones generales sobre su correcta ejecución. Se describen a continuación los distintos apartados de Blondel y Patté (1771-77) dedicados a las bóvedas tabicadas.

3.2.3.a. Introducción

La introducción es muy breve, definiendo lo que es una bóveda tabicada «On les appelle Voûtes plates, parce qu'elles son surbaissées au point d'imiter les plafonds, sans exiger néanmoins pour cela des murs plus épais que de coutume» (Blondel y Patte 1771-77, 84) y el uso que han tenido en Francia «Les Voûtes plates son originaires du Roussillon, où l'on s'en sert depuis un tems immémorial (...). Ce n'est que depuis environ 35 ans qu'on a adopté cette méthode dans plusieurs de nos Provinces de France» (Blondel y Patte 1771-77, 84)

¹⁰ En realidad fue Pierre Patté el que decide introducir las bóvedas tabicadas en el *Cours de Architecture*. Blondel publica desde 1771 hasta su muerte en 1774 los cuatro primeros volúmenes con dos de láminas. Patté continúa el tratado, escribiendo volúmenes 5 y 6 y un último de láminas. En el volumen 6, dedicado a los aspectos constructivos, aparecen las bóvedas tabicadas. Además era un tema que le interesaba a Patté, ya que también las cita en dos libros escritos por él (Patté 1765, 1769). En ambos, siguiendo las ideas de Laugier, se defiende el uso de forjados de ladrillo en lugar de la madera, para solucionar el grave problema de los incendios. En concreto, en Patté (1769) se citan los mismos ejemplos de construcción tabicada que luego se explicaran en el *Cours*..: las bóvedas del Ministerio de la Guerra en Versalles, las caballerizas de Bizy y los procedimientos tradicionales del Rosellón y de Lyon (González Moreno-Navarro 1993)

3.2.3.b. *ARTICLE PREMIER: Comment on les construit dans le Roussillon*

En este primer artículo describe la forma tradicional de construir bóvedas tabicadas en el Rosellón francés. El ejemplo elegido para describirlas es la caballeriza del castillo de Bizy, en el norte de Francia. Pero como ya se ha citado antes, Charles Fourquet se llevó albañiles de Perpignan para esta construcción.

La bóveda que se describe (ver figura 3.3) es la mayor de todas las que se construyeron en Bizy, y está en las cuadras. Es de cañón seguido, tiene 120 pies de largo, 30 de ancho y 6 pies de flecha. Según el texto de Blondel y Patte (1771-77) apoya sobre muros de 2 pies y medio de espesor (L/13), contruidos con ladrillo y mampostería. Esta construcción se dibuja en la figura 3.1; en ella se acotan los muros de 3 pies y medio (L/8,6). La forma de la bóveda es un arco carpanel.

El texto relata con mucho detalle el proceso constructivo de la bóveda, dando importancia a los mismos aspectos que Espie: no empezar a construir la bóveda hasta que los muros llevan un tiempo hechos y ya han asentado; apoyar los primeros ladrillos en una pequeña hendidura realizada en los muros perimetrales.

Para la construcción se utiliza una cimbra de madera bastante grande, de 2,5 pies (unos 76 cm) de profundidad. A lo largo de los muros laterales se coloca una viga de madera para apoyar esta cimbra y que pueda deslizarse libremente (nombradas como C y D en la Fig. II, ver figura 3.3). En bóvedas de más luz pueden utilizarse incluso otras intermedias (nombradas como E en la Fig. II, ver figura 3.3).

La bóveda se comienza por uno de los testeros, colocando en él la cimbra. Dos operarios van colocando los ladrillos de plano sobre la cimbra, con el lado corto hacia el testero y unidos entre sí por los lados largos, comenzando por los arranques y llegando hasta la clave, donde se cierra la hilada. Es importante rellenar bien la junta de ladrillo y dar un golpecito con la paleta para ajustar bien el ladrillo recién puesto. Se continúa con la siguiente fila, colocando los ladrillos machihembrados con la primera para que hagan mejor unión. Así hasta cubrir casi por completo la superficie de la cimbra con una hoja de ladrillos. Hecho esto, se dobla la bóveda a matajunta.

Seguidamente se desliza la cimbra sobre las carreras de madera que se han colocado y se repite el proceso, hasta llegar al testero opuesto, que cierra la bóveda.

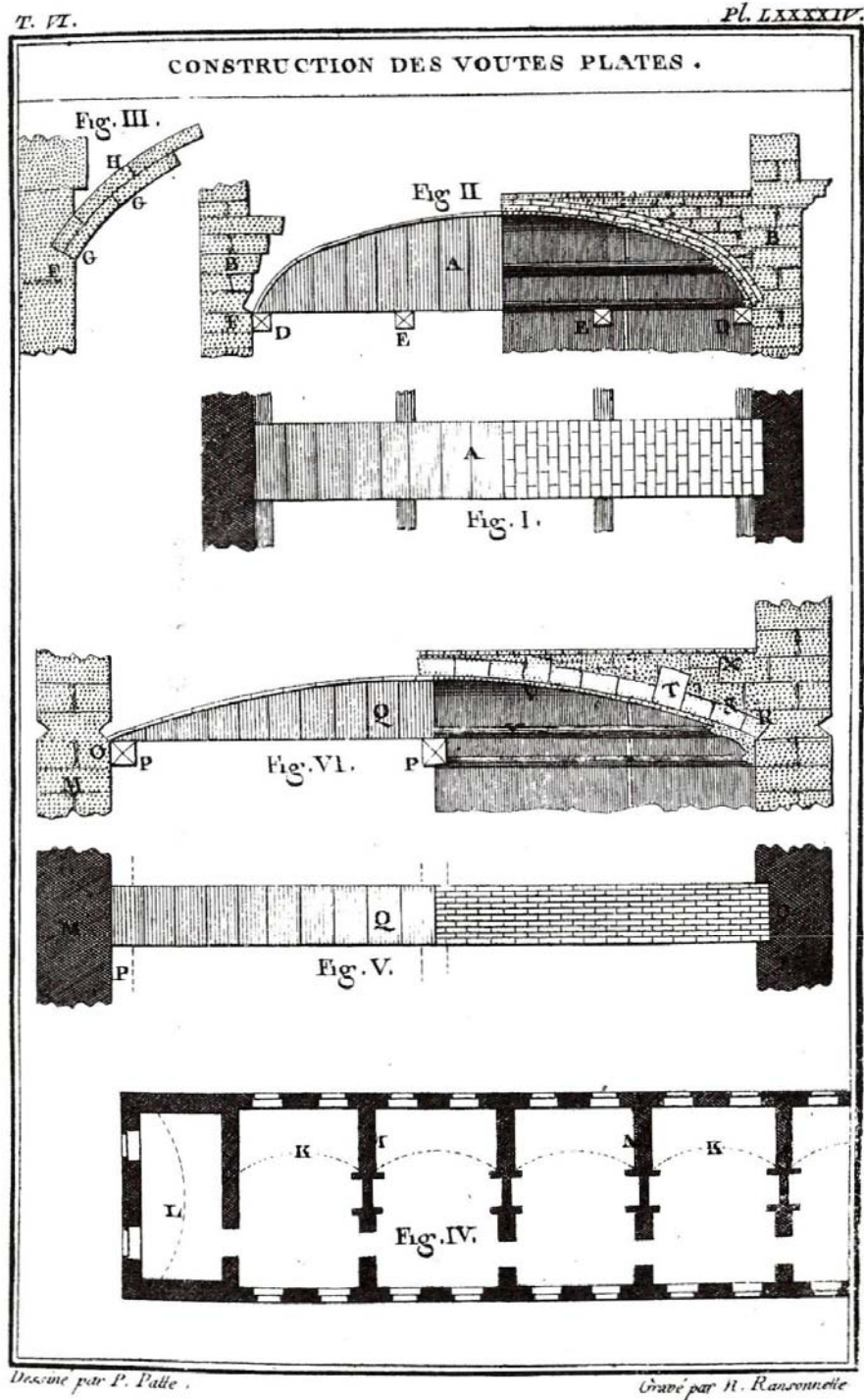


Figura 3.3: Construcción de bóvedas tabicadas. (Blondel y Patte 1771-77, Pl. LXXXIV).

Las Figs, I, II y III explican como se construyen las bóvedas en el Rosellón, aplicadas al caso concreto de las caballerizas de Bizy: la Fig. I es la planta de una tramo de bóveda; la mitad izquierda representa la planta de la cimbra cubierta de tablas y la mitad derecha la disposición de los ladrillos; la Fig. II es una sección de lo anterior y en la Fig. III se detalla el arranque de la bóveda.

Las Figs. IV, V y VI representan la construcción de las bóvedas del Ministerio de la Guerra, en Versailles: la Fig. IV es la planta general de una de las alas del Ministerio, observando la disposición de las bóvedas que se ayudan unas a otras (K y L); la Fig. V es la planta de un tramo de bóveda, a la izquierda la cimbra cubierta de tablas y a la derecha los ladrillos, de canto, colocados sobre ella; la Fig. VI es la sección de lo anterior.

Terminada la bóveda, se retira la cimbra y se rellenan los riñones con pequeños mampuestos. Por último, se enyesa el intradós.

En el mismo castillo se construyeron otras bóvedas más pequeñas, que no aparecen en la figura, con la particularidad de que su flecha era muy pequeña (1/12 de su luz) y que, en lugar de rellenas los riñones, se construyeron en ellos pequeños tabiques de ladrillos de plano, a la manera de las lengüetas de Fray Lorenzo, separados 3 pies unos de otros.

3.2.3.c. ARTICLE II. Comment on les construits à l'Hôtel du Bureau de la Guerre

Estas bóvedas se construyen por iniciativa de Charles Fourquet, duque de Belle-Isle, que en 1758 fue nombrado Ministro de la Guerra. En 1759 empieza la construcción de un gran edificio en Versalles para alojar el Ministerio de la Guerra bajo la supervisión de Jean-Baptiste Berthier. Posteriormente se ampliará con los ministerios de la Marina y de Asuntos Exteriores. Una buena parte de los forjados de este gran complejo se construirá con bóvedas tabicadas. Además de la rapidez de construcción, se eligen por su incombustibilidad, ya que el edificio alojará importantes archivos (Bannister 1968).

En Blondel y Patte se describe la construcción de algunas bóvedas de este edificio, ver Figs. IV, V y VI en la figura 3.3. Son varias bóvedas seguidas empujando sobre muros transversales. A las últimas bóvedas se les da la vuelta de manera que funcionan como un contrafuerte para el resto.

Estas bóvedas no son tabicadas, sino que se construyen con ladrillos de canto, unidos por sus lados cortos (ver Figs. V y VI en la Fig. 3), además de sustituir las rasillas por ladrillo macizo y más grueso de lo habitual en estas bóvedas (de 8x4x2 pulgadas). Es probable que estos cambios se deban a las recomendaciones que en 1754 emite la Academia Francesa en respuesta a la memoria presentada por Tannevot presentado el sistema tabicado a través del libro del conde Espie, ver apartado anterior.

A pesar de no ser tabicadas estas bóvedas, están incluidas dentro del capítulo dedicado a ellas. Y en Bannister (1968) se indica que dentro del mismo edificio sí se construyeron bóvedas tabicadas, ver figura 3.4.



Figura 3.4: Imagen actual de una bóveda tabicada en la entrada del Ministerio de la Guerra, en Versailles (Original en fr.topic-topos.com/livres/versailles)

Las bóvedas que se describen en Blondel y Patte tienen un ancho de 18 pies. La forma de la bóveda es un arco de círculo rebajado, con una flecha de $\frac{1}{14}$ de la luz y apoyan sobre muros de carga de 2 pies y 8 pulgadas (L/6,60). El proceso de ejecución es el mismo, con una cimbra deslizante de lado a lado. Los riñones también se rellenan con mampostería y se coloca un tirante de hierro por el extradós. Una novedad es el uso de unos ladrillos cuadrados (de 8x8 pulgadas) que funcionan como “llaves” trabando mejor la bóveda con el relleno (son los nombrados con una T en la Fig. VI de la figura 3.3).

Aparece en este edificio un problema nuevo: al tener muchas plantas (se construyen hasta 5 sobrepuestas), se van acumulando los tubos de las chimeneas adelgazando los muros de carga laterales. Para solucionarlo, se refuerzan los muros con tirantes metálicos en el borde de los huecos que recogen los empujes de las bóvedas. Estos refuerzos se describen en las Figs VII, VIII y IX de la figura 3.5.

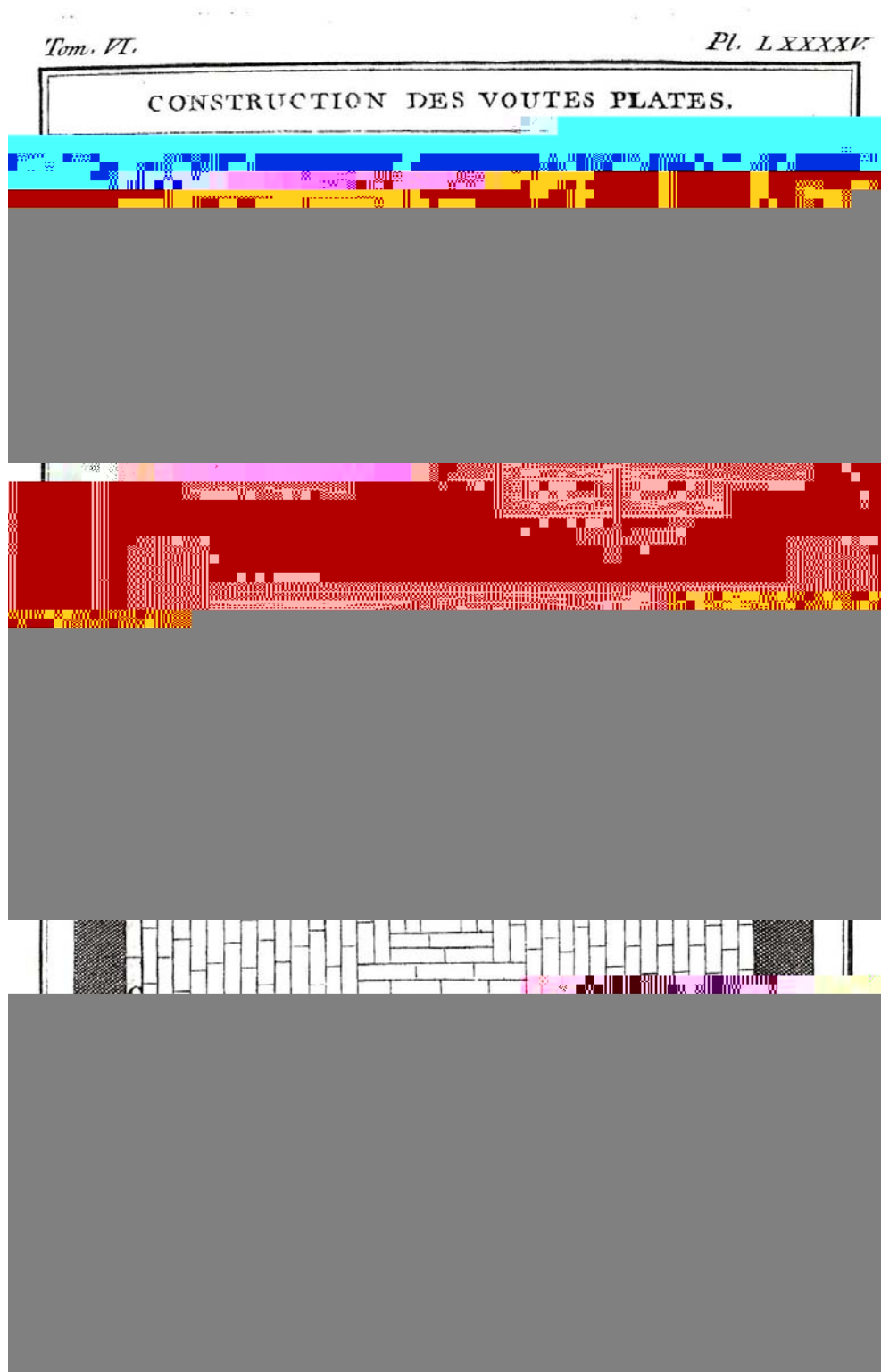


Figura 3.5: Construcción de bóvedas tabicadas. (Blondel y Patte 1771-77, Pl. LXXXV).

Las Figs. VII, VIII y IX representan la planta y la sección de los conductos de chimeneas, con los refuerzos metálicos que se deben colocar para resolver la disminución de espesor que provocan en los muros: la Fig. VII es un plano de los tubos bajo la roza; la Fig. VIII es un plano a la altura de la roza; la Fig. IX es el perfil que incluye las dos plantas anteriores.

La Fig. X es una bóveda de perfil imperial siguiendo el procedimiento del conde d'Espie. Arriba, una sección y abajo, los ladrillos dispuestos en planta.

3.2.3.d. ARTICLE III: *Comment on les construit dans le Languedoc*

Al inicio de este artículo los autores citan específicamente al conde d'Espie, que había construido con bóvedas tabicadas su casa en Toulouse, en Languedoc:

C'est à M. le Comte d'Espie qu'on doit, d'avoir perfectionné les Voûtes plates du Roussillon, en substituant à la forme en berceau, qui ne se soutient que sur deux murs, la forme en impérial, qui repose également sur tous les murs d'une (Blondel y Patte 1771-77, 94)

A continuación describen estas bóvedas,¹¹ relatando la construcción de una de perfil imperial, de manera muy similar a como la describe el propio Espie en el capítulo inicial de su libro (Espie 1754): *Des Voutes plates*. La construcción, en planta y sección, se describe también en la Fig. X de la figura 3.5.

Para terminar el capítulo, los autores expresan sus dudas sobre las categóricas afirmaciones del conde d'Espie acerca de la falta de empuje de las bóvedas tabicadas:

d'où il conclut, ainsi que d'après plusieurs expériences qu'il rapporte, que quand ces voûtes ont été bien faites, elles n'ont point de poussée contre leurs murs de soutien, & qu'ainfi cette considération ne mérite aucun égard; nous verrons par la suite ce qu'on doit penser sur ce sujet, d'autant que cette assertion à induir en erreur la plupart de ceux qui, d'après son système, ont voulu entreprendre de ces sortes de voûtes (Blondel y Patte 1771-77, 98)

3.2.3.e. ARTICLE IV: *Comment on les construit à Lyon*

Las bóvedas tabicadas llegan a Lyon hacia 1750, sustituyendo en viviendas particulares a las estructuras habituales de madera. Probablemente llegaron desde el Rosellón, a través del Languedoc (Bannister 1968). El tipo más frecuente es el perfil imperial y se utilizan en edificios de tres o cuatro plantas de altura. Se cubren con ellas salas de 20 o 24 pies, con flechas entre 1/6 y 1/12 de la luz mayor. La bóveda se construye al interior, una vez terminados muros y cubierta. El forjado de cubierta, en Lyon, es siempre de

¹¹ Blondel y Patté piensan que estas bóvedas deben tener más difusión que la ofrecida por el libro de Espie. Como saben que su tratado va a tener esa difusión, las incluyen: «comme il en a lui-même Publio la description dans une Brochure (1), qui est aujourd'hui peu connue, nous croyons que l'on en verra ici l'extrait avec plaisir» (Blondel y Patté 1771-77, 95)

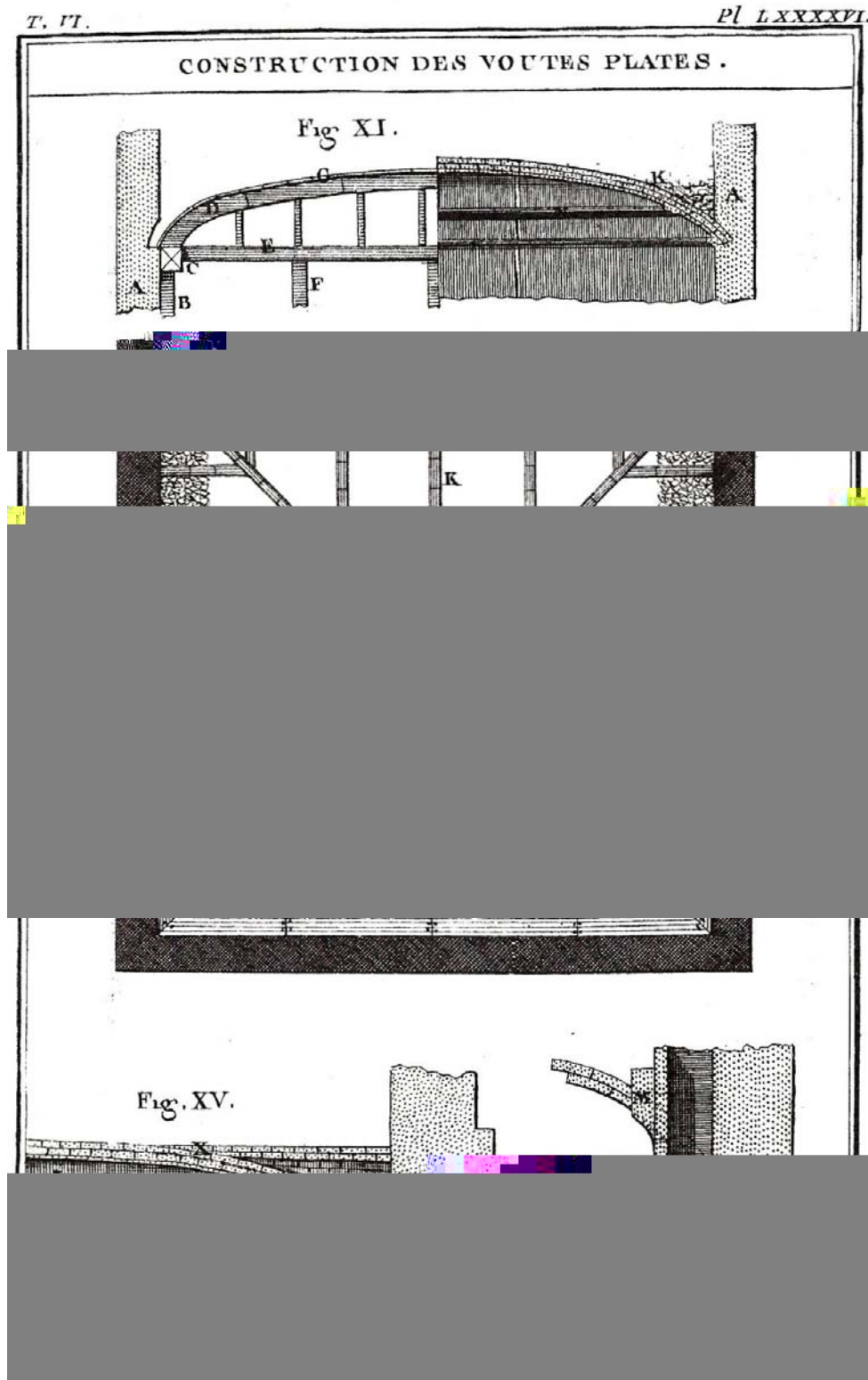


Figura 3.6: Construcción de bóvedas tabicadas. (Blondel y Patte 1771-77, Pl. LXXXVI).

Las Figs. XI, XII, XIII y XIV representan la construcción de bóvedas tabicadas tal y como se lleva a cabo en Lyon: la Fig. XI es la sección de una cimbra (a la izquierda) y de la bóveda terminada (a la derecha); la Fig. XII es una cimbra en planta, recubierta de tablas; la Fig. XIII es la planta de la bóveda vista por encima con las lengüetas en los riñones; la Fig. XIV es el perfil de un tubo de chimenea; la Fig. XV ofrece el perfil de la bóveda de construcción «ideal» según los autores del texto.

El asunto de la apertura de huecos para chimeneas preocupa a los autores,¹⁴ que le dedican una buena parte del texto y una figura (la Fig. XIV en la figura 3.6): «c'est pourquoi nous avons représenté à part, fig. XIV, le profil d'un tuyaux de cheminée avec un arceau M, au droit de la naissance de la voûte» (Blondel y Patte 1771-77, 105)

Es costumbre no quitar la cimbra hasta un par de días después de terminar la bóveda. Entonces se enlucce por debajo, borrando los ángulos de las esquinas y rematando con una cornisa.

3.2.3.f. ARTICLE V. Comment elles ont été construites au Palais Bourbon

El *Palais Bourbon* comienza a construirse en 1722. En 1764 pasa a manos del Prince de Condé, que lo amplía (Bannister 1968). En ese momento se construyen las bóvedas que se describen en Blondel y Patte (1771-77).

Estas bóvedas tienen una forma diferente a las anteriores, ya que apoyan en las cuatro paredes pero su perfil es circular, formando unas cúpulas muy rebajadas, con flechas del orden de 1/12 de la luz.

Se describe al inicio la forma de construir la cimbra: «Après avoir disposé des cintres légers, tels qu'on en voit dans le profil, fig XVI, & dans le plan fig. XVII» (Blondel y Patte 1771-77, 108). A pesar de la ligereza que le atribuyen a la cimbra, vuelve a ser bastante pesada: sobre un entramado de pies derechos (C, Fig. XVI en la figura 3.7) se colocan tablas de canto (A, Fig. XVI en figura 9) y encima unos listones (D, Fig. XVII en figura 3.7). Estos listones están separados sólo 2 pulgadas.

La primera fila de ladrillos apoya en una pequeña cornisa de piedra (E en Fig. XX, ver figura 3.7), en lugar de introducirse en una roza abierta en la pared, como en todas las bóvedas anteriormente descritas.

¹⁴ Como se ha citado anteriormente, en este apartado se describe la construcción de edificios de vivienda, en varios pisos. Si se colocan en paralelo los distintos huecos de cada vivienda, el adelgazamiento del muro en esta zona puede ser importante.

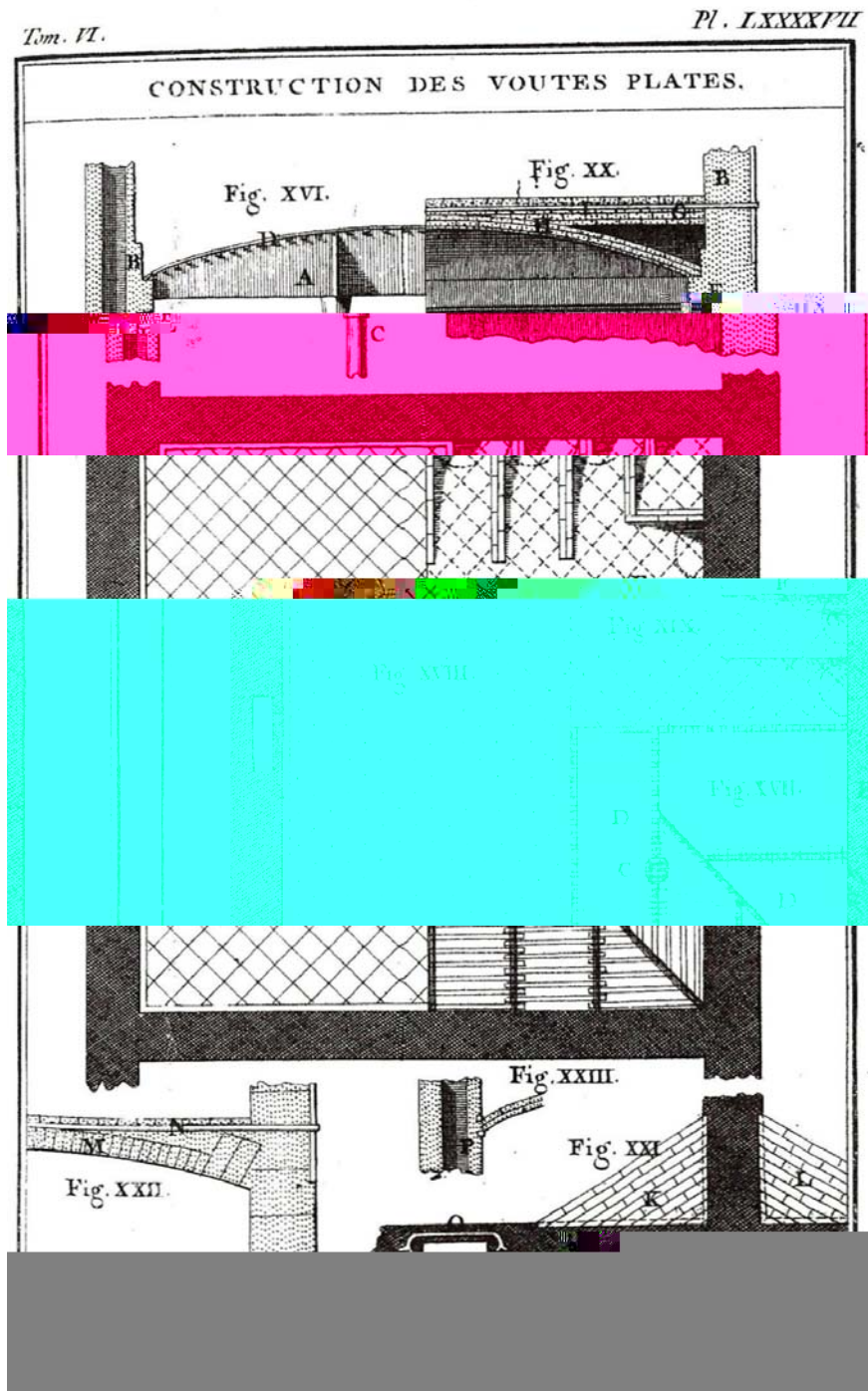


Figura 3.7: Construcción de bóvedas tabicadas en el Palais Bourbon. (Blondel y Patte 1771-77, Pl. LXXXVII).

Las Figs. XVI y XVII son la planta y la sección de la cimbra que ha servido para hacer estas bóvedas; la Fig. XVIII es el plano de media bóveda vista por debajo, mostrando el aparejo en forma de rombo de los ladrillo; la Fig. XIX representa un cuarto de bóveda visto por encima, con las lengüetas de refuerzo en los riñones, formadas por dos filas de ladrillos de canto; la Fig. XX es la sección de una mitad de la bóveda, incluido el atirantamiento superior anclado al muro con una platabanda; la Fig. XXI representa la disposición en planta de los ladrillos de dos bóvedas adyacentes de manera que sus empujes se contrarrestan mutuamente. En estas bóvedas los ladrillos se han colocado de canto; la Fig. XXII es la sección de la bóveda precedente; la Fig. XXIII representa la solución en este caso de los agujeros para las chimeneas

Encima se van colocando los ladrillos, que en este caso son cuadrados, de 8x8 pulgadas y espesor 1 pulgada. El aparejo es en forma de rombo (ver Fig. XVIII en figura 3.7)

tanto la en primera como en la segunda capa, con ladrillos cortados en forma de triángulo en el inicio.

Sobre las bóvedas se construyen lengüetas, formadas por dos filas de ladrillos planos, y sobre éstas apoyan unas pequeñas bóvedas de cañón que comienzan en los muros y van a morir hacia la clave de la bóveda (ver Fig. XIX en figura 3.7), de manera que los riñones no se rellenan. Las bóvedas del *Palais Bourbon* están atirantadas, como se ve en la Fig. XX, ver figura 3.7. Estos tirantes se colocan cada 12 pies y acaban en una chapa por la parte exterior del muro.

En el *Palais Bourbon* también hay bóvedas construidas con ladrillos ordinarios y construidas de canto (ver Figs. XXI y XXII en figura 3.7). Se construyen de manera similar, pero tienen más empuje que las anteriores, de manera que los tirantes se colocan más juntos (cada 9 pies).¹⁵

Al final de este capítulo, en una extensa nota a pie de página, se describe un ensayo ante la Academia Real de Arquitectura, que se detalla en el capítulo 8 de esta misma tesis

3.2.3.g. ARTICLE VI: *Reflétions sur les Vôutes plates, & sur les moyens d'operer leur construction avec succès*

Este último artículo es el más interesante ya que, frente a los anteriores que describen de manera más o menos objetiva la forma de construir estas bóvedas en distintos lugares de Francia, en éste los autores dan su opinión sobre dichas construcciones y su forma de trabajar.

Aquí vuelve se cita por primera vez el comportamiento monolítico de las bóvedas tabicadas, trabajando como la *couvercle d'un pot de terre*. Este símil tendrá mucho éxito en posteriores tratados, franceses y españoles, y servirá para reforzar la idea, ya

¹⁵ En estas bóvedas cita el tamaño del tirante de acero: plano, de 2,5 pulgadas de espesor y 6/7 líneas de grosor.

propuesta por Espie, de la falta de empuje de las bóvedas tabicadas (ver capítulo 7 de esta tesis)

A continuación repasan algunos aspectos relativos a ladrillos y yeso, los dos elementos con los que se fabrican estas bóvedas:

-Sobre los ladrillos, destacan que nunca deben colocarse planos en la clave porque presentan así tendencia a caerse. Esto está relacionado con la mayor o menor flecha que debe tener la bóveda, de la que hablarán después.

-Sobre el yeso, la preocupación más importante es evitar que el aumento de volumen que sufre al fraguar derribe los muros. Para evitarlo, se deja un pequeño espacio (de unas dos pulgadas) en el muro en los arranques para que el yeso pueda hinchar libremente sin empujar a los muros. Después de un tiempo, puede rellenarse este hueco.

Y relativo a los tipos de bóvedas descritos en cada uno de los cinco artículos anteriores, expresan sus ventajas e inconvenientes:

- Las bóvedas tradicionales del Rosellón, de cañón seguido, se adaptan muy bien a tipos constructivos como cuadras, almacenes o iglesias y son fuertes siempre que su flecha sea de $\frac{1}{7}$ de la luz.

-Las bóvedas descritas para el Ministerio de la Guerra, que se construyen con ladrillo de canto, son más resistentes, pero al mismo tiempo crean más empujes sobre los muros.

-Las bóvedas de perfil imperial son muy prácticas como forjados de edificios ordinarios, y ahora mismo son las preferidas. La proporción más adecuada es la que indica el conde d'Espie para sus bóvedas de Toulouse.

-Respecto a la construcción de bóvedas en Lyon, tiene la ventaja de que las cimbras son más consistentes que las empleadas en el Languedoc, y también es una buena idea dejar un tiempo el último ladrillo sin poner, así el yeso puede hinchar libremente hacia arriba.

-Las bóvedas del Palacio de Borbón son demasiado planas. El aparejo en rombo también disminuye su resistencia. Las pequeñas bóvedas sobre las lengüetas aligeran los riñones a la vez que fortifican las bóvedas y son una buena idea en cualquier caso.

Como los muros son gruesos y no se ha ahorrado en tirantes de hierro, son firmes, pero podrían haberse construido más sencillamente

Como resumen final y aglutinando ventajas y desventajas de los edificios estudiados Blondel y Patte terminan con una siguiente lista de 10 recomendaciones que, al igual que el símil de la «tapa de puchero» se repetirá en muchos tratados posteriores, tanto en Francia como en España.¹⁶

3.2.3.h. CHAPITRE IV: De la Construction des Combles

Además del capítulo 2, dedicado específicamente a las bóvedas tabicadas, se vuelven a citar al hilo de la construcción de tejados incombustibles de ladrillo. Se describe la forma de construirlos en la vivienda del Conde d'Espie de Toulouse (ver Figs. XVII a XX de la figura 3.8) y en el Palais Bourbon (ver Figs. XXI a XXIV en la figura 3.8). Las figuras referidas a la vivienda de Espie son una copia de las láminas que publica en su libros (ver figura 3.2).

3.2.4 Rondelet : L'art de bâtir.

La consagración definitiva de las ideas de Espie sobre las bóvedas tabicadas viene cuando Rondelet reproduce, aunque con menos detalle, la parte del tratado de Blondel y Patte que se refiere a ellas. Rondelet, que fue discípulo de Blondel, no añade nada nuevo: recoge los mismos ejemplos incluso reproduciendo las imágenes (ver figura 3.9) También nombra las experiencias y opiniones del Conde d'Espie, manifestando su conformidad con la teoría del monolitismo.

¹⁶ Esta lista de 10 recomendaciones se reproduce, traducida al castellano por Benito Bails, en el apartado 3.3.2 de esta misma tesis.

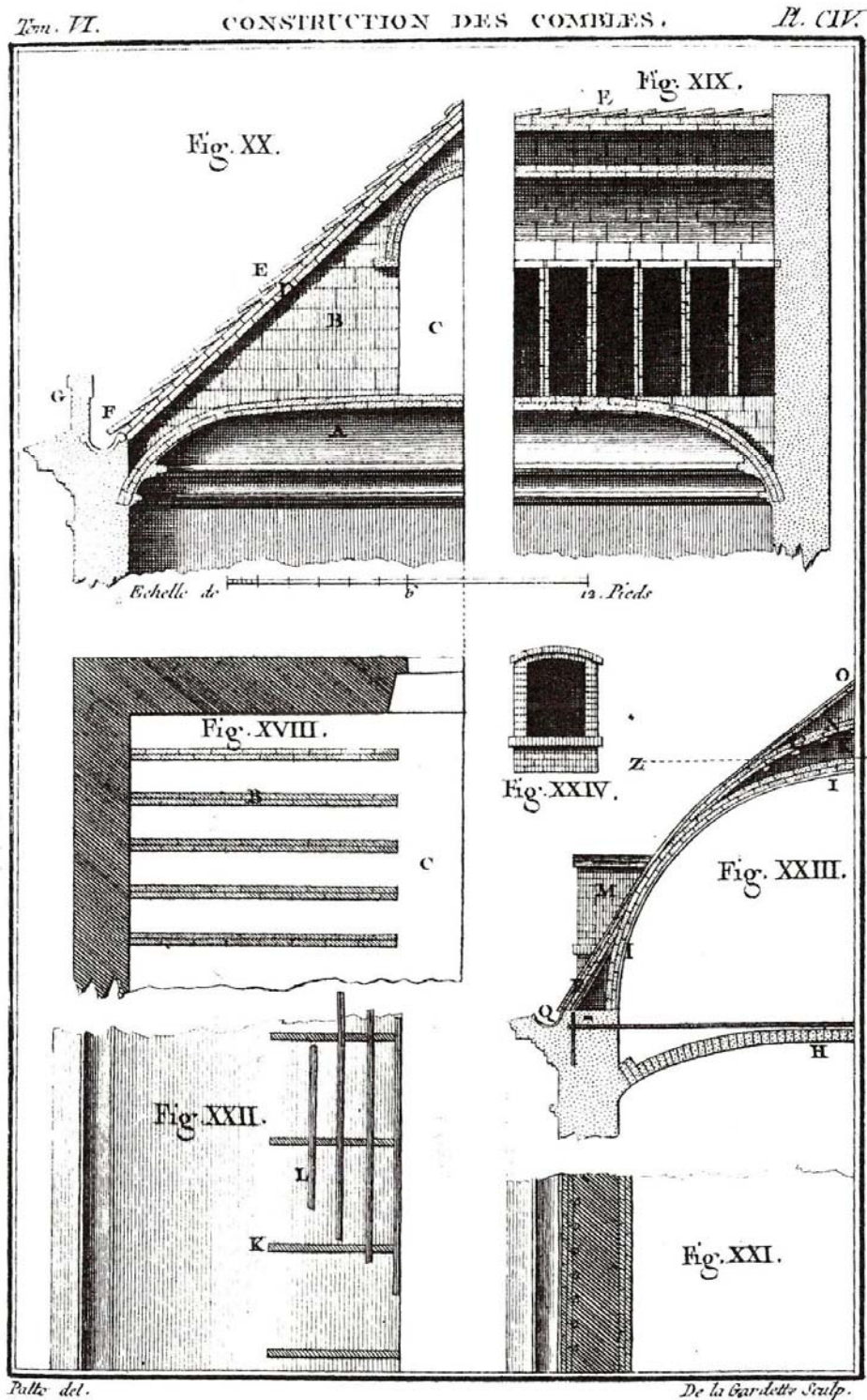


Figura 3.8: Construcción de tejados incombustibles. (Blondel y Patte 1771-77, Pl. CIV). Las Figs. XVIII a XX representan el tejado de la vivienda de Espie, y son una copia de las láminas de su libro (1754). Las Figs. XXI a XXIV describen los tejados de ladrillo del Palais Bourbon: bóvedas tabicadas de doble hoja, la interior de $\frac{1}{2}$ punto y la exterior con la forma del tejado (Fig. XXIII), conectadas entre sí por una trama de muretes (Fig. XXII). Los muros están atirantados. Aunque en la descripción de la tejado no se cita los tirantes, seguramente porque ya se habló de ellos en la descripción de las bóvedas por debajo, ver figura 3.7

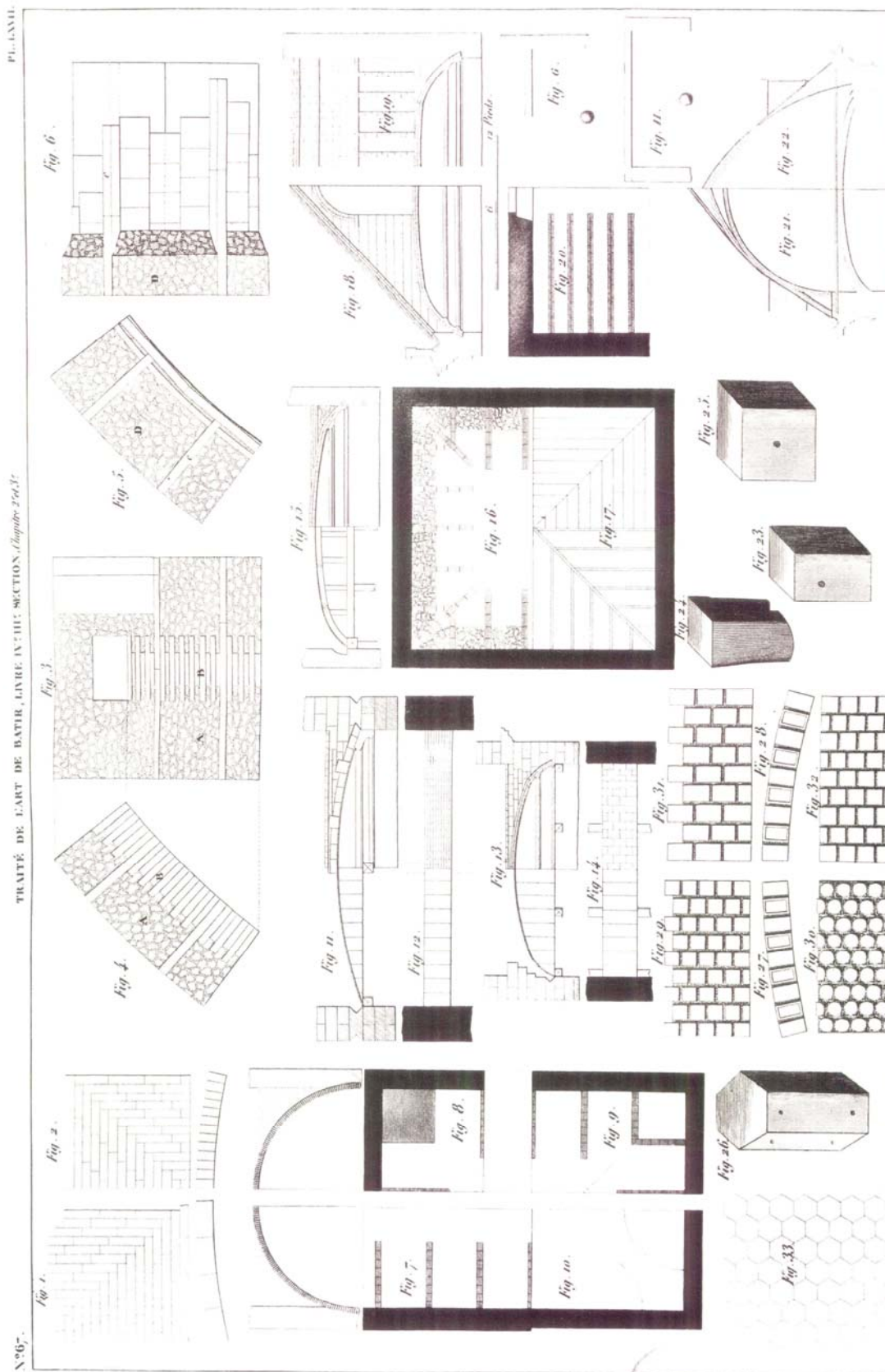


Figura 3.9: Lámina del tratado de Rondeliet dedicada a la construcción tabicada. Los dibujos son una copia del tratado de Blondel y Patte (Figs. 11-22), algunos de ellos a su vez reproducciones del libro de Espie (Figs. 18-20). (Rondeliet 1843, Pl. LXVII)

3.3. La vuelta a España

Durante los siglos XVIII y XIX, la cultura francesa fue la más influyente en Europa. En la misma medida, la arquitectura y los tratados que sobre ella se escribieron. Tanto el libro de Espie como los textos sobre bóvedas tabicadas que escriben Blondel y Patte y reproduce Rondelet, se convierte en la referencia que citan numerosos tratados españoles de los años siguientes.

Las primeras noticias acerca del desarrollo en Francia del sistema tabicado, tan extendido en España, las encontramos en breves referencias de la traducción que hace Benavente del tratado de Rieger *Elementos de toda la Arquitectura civil* (Benavente 1763) y en el libro de Diego de Villanueva -director de Arquitectura en la Academia de Bellas Artes de San Fernando- *Papeles Críticos de Arquitectura* (1766).

El primero, traduciendo a Rieger describe brevemente «Las Bóvedas modernas, que llaman llanas» (Benavente 1763, 247), afirmando que son simples, de pronta construcción y poco pesadas, de manera que casi no empujan sobre los apoyos. El traductor español añade de su cuenta que «En España no sabemos el tiempo que se diò principio à estas bóvedas; pero sí tenemos noticias de que las hay en Cádiz» (Benavente 1763, 247)

Diego de Villanueva, sin embargo, no parece tener noticia del uso que tienen las bóvedas tabicadas en España, ya que afirma:

En vano el sabio Conde de Espie trabajò en alivio del publico su excelente Obra, proponiendo medios experimentados para librarle de los crecidos gastos y contingencias, que produce en los Edificios la introducción de la madera: su Obra, aunque docta, y experimentada, solo ha servido para dar a conocer su zelo por el bien público. Los Proffesores lo han mirado con desprecio (Villanueva 1766, 93-94)

Finalmente, en 1776 Sotomayor traduce al español el libro de Espie. Y unos años después, en 1796, Benito Bails publica *De Arquitectura Civil*, un tratado muy influenciado por los franceses, especialmente por Blondel y Patte (1771-77).

3.3.1. La traducción de Sotomayor

El libro del Conde d'Espie, a pesar de no estar escrito por un profesional de la construcción y contener numerosos errores, tiene una amplia difusión internacional. En 1756 se traduce al inglés y en 1760 al alemán (Bannister 1968). En 1776, Joaquín Sotomayor publica un libro, *Modo de hacer Incombustibles los Edificios, sin aumentar el coste de construcción*, en el que traduce de manera libre el texto de Espie además de añadir una introducción propia al inicio y algunos comentarios de su cosecha. Joaquín Sotomayor, al igual que Espie, era un aficionado a la arquitectura.

En la introducción explica por qué decide traducir este libro: en sus observaciones sobre la arquitectura piensa que las bóvedas que se construyen en ese momento requieren muros demasiado gruesos, en comparación con las construidas, por ejemplo, en el gótico. Tiene noticia de la existencia en España de algunas bóvedas tabicadas, pero «los artífices» dicen que ya no se utilizan:

y hallé, que no había allí mas aparato, artificio, ni volumen, que el de un tabique de ladrillos unidos con hieso, y colocados, no de canto, como en las Bobedas comunes, sino de plano, según la buelta de ellas. Hablé de estas con algunos Profesores, que me dijeron, era cosa conocida, y practicada de tiempo casi inmemorial en España, con el nombre de Bobedas tabicadas; pero, aunque los reconvine (*) por qué no las usan ahora poniendoles a la vista en aquel mismo caso las ventajas que hacen a las comunes, se cerraron en que estas eran las que más convenían a la subsistencia de los edificios y que los profesores que dejaron por ellas las tabicadas habían tenido fuertes y poderosas razones para ello (Sotomayor 1776, 13)

El autor tiene noticia del libro del conde d'Espie a través del Abate Laugier, en el que habla de unas bóvedas ligeras y sin empujes. Intrigado, busca el libro, encontrando que habla de las mismas bóvedas tabicadas que habían llamado su atención. Decide entonces traducir el libro, para dar de nuevo a conocer una técnica que él piensa está olvidada en España

Aquí, pues, presento à mi Nacion, no un descubrimiento nuevo, pues en ella misma hay Edificios bien antiguos, contruidos según este mismo sistema; sino una noticia casi olvidada, y de la mas sólida, y trascendente utilidad (Sotomayor 1776, 19-20)

Aunque cita ejemplos contruidos recientes: las casas del Príncipe y del Infante y la casa de familia de los Infantes en El Escorial, y la casa del Marques del Llano en la

c/Luna, en Madrid. A partir de aquí, el tratado es una traducción del de Espie, al que añade algunas notas suyas, que coloca entre corchetes para distinguirlo del original. Algunas de estas notas dejan ver la poca experiencia constructiva de Sotomayor, como cuando propone sustituir el yeso por la cal:

Los materiales precisos para hacer estas Bobedas son el ladrillo y el Hieso [Pero al segundo se podrá substituir la cal, y con gran ventaja, así por ser mas general su abundancia que la del hieso, y menor, por consiguiente, su precio, como porque aumentará la solidez de la Obra] (Sotomayor 1776, 24)

sin indicar la diferencia entre tiempos de fraguado de cal y yeso, definitiva en la construcción sin cimbra.

Sotomayor traduce el perfil de bóvedas preferido por Espie: *impériale de carosse*, como cielo de un coche «a la Española», esta traducción se reproducirá luego en otros textos. Igualmente se recogen las ideas de Espie sobre la falta de empuje de las bóvedas tabicadas si estas se construyen de manera adecuada, siguiendo sus indicaciones. Además, el autor añade en una de sus notas propias un comentario similar a del *pot de terre* de Blondel y Patte, quizá por haberlo leído:

[Para mejor inteligencia, quiero poner un símil. Figúrese una bóveda de hierro, bronce u otro cualquiera metal vaciada y hecha de una pieza, como una campana; y digan (...) si semejante bóveda tendría empuje alguno ni necesitaría, para mantenerse, unas paredes más fuertes que las que ha menester un piso regular de madera que la iguale en peso] (Sotomayor 1776, 60-61)

Pero lo más interesante del tratado de Sotomayor es la «Censura Previa» que, a modo de prologo, escribe, Ventura Rodríguez, arquitecto mayor de Madrid y constructor experimentado de bóvedas de todo tipo. Ventura Rodríguez no está en absoluto de acuerdo con las afirmaciones de Espie y Sotomayor acerca de la falta de empuje de las bóvedas tabicadas, y advierte de las consecuencias nefastas que puede tener seguir las ideas que se apuntan en el libro:

Muy Señor mío: Devuelvo a Vm. el Discurso, que en 14 de Agosto de este año remitió Vm. a mi censura de orden del Consejo, que se titula: *Modo de hacer incombustibles los Edificios sin aumentar el coste de su construccion: extraido de el que escrivió en Francés el Conde de Espie: ilustrado y añadido Don Joachin de Sotomayor, Cisneros y Sarmiento, Señor de Allanes:*

Y haviendole examinado con el cuidado que corresponde, debo decir: 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.

El Problema de que trata el señor D. Joaquín pertenece a un punto de los más delicados de la Arquitectura cual es averiguar el equilibrio del empuje y el peso de los arcos y bóvedas con sus muros, en cuya investigación se han fatigado los más célebres matemáticos y arquitectos, y hasta ahora por ninguno se le ha dado solución, viniendo à parar en que este asunto es otro arcàno como el de la Quadratura del circulo: duplicación del cubo: dos medias proporcionales: triseccion del ángulo no recto, y otras proposiciones, que sin embargo de que muchos Ingenios se han lisongeados haverlas resuelto, y demostrado mathematicamente, han quedado con su buen deseo en el mismo estado que las dejò Archimedes 208 años antes de la Venida de Christo.

Funda el autor con el Conde de Espie su sistema en suponer, o creer las bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso de tal calidad que estos dos materiales entre sí constituyen una solidísima unión intangible, y tan constante como si fuera una cubierta o tapadera fundida de una sola pieza de algún material exento de elasticidad; que estas dos cualidades se requieren y aún no bastan a la firmeza para que la bóveda no cause empuje y se pueda mantener en paredes como las que ordinariamente se construyen en los edificios comunes.

Pero esa suposición, o creencia, es lisonjera, 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 estribos, que a favor de firmeza son grandes ventajas (...) y las vemos quebrantadas por muchas partes y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje no obstante el atirantado del las armaduras del cubierto. Hermosura, comodidad y firmeza constituyen perfecto un edificio, y quedará viciado faltando estas dos primeras cualidades, pero si falta la tercera, todo es perdido.

En Córdoba se ha construido de planta en estos últimos años, por un arquitecto francés, el Colegio de Santa Victoria para Niñas educandas, y padeció la desgracia de arruinarse el templo, por falta de restrivación a la Medianaranja, con cuyo motivo fui llamado a dar disposición y traza para levantarle; reconocí al mismo tiempo todo el resto del edificio, que se acaba de construir incombustible, todo el bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso de la mejor calidad y bien trabajado, siguiendo en todo el sistema de que se trata, con más curvatura y fuerza en las paredes a proporción que las propuestas por este autor; y todas las bóvedas, cuyas paredes no tenían la robustez competente a resistir el empuje, se abrieron en dos fracturas por la longitud de la clave y desplomaron las paredes exteriores de suerte que fue necesario aplicar un número considerable de cadenas de hierro en todos los pisos y cubiertos para contener la ruina a que, a paso largo, caminaba el Edificio.

Siempre que se trate de hacer alguno todo de Bobedas, y por consiguiente incombustible, es necesario dar abundante grueso à las paredes en los parages en que se necesite (Sotomayor 1773, Censura Previa. Sin paginar)

Además, Ventura Rodríguez aclara que él no es el autor de la ampliación de la vivienda para el Marqués del Llano que le atribuye Sotomayor, sino Juan de Villanueva y afirma que «y aunque no la he visto por el interior, he entendido usa de los tirantes de hierro, sin cuyo auxilio no quedaría con firmeza» (Sotomayor 1773, Censura Previa. Sin paginar)

3.3.2. Benito Bails

Benito Bails (1730 –1797) fue principalmente un matemático. Escribió unos extensos Elementos de Matemáticas (diez volúmenes, publicados entre 1779 y 1787). Dentro de ellos, la parte I del Volumen IX se dedica a la Arquitectura Civil, que Bails considera una rama de las matemáticas. Dada su formación¹⁷, es un texto muy influenciado por los tratados franceses de arquitectura e ingeniería.

Dedica una buena parte de su tratado a las bóvedas, incidiendo en concreto en la manera de obtener el espesor necesario para muros y estribos, aspecto en el que copia a Blondel y Patte y a Bélidor (Huerta 2004). Dedicar un apartado específico a las bóvedas tabicadas. Reproduce en él opiniones y figuras de diversos autores, incurriendo en numerosas contradicciones por ello.

Al igual que Sotomayor, Bails afirma que la bóveda tabicada ha sido muy frecuente en España:

Esta casta de fábrica es muy antigua en España, y muy usada en la Corona de Aragon, de donde pasó a Francia, en Andalucía, Murcia, etc. y en esta Corte se usó muchísimo en tiempos pasados. Hay pruebas evidentes en Fr. Lorenzo de que no hay bóveda ninguna, sea de la especie que fuese, que no labrasen de tabique nuestros maestros, y es verosímil que así lo practicasen los arquitectos de Madrid, donde el citado Religioso dice que aprendió y practicó por espacio de cincuenta años la facultad (Bails 1796, 567-568)

Pero que ya no lo es tanto:

¹⁷ Bails pasó su infancia y juventud en Francia; hizo sus primeros estudios en la Universidad de Perpiñán y estudió Matemáticas y Teología en la Universidad de Toulouse; a los 24 años marchó a París.

En vista de autoridad de tanto peso en estas materias he estrañado mucho la oposicion que en algunos facultativos he notado hacia estas bóvedas, asegurándome unos que acá no se podian hacer, desconfiando otros de que puedan servir si sobre ellas se hubiere de cargar algun peso, y empeñados los mas en que por mucho que empujan las paredes en que estriban, ó no va segura la obra, ó es indispensable gastar mucho hierro para su fortificacion (Bails 1796, 571)

La «autoridad de tanto peso» a la que se refiere Bails es Fray Lorenzo de San Nicolás, del que reproduce, entrecomillados, los textos de los capítulos 51 a 57 en los que éste describe la construcción de todo tipo de bóvedas tabicadas. Sin embargo, no cita el texto del capítulo 24 en el que Fray Lorenzo explicita las medidas necesarias estribar las bóvedas tabicadas. Es raro que Bails no leyera esta parte y, dado su interés por este asunto para las bóvedas de piedra, parece más bien intencionado, ya que más adelante recoge las ideas francesas sobre la falta de empuje de las bóvedas tabicadas.

A continuación, Bails recoge los mismos ejemplos de construcciones con bóveda tabicada en Francia que se leen en el tratado de Blondel: las cuadras del castillo de Bizy, el Ministerio de la Guerra, etc., pero en este caso sin citar la fuente. Las ilustraciones son también las mismas, como se puede ver en la figura 3.10

Bails termina la parte de su tratado que dedica a las bóvedas tabicadas con el apartado *Algunas consideraciones acerca de las bóvedas tabicadas*, muy similar al Artículo 6 de Blondel y Patte: *Reflétions sur les Vôutes plates, & sur les moyens d'operer leur construction avec succès*.

Si fuese posible trabar con mezcla las dovelas de una bóveda de modo que formasen un todo de partes tan adherentes unas con otras, que se pareciese a una tapadera o cobertera de puchero, es constante que no tendria ningun empujo, y no necesitarían las paredes en que estribase más grueso que el competente para aguantar el peso de la bóveda. (Bails 1796, 579)

Este párrafo entra en contradicción con Fray Lorenzo, a pesar de ser una «autoridad de tanto peso» para Bails: Fray Lorenzo, en el artículo 24 de su tratado (el que Bails no cita) afirma que cuando una pared carga sólo con una armadura y no recibe empujes de ninguna bóveda, puede ser más delgada ($L/8$) que cuando recibe el empuje de una bóveda tabicada ($L/5$).

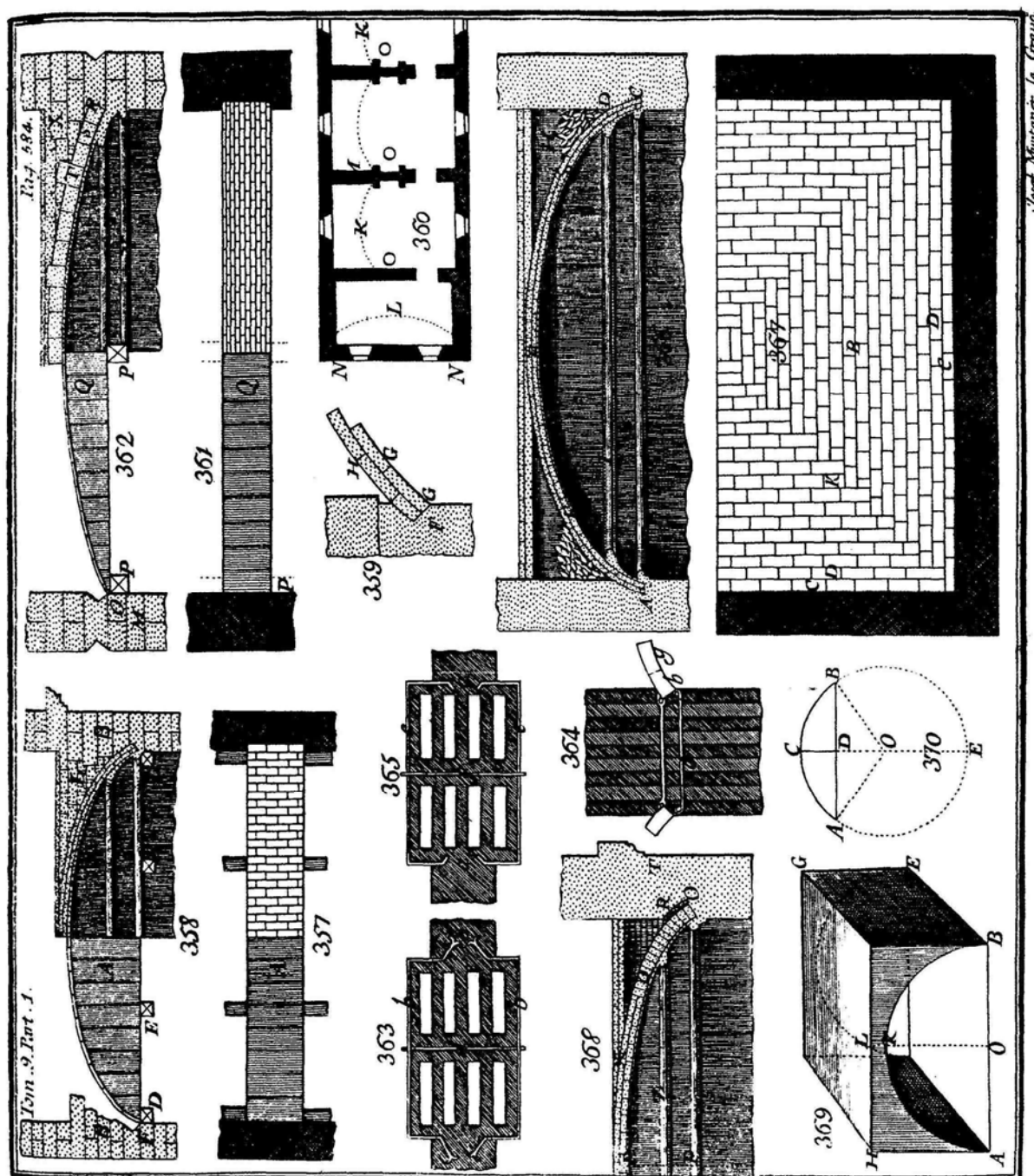


Figura 3.10: Figuras relativas a bóvedas tabicadas que aparecen en Bails (1796, 584), copiadas de las que aparecen en Blondel y Patte (1771-77), ver figuras 3.3, 3.5, 3.6 y 3.7 de este mismo capítulo.

Se reproduce a continuación el «decálogo de la buena construcción tabicada», que no es más que una traducción del que escriben Blondel y Patte unos años antes, aunque Bails sigue sin citar la fuente:

1°. No labrarlas jamás en sitio descubierto, sino después de cubierto el edificio, y de haber hecho todo su asiento las paredes.

2°. Asegurarse primero de la bondad del yeso y del ladrillo, procurando que estos estén bien cocidos, y tengan 21 líneas por lo menos de grueso, con el fin de que al asentarlos de plano tengan algun tanto de inclinacion.

3°. Hacer una ceja o zarpa de 5 pulgadas 3 líneas alrededor de las paredes, quando la bóveda haya de ser esquifada, o solo a lo largo de las paredes en que hubiere de estribar.

4°. Hacer siempre cimbras sólidas, y dexar que sobre ellas descansen algun tiempo las bóvedas despues de labradas.

5°. No hacerlas extremadamente rebaxadas , y darlas de montea quando mas la octava parte del ancho de la pieza, porque así queda mas firme la obra, bien que sepueden hacer, y se han hecho con efecto algunas más rebaxadas.

6°. Asegurarse contra los efectos de la hinchazon del yeso que obra hasta cierto tiempo no mas, y dexar un hueco en quadro en el sitio de la clave en las bóvedas esquifadas, para cerrarle despues que hubiere hecho toda su fuerza el yeso; y una holgura de 21 línea fuera del arranque de las bóvedas en la ceja, esto es, detrás de la primera carrera de ladrillos, lo que se consigue fácilmente adelantando los primeros ladrillos hacia el interior de la bóveda , y la parte exterior de la ceja lo suficiente. Mediante esta precaucion, aunque hinche el yeso de las bóvedas, no podrá hacer empujo alguno contra las paredes, le quedará toda la holgura señalada donde poderse explayar; y despues que ya no hubiere que rezelar de su fortaleza, se podrá macizar la holgura con pedazos de piedra en seco, o trabándolos con mezcla, o con yeso y tierra. Entonces la bóveda cargará las paredes del mismo modo que una cobertera carga el puchero que tapa. Las mas de las bóvedas tabicadas que se han venido abaxo, han tenido este paradero por falta de esta precaucion y todo su empujo en los estribos, quando hay señas de que le hacen, proviene de la hinchazon del yeso; por cuyo motivo es esencialísimo no cerrar del todo la bóveda tabicada á manera de cielo de coche hasta algunos dias despues de concluirla en su mayor parte.

7°. Hacer, para mayor resguardo , las lengüetas en forma de arcos botareles, que vayan á morir insensiblemente en el espinazo de la bóveda.

8°. Llenar los huecos encima de las lengüetas y los demas de las embecaduras de la bóveda de grava trabada con granzas mezcladas con tierra, sin descuidarse en dexar alrededor una holgura mas allá de la tortada de yeso sobre la qual se ha de asentar el suelo holladero, a fin de que no obre en las paredes, y esto pide tambien mucho cuidado.

9°. Asentar en el espinazo de su trasdos, quando la bóveda tuviere de ancho mas de 19 o 21 pies, llantas de hierro en aspa, que hagan oficios de tirantes, en la direccion de las diagonales de la planta, con lo que quedará mas fortificada.

10°. Dar despues de quitadas las cimbras ,un jaharro de 8 o 9 lineas de grueso en lo interior de la bóveda, y echar una cornisa Z, en su arranque, borrando los ángulos entrantes de la boquilla ó cielo de la bóveda.

(Bails 1796, 580-582)

Benito Bails escribió otros libros, entre los que se incluye este *Diccionario de Arquitectura Civil* que se publicó póstumamente. Aunque en él no añade nada nuevo sobre bóvedas

tabicadas, la cantidad de palabras descritas con referencia a ellas nos dice mucho de la frecuencia con la que se utilizaban.

BÓVEDA TABICADA. La que se hace de ladrillos asentados de plano sobre la cimbra, de modo que se tocan por su canto; con lo que la bóveda viene á ser un tabique de ladrillo volteado. También se hacen bóvedas tabicadas de ladrillo, que se tocan por su canto mas largo, descansando el mas corto sobre la cimbra: éstas últimas bóvedas son un conjunto de muchos tabiques, cada uno de un ladrillo solo, plantados sobre la cimbra (Bails 1802, 16, dentro de la entrada *Bóveda*)

DOBLE. S. m. La bóveda tabicada hecha de dos capas ó tabiques de ladrillo uno sobre otro (Bails 1802, 35, única definición en la entrada *Doble*)

LENGUETA. s. f. Tabiquillo de ladrillo que sirve para varios usos, de los cuales se especifican los principales en los siguientes artículos:

LENGÜETA DE BÓVEDA. Cada uno de los tabiques que se levantan en sus embecaduras para fortificada, enlazándola con los muros. (Bails 1802, 59, dentro de la entrada *Lengüeta*)

TABICAR DE SENCILLO. Frase Hacer una bóveda tabicada con una sola capa de ladrillos (Bails 1802, 99, dentro de la entrada *Tabicar*)

3.3.3. Ortiz y Sanz: la traducción de los Diez Libros de Arquitectura de Vitrubio

Ortiz y Sanz publica en 1787 una traducción al español de *Los Diez Libros de Arquitectura* de Vitrubio, con numerosas notas a pie de página (añadido del traductor) que fue de amplio uso durante los siglos XVIII y XIX en España.¹⁸

En este libro encontramos una única referencia a las bóvedas tabicadas, en una de estas notas a pie de página, refiriéndose al conde d’Espie, en la que critica la dependencia española de los tratados franceses en un método de construcción tan habitual en España como las bóvedas tabicadas. La nota está dentro de un capítulo referido a los jaharrados de yeso

Nota 10....El Conde d’Espie en su libro, impreso en Paris año de 1754, parece se hace inventor de los tendidos en texados y cubiertos sin armaduras de madera, y solo con ladrillo y yeso: como igualmente propagador en Francia de las bóvedas tabicadas,

¹⁸ A título de ejemplo, Paredes Guillen lo cita en su libro como uno de los ejemplares más apreciados de su biblioteca.

construidas con ladrillos puestos de plano unidos con yeso. Aunque para Francia pareciesen nuevas estas bóvedas y cubiertos, no lo eran para España. En el Reyno de Valencia son antiquisimas, y se hallan en varias Iglesias de 300 años de antigüedad. En casas particulares las hay del tiempo de los Moros y Moriscos. Creo que en el resto de España sucede lo mismo con poca diferencia. Los referidos techos son en Valencia igualmente conocidos, bien que pudieron introducirse por falta de madera. Suelen darles el nombre techo acallejonado. Asi, es muy extraño haya escritor español que diga que el uso de estas bóvedas tuvo poco ha principio en el Condado de Roussillon, y que hoy (era por los años de 1760) se usa mucho en Languedoc. Esto es ignorar lo que se tiene dentro de casa, y gobernarse por la jactancia de algunos escritores franceses que nos quieren vender por inventos propios cosas antiquisimas que acaso vieron en nuestros paises. Pero realmente el P. Laugier, de quien dicho autor lo toma sin citarle, habla diversamente. (Ortiz y Sanz 1787, 73)

Esta nota crítica de Ortiz y Sanz puede referirse a Diego de Villanueva o a Sotomayor. Aunque no es cierto que estos autores, ni tampoco Bails, afirmen que las bóvedas tabicadas son una novedad de Francia, si lo es que relatan los métodos constructivos escritos por los autores franceses, con sus incorrecciones.

PARTE II

LAS BÓVEDAS TABICADAS EN EL S. XIX: ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

CAPÍTULO 4:

LA PERVIVENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN TABICADA TRADICIONAL

Como se indica en los capítulos 1 y 2, la construcción tabicada era un sistema constructivo implantado y codificado en España, según unos criterios claros a los que he llamado «la construcción tabicada tradicional». Esta forma de construir se mantendrá también a lo largo del siglo XIX, conviviendo con una línea que avanza en la búsqueda de una nueva manera separándose cada vez más de la inicial.

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

4.1. Los *Quincenarios* de Josep Renart, ca. 1810.

Josep Renart (1746-1824), maestro de obras barcelonés, desarrolla su carrera en los últimos años del siglo XVIII, en los que en Barcelona se produce un importante incremento demográfico y, derivados de él, algunos cambios en la forma de construir.¹ En los primeros años del siglo XIX recoge su saber constructivo en unos manuscritos (*Cartas* y *Quincenarios*, estos últimos escritos cada quince días) que manda a su hijo Francesc, también maestro de obras. Estos documentos están escritos en los primeros

¹ Un estudio exhaustivo de Josep Renart y de los cambios experimentados en la forma de construir de Barcelona a finales del s. XVIII se puede encontrar en Rosell (1996). También allí está transcrito completo el 4º Quincenario de Josep Renart, dedicado a materiales y técnicas de construcción, que se estudia en este apartado

años del siglo XIX. España está inmersa en la Guerra de la Independencia y Renart aprovecha este momento de paro forzoso para escribir lo que sabe sobre construcción y enviárselo a su hijo, que está destinado en Tarragona también por la guerra. El documento que se estudia es el 4º *Quincenario*, dedicado a las técnicas constructivas.

Es un texto interesante porque Renart, que es un hombre culto pero a la vez un constructor experimentado, mezcla trozos de tratados con su propio saber constructivo.²

Renart dedica un buen espacio de su manuscrito a hablar de bóvedas tabicadas, desde la página (32) hasta la (87), en un manuscrito de 122 páginas. Esto deja ver la importancia que tenía este sistema constructivo en Barcelona y en la época en que Renart escribe. Se mezclan reproducciones íntegras de opiniones de otros autores que han tratado las tabicadas: Fray Lorenzo, Bails y Espie,³ con textos propios de Renart. Muchas veces entran en contradicción unos con otros, lo que es frecuente en este momento y en este tema. Hay que entender que lo que escribe Renart de su cosecha es lo que realmente construía, mientras que los textos copiados de otros autores, normalmente tratadistas influyentes, era lo que había que escribir.

Comienza el capítulo copiando a Sotomayor, citando datos que sólo están en su traducción, no en el original de Espie. Una de ellas resulta interesante, como ejemplo de la influencia de los tratados «cultos» por encima de la práctica constructiva: la recomendación de utilizar cal (llamada por Renart «argamasa romana») en lugar de yeso para unir los ladrillos. Esto es un añadido de Sotomayor, que no había construido una bóveda tabicada en su vida, al libro de Espie. Y es llamativo que Renart, que había construido muchas, la copie: el mortero de cal, aunque tiene otras ventajas sobre el yeso, fragua muy lentamente y no permitiría construir las bóvedas sin cimbras. En el

² También en Rosell (1996) se relata la formación intelectual de Josep Renart y los libros que manejaba. En la introducción de su 4º quincenario, cita como influencias a Milizia, Daviler, Bails y Belidor. En la parte dedicada a las bóvedas tabicadas se ve claramente la influencia de Benito Bails (1796).

³ A Espie lo conoce a través de la traducción de Sotomayor, de la que cita textos literalmente. Según se indica en Rosell (1996), Renart había leído la traducción de Sotomayor a través de otro autor que lo reproduce: Francesc Vidal y Cabassés, en un libro titulado *Conversaciones instructivas en que se trata de fomentar la agricultura por medio de riegos*, publicado en Barcelona en 1778.

resto del manuscrito no vuelve a hablar de la cal como aglomerante, citando siempre el yeso.

El documento de Josep Renart, a pesar de estar escrito en los primeros años del XIX, recoge la tradición constructiva de los últimos años del XVIII, en los que realmente trabajó Renart. En ese aspecto, es interesante como epílogo de la construcción tabicada tradicional, aunque ya influenciada por las ideas francesas, al menos en la teoría. Y es un punto de partida para los cambios que vienen detrás, a lo largo del s. XIX.

4.1.1. *Sobre el tamaño de los estribos*

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

Para las bóvedas de cantería comienza con unas referencias a tratados, reproduciendo una tabla para obtener su tamaño⁴, sigue con una polémica sobre el uso de esta tabla y termina con unas reglas proporcionales, que escribe además en catalán, frente al castellano de la mayoría del texto. Estas reglas deben ser las que empleaba Renart en la práctica. Son sencillas, del estilo de las de Fray Lorenzo y los factores relevantes son la luz del arco y su forma: tanto el intradós (medio punto, apuntado, rebajado) como el trasdós, ver figura 4.1. Para un ancho de bóveda de 36 palmos y distintas formas de arcos que se dibujan a la izquierda, a la derecha se ofrece el ancho necesario del muro, también en palmos.⁵ Las proporciones oscilan entre $L/2,5$ y $L/4$.

⁴ En concreto, reproduce una tabla del *Tratado de Fortificación ó Arte de construir los Edificios Militares y Civiles*, de John Muller que había sido traducido al castellano y publicado en Barcelona en 1769.

⁵ El palmo es una unidad de medida tradicional en Cataluña. Equivale más o menos a 0,20 m (Rosell, 1996). Luego 36 palmos son 7,2 metros, un ancho usual en naves de iglesia.

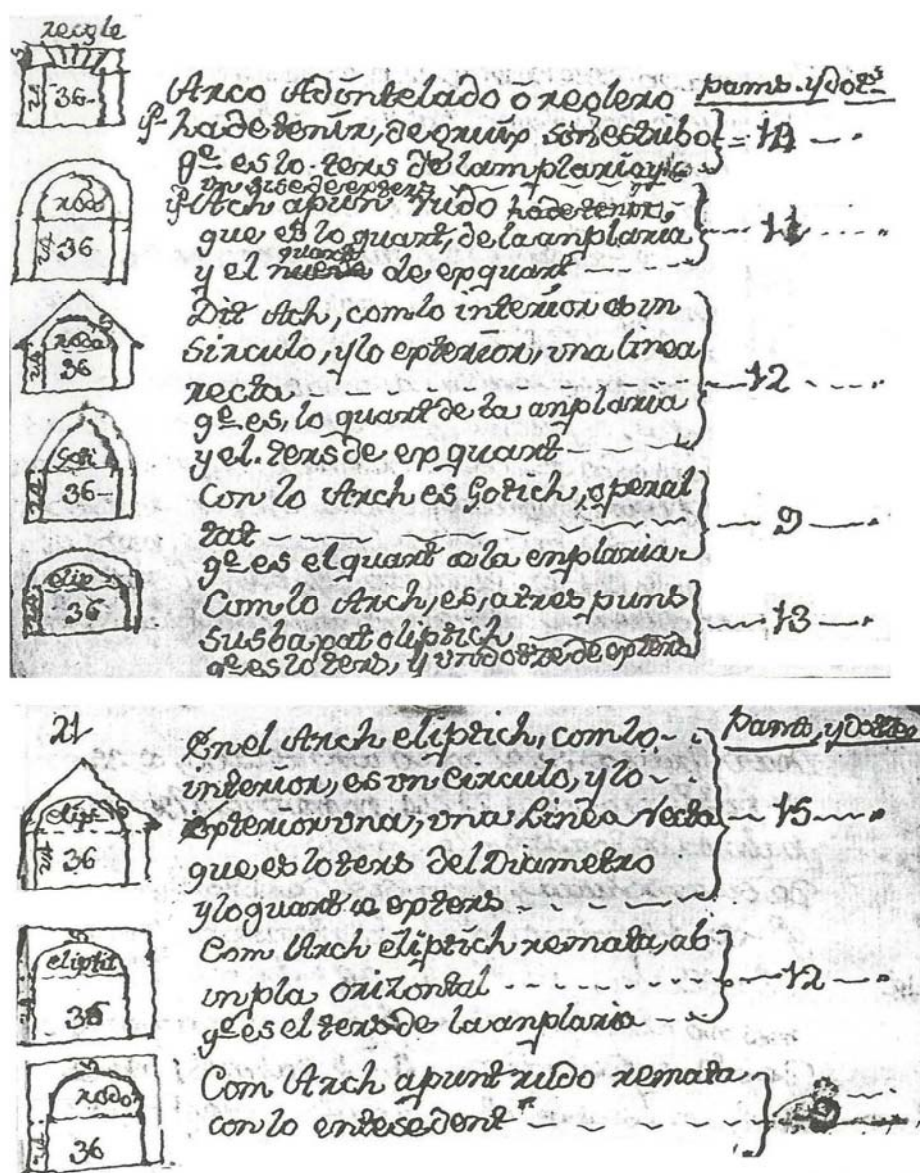


Figura 4.1: Reglas proporcionales para obtener el estribo de los arcos. (Renart, 4º Quincenario, 20-21)

Renart sabe que hay otros factores que inciden pero también que son poco relevantes:

Estas proporciones del grueso de los estribos para resistir el empuje de los arcos o bóvedas, casi puede servir por punto general si el arco tiene más o menos de su ancho. Por punto principal de la mayor anchura del ancho depende, el grueso de sus estribos (que a más de este también depende como tengo dicho, de la altura del estribo hasta donde arranque el ancho y asimismo la altura de su tardosa) pero como esto comprendo que no es tanto de consideración como su anchura se puede dejar a la discreción del Arquitecto (Renart, 4º Quincenario, 21)

Las reglas anteriores son para bóvedas de cantería y aunque se salen un poco del tema de la tesis, se reproducen para incidir en el tipo de reglas, proporcionales y de fácil

aplicación, que se empleaban todavía en este momento, aunque en algunos tratados ya se empezaran a escribir cosas más complejas.⁶

Sobre las tabicadas comienza discutiendo el asunto de su falta de empujes «Entre los arquitectos se disputa cada día sobre si esta especie de bóvedas tienen o no tienen empuje» (Renart, 40). A continuación de esta frase reproduce los «experimentos» de Espie para demostrar el escaso empuje de las estas bóvedas y después da unas reglas propias para calcular el estribo necesario en las bóvedas tabicadas. Son reglas de proporción, similares a las ha ofrecido para otro tipo de bóvedas (ver figura 4.1) y a las que enuncia Fray Lorenzo 150 años atrás. Pero las proporciones de estribos que ofrece Renart son mucho más esbeltas que las de Fray Lorenzo: frente a $L/5$ que recomendaba Fray Lorenzo para una pared sin contrafuertes, Renart dice que basta con un espesor entre $L/9$ y $L/12$, en función de la forma de la bóveda y de si lleva o no lunetos.

El hijo de Renart, el destinatario de estos escritos, aún apura más las medidas necesarias para soportar una bóveda tabicada: en algunos casos escribe anotaciones al margen o tacha las de su padre, dando proporciones menores: respecto a la media naranja: «habiendo lunetos bastará a la bóveda circular el onzeno y a la rebajada el $1/10$ » (Renart, 56); respecto a la baída tacha la proporción de $L/10$ y apunta en su lugar $L/12$. Renart cita y dibuja esquemáticamente en su texto unos cuantos edificios contruidos por él en los que se cumplen estas proporciones, como la casa de campo de Narciso Plandolit: 30×50 palmos en planta, bóveda en cielo de coche, rebajada, $f=L/6$, espesor de muros $3,5$ palmos ($L/8,5$). Este asunto se estudia con más detalle en el capítulo 7 de esta tesis.

4.1.2. Sobre los procesos de ejecución

Son muy interesantes los textos relativos a la ejecución de bóvedas tabicadas. Hace la misma división geométrica, y en el mismo orden, que Fray Lorenzo: bóvedas de cañón, media naranja, baídas, esquifadas y por arista. Añade un último tipo, que son «las

⁶ Por ejemplo, en Bails (1796), una de las influencias más directas de Renart para escribir este manuscrito, se citan unas reglas matemáticas muy complejas para obtener el tamaño de los estribos.

bóvedas a manera de imperial de coche» que describe Espie en su libro y de las que el propio Renart ya ha hablado anteriormente. En estas descripciones sobre la ejecución de bóvedas suele comenzar con textos copiados de Fray Lorenzo, continuando con aportaciones propias y describiendo algunas obras llevadas a cabo por él y en las que se construyó ese tipo de bóveda. Se extiende especialmente en las bóvedas baídas y en las de perfil imperial, a las que llama de «cielo de coche», que parecen las que construye con más frecuencia.⁷

4.1.2.a. *Macizados y lengüetas*

Renart cita con mucha frecuencia, en todos los tipos de bóvedas, la necesidad de rellenar los riñones y de construir lengüetas, a las que llama estribos:

El poco espacio que queda entre la pared y la vuelta de la bóveda hasta igualar la altura de las dos primeras carreras de ladrillo o poco más se llena y guarnece con yeso y trozos pequeños de los ladrillos partidos: y de allí arriba se asegura la vuelta de la bóveda con unos pequeños estribos distantes unos de otros seis o siete palmos pero sobretodo es menester gran cuidado en fortificar por este medio los cuatro ángulos de las bóvedas llanas (Renart, 37-38)

Especifica la distancia a la que deben situarse unas lengüetas de otras (entre 4 y 6 palmos, según el tipo de bóveda) y que sobre ellas pueden construirse revoltones o contrabóvedas para aligerar. Como referencia, cita dos edificios construidos por él, ambos con bóveda baída: en el cuartel de Atarazanas son unas contrabóvedas en las esquinas (ver figura 4.2. izq.); en la iglesia del Pino, las lengüetas se construyen siguiendo la pendiente, y sobre ellas se construyen contrabóvedas. Esta bóveda es en planta un rectángulo muy desigual (85x28 palmos), a pesar de ello Renart hace coincidir las lengüetas en la diagonal, ver figura 4.2.der., para reforzar los ángulos.

⁷ Estas bóvedas, ya citadas en el capítulo 3 porque los autores franceses las describen con frecuencia, es similar a la esquifada, pero de perfil elíptico, muy plana en la zona central y con la curvatura concentrada en los laterales, que después se oculta con una cornisa de manera que parece un techo plano. Espie las construya así en su vivienda de Toulouse, y son las que se dibujan en las 2 láminas de su libro (Espie, 1754)

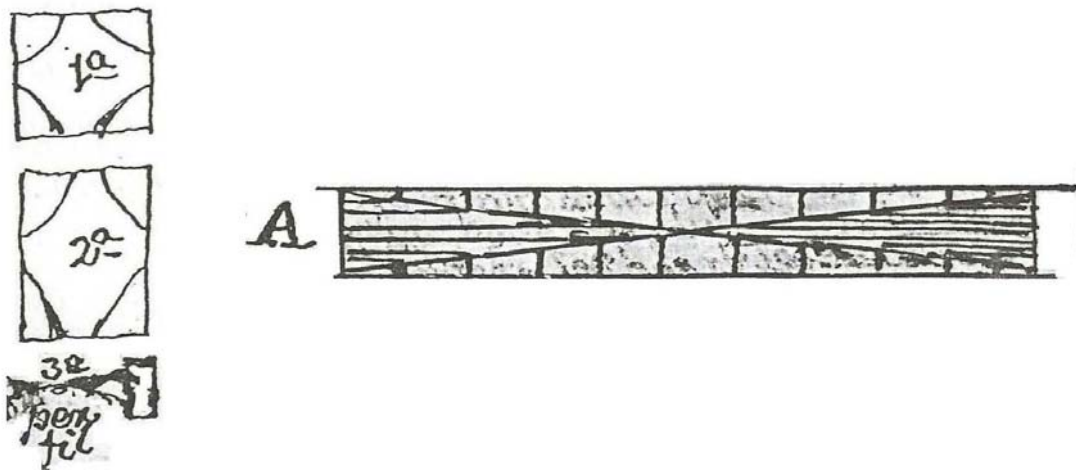


Figura 4.2: Situación y manera de construir las lengüetas en bóvedas tabicadas. A la izquierda: contrabóvedas en las esquinas (Renart, 60). A la derecha: lengüetas siguiendo la pendiente y tabiquillos por encima (Renart, 61).

4.1.2.b. Uso de cimbras

Renart tiene muy claro el uso de las cimbras en las estructuras tabicadas: «Al instante que se concluye la bóveda se pueden quitar las cimbras sin el menor recelo que no han servido (como en las comunes) para mantener su peso sino para arreglar su contorno» (Renart, 39).

En general, copia textualmente los procedimientos de Fray Lorenzo, sin más que detallar algunos de ellos: en las bóvedas de cañón, sobre la descripción de Fray Lorenzo añade que las dos cerchas necesarias se separarán 5 palmos y entre ellas se tirarán listones para apoyar todos los ladrillos del sencillado; en la media naranja, describe exactamente el procedimiento de Fray Lorenzo, con uno o varios cintreles según la forma de la bóveda; y para las bóvedas baídas, esquifadas y de arista, insiste mucho en que además de los cuatro cerchones en las diagonales de Fray Lorenzo, se coloquen cuatro más en medio del cuadrado, dibujando dos figuras explicativas sobre esto, ver figura 4.3.

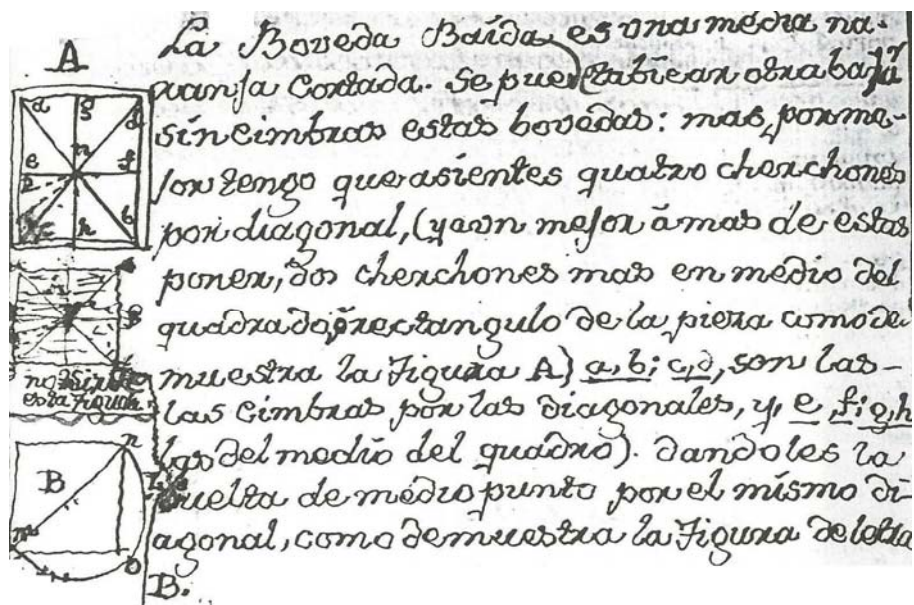


Figura 4.3: Dibujo explicativo sobre la colocación de las cerchas en bóvedas baídas, esquifadas y de arista (Renart, 58). El texto a la derecha es una copia de Fray Lorenzo, al que añade, entre paréntesis, el cambio que propone, consistente en añadir cuatro cimbras más siguiendo los cuartos.

4.1.3. Influencias francesas

Renart describe la forma tradicional de construir bóvedas tabicadas. Pero como ha leído a Sotomayor y a Bails, hay algunos añadidos sobre lo que, por ejemplo, escribe Fray Lorenzo, otra de sus fuentes fundamentales. Se refieren a algunos asuntos relativos a la construcción tabicada a los que las fuentes francesas dan mucha importancia:

El primero es sobre el problema que presenta el aumento de volumen del yeso en su fraguado, que además de ser una recomendación teórica copiada de otros tratados, es comentado por Renart en las partes propias del texto. Referido a la construcción de la iglesia del Pino, encontramos este texto:

dicha bóveda (...) por sus extremos descansaba en el encaje del arco (que también se hizo nuevo dejando una holgura de una pulgada y media entre este y la bóveda porque en tiempo de hinchar el yeso de la bóveda no diese empuje ninguno en el arco (Renart, 61)

Además de los cinco tipos de bóvedas descritos por Fray Lorenzo, Renart añade la bóveda imperial. Pero Renart, que es un constructor práctico, sabe que es muy difícil construirla con un perfil realmente elíptico y copia la descripción de Bails para estas

bóvedas: «La figura de esta bóveda es en su perfil una especie de vuelta de cordel muy rebajado (...) su montea será desde $\frac{1}{3}$ del ancho del aposento hasta $\frac{1}{8}$ » (Renart, 75-76), ver figura 4.4.

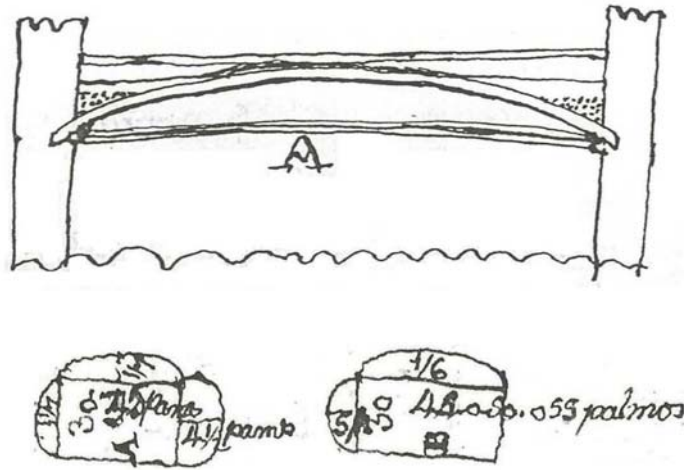


Figura 4.4: Arriba, sección de una bóveda tabicada con perfil imperial (Renart, 40) Abajo, flechas recomendables con este tipo de bóvedas para plantas rectangulares (Renart, 76). Aunque en el texto habla del perfil elíptico «como un cielo de coche», dibuja una bóveda circular muy rebajada.

El final de la parte dedicada a bóvedas tabicadas en el manuscrito es una copia bastante literal de Bails (1796). Comienza con un párrafo idéntico: «En vista de autoridad de tanto peso en estas material he extrañado mucho la oposición que en algunos facultativos he notado hacia estas bóvedas» (Bails 571-72; Renart 78), pero para convencer al lector de la bondad del sistema tabicado, en lugar de los ejemplos que cita Bails (copiados a su vez del *Cours de Architecture* de Blondel y Patti) ofrece los suyos propios, ya citados más arriba: la capilla del coro de la iglesia del Pino, la casa de campo de Narciso Plandolit y otros. También, siguiendo la manera de Espie cita un «experimento», un pequeño ensayo no intencionado sobre la bóveda construida por él en la iglesia del Pino:

el albañil que la hizo (..) la cargó de tanta tierra en dicha bóveda recién hecha que a mi concepto había más de cinquenta carretadas que ascendían a 900 o 1000 quintales (...) no se experimentó mas que una rendica o dos por su largo; nomás llevaba de hondo todo el sencillo del primer ladrillo (Renart, 79-80)

Y termina con el apartado *Algunas consideraciones acerca de las bóvedas tabicadas*, que copia punto por punto de Bails (1796).

4.2 Los tratados de Fornés y Gurrea, 1841 y 1846

Manuel Fornés Gurrea nació y vivió en Valencia (1777-1856). Fue arquitecto y académico de la Real Academia de San Carlos, donde ocupó el puesto de director de Arquitectura. Como tratadista publicó dos obras en 1841 y 1846 tituladas *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar* y *Álbum de proyectos prácticos originales de Arquitectura*. El primero tuvo mayor repercusión y se reeditó en 1857 y 1872. Se divide en tres partes, a las que Fornés denomina *Tratados*. El primero es el más interesante sobre el tema que nos ocupa, ya que describe la forma de construir arcos, bóvedas y cúpulas. El segundo aborda temas legales y de medición y el tercero se dedica íntegramente a los estucos. En el *Álbum de proyectos prácticos originales de Arquitectura*, Fornés detalla plantas, alzados y secciones de distintos edificios, con la forma y medidas que el considera necesarias.

Al igual que Fray Lorenzo, dice ser un constructor experimentado: «según la misma experiencia me demuestra en las muchas que he edificado y dirigido» (Fornés y Gurrea 1841, 39)

4.2.1. Tipos de bóvedas y procesos de ejecución

Al igual que en Fray Lorenzo (1639) para Fornés y Gurrea todos los tipos de bóvedas pueden ser tabicadas: las escaleras, las bóvedas de los claustros, las bóvedas de cañón, las cúpulas, etc. No hay un apartado específico sobre bóvedas tabicadas, ya que trata de ellas a lo largo de todo el texto como la opción por defecto, dejando ver la frecuencia con que este sistema se usaba en la zona del levante español, donde, debido a la falta de madera, la construcción con ladrillo era la opción mayoritaria. Y dentro de las construcciones de ladrillo, la tabicada parece muy habitual, dado que en el libro de Fornés lo que hay es un capítulo específico *De las bóvedas de rosca*.

A pesar de estar escrito ya bien avanzado el siglo XIX, lo que describe Fornés sigue siendo lo de siempre: bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso. No encontramos en todo el

texto ninguna referencia al cemento como aglomerante ni tampoco al uso de atirantamientos metálicos. Tampoco a su uso en edificios industriales, aunque Fornés, especialmente en su segundo tratado, de 1846, recomienda el uso de bóvedas tabicadas en casi todos los edificios posibles: viviendas, iglesias, teatros, cuarteles, etc.

La clasificación por tipos de bóvedas no es muy sistemática, siendo veces por la forma y otras por el uso, y dedicando mucho espacio a algunos tipos (bóvedas de escaleras y cúpulas) frente a otros. La descripción del proceso geométrico para definir la bóveda (traza, punto de encuentro) es muy detallada, y no tanto el proceso constructivo en sí, ya que habla poco de cimbras, lengüetas, número de hojas, etc.

4.2.1.a. *Bóvedas de escalera*

Fornés dedica mucho espacio a una descripción muy detallada de cómo construir bóvedas para escalera, muy frecuentes «Las bóvedas tabicadas sencillas o dobles, que continuamente se construyen en las escaleras de edificios particulares» (Fornés y Gurrea 1841, 19). Es el primer autor (por orden cronológico) de los consultados en hacer un apartado específico para escaleras, que luego se repetirá en muchos tratados del XIX. Dedicar varias figuras a explicar con detalle el trazado de una curva de escalera (figura 4.5) y la composición entre varias curvas (figura 4.6).

Destaca la importancia de la adecuada traza de la bóveda y también de que esté inclinada hacia las paredes laterales que le sirven de apoyo. Sobre la traza, explica varias maneras para determinarla adecuadamente: el primero es un procedimiento geométrico (ver figura 4.5, arriba) y el segundo se ayuda de un cordel de hierro que marca una curva catenaria (ver figura 4.5, abajo):

Tírese la diagonal *a.b.* de un extremo á otro, donde se ha de apoyar la bóveda. Se tomará un cordel flexible ó cadenilla de hierro, ó cosa que tenga peso: se fijará en los dos extremos *a.b.*, dejándola colgar hasta el punto que se le quiera dar de monte, y el mismo cordel ó cadenilla demarcará la perfecta curva que se ha de dar á la bóveda; la que se transmitirá á la tabla que ha de servir de cimbra (Fornés y Gurrea 1841, 21)

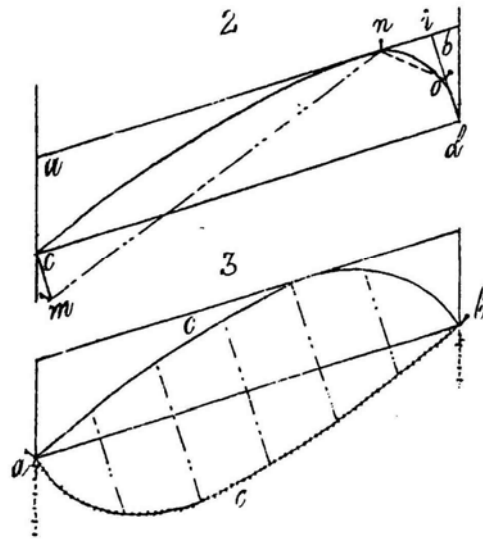


Figura 4.5: Explicación de los procedimientos para trazar la monte de un tramo recto de bóveda tabicada para escalera. Arriba: procedimiento geométrico; Abajo: con ayuda de una cadenilla que marca la catenaria. Lámina I, Figuras 2 y 3 (Fornés y Gurrea 1841)

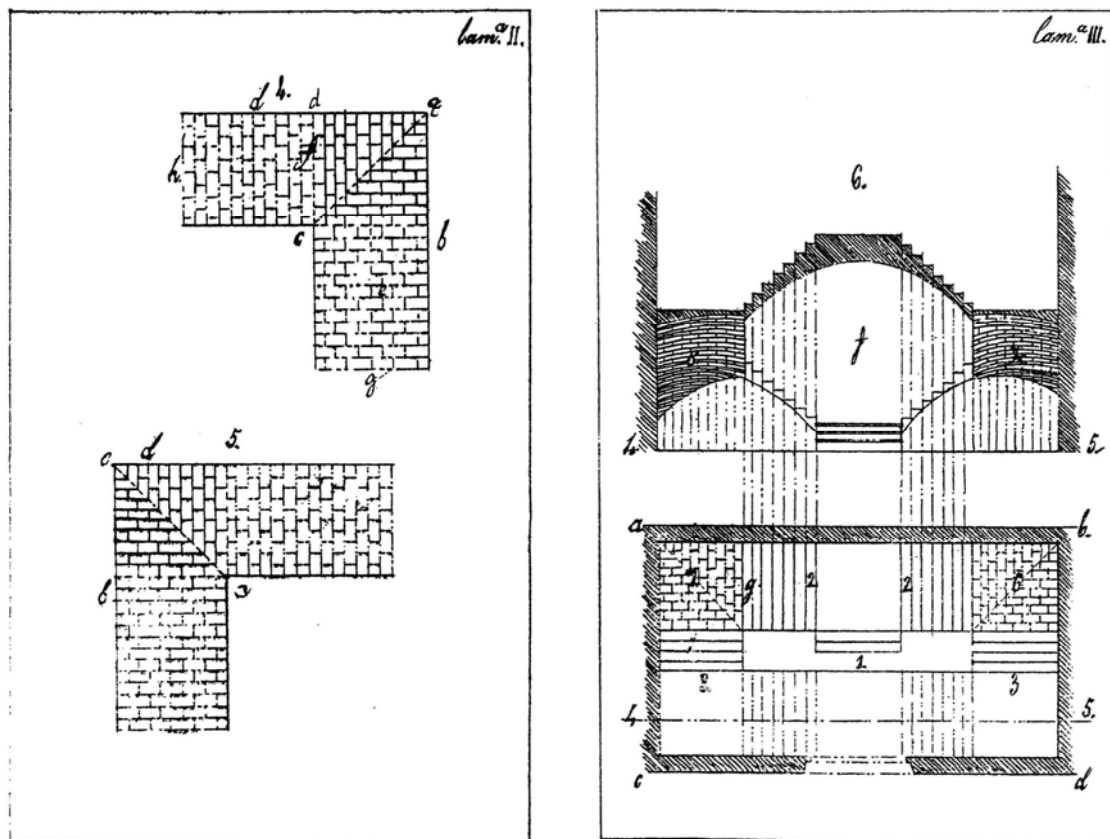


Figura 4.6: Explicación de los procedimientos para construir el cruce entre dos tramos rectos de una bóveda tabicada para escalera. A la izquierda, Lámina II. A la derecha Lámina III. (Fornés y Gurrea, 1841)

Para ejecutar el cruce entre dos tramos rectos, llamadas por el autor bóvedas de mezcla, Fornés explica dos procedimientos: por arista (parte derecha de la *lam^a III* y parte inferior de la *lam^a II*, ver figura 4.6) y por igual (parte izquierda de la *lam^a III* y parte superior de la *lam^a II*, ver figura 4.6). Las primeras dejan una arista marcada en el encuentro y son menos sólidas según el autor, por el poco grueso que presentan en la unión y porque «la unión de sus curvas pierde la fuerza en el ángulo saliente diagonal *a.c.*, y los ladrillos quedan cortados sin trabazón» (Fornés y Gurrea 1841, 22). Las segundas «se llaman de mezcla por igual, porque en la curva de la superficie del cuadrado no se hallan encuentras, sino una misma combinación de entrambas» (Fornés y Gurrea 1841, 22)

4.2.1.b. Cúpulas

Como para el resto de bóvedas, Fornés describe las cimbras (o cintreles) necesarios para generar la cúpula con mucho detalle, pero apenas incide en el proceso constructivo posterior.

Fornés explica cómo construir las cúpulas que considera más habituales, que son peraltadas, con una montea del $\frac{2}{3}$ del diámetro en planta, ver figura 4.7.

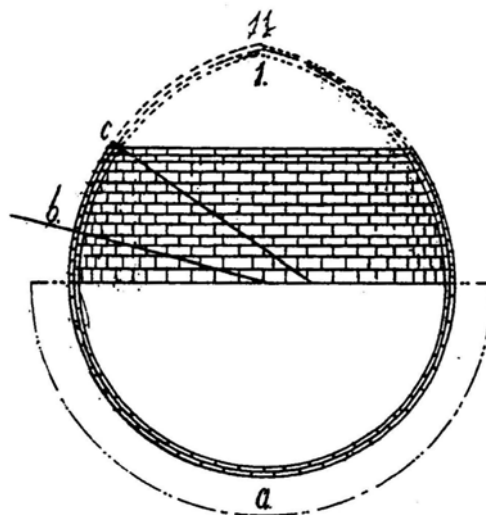


Figura 4.7: Método para construir una cúpula tabicada sin cimbras, con una montea de $\frac{2}{3}$ del diámetro en planta. Se utilizan dos cordeles, uno fija la altura (b, fijo en el centro) y otro la posición en el anillo (c, fijo a $\frac{2}{3}$). Lámina VII, figura 11 (Fornés y Gurrea 1841)

Se ejecutan con ayuda de dos listones de madera: el *b*, de longitud igual al radio de la cúpula en planta, sirve para colocar los ladrillos de una hilada y el *c*, de longitud igual a la monte de la cúpula, para situar el primer ladrillo de cada hilada, ver figura 4.7.

Para cúpulas de planta oval, a las que llama elípticas pero luego describe así: «por constar la elipse de dos diámetros, mayor y menor y ser por consiguiente su perímetro ó curva formada por diferentes radios», Fornes describe dos procedimientos de trazado. Ambos son aproximados, dando lugar a una superficie más o menos oval. El primero (ver figura 4.8 izq.) es con ayuda de una cimbra oval que gira alrededor del eje horizontal *ab*. La cúpula que se obtiene es oval en planta y en la sección larga y semicircular en la sección corta. En el segundo, la cimbra oval gira alrededor del eje vertical *ab*; en planta quedaría una circunferencia así que se suplementa la distancia con unos *sarchones* que hacen el acuerdo.⁸

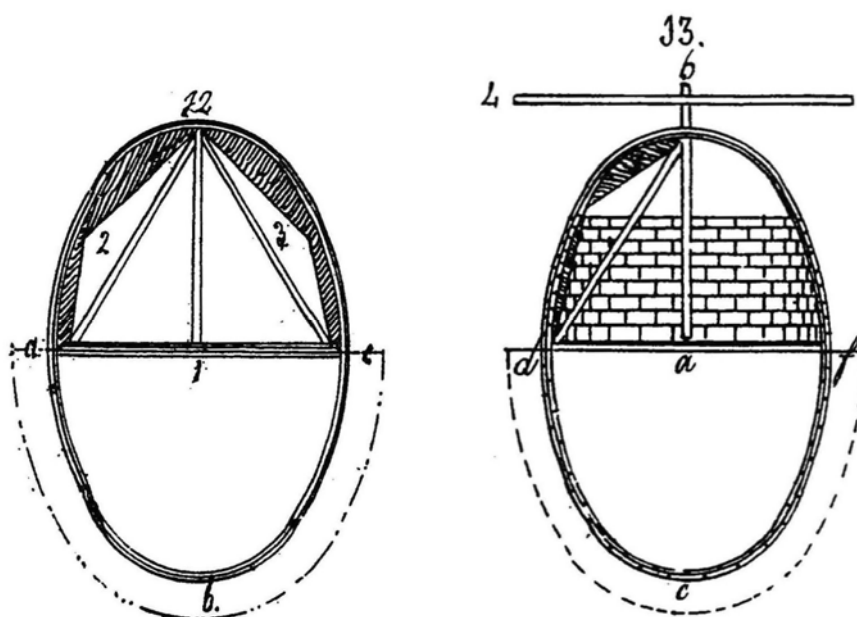


Figura 4.8: Explicación de dos métodos para construir bóvedas elípticas sin cimbra. A la izquierda: Lámina VII, figura 12. A la derecha, Lámina VIII, fig. 13 (Fornés y Gurrea 1841)

⁸ *Sarchón* es una palabra utilizada con frecuencia por Fornés y Gurrea. Es un tablón (o varios enlazados) cortado a lo largo con la forma del arco que se utiliza como cimbra ligera, más para controlar la forma que como apoyo de los ladrillos. Se dibuja en la figura 4.8 izq.

4.2.1.c. *Bóvedas tabicadas como cimbra*

Fornés utiliza mayoritariamente las bóvedas tabicadas. Las bóvedas de rosca las reserva para los elementos que deben resistir mucho peso, como los arcos torales y las pechinas, o los pósitos: «las bóvedas del piso principal de rosca de un ladrillo cuando menos de espesor» (Fornes y Gurrea 1846, cap. X-Pósito o Almudín).

Pero incluso en esos casos cita las tabicadas como cimbra de las de rosca, ahorrando así madera, muy costosa en la zona de Valencia por su escasez:

Por lo mismo manifestaré cómo debe procederse en semejantes casos, para que sin riesgo alguno, y supuesta la falta de madera, se puedan construir los arcos (...) De modo que el tabique sirve para sostener el medio ladrillo, y este su totalidad sin riesgo alguno, y sin necesidad de grandes y costosas cimbras (Fornés y Gurrea 1841, 29)

El texto describe el procedimiento de la figura 4.9: primero se construye una hoja tabicada, que apoya en sarchones en la zona cercana a los arranques (desde las líneas de trazo y punto en la figura 4.9) y en «una simple cimbra de tablas, lo suficiente para correr un tabique» (Fornes 1841, 29). Sobre la hoja tabicada se construye la de rosca, primero «un arco de medio ladrillo echado y otro derecho, dejando la trabazón correspondiente para la unión (...) del restante grueso» (Fornes 1841, 29).

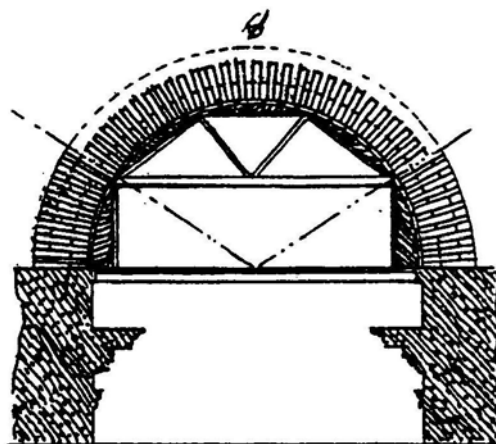


Figura 4.9: Explicación de cómo construir arcos torales con una capa de ladrillos de plano funcionando como cimbra del arco definitivo de rosca de ladrillo. Lámina VI, figura 8. (Fornes y Gurrea 1841)

De manera similar se procede en los sitios húmedos, en los que usar bóvedas tabicadas, recibidas con yeso, puede dar problemas:

Para construir con prontitud y seguridad las bóvedas de cubrir sótanos, cloacas, valladares, ó puentes de caminos asegadores, cuya rosca, por razon de la humedad, se hace de argamasa, y esta necesita de algunos días para endurecerse; se volteará antes la bóveda tabicada, y sobre ella se apoyará la rosca; pues cuando se arruina aquella por la humedad, ya ha adquirido la rosca toda su consistencia y solidez (Fornés y Gurrea 1841, 45)

Es interesante resaltar que, a pesar de que Fornés escribe en 1841, no hace ninguna referencia a la posibilidad de utilizar bóvedas tabicadas recibidas con cemento rápido para solucionar el problema anterior.

En su siguiente libro, *Álbum de proyectos de arquitectura*, Fornés también recoge esta idea acerca del uso de las bóvedas de rosca:

bóvedas subterráneas de suelos y cubiertas, de ladrillo y yeso ú mortero, según su clase y distinción; es decir, las bóvedas del piso de tierra, y subterráneos de rosca de un ladrillo de espesor, y las demás de tabiques dobles; (Fornés 1846, capítulo XVII-Casa de recreo para un grande)

4.2.1.d. Otras bóvedas

Fornés cita otros tipos de bóvedas, aunque con menos detalle: en el apartado *Bóvedas en claustros o peristilos* cita las bóvedas baídas y las de arista, que habitualmente se construyen en esos lugares. Como otros autores, previene acerca de la debilidad de las de arista si son tabicadas. Sobre las bóvedas de cañón, las describe con lunetos, también esféricos. Se construye primero la bóveda completa, se traza la forma del luneto desde la planta por proyecciones verticales y se rompe. Entonces se construye el luneto «por medio de un sarchón de escasa montea [que] se apoya en la curva abierta en la bóveda y en una ranura o zanja abierta en la pared» (Fornés 1841, 33). En la figura 4.10 se describe el procedimiento, en planta y dos secciones.

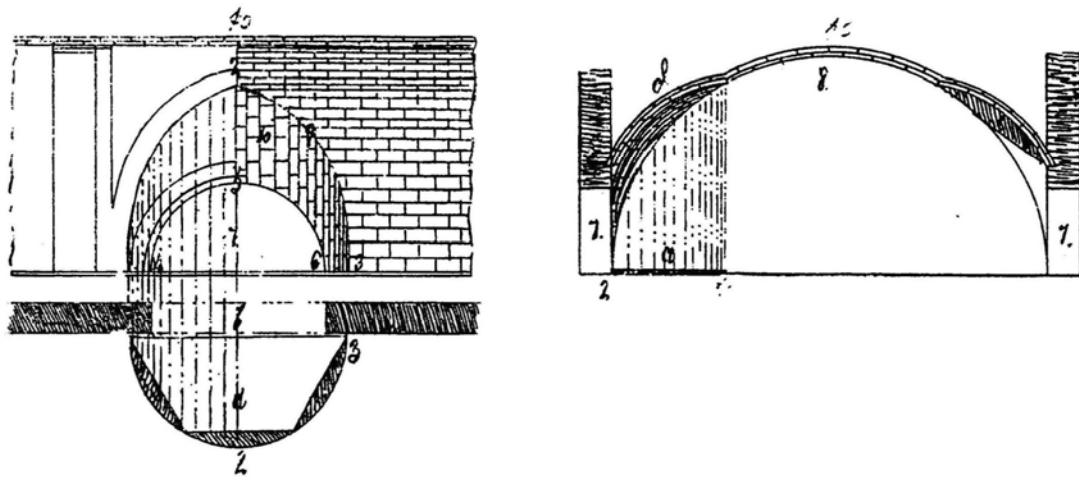


Figura 4.10: Procedimiento para trazar un luneto esférico en una bóveda de cañón, tanto la bóveda como el luneto son de tabique doble.

También sobre las bóvedas de cañón hay un apunte interesante sobre como darles una ligera curvatura en el sentido del cañón. Fornés recomienda esto para evitar que se desprendan los ladrillos de la clave

En la construcción de las bóvedas de cañón corrido de mucha longitud, que se fabrican entre arcos y paredes, se colocarán cimbras á la distancia cuando mas de cuatro varas, y al sarchon que se apoya en las mismas, y sirve de regla maestra de uno á otro extremo, se le darán dos ó tres dedos de curva ó monte, á fin de romper la línea recta (Fornés y Gurrea 1841, 48)

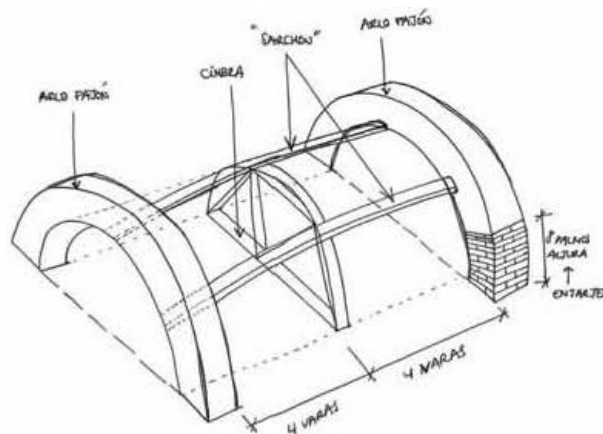


Figura 4.11. Procedimiento para dar doble curvatura a una bóveda de cañón seguido, con ayuda de un sarchón flexible. Interpretación del texto de Fornes y Gurrea en Sebastián (2013)

Termina dibujando unas figuras con aparejos posibles para distintas plantas, regulares e irregulares, construidas todas ellas con bóveda tabicada. Se reproducen a

continuación (ver figura 4.12) para mostrar el dominio de la técnica que se tenía en Valencia cuando Fornés escribe el tratado, ejecutándose aparejos de ladrillo de enorme complejidad.

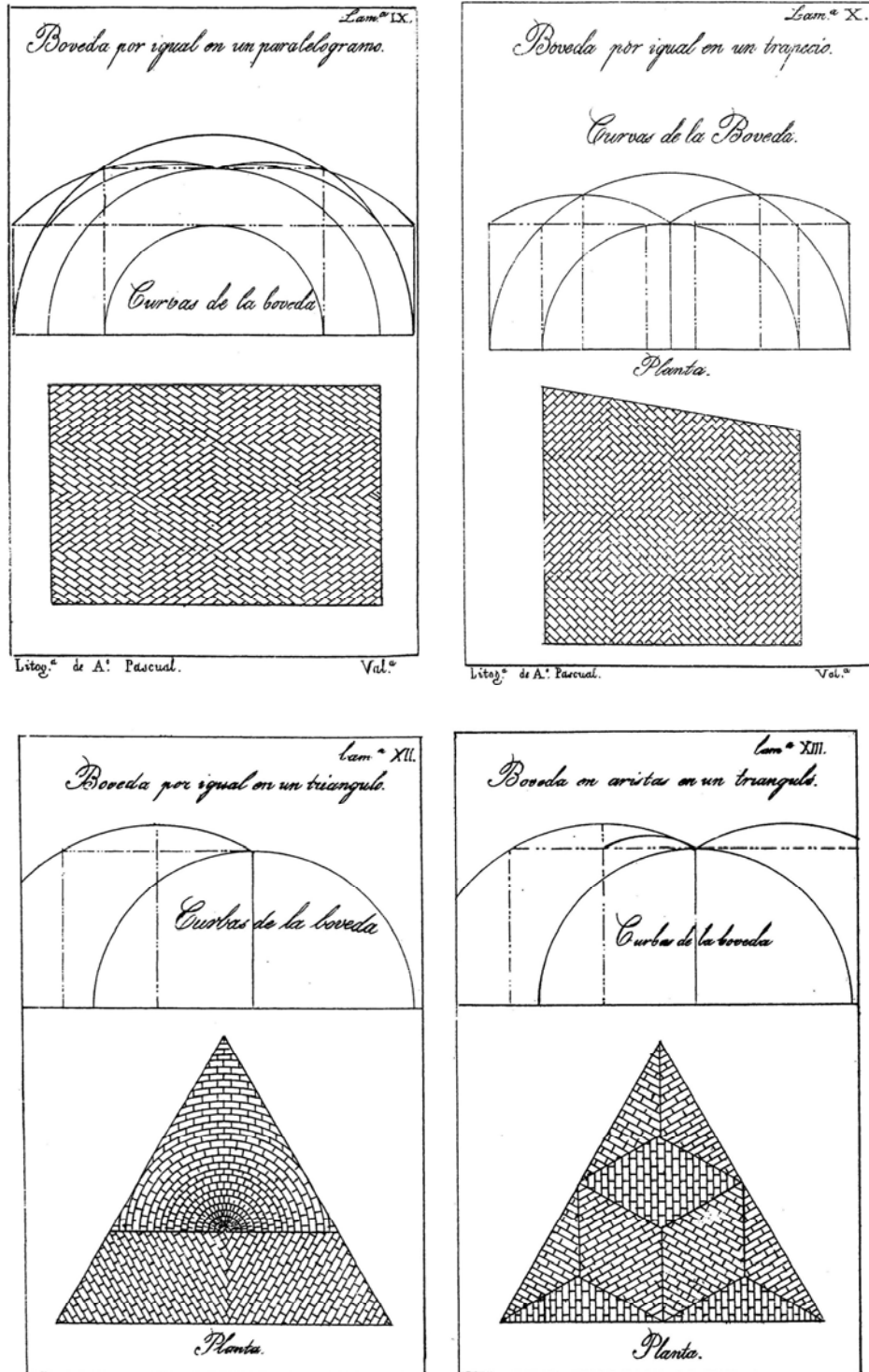


Figura 4.12: Dibujo en planta de los aparejos posibles para construir bóvedas tabicadas en distintas plantas, regulares e irregulares. Láminas IX, X, XII, XIII (Fornés Gurrea, 1841)

4.2.2. Comportamiento estructural

El tratado de Fornés es escaso en consideraciones sobre el comportamiento estructural de las bóvedas. Parece un tema que no le interesa mucho, escribiendo textos muy vagos sobre él: «el mayor o menor empuje de las bóvedas pende de su mucha estension, ó de ser mas ó menos rebajadas, y de su grueso, y que en las tabicadas este es apenas reparable» (Fornés y Gurrea 1841, 46) y reproduciendo lo que ha leído en los tratados de la época: la falta de empujes de las bóvedas tabicadas por su monolitismo: «su fábrica se reduce á un cuerpo sólido, igual por ejemplo á una cobertera de puchero, sin mas empuje que el de su peso» (Fornés y Gurrea 1841, 47).

La influencia de los tratados franceses se deja notar en el capítulo final de su tratado I, *Instrucciones sobre la elaboración de las bóvedas tabicadas*. Allí, además de las ideas sobre el empuje, encontramos las diez instrucciones básicas sobre «la buena construcción tabicada» que escribe por primera vez Blondel y reproducen muchos autores después: la precaución contra la hinchazón del yeso, mojar bien ladrillos antes de colocarlos, utilizar ladrillo y yeso de buena calidad y amasar el yeso en pequeñas cantidades, etc.

y componiéndose dicha fábrica de ladrillo y yeso, debe procurarse la buena calidad de estos dos únicos ajentes; a saber, solidez en el ladrillo, y buena calidad en el yeso para la perfecta unión de ambas especies. De modo que el ladrillo al emplearlo esté suficientemente mojado, y antes de ponerle el yeso se le limpie el canto con las manos, para que fragüe bien aquel. El yeso ha de amasarse en corta cantidad (...). Tampoco debe menearse este una vez puesto en su lugar, pues en ello consiste la perfecta unión, y el ladrillo doble se asentará con yeso claro bien batido á juntas encontradas del tabicado (...) También previene la buena práctica estén hechos algunos días sin llenar sus senos ni hacer lengüetas, ó encallejonados de ladrillo para formar su piso, en atención á la hinchazón del yeso que las empuja hacia arriba (Fornés y Gurrea 1841, 47)

4.2.3. Cúpulas y bóvedas dobles

Fornés describe con detalle la construcción de cúpulas dobles, así como la formación de las vertientes para los tejados utilizando únicamente albañilería, en palabras de Juan

José Nadal: «en este país se quitan las aguas sin madera» (Gil 2012).⁹ En Valencia la madera era cara y poco abundante, asunto que el propio Fornés recoge en su *Álbum de proyectos* de 1846:

La formación de los suelos de los pisos altos serán de bóvedas tabicadas y trasdosadas hasta formar planos horizontales y verticales en las cubiertas, de manera que solo se empleará la madera en puertas y ventanas (Fornés y Gurrea 1846, cap. V-Casa de posadas para una capital)

Así que la forma más habitual de construir el tablero de apoyo de las tejas (que podía ser plano o una segunda cúpula) era con ladrillos y yeso, conectadas a la cúpula o bóveda inferior mediante lengüetas, que en valenciano se llaman *carrrerons*. Las soluciones que ofrece Fornés acaban siendo parecidas al sistema de *combles briquetès* de Espie.

4.2.3.a. Cúpulas dobles

Las cúpulas de doble hoja, ambas tabicadas, que describe Fornés fueron un tipo de construcción muy abundante en Valencia: «Pero la experiencia ha hecho ver la necesidad de duplicar las bóvedas en las cúpulas, un exterior de ladrillo doble, sobre la cual asientan las tejas, y otra interior separada de aquella» (Fornés 1841, 40). La hoja exterior es peraltada, con una monte de $\frac{2}{3}$ del radio y la interior «con sujetarse al radio, cuando menos tiene bastante» (Fornés 1841, 41). La forma peraltada de la hoja exterior permite la rápida evacuación de las aguas. Y la de la hoja interior, de medio punto o rebajada, se cubre con pinturas que así «se presentan (...) más aproximados a la vista del espectador». La doble hoja hace que las posibles humedades de la cubierta sólo afecten a la hoja exterior, preservando así las pinturas.

En su segunda obra, *Álbum de proyectos originales de arquitectura*, Fornés dibuja muchas de estas cúpulas dobles como solución de cubierta para diferentes edificios, ver figuras 4.13 y 4.14.

⁹ Juan José Nadal fue un importante arquitecto del barroco valenciano y está frase la escribe en la justificación de uno de sus proyectos a la Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid. En Gil (2012) se encuentra más información a este respecto.

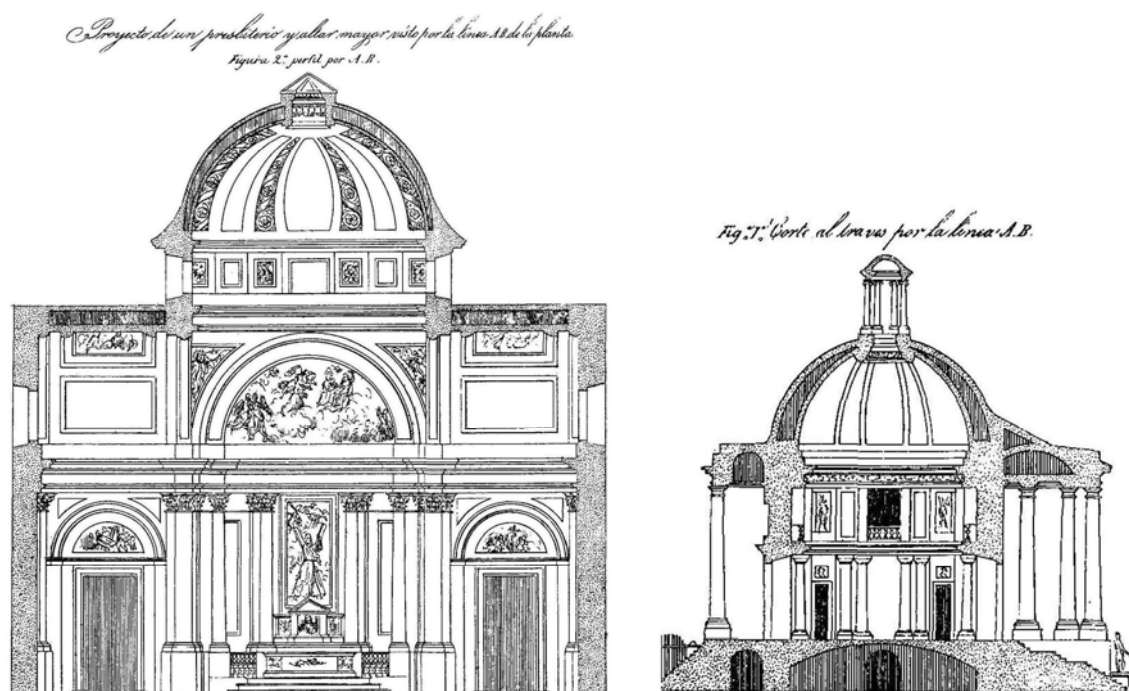


Figura 4.13: A la izquierda, sección por el Presbiterio de una iglesia (Fornés 1846, Lam. XIV). Tanto la cúpula central como las bóvedas laterales son de doble hoja, la cúpula une sus hojas en clave y arranques. A la izquierda, sección de Casa de recreo para un grande (Fornés, Lam. XXII, fig. 1), también con una cúpula tabicada de dos hojas.

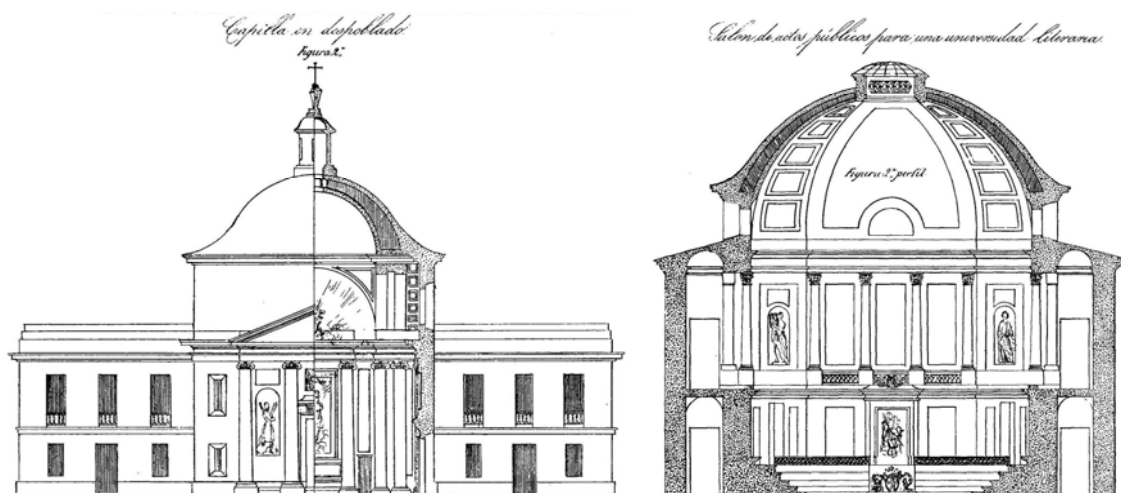


Figura 4.14: A la izquierda, alzado y sección de Capilla en despoblado: «su cúpula y linterna de ladrillo y yeso, sobre las que se harán sus vertientes con encallejonados, cubriéndose de buena y sólida teja bien pavimentada» (Fornés y Gurrea 1846, Lam. XVI, fig. 2 y texto en cap. XIII). A la derecha, sección de Salón de actos de universidad: «las bóvedas tabicadas dobles, con encallejonados para formar las vertientes» (Fornés y Gurrea 1846, Lam. XIX, fig. 2 y texto en cap. XV).

Son dibujos muy interesantes: cúpulas de dos hojas muy delgadas, frecuentemente unidas por lengüetas, aligeradas con arcos en arranques y clave. Las dos hojas se unen en los arranques de la cúpula (y también en la clave cuando rematan en una linterna), en una única hoja muy gruesa. Este regruesamiento continúa por el muro que las sustenta. Los perfiles de estas cúpulas recuerdan extraordinariamente a los que, 50 años después construirá Guastavino (de origen valenciano) en Estados Unidos.

4.2.3.b. Formación de vertientes para tejados

En los apartados *Formación de vertientes sobre bóvedas* y *Cubiertas sobre las cúpulas* de Fornés (1841) se describe como construir una base para la cubierta inclinada de tejas sobre las bóvedas y sobre las cúpulas. Para ello se construye sobre la bóveda tabicada un conjunto de tabiques llamados callejones (en valenciano *carrerons*), que pueden ser todavía más ligeros, ver figura 4.15

El método de aligerar se reduce á formar arcos en los mismos tabiques, que estriben sobre las paredes y trasdós de las bóvedas, por cuyo medio se puede suprimir una tercera parte de su peso y trabajo, según se manifiesta en la *figura 14, Lámina VIII: a.* planta de los callejonados encima de los trasdós de una bóveda; 1. callejón central á lo largo de una nave de iglesia; 2. callejones transversales que se comunican en el centro (Fornés y Gurrea 1841, 41-42)

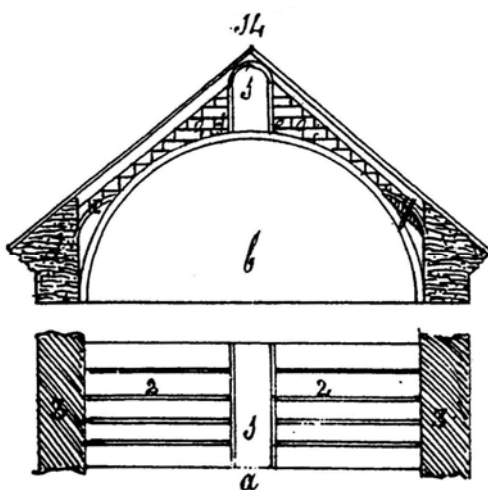


Figura 4.15: Formación de tablero de cubierta mediante tabiques de albañilería sobre las bóvedas. Lámina VIII, fig. 14 (Fornés y Gurrea 1841)

Estos tabiques o callejones, que se construyen de manera similar a las lengüetas de Fray Lorenzo, tienen también una función estructural, colaborando tanto los tabiques como el tablero superior a la resistencia global, formando una especie de bóveda de doble hoja

Al igual que con las cúpulas dobles, Fornés dibuja en las láminas de su *Álbum de arquitectura* (1846) numerosos ejemplos de esta manera de construir los tejados. Las figuras 4.16 y 4.17 muestran algunos de ellos

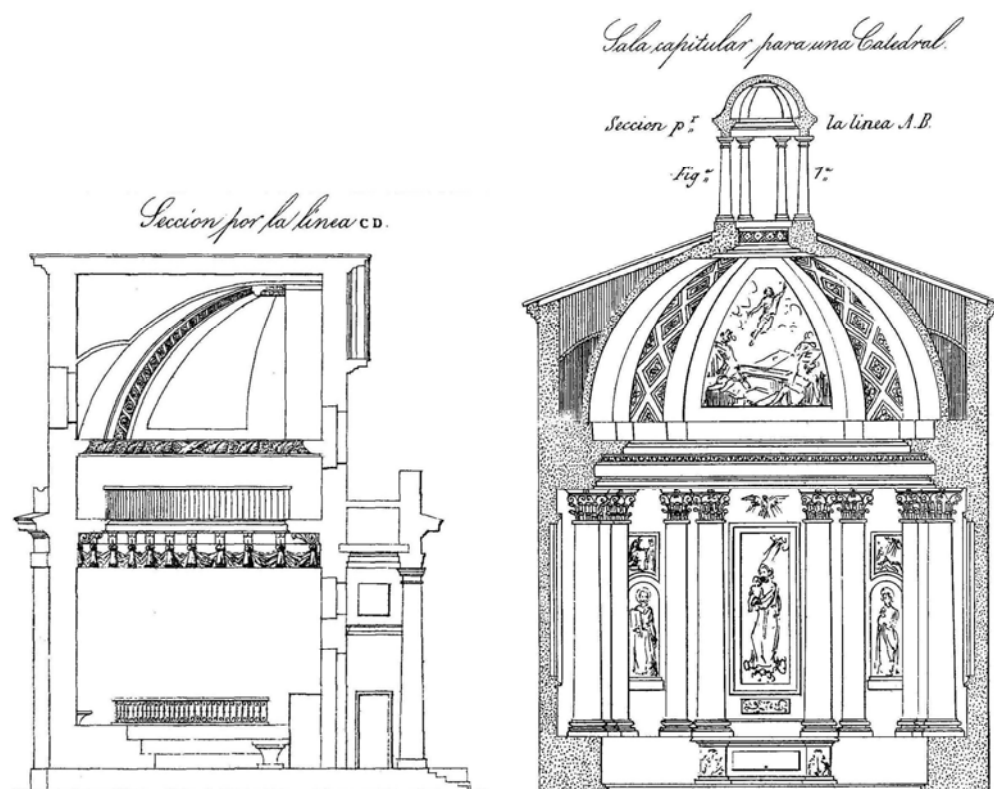


Figura 4.16: A la izquierda, sección por el anfiteatro de un Teatro anatómico (Fornés y Gurrea 1846, Lam. IVbis). La cúpula es tabicada y está reforzada mediante una lengüeta que funciona como arbotante. A la derecha, sección de Sala Capitular de una catedral (Fornés y Gurrea 1846, Lam. XXVI, fig. 1). Aquí la cúpula tiene una sola hoja y se construyen lengüetas para llegar al tejado, aligeradas con un arco en su parte inferior

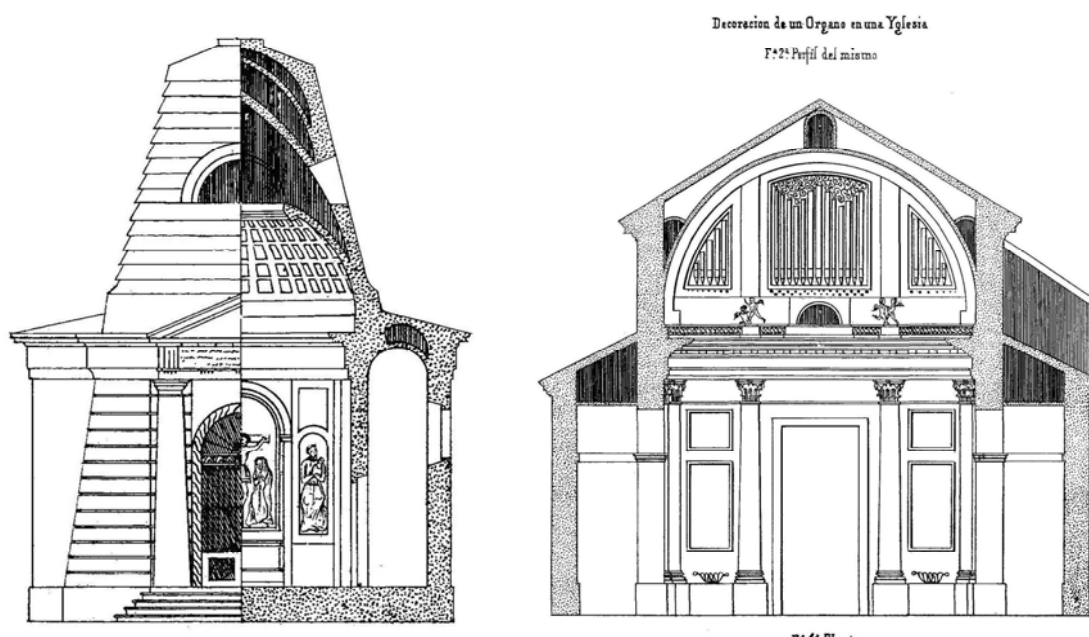
Fig. 2.ª Mitad de Fachada y Corte del interior. p.ª A.B.

Figura 4.17: A la izquierda, sección de *Capilla sepulcral en despoblado* (Fornés y Gurrea 1846, Lam. XLIV, fig. 2), vemos como se lleva al extremo la complejidad en la construcción de cúpulas de varias hojas, que aquí son cuatro en total. A la derecha, sección de *Decoración de un órgano para una yglesia* (Fornés y Gurrea 1846, Lam. XLV, fig. 2). Cúpula de una hoja con lengüetas hasta alcanzar la forma del tejado, estas se aligeran con un arco en la zona inferior.

4.3. Ger y Lóbez: Construcción civil, 1898

En la segunda mitad del siglo XIX se publican numerosos tratados de arquitectura y construcción. En casi todos ellos se citan, en mayor o menor medida, las bóvedas tabicadas. En la mayoría de ellos se van recogiendo las novedades (uso del cemento atirantamientos, etc.), con más intensidad a medida que avanza el siglo. Pero estos avances conviven con el sistema tabicado tradicional. Un buen ejemplo es el tratado de Ger y Lóbez *Construcción Civil*, escrito en 1898, en el que aparecen dos apartados dedicados a la construcción de bóvedas tabicadas, tituladas justamente «Bóvedas tabicadas con yeso» y «Bóvedas tabicadas con cemento» Se estudia aquí el primer apartado, un texto muy influenciado por Fornés y Gurrea.

Comienza describiendo el proceso de ejecución de la bóveda más sencilla, la de cañón seguido, sin ninguna cimbra «Merced al pronto fraguado de las mezclas, la construcción de estas bóvedas puede ser sin cimbra, verificándose por filas oblicuas» (Ger y Lóbez 1898, 260), ver figura 4.17; aunque un poco más adelante describe esta

misma construcción empleando una cimbra ligera «para la mayor regularidad del intradós y para la celeridad del trabajo» (Ger y Lóbez 1898, 260)

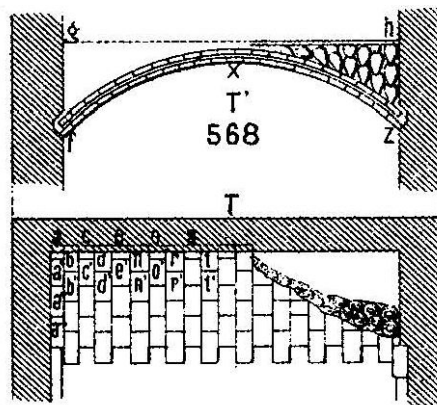


Figura 4.18: Planta y sección de una bóveda tabicada, con los ladrillos contrapeados, y construyendo por hiladas oblicuas para poder ejecutarla sin cimbra. (Lam. XIII, fig. 568. Ger y Lóbez 1898)

Como Fornés y Gurrea, recoge la construcción de cúpulas de doble hoja, la exterior peraltada, con una monte de $\frac{2}{3}$ del diámetro y la interior de medio punto o rebajada:

En cúpulas al descubierto que, como se ha dicho (795), deben componerse de dos bóvedas, la exterior ha de construirse primero, no procediéndose á la ejecución de la interior hasta que, terminada la cubierta, haya seguridad de que no hay filtraciones en tiempo de lluvias, pues éstas deteriorarían las pinturas y hasta podrían destruir la bóveda interior si ésta, como es lo general, se fabrica de tabicado con yeso, como luego se hablará. (Ger y Lóbez 1898, 257)

Encontramos la misma reticencia al uso de las bóvedas de arista, por la debilidad de sus encuentros: «En las bóvedas por arista deben éstas reforzarse por el trasdós, consiguiéndose mejor resultado con la construcción encima de otra bóveda vaída» (Ger y Lóbez 1898, 260) y la conveniencia de dar una ligera curvatura a las bóvedas de cañón seguido de mucha longitud «deben colocarse las cerchas de trecho en trecho (2 á 3 metros) elevando la clave de 4 á 5 centímetros á fin de que si descende algo la bóveda pueda regularizarse con el revoque» (Ger y Lóbez 1898, 260).

También es parecida la descripción de las bóvedas tabicadas para escaleras, comenzando por el trazado de un tramo recto y después la manera de trabar dos

tramos: por mezcla y por igual. Y la de formación de tejados sobre bóvedas. En estos casos, incluso los dibujos son los mismos de Fornés y Gurrea, ver figura 4.18, aunque Ger y Lóbez no lo cita en ningún momento.

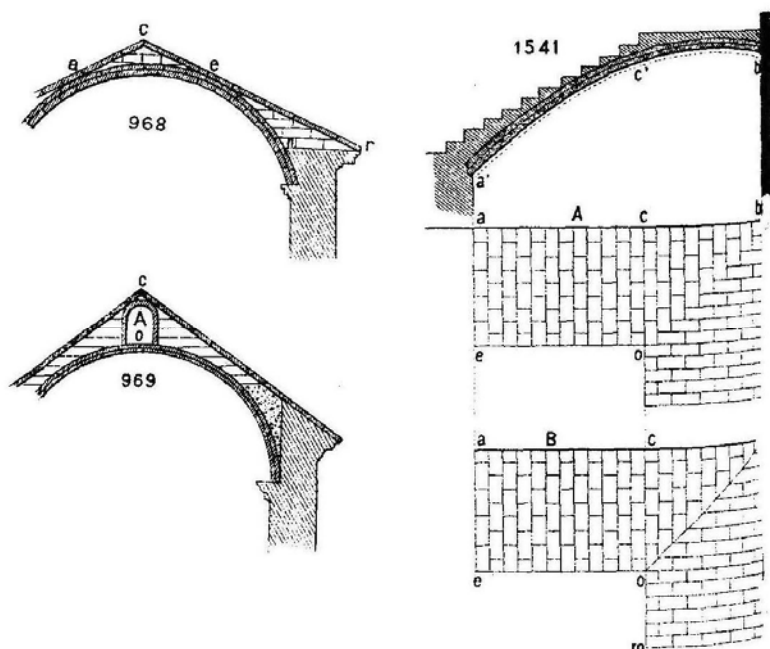


Figura 4.19: A la derecha, formación de tejados sobre bóvedas (Lámina XXIII, figs. 968 y 969. Ger y Lóbez 1898). A la izquierda, sección y aparejos para unir dos tramos de una escalera tabicada (Lámina XLVIII, fig. 1541. Ger y Lóbez 1898)

Y por último, en este tratado de Ger y Lóbez encontramos una referencia poco habitual: bóvedas tabicadas como plementería entre nervios de las bóvedas de crucería, ver figura 4.19. Este uso, que fue el primero de las bóvedas tabicadas en España, pasa a segundo plano al expandirse su uso durante el renacimiento, cuando no se utilizaba este tipo de bóveda. Vuelve a aparecer aquí, posiblemente ligado al movimiento neogótico. Es interesante la descripción del aparejo de ladrillo para no utilizar cimbras:

En las bóvedas de crucería (...) cuyos nervios son arcos de ladrillo á rosca, las bóvedas tabicadas tienen su aplicación para cubrir los espacios de la red, adoptándose las disposiciones que se representan en la *fig. 570*. En la parte *A* las hiladas siguen la dirección de las líneas generatrices de la bóveda lo cual obliga á cortar los ladrillos en ángulo oblicuo al encontrarse con los nervios *ca*, *cb*. Si se emplea el medio indicado en *B*, la construcción puede llevarse á cabo sin cimbra, pues cada hilada forma un arco (Ger y Lóbez 1898, 260)

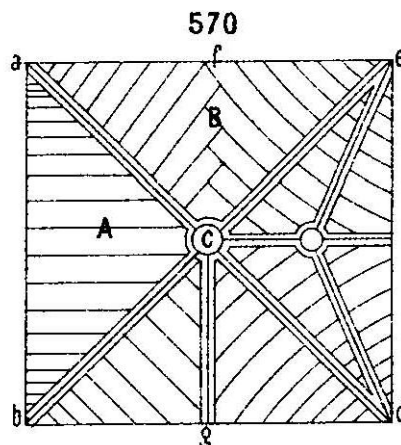


Figura 4.20: Distintos aparejos para bóvedas tabicadas sobre los nervios de una bóveda de crucería. (Lámina XIII, fig. 570. Ger y Lóbez 1898)

También al igual que Fornés, Ger y Lóbez habla poco del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas, escribiendo textos poco definidos que recogen el pensamiento del momento: el monolitismo.

La estabilidad de las bóvedas tabicadas depende de la adherencia del mortero con los ladrillos, mediante la cual forman un solo cuerpo, pudiendo considerarse como vaciadas en un molde de mezcla en el cual se hubieran introducido ladrillos para aumentar la resistencia. Por lo tanto, una vez fraguadas, es muy pequeño el empuje que ocasionan y mucho menos si se les ha dado algún peralte (Ger y Lóbez 1898, 261)

Aunque a lo largo del siglo XIX se producirán muchos cambios en la forma de construir bóvedas tabicadas, que se estudian en los siguientes capítulos, hay otros aspectos que se mantienen inalterados hasta que se abandona la construcción tabicada en la segunda mitad el siglo XX.

Uno de ellos son los medios auxiliares que se utilizan en el proceso de construcción. En varios textos escritos ya en el siglo XX, se describen métodos que parecen ilustraciones del tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (ver capítulo 2 de esta tesis), escrito 300 años atrás:

- las bóvedas de cañón se construyen con una o dos cerchas de tablas que se deslizan conforme avanza la construcción: así se describen en Folguera (ca. 1915, ver figura 2.4); Sugrañes (1916) y Moya (1957)
- para las cúpulas se emplean cintreles atados al centro de la esfera (Moya, 1957).

-para las bóvedas baídas se colocan unas cerchas siguiendo las diagonales y desde ellas hasta los arcos torales la forma se determina con ayuda de simples hilos. Así lo describen autores prácticos como Luis Moya (en 1957) o Ángel Truñó en su *Construcción de bóvedas tabicadas*, escrito hacia 1951 (González Moreno-Navarro 2004, Iv), aunque permaneció sin publicar hasta 2004, ver figura 4.21.¹⁰

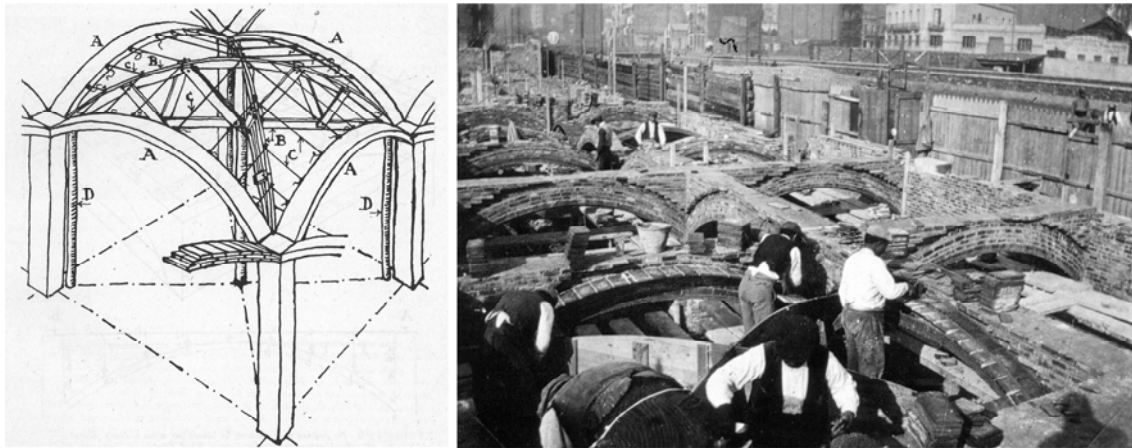


Figura 4.21. A la izquierda, descripción de las cimbras necesarias para construir una bóveda tabicada de arista (Moya 1957, 13): cerchas en las diagonales e hilos entre ellas y los arcos torales. A la derecha, construcción, con una sistema muy similar, de bóvedas de arista en la cripta de la parroquia del Pilar de Barcelona (Truñó 2004, 60). En lugar de cerchas, se utiliza un camón macizo, probablemente por las menores dimensiones que las de la genérica que dibuja Moya.

¹⁰ Ángel Truñó (Barcelona 1895-1979). Se tituló como arquitecto en 1920, pero trabajó fundamentalmente como constructor, además de ser profesor de construcción en la Escuela de Arquitectura de Barcelona desde 1948 hasta 1966. Escribió un interesante texto acerca de la construcción de bóvedas tabicadas, muy práctico y acompañado de numerosos dibujos y fotos de obras propias en construcción (González Moreno-Navarro 2004, Iiv-Iv).

CAPÍTULO 5:

APARICION DE NUEVOS MATERIALES: EL CEMENTO Y EL HIERRO

A lo largo del siglo XIX comienzan a utilizarse de forma masiva el cemento y el hierro en la construcción de edificios. Ambos materiales se conocían desde tiempo atrás, pero su proceso de fabricación, artesanal, los hacía poco abundantes y caros en consecuencia.¹

Tanto el hierro como el cemento son muy importantes en la evolución que experimenta la construcción tabicada a lo largo de este siglo.

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 (ver capítulos 2 y 4 de esta tesis). 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, que es 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 el 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

¹ Sobre el desarrollo del hierro en general, se han consultado los tomos 9 y 10 de la colección «Studies in the History of Civil Engineering», titulados *Structural Iron 1750-1850*, (R.J.M. Sutherland ed., 1997) y *Structural Iron and Steel 1850-1900*, Robert Thorne ed. 2000) así como el libro *Historia de la Tecnología en Occidente hasta 1900* (Kranzberg y Pursell 1981). Sobre el desarrollo del cemento en general, el tomo 11 de la colección citada, titulado *Early Reinforced Concrete* (Frank Newby, ed). Y sobre el desarrollo en España, el libro *Los orígenes del hormigón armado en España* (Antonio Burgos, 2009)

importante, la confianza en el nuevo material acaba con las reticencias que existían respecto a este sistema constructivo por el empleo del yeso.

En cuanto al hierro, se emplea en atirantamientos que permiten reducir el espesor de los muros de apoyo. En Blondel y Patté (1771-78) encontramos esta solución constructiva por primera vez. Bails la recoge 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.

5.1. Los cementos

Durante siglos los aglomerantes empleados en la construcción fueron el mortero de cal y la pasta de yeso. El mortero de cal funciona bien en exteriores, pero fragua muy lentamente y necesita el CO₂ del aire para endurecerse, de manera que no puede fraguar bajo el agua. El yeso endurece muy rápido, pero aguanta mal la humedad por lo que no se utilizaba en exteriores.

Desde la época romana se conocía la propiedad de algunos materiales naturales que, añadidos a la cal, le confieren hidráulicidad. El más conocido de ellos es la puzolana, que se obtenía en Nápoles, pero había otros similares aunque de menor calidad: la tierra de Holanda y en España, la *argila* de Valencia.² Un resultado similar se obtenía añadiendo a la cal restos machacados de arcilla cocida: tejas, ladrillos, ollas, etc.³

² Smeaton realizó experimentos con tierra de Holanda y puzolana dentro de su investigación para construir el faro de Eddystone, encontrando que las puzolanas eran un material mucho mejor (Newby, 2001)

³ Sobre la evolución de los morteros desde la cal hasta el cemento Portland en los primeros años del siglo XIX, en Francia e Inglaterra, se ha consultado el artículo «Portland Cements 1843-1887» de A.W. Skempton, incluido en el libro recopilatorio *Early Reinforced Concrete*, editado por Frank Newby. Sobre el uso de los cementos naturales en España en la segunda década del siglo XX, se ha consultado el libro *Los orígenes del hormigón armado en España*, de A. Burgos, el artículo *La antigua industria del cemento natural en Martos*, del mismo autor, y la página web «oficios.tradicionales.net», de la Diputación de Guipúzcoa, donde se desarrolla especialmente la historia del cemento natural en esa provincia. Sobre la aparición del cemento Portland en España, las mismas fuentes anteriores y el libro de P. Palomar *La industria del cemento en España*.

5.1.1. Desarrollo de la fabricación de cemento en Europa

El primero en plantearse de una manera científica el problema de la hidraulicidad de los morteros fue John Smeaton, que en 1756 recibió el encargo de reconstruir el faro de Eddystone. Para construir la cimentación del faro, Smeaton ensayó morteros de cal con diferentes cantidades de tierra de Holanda y puzolana romana, hasta que dio con una mezcla que podía fraguar bajo el agua del mar. Además, descubrió que estos materiales convertían el mortero de cal en hidráulico por su contenido en arcilla. Publicó sus descubrimientos en 1791.⁴

En 1796, James Parker descubrió que, añadiendo a la cal el polvo resultante de quemar unas piedras determinadas, encontradas en Kent, se obtenía un resultado similar. Patentó un mortero hidráulico natural al que llamó «cemento romano», por su similitud con el aglomerante empleado en la antigua Roma, que había mantenido un aura de calidad desde entonces. Su único inconveniente es que fraguaba muy rápido, entre 5 y 20 minutos, debido a su alto contenido en arcilla, alrededor del 30%. A pesar de ello, se utilizó mucho durante el siglo XIX, conocido como cemento romano, cemento rápido o cemento de Parker.

En 1812 el ingeniero francés Vicat emprende un estudio exhaustivo, mediante ensayos, de la composición química de cales y cementos. Descubre que la presencia del sílice es fundamental y que, tanto las puzolanas como la tierra de Holanda son silicatos de aluminio, de características similares. Establece unas tablas, que serán una referencia a partir de entonces, con el porcentaje de arcilla, sílice, aluminio y otros que debe tener una cal para conseguir la hidraulicidad requerida, así como su tiempo de fraguado y su dureza. Recoge todos sus descubrimientos en su *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, publicado en 1818. Un resumen de esta clasificación, publicado en un libro posterior, de 1840, se reproduce en la figura 5.1. Como se ve en la tabla, las distintas cales hidráulicas y cementos se distinguen por su contenido en arcilla.

⁴ Estos avances se publican en Smeaton (1791). Según sus investigaciones, las cales con propiedades hidráulicas, a las que llamó *water limes*, deben contener entre un 6 y un 20% de arcilla.

TABLEAU N° I (1).

DESIGNATION des principes constituants.	TYPE des chaux moyenne- ment hydrauli- ques.	TYPE des chaux hydrau- liques ordinaires.	TYPE des chaux éminem- ment hy- drauli- ques.	TYPE des chaux- limites.	TYPE des ci- ments- limites infé- rieurs.	TYPE des ci- ments or- dinaires.	TYPE des ci- ments- limites supé- rieurs.	TYPE du commen- cement des pouzzolanes.
<i>A l'état naturel.</i>								
Carbonate de chaux.	89.00	83.00	80.00	77	73	64	39	16.40
Argile.	11.00	17.00	20.00	23	27	36	61	83.60
<i>Après cuisson.</i>								
Chaux caustique. . .	100	100	100	100	100	100	100	100
Argile combinée. . .	22	36	44	53	65	100	273	900 non com- binée.

Figura 5.1. Resumen de la clasificación de las cales y cementos (Vicat 1840, 3)

Conocida la composición química de la cal hidráulica y del cemento, sólo queda fabricarla industrialmente. Las primeras cales hidráulicas artificiales son del propio Vicat y de cemento rápido hay varias patentes de esos primeros años -además de la inicial de Parker- tanto en Francia: cemento de Vassy, en 1830, cementos Lafarge, en 1835, como en Inglaterra: James Frost, hacia 1830 y la más conocida de John Aspdin en 1824. Aspdin llamó a su producto «cemento Portland» por su color gris oscuro, parecido a las rocas de Portland, aunque lo que fabricaba inicialmente era un cemento romano, de fraguado rápido. Lo que hoy conocemos como cemento Portland necesita mayores temperaturas de quemado (1300° frente a 1100°) y una proporción menor de arcilla (20-25% frente al 30% o más) que el cemento romano. Es un producto similar a lo que Vicat llamó «cales límite», pero sometido a una mayor temperatura del horno. No se sabe bien como llegó Aspdin⁵ a este producto, pero hacia 1840 sus cementos llamaban la atención por su gran resistencia.⁶ Otros fabricantes de cemento romano, como I. C. Johnson y J.B. White , intentan reproducir el cemento de Aspdin, descubriendo mediante ensayos la temperatura y composición química necesaria para conseguir lo que hoy llamamos cemento Portland.

⁵ En realidad, los Aspdin fueron dos, un padre (Joseph) y su hijo (William). El primero fue el que patentó el nombre de Cemento Portland, pero fue el hijo el que realmente lo convirtió en un material distinto del resto de cementos romanos, y similar al que hoy conocemos.

⁶ En 1843 se ensayan unos cementos fabricados por Aspdin que resisten un 80% más que los mejores cementos romanos de la época.

En 1852 existen 6 fabricantes de cemento Portland en Inglaterra. En 1853 se instala la primera fábrica en Francia, en Boulogne y en 1855 en Stettin, Alemania. En Alemania se mejoraron mucho los procesos, de manera muy rápida y hacia 1870 se fabrican los primeros cementos Portland «modernos». En 1887 publican unas especificaciones técnicas que fueron la referencia hasta 1920.

TABLE 16
TYPICAL PROPERTIES OF LIMES AND CEMENTS

Class (kiln temp.)	Approx. proportion of clay in raw materials, per cent.	Description	Date	Specimens cured in water		Density in loose packing
				Compression strength at 28 days 1 : 3 by weight, lb./sq. in.	Time to final set	
“Roman” cements (1,100° C.)	30	Ordinary quality First quality	mid-19th century	300 400	$\frac{1}{4}$ hour	1.0
Early Portland cements (1,300° C.)	25	Maude and Aspdin J. B. White & Sons Robins and Aspdin English cements English cements	1843 1847 1848 1860 1865	c. 700 800 1,000± 900 1,200	$\frac{1}{2}$ hour	1.3
Portland cements (1,400° C.)	23	German cements German cements Standard Specifications	1875 1885 1887 1909 1918 1932 1942	1,650 2,600 2,300 2,800 3,600 3,900 4,500	2 hours	1.3
Hydraulic limes (1,000° C.)	18 15 8	Metz, Teil, Senonches Lias, Labourgade Dorking, Halling	Early and mid-19th century	300 200 100	3 days 6 days 12 days	0.8
Limes (900° C.)	1	Chalk	—	0	never	0.5

Figura 5.2. Tabla con las propiedades de cales y cementos desde el inicio de su fabricación. (Newby 2001, 91).

5.1.2. El cemento natural en España

En España encontramos un desarrollo similar al del resto de Europa. Desde antiguo se conocía –de manera empírica– la propiedad de algunos materiales naturales, que añadidos a la cal, le conferían propiedades hidráulicas, por ejemplo la *argila* de Valencia: «se halla en el Término de la Ciudad de San Felipe, en el Reyno de Valencia (...). Este polvo tiene las mismas propiedades que el de Puzòl. Lllamanle vulgarmente *Argila*» (Briguz y Brú 1737, 128). También tenían las mismas propiedades las gredas de

Olot, una comarca volcánica.⁷ Pero debido a las dificultades del transporte, estos productos se aplicaban poco, quedando su uso restringido a mercados locales.

También se conocían propiedades similares de materiales artificiales: el polvo resultado de triturar ladrillos, tejas y otros elementos de arcilla cocida en un horno. Así, en Briguz y Brú (1737) encontramos la siguiente definición de cemento: «es el polvo que se haze de las texas, y ladrillos, se mezcla también con cal, en mayor, o menor cantidad, según lo que más o menos abunda» (Briguz y Brú 1737, 131).

Bails (1802) incluye una definición similar en la entrada *Mezcla*, como una novedad de París. Es una muestra más de que Bails sólo maneja fuentes francesas, dado que la «novedad» es muy parecida a la mezcla descrita por Briguz y Brú en 1737.

despues de impreso el tratado de Arquitectura [se refiere aquí a Bails 1796]se publicó en París una mezcla, que no puedo menos de proponer aqui, por ser de muy particular excelencia (...)

A una medida de cal apagada se echa medida y tercia de agua (...) En esta lechada se echan cinco medidas y un tercio de guijarro ó cascote de teja molido, ó un mixto de ámbos hecho de tres partes de guijo y dos y un tercio de cascote (Bails 1802, 66)

Todavía en el *Vocabulario* de Matallana, de 1848, encontramos la misma descripción del cemento: «así se llaman las tejas pulverizadas que en vez de arena sirven para hacer una especie de mortero hidráulico y aún al mismo mortero formado, bien con polvos de teja o ladrillo, o con greda o arcilla cocida» (Matallana 1848, 90).

A mediados del siglo XIX se difunden en España las investigaciones de Vicat, que dan a conocer la composición química de cales hidráulicas y cementos y comienza la explotación industrial de cemento natural,⁸ que se obtiene calcinando piedras calizas con un contenido variable de arcilla, entre el 20 y el 35%. A mayor proporción de arcilla, aumentan las propiedades hidráulicas pero disminuye el tiempo de fraguado.

⁷ El arquitecto barcelonés Antonio Celles Azcona descubrió hacia 1820 las bondades de estas cales hidráulicas, e intentó extender su uso a Barcelona, sin conseguirlo (Burgos 2009a, 229).

⁸ La diferencia entre un cemento natural y una cal hidráulica es muy imprecisa. En principio se basa en el contenido en arcilla, mayor en los cementos. Pero dado que en los aglomerantes naturales las proporciones no eran exactas, la frontera no estaba muy clara. En los inicios de la fabricación se solía dar el nombre de cemento natural a las cales hidráulicas de mayor calidad.

El libro de Espinosa *Construcciones de Albañilería*, publicado en 1859, es el primero de los tratados españoles que se ocupa extensamente de cales hidráulicas y cementos, así como el primero que cita a Vicat: «Puede decirse que los estudios especiales y metódicos relativos a las cales datan desde el año 1812, en que (...) los emprendió el distinguido ingeniero francés M. Vicat» (Espinosa 1859, 1). Pero el cemento todavía no era habitual en España: Espinosa llama «mortero común» a la mezcla de cal grasa y arena. Posiblemente se deba a que tuviera un alto precio «Como el cemento es en general caro, suele mezclarse con arena (...) no deberá escenderse de 1,25 en volumen de esta por 1 de cemento» (Espinosa 1859, 74).

Las fábricas de cemento natural se situaban en las cercanías de las canteras de las calizas arcillosas, encontrando varios focos en España, el más importante de ellos en Zumaya, (Guipúzcoa) donde existen vetas de margas,⁹ con una composición bastante constante, que la hacen adecuada para la fabricación de cementos naturales. Además se le añadían cenizas procedentes del propio lignito que se utilizaba en la calcinación, que se extraía en la misma zona. Estas cenizas, con una gran cantidad de sílice, eran similares a las puzolanas, y esto hacía que los cementos de Zumaya fueran de una calidad excelente, especialmente en su resistencia al agua de mar. Todavía en 1930 el cemento de Zumaya era descrito por el Ministerio de Fomento como una de las seis variaciones de aglomerante que se fabricaban en España:

Se llama cemento de Zumaya o simplemente Zumaya, al cemento natural de fraguado rápido obtenido por la calcinación de margas, sin adición de materiales en crudo ni en frío, y que son análogos a los fabricados en la región cementera de Zumaya (web *oficios tradicionales.net*)

La fabricación de cemento natural en Guipúzcoa es introducida por los soldados ingleses de la primera guerra carlista, hacia 1840. De 1846 se conserva la escritura de constitución de una compañía para fabricar cal hidráulica en Arrona: Corta, Linazasoro y Zubimendi. (Música 1918). Otro fabricante importante de la primera época fue

⁹ Las margas son un tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de calcita y arcillas, con predominio, por lo general, de la calcita.

Nicolás Gurruchaga, que en 1851 suministra el cemento de las obras de mejora del puerto de San Sebastián (web [oficios tradicionales.net](http://oficios.tradicionales.net)).

Estas primeras instalaciones eran pequeños hornos, similares a los que se habían usado tradicionalmente para obtener cal. En 1859 Eusebio Gurruchaga, hijo de Nicolás, funda en Arrona (Zumaya) la primera fábrica moderna de cemento rápido, que se mantendrá en funcionamiento hasta 1930: tenía hornos continuos para la calcinación y la trituración previa de las margas se hacía en un molino movido por turbinas hidráulicas y máquinas de vapor.



Figura 5.3. Anuncio de la fábrica de cemento natural de Eusebio Gurruchaga, en Zumaya. En el centro hay un dibujo de las instalaciones, con las chimeneas de los molinos para triturar las margas. A la derecha está la vivienda del propietario (web [oficios tradicionales.net](http://oficios.tradicionales.net))

En 1894 ya existen seis fábricas de cemento natural en la zona de Zumaya, y once en toda la provincia de Guipúzcoa. Se transportaba por mar, por lo que se distribuía principalmente por la costa del Cantábrico, dado que una de sus principales aplicaciones eran las obras de los puertos. Pero también llegaba a otros puntos de España: los fabricantes Gurruchaga y Corta suministraron cemento natural para la obra del Canal de Isabel II, de Madrid, desde 1853. La calidad de este cemento era conocida incluso fuera de España, como afirma Pardo en su tratado *Materiales de Construcción*:

Los cementos de Guipúzcoa constituyen productos de notable importancia, cuyo uso se ha generalizado no sólo en España, sino en el extranjero, exportándose grandes

cantidades al Mediodía de Francia y a América, donde compiten con los cementos ingleses y franceses (Pardo 1885, 79)

Uno de estos cementos de Zumaya, el fabricado por Eusebio Gurruchaga fue analizado por Vicat y ganó un premio en una Exposición internacional celebrada en Burdeos en 1882.

Otros lugares de España donde se fabricaron cementos naturales fue Novelda (Alicante), este al parecer de menor calidad: «Se emplea también mucho en las provincias del centro y de levante, un cemento procedente de Novelda (provincia de Alicante), que es algo inferior al de Zumaya» (Pardo 1885, 80) y el suroeste de Jaén, en Martos (Burgos 2009b).

También había muchas fábricas en Cataluña, pero eran de pequeño tamaño y abastecían el mercado local. La zona de mayor concentración era el prepirineo, donde, al igual que en Zumaya, había buenas vetas de calizas arcillosas. En el manuscrito *Bóvedas tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas*, del capitán de ingenieros Ramón Ballesteros, escrito en 1869, se relata la buena calidad del cemento producido en Figueras. Alrededor de Guardiola de Berguedá se establecen algunas empresas, como «Cementos i Cal Pujol Thomas», fundada en 1890 por Pedro Pujol.¹⁰ En Ripoll y San Juan de las Abadesas había numerosas empresas pequeñas de fabricación de cemento natural, que en los primeros años de siglo XX se agruparon en la «Unión de Fabricantes de Cemento de San Juan de las Abadesas y Ripoll». Otras fábricas en Cataluña eran: las de la familia Molins, con varios hornos en las cercanías de la ciudad de Barcelona, la fábrica de Juan Miret en Villafranca del Penedés, la de Miguel Pérez en Sarriá de Gerona. Debió haber muchas más, pero debido a su pequeño tamaño no queda constancia de ellas:

Puede decirse que hace cuarenta años no existía la industria del cemento Pórtland en nuestro país. Había cierta abundancia de fábricas de cemento romano y cales más o

¹⁰ Esta empresa sigue fabricando cementos naturales, ahora bajo la marca cementos Collet. Los publicita especialmente para la construcción de bóvedas tabicadas en rehabilitación. Desde 2006 hay una norma UNE sobre ellos, que los define así: «Un cemento natural es un conglomerante hidráulico obtenido por calcinación a temperatura suficientemente elevada, pero inferior a la de clinkerización, de margas de composición regular, sometidas después a la molturación fina con adición máxima de un 5% de sustancias no nocivas»

menos hidráulicas (...) siendo los principales núcleos, Cataluña (con cerca de cien hornos de cuba), Levante, Guipúzcoa y Vizcaya (Palomar 1940, 11)



Figura 5.4. Anuncio de la Unión de Fabricantes de Cemento de San Juan de las Abadesas y Ripoll, publicado en 1909 en la revista *Arquitectura y Construcción* (Burgos 2009a, 235).

En los primeros años del siglo XX, el cemento Pórtland artificial comienza a fabricarse en España y va desplazando a los cementos naturales. En 1907 comienzan a cerrar algunas fábricas; otras se fusionan. En 1930 cierra la fábrica «Nuestra Señora de los Dolores», de Eusebio Gurruchaga, que había funcionado durante 80 años. En 1972 cierra la fábrica de Bedua (Guipúzcoa), que era la última en funcionamiento. Algunas de las empresas se reconvirtieron en fabricantes de cemento Portland artificial.

En el tratado de Sugrañes *Arquitectura y Construcción Modernas*, escrito en 1916, encontramos que el cemento artificial es ya más habitual que el natural: «Los cementos pueden fabricarse obteniéndolos de las calizas arcillosas (...) aunque lo más general es obtenerlos mezclando en las debidas proporciones las cretas ó las margas calcáreas con la arcilla» (Sugrañes 1916, 48) y también el cemento lento tipo Pórtland más que el rápido: «Estos cementos [por los romanos] han tenido hasta hace poco un gran fervor, pero lo van perdiendo, quedando reducido su empleo para determinadas operaciones en las cuales son insustituibles» (Sugrañes 1916, 51).

5.1.3. La aparición del cemento Pórtland en España

El cemento Pórtland, que se comienza a fabricar en Inglaterra y Francia hacia la mitad del siglo XIX, era conocido en España poco después. En 1859 es citado en el libro de Espinosa: «Uno de los cementos que más éxito han tenido, es el conocido con el nombre de Portland, fabricado en Inglaterra y estraído para las obras de varios puertos» (Espinosa 1859, 86). En 1870 ya se comercializaba en Sevilla, como atestigua el ingeniero Valdés en su tratado *Manual del Ingeniero y del Arquitecto*.¹¹ En 1876, el ingeniero Antonio Pelayo y Gómiz realiza una serie de ensayos para la construcción de un dique en Cádiz. Ensayó los cementos disponibles en el momento, que son los cementos naturales de Guipúzcoa, Novelda y Jaén, así como varios cementos Pórtland ingleses.

En el libro *Materiales de Construcción*, de Manuel Pardo, se define el cemento Pórtland, como aquel que contiene entre un 20 y un 25% de arcilla y a los que Vicat había llamado cales límite. Pardo los recoge como cementos artificiales «que aparecieron en los puertos del canal de la Mancha en 1850. Los que gozan de más reputación son los ingleses, el de Stettin (Prusia) y los de Boulogne y Theil, en Francia» (Pardo 1885, 74). Pero en 1885, año en que se publica el libro de Pardo, los cementos más usuales son los naturales de Guipúzcoa. El Pórtland todavía no se fabrica en España: «También se importan en grandes cantidades, de Inglaterra y Francia, cementos de fraguado lento (...). El Portland no se prepara en España, pero parece que se hacen ensayos para montar su elaboración en Zumaya» (Pardo 1885, 81).

En 1887, y después de siete años de ensayos en el puerto de Gijón, el ingeniero Fernando García Arenal publica un pliego de condiciones para la recepción de cementos, incluyendo los cementos de Zumaya y cementos Pórtland ingleses y franceses.¹² Empieza a extenderse cierta reticencia al uso de los cementos naturales por su composición heterogénea.

¹¹ En el tratado de Valdés (1870, 660-673) se incluyen unas tablas con los materiales que se podían encontrar en las distintas provincias españolas. En muchas de ellas se comercializaba el cemento romano, pero el Portland sólo se vendía en Sevilla (Burgos, 2009a, 240)

¹² Se publica en la Revista de Obras Públicas, año XXXV, nº 18, del 30 de septiembre de 1887 (Burgos, 2009a, 241)

La fabricación de cemento artificial tipo Pórtland en España comienza en los últimos años del s. XIX. Las primeras empresas se siguen situando en las cercanías de canteras de calizas y arcillas, que extraen por separado y mezclan en las condiciones precisas. En 1898 se instala la primera fábrica, de la Compañía Tudela-Veguín, en Oviedo; en 1899 la empresa francesa *Société Générale des Ciments Portland* abre una fábrica en Sestao (Bilbao), comercializando el cemento «Hércules»; en 1901 abre Cementos Rezola en Añorga (San Sebastián), una empresa que fabricaba ya cemento romano y comienza ahora a producir también el tipo Pórtland artificial.



Figura 5.5: Anuncio de la fábrica de cemento Pórtland Añorga, en San Sebastián. Pertenecía a la familia Rezola, y fue una de las que se reconvirtió desde su producción inicial de cemento romano al cemento Portland. En este cartel, de 1903, todavía fabricaban ambos tipos (Burgos 2009a, 232).

En 1904 la Compañía Asland inaugura la fábrica de Clot del Moro, en Castellar de n'Hug (Barcelona). A pesar de no ser la primera, la fábrica Asland supuso un hito importante, ya que sus grandes instalaciones permitieron una producción desconocida hasta entonces, especialmente desde 1910, año en que instala el primer horno giratorio de España.

En el año 1904 se llevó a cabo la instalación de la fábrica del Clot del Moro, más conocida por fábrica de Poble, de la Compañía General de Asfaltos y Portland Asland. Esta fábrica,

con tres hornos rotatorios de 1,80 m. de diámetro por 30 m de longitud, los mayores que entonces se conocían en el mundo, producía 100 toneladas diarias de cemento Pórtland. (...) el conjunto de la fábrica constituía una de las obras técnicas más importantes de Europa, en aquellos tiempos. (Palomar 1940, 11)

La fábrica se adapta a la ladera (ver figura 5.6), con un desnivel total de 50 m, escalonado en 14 pisos. Tenía muy cerca las canteras, tanto la de caliza como la de piedra arcillosa, que se llevaban hasta la parte superior de la fábrica. Desde allí, la gravedad ayudaba a los procesos industriales y el cemento resultante se recogía en la parte inferior. Un tren construido específicamente para la fábrica lo transportaba hasta las líneas principales de ferrocarril. La empresa Asland llegó a ser la cementera más importante de España, fabricando un cemento de muy buena calidad.

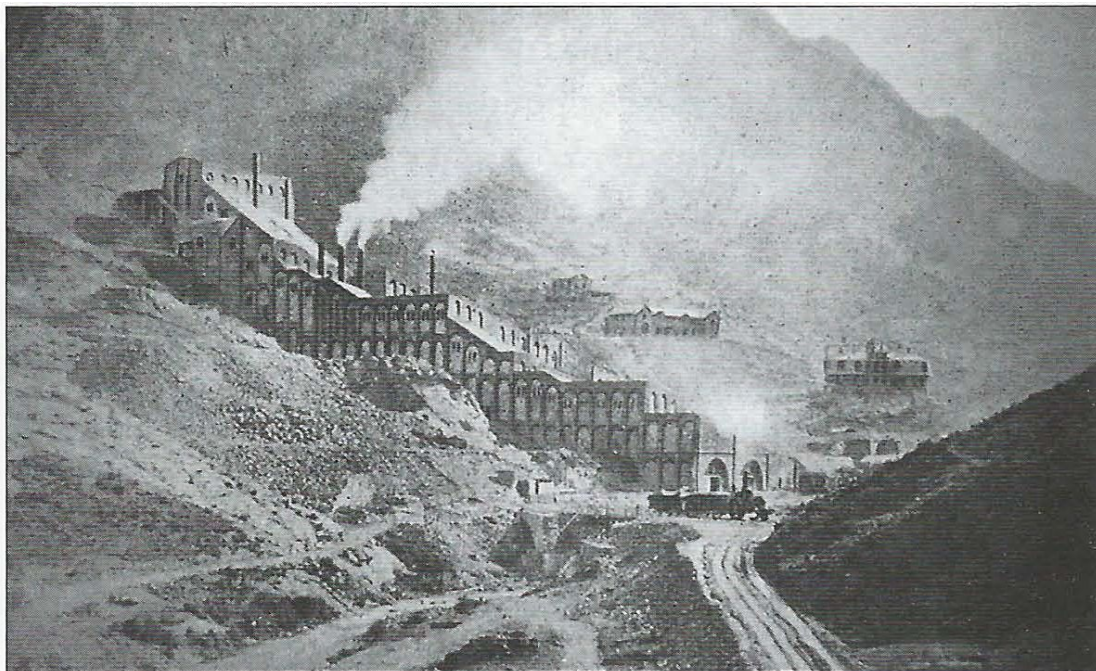


Figura 5.6. Fábrica de cemento Asland en Castellar de n'Hug (Barcelona), en 1905 (Burgos 2009a, 248)

Otras fábricas de los primeros años del s. XX fueron la Sociedad Anónima de Cementos Gaditanos, fundada en 1901 en Puerto Real (Cádiz), la empresa Butsems y Fradera (Barcelona, 1903), la Sociedad Anónima de Cementos Portland de Pamplona, que fabricaba la marca El Cangrejo desde 1905, la fábrica de La Cañada, en Ciudad Real, etc. Entre 1910 y 1915 se abren numerosas fábricas, de forma que el mercado nacional se autoabastece en esos años.

Pero el elevado precio del cemento siempre fue un problema en su utilización, agravado por una mala distribución territorial, que encarecía el producto en las zonas alejadas de los centros de producción.

Este problema no se solucionó hasta 1929, en que se crea una Junta de la Industria del Cemento, que regula la apertura de nuevas fábricas y fija el precio del mismo para todo el país.

5.1.4. Características de los primeros cementos españoles

En el libro de Espinosa *Construcciones de Albañilería*, de 1859, que como ya se ha dicho más arriba es el primero que trata cales hidráulicas y cementos de una manera extensa, conociendo los experimentos de Vicat, no encontramos datos acerca de la calidad de los cementos españoles. Espinosa dedica un apartado al asunto de la resistencia de los morteros, pero se limita a citar datos de autores extranjeros: Rondelet, Vicat, Claudel, probablemente por no tener todavía ningún dato propio de España, donde la fabricación era muy incipiente. Es interesante destacar que, al igual que los siguientes autores, cita tanto la resistencia a tracción como la de compresión de los morteros. A la primera le llama *cohesión*. Posteriormente habla de la cales hidráulicas de España, agrupadas por provincias, citando las de Guipúzcoa y otras: en Logroño, Palencia, Madrid, Badajoz, etc. Por su descripción parecen pequeñas explotaciones en las que no se hacían ensayos de resistencia, sólo en algunos casos se cita la composición química de la piedra de la que se extrae.

Manuel Pardo, en su libro *Materiales de Construcción* (1885) describe distintos morteros, fabricados con cales, cementos romanos y cementos Portland. Aquí ya se especifican datos numéricos acerca de su resistencia –dentro del espíritu científico de la época y se cita la resistencia a tracción de los morteros, a la que Pardo llama también cohesión, con más detalle que la resistencia a compresión. Esta datos se inscriben dentro de las ideas acerca del monolitismo y la construcción cohesiva de la época:

La adherencia del Portland à las piedras y à los otros materiales semejantes, es muy considerable. No se conoce su valor numérico, pero un experimento repetido muchas veces, ha hecho ver que el Portland amasado con consistencia adecuada y colocado entre dos ladrillos, contrae pronto con ellos tal cohesión, que, cuando se trata de separarlos por

tracción, la rotura no se hace por la unión de los ladrillos y el cemento, sino por el espesor de éste ó por el cuerpo de uno de aquellos (Pardo 1885, 113-14)

En la tabla de las figuras 5.7 se especifican las resistencias a tracción de distintos morteros disponibles en España en 1885, bien los naturales de Zumaya como los tipo Pórtland artificiales que vienen de Inglaterra, Francia o Alemania. Es interesante constatar que en la tabla de Pardo, cuando se indica «Resistencia», se refiere a la resistencia a tracción, no a compresión.

DESIGNACIÓN DE LOS CEMENTOS.	COMPOSICIÓN DE LA PASTA.		Tiempo transcurri- do después de la inmersión.	Resistencia por centíme- tro cuadrado Kilogramos.	Residuo del cernido. Litros.
	Cemento.	Agua.			
	Litros.	Litros.			
Portland inglés (Wouldhan).....	4	4	1 día...	16,87	4,38
			7 días..	29,75	
			3 meses.	35,48	
			6 id....	38,43	
			1 año...	48,25	
Idem alemán (Stettin).	4	0,8	1 día...	31,32	0,80
			7 días..	38,43	
			3 meses.	44,45	
			6 id....	47,46	
			1 año...	50,60	
Cemento de Zumaya..	4	4,3	1 día...	6,24	3,48
			7 días..	7,50	
			3 meses.	16,29	
			6 id....	18,28	
			1 año...	20,65	
Idem id. (otro ejem- plar).....	4	4,3	7 días..	15,85	3,40
			3 meses.	19,95	
			6 id....	21,64	
			1 año...	20,29	

Figura 5.7. Datos de resistencia a tracción de los distintos cementos en uso en España. Proceden de los ensayos realizados por el ingeniero Fernando García-Arenal entre 1880 y 1887 para el puerto de Gijón (Pardo 1885, 112).

Sobre la resistencia a compresión es mucho menos explícito. Para los cementos romanos indica un valor de 150 kg/cm², dato que obtiene de ensayos al cemento francés de Vassy; para los tipo Pórtland afirma que:

Se han hecho pocos ensayos sobre la resistencia de estos morteros al aplastamiento (...) puede considerarse como siete veces mayor que la carga de rotura por tracción, para las pastas de cemento puro, y como cinco veces para los morteros (Pardo 1885, 114)

Incluso dentro de las condiciones necesarias para la recepción del Portland, copiadas por Pardo de la administración francesa, no hay ninguna dependiente de la resistencia

a compresión de cemento y morteros y sí una dependiente de la resistencia a tracción (ver figura 5.8).

5.º El cemento puro y el mortero han de resistir convenientemente á la tracción, prescribiéndose que se harán ensayos con las mezclas, preparadas éstas en forma de panes ó adoquines. Las resistencias que exigen varios pliegos de condiciones, son las que se consignan á continuación:

Designación.	Tiempo transcurrido.	Resistencias por centímetro cuadrado. — Kilogramos.
Cemento puro.....	2 días.	4
	5 id.	40
	30 id.	20
Mortero.....	5 id.	4
	45 id.	9 á 12

Figura 5.8. Extracto de las condiciones para la recepción del Portland en función de su resistencia a tracción (Pardo 1885, 116)

En Pereda (1951) encontramos reproducida una tabla de José Marvá y Mayer con resistencia a tracción y compresión de algunos cementos fabricados en España.¹³

		Coeficiente de fractura por compresión Kgs. × cm²		Coeficiente de fractura por tracción Kgs. × cm²	
		7 días	28 días	7 días	28 días
Tudela-Veguín	Asturias ...	153,60	269,60	13,34	17,60
Asland	Cataluña ...	270,00	395,00	12,50	22,25
Sansón	Málaga ...	157,00	250,00	11,00	17,00
Rezola	San Sebastián ...	238,05	251,76	19,52	21,71

Figura 5.9. Tabla con las resistencias a compresión y tracción de distintos cementos fabricados en España, publicada originalmente por Marvá y Mayer (Pereda 1951, 27)

¹³ José Marvá y Mayer fue (1840-1930) fue un importante ingeniero militar. No sé exactamente en cual de sus numerosas publicaciones aparece este cuadro (Pereda no lo dice); posiblemente en alguna de las ediciones de su tratado *Mecánica aplicada a las construcciones* (1ª ed 1888-5ª ed 1916). Por los cementos que aparecen en la tabla, parece que se refiere a los primeros cementos artificiales (tipo Portland) que se fabricaron en España, en los primeros años del s. XX (ver apartado 5.1.3 en este mismo capítulo).

Un poco más adelante, en el tratado de Sugrañes *Arquitectura y Construcción Modernas* se incluyen numerosos datos de resistencia de cementos y cales, tanto en pasta como formando morteros. De nuevo se da mucha importancia a la resistencia a tracción, aportando datos sorprendentes: en la figura 5.10 se reproduce una tabla con los «resultados» del cemento Asland catalán, según los cuales la resistencia a compresión de algunos morteros es igual o incluso inferior a la de tracción.¹⁴

<i>Resistencia á la tracción en Kg. por cm²</i>		
<i>Calidad de la pasta</i>	<i>A los 7 días</i>	<i>A los 28 días</i>
Pasta normal con 23.3% agua . . .	54.7	73.5
Mortero 1 : 3 y 8.4% agua . . .	26	31.2
— 1 : 5 y 7.2% — . . .	14.2	18.3
<i>A la compresión:</i>		
Pasta normal con 23.7% agua . . .	73.2	96.2
Mortero 1 : 1 y 12.4% agua . . .	66.1	75.7
— 1 : 3 y 8.5% — . . .	30.4	35.1
— 1 : 5 y 7.2% — . . .	10.4	15.3

Figura 5.10. Tabla con las resistencias a tracción y a compresión de pasta de cemento y de morteros con distintas proporciones de arena, fabricados con cemento Asland catalán. (Sugrañes 1916, 55)

Dados estos valores, Sugrañes termina «Como se vé, este cemento resulta de excelente calidad, se fabrica en Cataluña y compite con los mejores extranjeros» (Sugrañes 1916, 55). Después ofrece una tabla general sobre resistencia de morteros, con valores más creíbles, ver figura 5.11. Seguido de la tabla, el autor afirma que «Como cargas de seguridad en la práctica suele tomarse de 1/6 a 1/10 de la carga de fractura» (Sugrañes 1916, 71)

Y por fin, es este libro el primero en que empezamos a encontrar reticencias al uso de la cal, como una prueba más de que el cemento se está convirtiendo en el aglomerante más utilizado.

La cal grasa (...) que por su gran rendimiento y economía suele emplearse preferentemente por los constructores, será conveniente estar en guardia y proscribirla, siempre que se crea que pueda producir dañosos efectos, ya sea en cuanto á solidez ó en

¹⁴ Sugrañes no indica si estos resultados son de un ensayo propio o datos suministrados por la empresa.

lo relativo á higiene, por sus defectos provenientes de su lento endurecimiento (Sugrañes 1916, 38)

Calidad del mortero	Pasta		Después de días	Carga de fractura en Kg. por cm. ²	
				A la tracción	A la compresión
Mortero de cal grasa	Cal 1	Arena 3	360 á 700	2.4 á 6	19 á 30
— — y puzolana.	— 1	Puzolana 1	—	1.8 á 12	37
— — hidráulica.	— 1	Arena 3	360 á 700	12 á 18	100 á 150
— eminentemente hidráulica. .	— 1	— 3	360 á 700	20	160
— de groppiers	Groppier 1	— 3	360	25 á 35	—
— de cemento rápido	Cemento 1	— 3	28	10	80
— — lento.	— 1	— 3	360	22	110
— — Portland	— 1	— 2	20	16	—

Figura 5.11. Tabla con las resistencias a tracción y a compresión de distintos morteros (Sugrañes 1916, 71)

En el artículo de Martorell «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado», escrito en 1910, encontramos la siguiente referencia a la resistencia de las fábricas de ladrillo recibidas con cementos o cales:

El ladrillo en Cataluña es de gran dureza. Los coeficientes de resistencia á la compresión, hay que referirlos siempre á las juntas de mortero, en obra de tal material. Según experiencias particulares, cuando se emplee mortero de cal, el coeficiente debe ser de 7 kg. por centímetro cuadrado de sección; con mortero de cemento ordinario 10 ó 12 kg. y en casos excepcionalmente favorables 15; con cemento Portland 30 kg (Martorell 1910, 144)¹⁵

Martorell, en un artículo eminentemente práctico, no hace ninguna referencia a la resistencia a tracción ni del mortero ni de la fábrica.

¹⁵ Sobre la buena calidad de los ladrillos fabricados en Cataluña hablan muchos autores. Por ejemplo, en Ballesteros (1869) se indica: «Los materiales de este país en general son de muy buena calidad. El ladrillo empleado en estas bóvedas es el más delgado que se fabrica y tan bien cocido, que indudablemente es de la mejor que hay en esta clase de material». Y en Folguera (ca. 1915) leemos: «No nos parece necesario hablar de las magníficas condiciones de nuestros materiales de cerámica; son proverbiales en todas partes. Tan solo con ver los espesores inverosímiles, por lo delgados, que solemos dar a las paredes de fachada y de carga, comprendemos que se trata de una materia prima de toda confianza, y con la que se pueden tener todo tipo de atrevimientos»

En la actualidad se siguen fabricando cementos naturales en España, al menos en Cataluña. Según ensayos realizados por una de las empresas fabricantes, cementos Collet,¹⁶ las resistencias actuales son: pasta de cemento, sin arena, 31 N/mm²; mortero de cemento con proporción 1/1: 22 N/mm²; mortero de cemento con proporción 1/2,5: 17 N/mm². El informe de la empresa sólo cita las resistencias a compresión, sin nombrar en ningún caso valores de tracción. Son valores bastante más elevados que los que citan los tratados de finales del XIX, del orden de tres veces más.

5.2. El hierro y el acero

Hasta 1750 la escala de producción del hierro en cualquiera de sus estados fue muy reducida.¹⁷ La forma más utilizada fue el hierro forjado manualmente por un herrero, para usos muy concretos y en pequeña escala: herramientas, clavos, cercos de barril, etc. En Europa se conocía el proceso de templado (enfriamiento rápido por inmersión después de la forja) desde el s. XV, pero estaba reservado para útiles que requerían mayor calidad y dureza superficial, como las espadas. Al hierro forjado templado se le llamó acero. Ambos procedimientos, artesanales, eran muy dependientes de la habilidad del forjador, que debía decidir el tiempo que permanecía calentándose en la

¹⁶ Estos valores se han obtenido de dos informes de calidad encargados por la empresa cementos Collet a distintos laboratorios de ensayos, en los años 2008 y 2010, y disponibles en la página web de la empresa.

¹⁷ El hierro cambia notablemente sus propiedades con pequeñas adiciones de carbono, encontrando tres estados principales:

-Hierro forjado o hierro dulce: contenido en carbono menor de 0,25%. Su temperatura de fusión es muy elevada, alrededor de 1530°. Es forjable y soldable en caliente, dúctil y relativamente blando en frío.

-Acero: contenido en carbono entre 0,25 y 1,25%. Igualmente forjable y soldable en caliente, dúctil y blando en frío si se enfría lentamente pero muy duro si el enfriamiento es rápido. Temperatura de fusión intermedia entre hierro forjado y fundición.

-Hierro fundido o colado: contenido en carbono entre 2,5 y 3,5%. Temperatura de fusión más baja, entre 1000 y 1200°. Es blando y mecanizable, pero frágil y no se puede forjar.

Hasta 1780 no se identificó el elemento carbono, ni se supo de la influencia que tenía en las diferentes formas del hierro, ya que no se le añadía, sino que lo absorbía en pequeñas cantidades del carbón vegetal que se usaba para calentarlo. Se pensaba que el cambio de propiedades era debido al efecto purificador del fuego.

forja, absorbiendo carbono y en la fase de templado: a más tiempo enfriando el material es más duro pero también más frágil. También el oxígeno se recibía de forma manual, a través de fuelles.

Otra forma de fabricación primitiva de acero fue el de crisol o cementación, en el que varillas de hierro se recubrían con carbón vegetal y arcilla y se calentaban lentamente. El producto resultante era muy duro superficialmente, donde el hierro se mezclaba con el carbono, y de composición más fiable que el de forja. Este procedimiento, vigente en Inglaterra desde la Edad Media (el famoso acero de Sheffield), experimentó un importante avance hacia 1740, a cargo de Benjamin Huntsman, que mejoró el proceso fundiendo las varillas de hierro. A este material se le llamó acero fundido.

A principios del s. XV, se consigue en un horno la temperatura suficiente para fundir el hierro en contacto directo con carbón vegetal. Así absorbía más carbono, lo que disminuye el punto de fusión y daba lugar a un nuevo material: el hierro fundido o colado, que se convertía posteriormente en hierro forjado separando, en un horno de refinado, parte del carbono. El hierro fundido, que comenzó siendo un intermedio en la fabricación semi-industrial del hierro forjado, era más barato de fabricar, ya que sólo pasaba por un horno, y acabó usándose donde su fragilidad no era un problema, como en vasijas, cañones, tuberías, etc.

5.2.1. Avances de la Revolución Industrial: el hierro forjado pudelado y el acero

A partir de 1750, la Revolución Industrial incrementa las necesidades de hierro. La madera para fabricar el carbón vegetal que se utilizaba en los hornos empezó a escasear y además, este combustible imponía una limitación en el tamaño de los hornos. Comienza a utilizarse el coque (carbón mineral) aunque los inicios no fueron muy exitosos: permitía hornos mayores, pero tenía muchas impurezas (especialmente azufre) que aumentaban la fragilidad del hierro fundido resultante. Estos problemas iniciales se fueron superando con mejoras en los hornos y en 1709, Abraham Darby consiguió buenos resultados precalentando el carbón mineral. Los avances tardan en generalizarse, pero hacia 1750 el hierro fundido es el material metálico más empleado en la construcción, posición que mantendrá durante 100 años, ver figura 5.12. Utilizando el coque como combustible, los hornos pueden ser cada vez mayores y en

consecuencia, también las piezas que salen de ellos. El único problema es la mala resistencia a tracción y la fragilidad del hierro fundido. Esto se soluciona con diseños adecuados, tanto de las piezas como de las estructuras completas.¹⁸

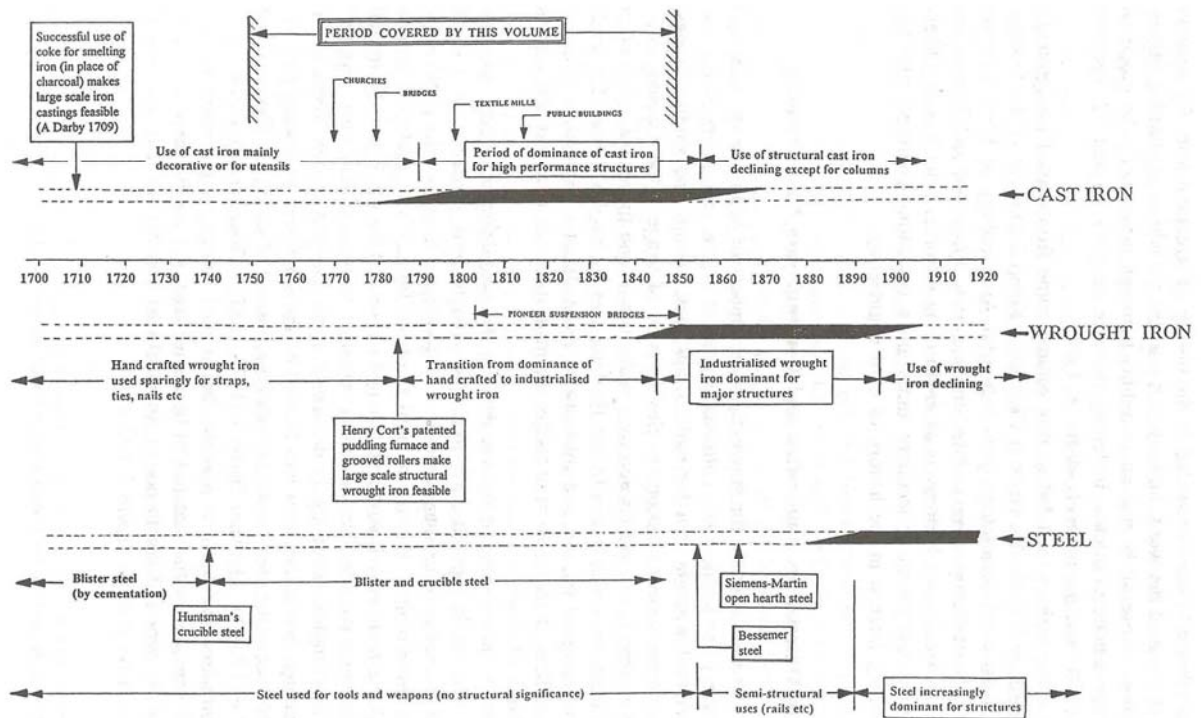


Figura 5.12: Esquema temporal de los avances en la fabricación del hierro y el acero (Sutherland 1997, xvi)

Lo siguiente fue el horno de pudelar, inventado por Henry Cort en 1784, y uno de los principales avances de la Revolución Industrial (Kranzberg y Pursell 1967, 179). Es una mejora del proceso de refinado posterior al fundido en alto horno, consiguiendo una mayor pérdida de carbono, por lo que el material que sale del horno, similar al hierro dulce, es forjable. También se introducen procesos industrializados en la forja posterior: grandes martillos y rodillos de laminado movidos por la fuerza hidráulica.

¹⁸ La fundición es un material de estructura interna granular, como la piedra. Su resistencia a tracción (y a flexión) es 1/6 de su resistencia a compresión. Aún así, resiste más que las mejores maderas y puede fabricarse en escuadrías mayores, por lo que las sustituyó en vigas de forjados y cubiertas, permitiendo luces mayores. La sección de las vigas se diseñaba especialmente para adaptarse a esta diferencia de resistencia. También se utilizó de manera combinada con el hierro forjado, por ejemplo en vigas trianguladas en las que las piezas comprimidas eran de fundición y los tirantes de hierro forjado (Sutherland, 1997)

El resultado final era similar al hierro forjado manual, pero siguiendo un proceso industrial, lo que permitió un abaratamiento del proceso y la posibilidad de fabricar piezas mayores. También el hierro forjado pudelado tarda un tiempo en extenderse, pero desde 1850 es la forma de hierro más utilizada, puesto que mantendrá hasta la generalización del acero en los inicios del s. XX, ver figura 5.12. Su único inconveniente con respecto a la fundición es que, al no poder moldearse, no se puede decorar. Esto llevó a emplear soluciones mixtas, como revestimientos decorados de fundición sobre piezas de hierro forjado.

En 1856, Bessemer encontró un proceso de fabricación industrial para un producto de propiedades similares al acero tradicional, fabricado por templado o cementación: inyectar un chorro de aire en el horno, que elimina el carbono por oxidación. Además, el calor que genera la reacción eleva la temperatura hasta el punto de fusión del hierro sin carbono. Se obtiene un hierro bajo en carbono y licuado, que fue llamado *acero Bessemer*. Este nuevo material, con menos contenido en carbono que la fundición pero más que el hierro forjado, tiene unas características óptimas de resistencia, dureza y ductilidad. La invención del horno Bessemer (1856) y poco después el Siemens-Martin (1864) abrió la puerta a la fabricación masiva del acero. Esto abarató el proceso además de permitir un control exacto de la cantidad de carbono contenida en el material. Como en los casos anteriores, hasta un tiempo después el uso del acero no se generaliza: hasta 1885, en Inglaterra todavía se produce más hierro forjado que acero.

5.2.2. *Uso del hierro y el acero en España en el siglo XIX*

En España, hasta los primeros años del s. XIX, el hierro es un material auxiliar en la construcción, utilizándose principalmente como piezas de unión (clavos, grapas, pasadores), cadenas y tirantes en sitios muy concretos y para herramientas.¹⁹ Esto se

¹⁹ En el diccionario de Benito Bails (1802) aparece la palabra hierro en numerosas entradas, que pueden agruparse en herramientas (azadón, batidera, escoda, escuadra, llana, maceta, paleta, pico, piqueta) y elementos auxiliares de edificación (abrazadera, barra, cadena, cincho, clavo, clavija, grapa, llanta, llave, pasador, tirante).

debe a su alto precio: «que qualquiera hierro quanto menor, mejor, aunque siendo posible siempre se ha de huir del (...) por lo mucho que cuesta» (López de Arenas 1633, 49v) y a su escasa fiabilidad debido al método artesanal por el que se produce. El hierro utilizado es siempre forjado o fundido. Este último se utiliza también para tuberías (Briguz y Brú 1738) y planchas en chimeneas (Bails 1796).

5.2.2.a. Tratados

El tratado *Arquitectura Civil* de Benito Bails, escrito en 1796, es el primero en que encontramos un apartado dedicado al uso del hierro en la construcción.²⁰ Trata el material como un elemento accesorio «con el fin de ampararse el artista de dos fuerzas en lugar de una sola» (Bails 1796, 159) y poco fiable «porque el hierro por su misma naturaleza es de corta duración» (Bails 1796, 159). Utilizado para grapas, presenta problemas de oxidación, que aumentan el volumen y rompen la piedra. Además, las uniones tampoco ofrecen mucha confianza «por estar una cadena de hierro muy tirante, se quita el barniz allí donde están las llaves, que es el parage donde la cadena trabaja mas; el orin se cria allí sin remedio, y por aquella parte ha de flaquear la cadena» (Bails 1796, 162).

Estudiando los tratados de arquitectura que se escriben en España a lo largo del s. XIX, encontramos una importancia creciente en el uso del hierro forjado, que pasa de ser el material auxiliar que describe Bails a un agente importante en la construcción de edificios:

En el *Vocabulario de Arquitectura Civil* de Matallana (1848) la entrada *Hierro* es muy extensa, distinguiendo entre *hierro colado* «el que ha sido fundido» (Matallana 1848, 155) y para otros usos -varillas, llantas, cuadradillos- que es siempre forjado con distintos tamaños y formas, el más grandes es el *torcho* «el forjado en barras de a cuatro dedos en cuadro» (Matallana 1848, 155). Los usos son similares a los del diccionario de Bails (1802): herramientas y elementos auxiliares de la construcción: barandillas y

²⁰ Esto no quiere decir que el uso del hierro en España, en 1796, fuera el que escribe Benito Bails. Como ha señalado el profesor González Moreno, Bails es un autor con fuertes influencias francesas, cuyo tratado es, en muchos aspectos, una traducción del *Cours de Architecture* de Blondel y Patté, describiendo más bien la realidad constructiva francesa que la española.

verjas, clavos y clavijas, cadenas. Pero comienzan a aparecer otros nuevos, como este «[PUENTE] *Colgante*.= El suspendido de dos ó mas estribos por medio de cadenas y barras de hierro» (Matallana 1848, 225).

En el *Manual del Albañil*, de Marcos y Bausá (1879) se describen los tres estados del hierro «presentandose despues la industria bajo tres clases distintas á saber: hierro fundido ó fundición; hierro forjado ó batido, y acero» (Marcos y Bausá 1879, 90), aunque la definición de acero se refiere todavía al material tradicional «El acero es un hierro que por el *temple* adquiere muchísima dureza» (Marcos y Bausá 1879, 92). Se enumeran a continuación los elementos que se fabrican con hierro (barras, varillas, flejes, etc.), incluyendo «formas especiales para cada caso particular; así los hay en forma de escuadra (fig. 27), ó los llamados de T (fig. 28), y doble I (fig. 29)»

Además, encontramos ya un cambio de actitud respecto al uso del hierro, que empieza a dejar de ser considerado un material auxiliar:

Todos estos hierros se emplean en las construcciones en los distintos oficios que más ó ménos en ellas intervienen, tanto formando el todo de la misma, como constituyendo los detalles y medios de uniones y enlaces de sus distintas partes, así como tambien en las herramientas ó medios auxiliares de cada oficio (Marcos y Bausá 1879, 94)

En Pardo (1885), un libro dedicado a los materiales de construcción, encontramos un amplio capítulo dedicado al hierro y al acero. Se describen todos los estados: hierro forjado, hierro colado y acero. También está descrito por primera vez el horno de pudelar,²¹ para fabricar hierro dulce afinando el hierro colado. Respecto al acero, se distingue entre los «aceros ordinarios» y los «aceros obtenidos por procedimientos modernos». Entre los primeros incluye el hierro forjado y posteriormente templado, el obtenido por cementación y el acero fundido. Y entre los segundos, el acero Bessemer, y el acero pudelado.²²

²¹ Es el primer libro consultado en el que aparece una referencia al hierro forjado pudelado. Han pasado más de 100 años desde que Henry Cort, en 1784, lo patentara, y unos 30 años desde que se generalizara su uso en Inglaterra.

²² «La teoría de la preparación de este acero es exactamente la misma que la de la pudelación y afino del hierro colado, pues como la composición del acero suele no diferir de la del hierro dulce más que

En Ger y Lóbez (1898) también se diferencia claramente el hierro forjado, fundido y el acero. Y, al igual que en Marcos y Bausá, una nueva actitud en relación a este material.²³ También encontramos referencias al hierro forjado pudelado, y posteriormente laminado. Y al acero, tanto a los tradicionales,²⁴ como a los derivados de nuevos procesos de fabricación, como el acero Bessemer y el Siemens-Martin. En 1898 todavía es de uso mayoritario el hierro forjado, pudelado y laminado, aunque ya se ve que el acero lo va a sustituir.

La fabricación del acero ha tenido hasta hace poco por objeto la formación de útiles y herramientas (...). Pero hoy que se conoce la resistencia dupla que tiene sobre el hierro forjado y que los perfeccionamientos que diariamente se realizan en su fabricación permiten darlo más barato y lo hacen susceptible de ser aplicado en grande á las construcciones, se puede asegurar que pronto reemplazará al hierro en el inmenso uso que todavía tiene éste» (Ger y Lóbez 1898, 87)

Y en este tratado, de finales del siglo XIX, encontramos ya reticencias al uso del hierro fundido, por su fragilidad.²⁵ Este recelo comienza en todos los países hacia 1850, momento en que la fundición se ve sustituida por el hierro forjado y posteriormente el

en una pequeña cantidad de carbono, se concibe que, deteniendo la pudelación en cierto punto, se obtendrá acero» (Pardo 1885, 488)

²³ «La dureza de estos materiales, su gran resistencia, su poco volumen, la facilidad de darles cualquier forma y su gran abundancia han hecho su empleo se extienda cada vez más en la construcción, ya formando parte auxiliar ó integrante ya constituyendo el conjunto de una obra y haciendo posibles los adelantos de la época» (Ger y Lóbez 1898, 76)

²⁴ Entre los aceros tradicionales, Ger y Lóbez distingue entre acero natural, acero por cementación y acero fundido (1898, 81). Estos son los que adquieren la dureza por un proceso de templeado posterior, no así los modernos, que por esa razón piensa Ger y Lóbez que no deben llamarse aceros «El acero fundido, denominado *Bessemer* (..) El producto obtenido por este procedimiento no puede templarse y es por lo tanto impropio el nombre de acero que se le da» (Ger y Lóbez 1898).

²⁵ «el hierro fundido debe emplearse con mucha parsimonia y cuidado por la desigual contracción que experimenta al enfriarse, por su naturaleza quebradiza y porque muchas veces sucede que presentando una gran homogeneidad en la apariencia, se quiebra repentinamente sin causa aparente produciendo la ruina total de una obra (...) Los fatales resultados que ha dado ya en construcciones importantes, ha hecho que hoy esté desterrado casi por completo en obras de puentes que un tiempo estuvieron de moda, pero que hoy se ejecutan con hierro dulce» (Ger y Lóbez 1898, 79-80)

acero, salvo como soportes (Sutherland 1997). Además de un extenso capítulo dedicado a los productos de hierro y acero, en Ger y Lóbez (1898) encontramos referencias al uso de este material en todos los capítulos: para cimentaciones especiales, en la construcción de paredes, en forjados y pavimentos, en armaduras de madera, en escaleras, etc.

5.2.2.b. Procesos de fabricación

El primer alto horno que se establece en España es el de Sargadelos (Lugo). Se fundó en 1791. En 1840 producía 1380 toneladas anuales de hierro colado (Pardo 1885, 553). Durante la primera mitad del siglo XIX el uso principal del hierro en la construcción fue la fundición. En 1832 se construye en Barcelona la fábrica Bonaplata, la primera que incorpora columnas de hierro fundido. Algo después se incorporan distintos procedimientos de afino del hierro colado para su transformación en hierro forjado o dulce, incluyendo el pudelado.

En *Materiales de Construcción*, de Manuel Pardo se describe el estado de la industria del hierro en España en 1885: la mayoría del hierro extraído (un 95%) se exporta para su tratamiento en otros países. En 1882 se fabricaron en España 120.064 toneladas de hierro en alto horno; de estas, 85.140 se llevaron a un horno de afino o pudelado para ser convertidas en hierro dulce y 554 se convirtieron en acero. El resto quedó como fundición. Por procedimiento directo (fraguas catalanas) se fabricaron 5553 toneladas. En ese año existen 33 hornos altos y están desapareciendo las fraguas catalanas, desplazadas por los altos hornos que producen grandes cantidades de hierro a precios más bajos.

La industria del hierro estaba formada por ferrerías, en las que se transformaba el mineral de hierro primero en hierro colado en alto horno, y después por afinado en hierro forjado, pudelado o acero y fábricas transformadoras del metal, de las que algunas se dedicaban a fabricar piezas para la construcción. Las empresas más grandes agrupaban el proceso completo.

Agrupados por zonas, vemos que las mayores ferrerías se encuentran en Vizcaya, Guipúzcoa y Asturias.²⁶ También hay algunas importantes en Málaga. En cuanto a las empresas transformadoras del hierro en materiales para la construcción, encontramos «La Maquinaria Terrestre y Marítima», «Material para ferrocarriles y construcciones» y otras menores en Barcelona, además de la fábrica de «Portilla, White y Cía» en Sevilla. La grandes ferrerías asturianas también eran fabricantes de piezas metálicas.

Estas empresas transformadoras, especialmente las pequeñas, comenzaron funcionando únicamente como suministradoras del material. Poco a poco, aparecen empresas metalúrgicas mayores, que disponían de equipos técnicos capaces de diseñar y calcular las estructuras metálicas, además de suministrar el material. En Barcelona fue muy relevante en este aspecto la labor de la Compañía Torras, propiedad del arquitecto Juan Torras Guardiola, fundada en 1878.²⁷

En algunos lugares de España se siguió utilizando durante todo el siglo XIX el procedimiento de la fragua catalana, que se ha citado más arriba.²⁸ Era un proceso directo, sin pasar por el intermedio del alto horno y la fundición, y similar a la forja tradicional, artesana. La mejora que introduce la fragua catalana es una inyección constante de aire en el horno, no mediante fuelles, si no a través de un tubo activado por efecto Venturi. Esto permitía controlar la presión de aire en el horno en cada punto. Se obtenía una bola de hierro dulce o acero, según el tiempo dejado en contacto con el

²⁶ Las más importantes por su tamaño eran la asturianas de Mieres y la de Felguera, así como la de Nuestra Señora del Carmen, en Baracaldo (Vizcaya). Todas ellas producían, en 1882, más de 10000 toneladas anuales de hierro, la mayoría forjado y pudelado. Algunas de ellas estaban instalando hornos *Bessemer* para la fabricación de acero. Una relación completa de empresas fabricantes y producciones la encontramos en Pardo 1885, 550-62)

²⁷ Más información sobre Juan Torras y su empresa en el apartado 5.2.3.b) de esta misma tesis

²⁸ «El procedimiento de las fraguas catalanas se emplea en países montañosos, en que seria muy caro establecer las grandes construcciones que requieren los hornos altos (...) y en las que suele abundar el combustible vegetal, que es el que de ordinario se emplea en este método. Exige además, para que se aplique en buenas condiciones, que el mineral beneficiado sea muy rico, por perderse bastante metal en las escorias. Las forjas catalanas están muy extendidas en los Pirineos y en Córcega. En España se encuentran principalmente en Vizcaya» (Pardo 1885, 398).

carbón, que se forjaba después mediante maquinaria hidráulica. El producto final era un hierro forjado de muy buena calidad o incluso un acero controlando la cantidad de carbono.²⁹ Persiste el problema de la escasa producción, al ser un método artesano; aunque con una composición más homogénea que las forjas y fraguas tradicionales.

Además, el procedimiento de fragua catalana requiere buenas vetas de mineral y abundancia de carbón vegetal. Por eso se sitúan en lugares montañosos con cercanía a buenas minas de hierro. En España fueron muy abundantes en los Pirineos de Cataluña, donde en 1860 existían aún 226 fraguas (Ballonga y Fernandez 2011), ver figura 5.13. La llegada de los hornos Bessemer y Siemens-Martin para fabricar acero las extinguirá.

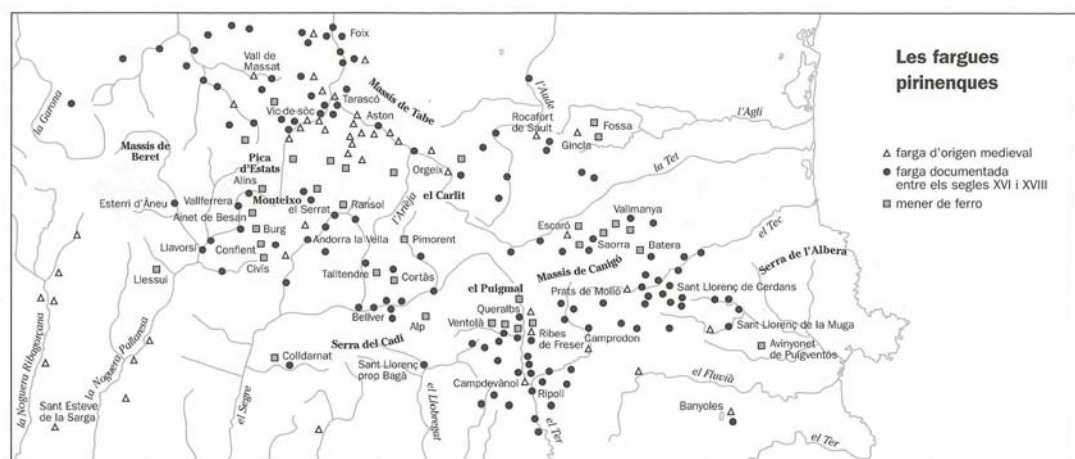


Figura 5.13. Situación de fraguas catalanas y minas de hierro en el Pirineo Catalán (Ballonga y Fernandez 2011, 27)

Pero es interesante destacar que incluso a principios del siglo XX se siguen empleando las fraguas catalanas: en el libro de Sugrañes *Arquitectura y Construcción Modernas* aún se describen:

Para afinar la fundición, hay varios medios, el de la *forja catalana* y por *hornos de reverbero* (...). Con el primer sistema se obtienen hierros de muy buena calidad, muy maleables y fáciles de trabajar.

²⁹ Según algunos autores, la calidad de este hierro forjado en las fraguas catalanes era muy superior al pudelado según el método de Henry Cort: «1784. Henry Cort inventa la técnica de la pudelación por obtener hacer a partir del ferro colat. Procés llarg i costós. Obtenió d'un hacer de pèssima qualitat» (Ballonga y Fernandez 2011, 23).

El horno de reverbero o de pudelaje tiene ventaja en aquellos lugares en que resulte caro el carbón vegetal (Sugrañés 1916, 99-100)

5.2.2.c. Características del hierro y el acero en el s. XIX.

En Pardo (1885) se reproduce la siguiente tabla con los valores de resistencia del hierro (ver figura 5.14). No son valores españoles, sino extraídos de libros franceses y alemanes, como indica él mismo en la columna de la derecha.

Por las características de su fabricación, el hierro forjado tiene menos resistencia cuanto mayor es su tamaño, ya que los martillos de forja no llegaban bien al interior de las piezas grandes. Esto ya lo apunta Bails en 1796: «porque el aguante del hierro debe menguar (...) a paso que crece su volumen pendiendo esta merma de que cuanto mayor es el volumen del hierro, tanto más dificultoso es forjarle» (Bails 1796, 159).

DENSIDAD Y RESISTENCIA DE LOS PRINCIPALES MATERIALES METÁLICOS.

METALES.	Densidad des medias.	CARGAS DE ROTURA, POR MILÍMETRO CUADRADO.				Módulo de elasticidad longitudinal para un milímetro cuadrado de sección.	Cargas, por milímetro cuadrado, corres- pondientes al límite de elasticidad.		OBSERVACIONES.
		Extensión.	Compresión.	Flexión.	Torsión.		Extensión.	Compresión.	
		Kilogs.	Kilogs.	Kilogs.	Kilogs.		Kilogs.	Kilogs.	
Hierro forjado (barras delgadas).....	7,79	43,5	35,0	70,0	70,0	25.000	47,0	47,0	Las densidades están tomadas de la obra de Clausen. Los guarismos rela- tivos a resisten- cias, se han co- piado unos y se han deduci- do otros, del tratado de Red- tenbacher so- bre Construc- ción de máqui- nas.
Idem id. (id. gruesas).....		33,0	24,0	40,0	45,0	15.000	43,0	43,0	
Palastro.....		35,0	28,0	»	»	14.700	42,0	42,0	
Alambre de hierro.....	7,20	70,0	56,0	»	»	18.000	28,0	28,0	
Hierro fundido.....		40 a 43	55 a 72	30,0	30,0	10.000	4 a 6	43 a 47	
Acero fundido.....		400,0	400,0	160,0	100,0	30.000	40	40	
Idem de calidad me- dia.....	7,78	75,0	75,0	»	75,0	20.000	30	30	
Idem ordinario.....		36,0	36,0	»	36,0	18.000	44	44	
Bronce de cañones.....		26,0	»	»	23,0	7.000	»	»	
Cobre forjado ó lami- nado.....	8,95	25,0	»	»	»	43.400	»	»	
Idem fundido.....	8,85	43,0	»	»	20,0	»	»	»	
Latón.....	8,43	43,0	»	22,7	24,0	6.450	»	»	
Estañó.....	7,29	3,3	»	»	6,6	3.200	»	»	
Plomo.....	11,35	4,3	»	»	4,6	5.400	»	»	
Zinc.....	7,19	2,0	»	»	»	»	»	»	

Figura 5.14: Tabla con las características mecánicas del hierro disponible a finales del siglo XX. (Pardo 1885, 563)

Esta es una limitación al tamaño de las piezas, que desaparece con la llegada del acero Bessemer. También encontramos en todos los materiales metálicos empleados, salvo en el acero, diferentes resistencias a tracción que a compresión.

En Nacente (1890) encontramos valores de rotura a compresión de 5000 kg/cm² para el hierro forjado y el doble para el hierro fundido, con la recomendación de emplear valores de diseño de 1/6 de la rotura para el hierro fundido (1600 kg/cm²) y 1/6 (1000 kg/cm²) para el hierro forjado.

En Sugrañes (1916) hay valores de resistencia segura a flexión de 500 kg/cm² para el hierro forjado, 575 kg/cm² para el acero y 170 kg/cm² para la fundición.

En el artículo de Martorell «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado», escrito en 1910, encontramos la siguiente referencia a la resistencia del hierro:

Es sabido que el hierro puede trabajar hasta 10 Kg. por milímetro cuadrado de sección, pero dada la excepcional importancia, que en las estructuras que consideramos presenta el tirante, no será conveniente que trabaje á mas de 3 ó 4. (Martorell 1910, 144)

5.3. Aplicación del cemento y el hierro a las bóvedas tabicadas

En los apartados 5.1 y 5.2 se describe el proceso de industrialización y la generalización de uso de dos materiales; en Europa y de manera más específica en España. Se estudia aquí la aplicación de estos nuevos materiales a la construcción tabicada.

5.3.1. El cemento en la construcción tabicada

En la segunda mitad el 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 permite su uso en exteriores y otros lugares húmedos y acaba con la reticencia hacia el uso del yeso. La confianza en este nuevo material es uno de los factores que determinan la expansión de las bóvedas tabicadas en el siglo XIX.

El libro de Espinosa (1859) es el primer lugar donde se nombra al cemento, además del yeso, como aglomerante para la primera hoja «Cuando el tabicado es doble, triple, etc. la primera capa exige el cemento ó yeso como de pronto fraguado. En las otras suele emplearse el mortero común, pues la primera sirve de cimbra» (Espinosa 1859, 285).

Espinosa tambien recoge el problema del aumento del yeso al fraguar y por esta razón prefiere el cemento:

En las que se emplee el yeso estarán mas espuestas á destruirse si no tienen el espesor conveniente los estribos, por el aumento de volumen de aquel que hace ejercer mayores empujes, y aun asi puede romperse la bóveda por no ceder los apoyos. Por esta razon es mas conveniente el empleo del cemento.

El empleo de los cementos tiene mucha importancia para construir las bóvedas sin cimbra por su pronto fraguado (Espinosa 1859, 286)

Espinosa cita ya en su tratado las bóvedas de hormigón, en las que las que una hoja tabicada sirve de cimbra, volviendo así a uno de los primeros usos de las hojas tabicadas de ladrillo, las empleadas en la construcción romana.

Esta clase de bóvedas [se refiere a las de hormigón] exige que la cimbra sea suficientemente resistente y de forma invariable (...)

Esta cimbra se forma generalmente de bóveda tabicada de ladrillo, formada de varias hiladas puestas de plano, sostenida por cuchillos ligeros de tablas, un tirante y tres tornapuntas (...)

La superficie de la cimbra debe cubrirse con una capa de mortero de dos á tres centímetros de espesor, formando el contorno del intrados; esto evita tambien que el hormigon se agarre al ladrillo. (Espinosa 1859, 292)

En 1869 todavía era rara la construcción tabicada con cemento, por su elevado precio: en el manuscrito de Ballesteros, escrito en ese año, se indica:

Si bien no hemos visto en este país ninguna bóveda tabicada construida con el material de que tratamos, que tenga las grandes dimensiones de las antes citadas de Francia, no dudamos, sin embargo, que se podrian ejecutar de la misma manera y que se obtendrán iguales ventajas: aquí el uso del cemento se reduce a lo puramente indispensable, es decir, que se aplica a aquellos trabajos en que por razón de humedades, se necesite (...): esto naturalmente es debido a la gran diferencia de precios, puesto que el cemento es mucho más caro que estos últimos materiales [se refiere al yeso y los morteros de cal] (Ballesteros 1869, sin paginar)

Un poco más tarde, en 1875, Rebolledo escribe su tratado *Construcción General*. En él hay una referencia breve a las bóvedas tabicadas y es únicamente en relación a la gran ventaja que supone su uso con los cementos de fraguado rápido que se están extendiendo en el campo de la construcción.

Las propiedades que poseen los morteros de cemento de fraguar con suma rapidez; adquirir una gran resistencia; tener una fuerte cohesión con los materiales y no cambiar de volumen después de fraguar, han proporcionado el medio de construir bóvedas de mucha luz y pequeño espesor, haciendo uso del ladrillo puesto de plano, en cuyo caso recibe la bóveda el nombre de tabicada (Rebolledo 1875, 250)

Nacente, en 1890 recomienda el uso de cemento rápido unido a las bóvedas tabicadas: «En las bóvedas delgadas los ladrillos se colocan de plano sobre la cimbra, ligándolos con cemento romano» (Nacente 1890, 183). A este nuevo material atribuye Nacente «nuevos horizontes» en la construcción de bóvedas:

El arte de construir bóvedas y arcos ha entrado de algunos años á esta parte en nuevos horizontes con el empleo de pequeños materiales de forma indeterminada, ligados en una fuerte masa monolita por medio de cementos de superior calidad. Débese este descubrimiento á la superioridad del cemento de Vassy con el cual se vió que podían llevarse á cabo tan atrevidas obras que luego se ha visto podían fabricarse con materias similares (Nacente 1890. Nuevos Materiales, 184)

En este texto, Nacente no está hablando de bóvedas tabicadas si no de las de hormigón. Pero es interesante como ejemplo de las expectativas que el cemento está creando en el mundo de la construcción de bóvedas. Encontramos a cambio reticencias al uso del yeso, tanto por su escasa resistencia como por el aumento de volumen que experimenta al fraguar

a la prevención que nos hace Fr. Lorenzo acerca de la fortaleza del yeso, de la cual haremos patente la importancia, mayormente cuando tratemos de las bóvedas tabicadas(...) pues se tiene experimentado que bóvedas hechas todas de yeso no pueden sufrir peso alguno (Nacente 1890, 64)

Siempre y cuando se emplea el yeso en la construcción de una, bóveda, nunca se ha de poner la clave hasta que el yeso haga su efecto, ó de lo contrario, produciría, al cuajarse por completo, un empuje hácia los pies derechos que los desarreglaría. (Nacente 1890, 183)

Hay una referencia al uso de bóvedas de ladrillo como bovedillas entre vigas de hierro, pero Nacente no especifica (ni en el texto ni en las imágenes, muy poco descriptivas) si los ladrillos se colocan planos o de canto.

Esas bóvedas de ladrillo se emplean hoy muy á menudo con las armazones de hierro. En tal caso, cada bóveda, mas conocida entonces por bovedilla, se forma con una pequeña arcada muy rebajada en un plano perpendicular á las vigas de hierro que forman el plano de los arranques de las bovedillas (Nacente 1890, 184)

Y Ger y Lóbez, en 1898, hay un apartado completo dedicado a las bóvedas tabicadas recibidas con cemento: «Cuando se emplean mezclas de pronto fraguado como el yeso, los cementos, etc., y materiales de gran adherencia como los ladrillos, se hacen bóvedas con éstos sentados de plano llamadas tabicadas» (Ger y Lóbez 1898)

Como los autores anteriores, Ger y Lóbez prefiere el cemento al yeso como aglomerante, por razones similares:

830. El yeso, como se sabe , pierde su fuerza y se destruye con la humedad produciendo con su expansión un empuje considerable en las paredes, por lo que son en este caso preferibles las mezclas hidráulicas, que se endurecen con la humedad, tienen una fuerza de cohesión bastante á ligar los ladrillos y no producen aumento de volumen al fraguar, como sucede con el yeso. (...) Las más de las bóvedas tabicadas que se vienen abajo reconocen por causa la falta de esta precaución ó la de no haber hecho su asiento las paredes (Ger y Lóbez 1898, 260-261)

Por último, en el libro de Sugrañés, escrito ya en 1916, encontramos una postura similar con respecto a los aglomerantes

En la construcción de la primera hoja debe emplearse el mortero de yeso ó de cemento rápido (...) No es conveniente que la primera hoja tenga mucha extensión, por lo que se procederá al doblado en cuanto se tengan cerrados tres ó más anillos de la primera hoja; este doblado se verifica extendiendo á baño el mortero sobre la parte de bóveda que se va á doblar, procurando que entre las hojas quede un espesor uniforme de 10 á 15 milímetros de mortero, el cual puede ser de cal hidráulica y mejor de cemento lento. (Sugrañés 1916, 342)

5.3.2. El hierro en la construcción tabicada

La primera referencia en España al uso de atirantamientos en bóvedas tabicadas la encontramos en la censura previa que escribe Ventura Rodríguez al libro de Sotomayor *Modo de hacer incombustibles....*, refiriéndose a las bóvedas de la casa del Marqués del Llano en Madrid: «porque el arquitecto de esta Obra es Don Juan de Villanueva; y

aunque no la he visto por el interior, he entendido usa de los tirantes de hierro, sin cuyo auxilio no quedaría con firmeza»

5.3.2.a. Tratados del siglo XIX

En el tratado de Bails *De Arquitectura Civil*, escrito en 1796, se describe por primera vez la asociación del hierro con las bóvedas tabicadas:

9º Asentar en el espinazo de su trasdós, quando la bóveda tuviere de ancho mas de 19 o 21 pies, llantas de hierro en aspa, que hagan oficios de tirantes, en la dirección de las diagonales de la planta, con lo que quedará más fortificada (Bails 1796, 582)

Pero este apartado es prácticamente una traducción del *Cours d'Architecture* de Blondel y Patté (1771-77). Con estos comentarios se está recogiendo la forma de construir bóvedas tabicadas en Francia a finales del siglo XVIII, no la española. Si buscamos en el *Cours* de Blondel y Patté encontramos el uso de hierro asociado a las bóvedas tabicadas de manera mucho más explícita, ver figura 5.15. Su uso principal es para reforzar los muros donde apoyan las bóvedas cuando se concentran muchos tubos de chimenea y como tirante para evitar que se abran las paredes en caso de bóvedas grandes, de ancho superior a 16-28 pies.

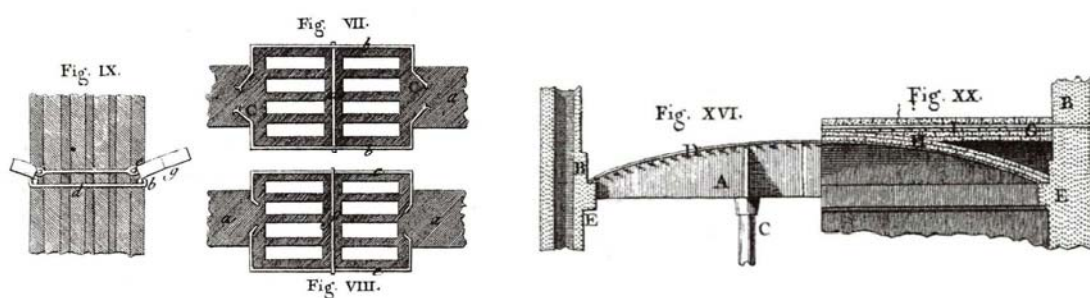


Figura 5.15. Dibujos en el *Cours d'Architecture* de Blondel y Patté relativas al uso de tirantes para refuerzo de bóvedas tabicadas.

A la izquierda, barras de hierro para reforzar los muros en las zonas donde se concentran huecos de chimeneas (Blondel y Patté 1771, Pl. LXXXXV, fig. VII, VIII y IX)

A la derecha, tirantes de hierro anclados en los extremos mediante una chapa, para recoger los empujes de la bóveda. Estas son las bóvedas construidas en el Palais Bourbon, con un ancho de unos 16 pies. Los tirantes de hierro son planos, tienen 2,5 pulgadas de espesor y 6/7 líneas de grosor. (Blondel y Patté 1771, Pl. LXXXXVII, fig. XVI y XX)

9º De placer sur le sommet de son extradados, dans le cas qu'une voûte excéderoit 16 à 18 pieds de largeur, des tirans de fer plat, soit en croix, soit diagonalement, soit transversalement; procédé qui ne pourroit que la solidifier davantage (Blondel y Patté 1771, vol. 6: 120)

En otros tratados españoles del siglo XIX, a pesar de la evolución en el uso del hierro que puede leerse, encontramos pocas referencias específicas a su uso combinado con las bóvedas tabicadas, ni siquiera con las bóvedas en general.

En los textos más «tradicionales» como el de Fornés y Gurrea o en el 4º *Quincenario* de Renart no aparece nada.³⁰

En Espinosa (1859) encontramos sólo una referencia dentro de un ensayo realizado por Brunel en Inglaterra en 1834 sobre bóvedas de ladrillo, aunque no queda claro si son de rosca o tabicadas.

Para conseguir la unión necesaria en la obra para poder construirle sin apoyo ó cimbra, pues no era suficiente para tanta salida y peso, solo la fuerza de cohesión del cemento, empleo Brunel alambres y flejes de hierro, y aun cuerdas que atirantaban la construcción (Espinosa 1859, 286)

En Rebolledo (1876) encontramos el siguiente texto, referido a bóvedas en general:

Sucede algunas veces en la edificación que los apoyos de las bóvedas no pueden tener todo el grueso necesario para contrarrestar el empuje de aquellas, y en tal caso hay que establecer refuerzos de hierro, unas veces aparentes y otras ocultos, cuya disposición varía según los casos (Rebolledo 1876, 253)

Aunque Ger y Lóbez, en su *Construcción Civil*, de 1898, dedica mucho espacio al uso del hierro en la arquitectura, y lo aplica a muchas partes de los edificios, no hace lo mismo con las bóvedas. En los apartados dedicados a la construcción de bóvedas, ya sean tabicadas, de rosca o de cantería, no cita atirantamientos de hierro; sí lo hace en los capítulos dedicados a refuerzo de bóvedas o arcos, ver figura 5.16. Ger y Lóbez piensa que el uso de tirantes de hierro es desaconsejable: «De todos modos, el hierro es un

³⁰ Como Renart copia en parte a otros autores, encontramos la misma referencia que el Bails, que a su vez copia a Blondel y Patté, sobre el uso de tirantes de acero en bóvedas tabicadas de más de un cierto tamaño. Pero en la parte del 4º *Quincenario* que Renart escribe originalmente, no se cita el uso del hierro en bóvedas tabicadas

medio muy débil de dar solidez a una bóveda y debe huirse de su empleo todo lo posible por la facilidad de oxidarse cuando está expuesto a la humedad» (Ger y Lóbez 1898, 267) y solo debe emplearse cuando no sea posible contrarrestar los empujes dando un espesor conveniente a las paredes o en caso de bóvedas ya construidas que presentan problemas: «El destino del hierro en las bóvedas no es éste: en ellas debe emplearse para consolidarlas, ayudando como parte accesoria y no como parte principal, y en este sentido solamente debe usarse» (Ger y Lóbez 1898, 267).

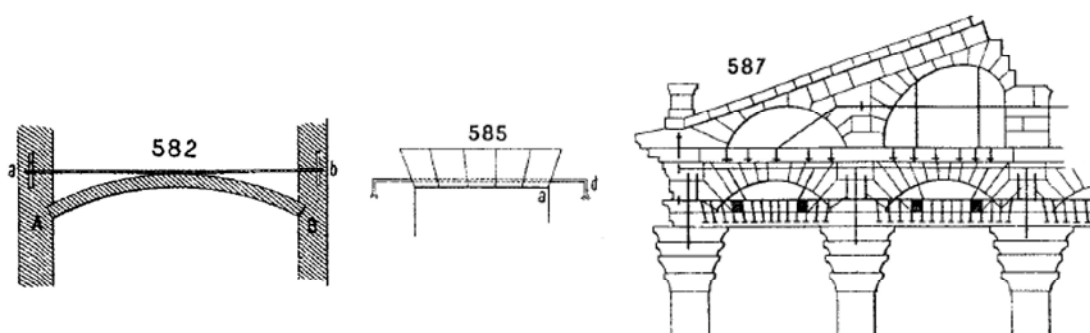


Figura 5.16. Figuras relativas al atirantamiento de bóvedas. Ger y Lóbez 1898, Lam. XIII. Las figuras 582 y 587 representan atirantamientos «adecuados» según Ger y Lóbez. En la figura 587 se muestra un ejemplo de lo que piensa que es incorrecto: «en la que el hierro juega un papel principal del que depende únicamente la estabilidad de la construcción, haciendo suponer falsamente que existe una gran simplicidad y ligereza, cuando por el contrario existe una gran complicación contra lo que debe ser» (Ger y Lóbez 1898, 267).

En lo que respecta específicamente a las bóvedas tabicadas, Ger y Lóbez recoge su uso en combinación con vigas de hierro para formar forjados, ver figura 5.17.

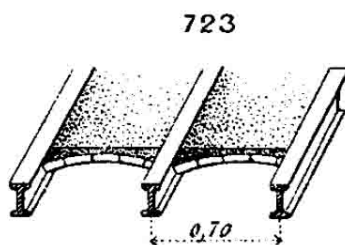


Figura 5.17: Forjado de vigas de acero y bovedillas tabicadas (Ger y Lóbez 1898, Lam. XVII)

Las bovedillas tabicadas entre vigas de madera eran muy frecuentes, al menos en Cataluña, desde los últimos años del siglo XVIII: sustituyeron a los forjados de tablas sobre viguetas para crear una separación estanca en los edificios de vecinos (Rosell

1996). A lo largo del siglo XIX se cambia la madera por el hierro, primero fundido y después forjado. En 1869 ya eran de uso común en Barcelona los forjados de bovedilla tabicada sobre vigas de hierro forjado: se amplía la separación entre vigas (desde unos 40 cm hasta 1 m), y las bovedillas pasan a estar formadas por 5 ladrillos, en lugar de 3 (Ballesteros 1869). El manuscrito de Ramón Ballesteros³¹ no tiene ningún dibujo; pero sí el del Folguera³² (ca. 1915); algunos de ellos parecen creados para ilustrar a Ballesteros, como el que se refiere al cambio en los forjados de vigueta y revoltón, ver figura 5.18.

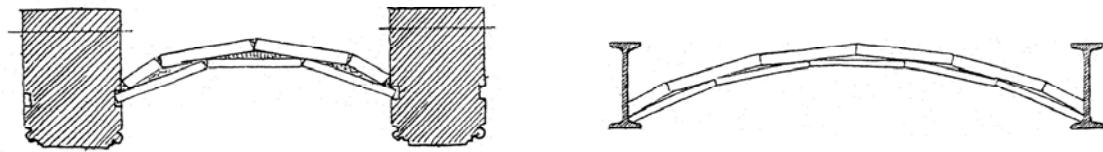


Figura 5.18. A la izquierda, forjado tradicional en Cataluña de viguetas de madera y revoltones de ladrillo tabicado: las viguetas se separaban entre 40 y 60 cm y el revoltón era de tres ladrillos. A la derecha, mismo forjado, pero construido con viguetas de hierro forjado: las viguetas están más separadas, entre 70 cm y 1 m y el revoltón es de 5 ladrillos (Folguera, ca. 1915)

5.3.2.b. Juan Torras y Guardiola

La figura de Juan Torras, arquitecto, profesor, fabricante y calculista de estructuras metálicas, es importante como unificador de la arquitectura del hierro que se impone en toda Europa con las bóvedas tabicadas.

³¹ Ramón Ballesteros fue capitán de Ingenieros en Cataluña. En 1869 escribe el texto *Bóvedas Tabicadas*, en el que repasa la forma tradicional de construirlas, especialmente en Barcelona y los incipientes avances que supone construirlas con cemento. El objetivo final era aplicar estos avances a edificios militares. El manuscrito se conserva en el Archivo Histórico Militar y nunca ha sido publicado; se incluye en un apéndice al final de esta tesis.

³² Francesc Folguera (Barcelona 1891-1960) se tituló como arquitecto en 1917. Fue ayudante de Gaudí en las obras de la Sagrada Familia y uno de los principales exponentes del Modernismo Catalán. Hacia 1915 escribe *La volta de mahó de plà*. El texto es citado por González Moreno-Navarro en la introducción de Truño (2004), pero permanece inédito, en el Colegio de Arquitectos de Cataluña. En el texto se describen los antecedentes históricos de las bóvedas tabicadas, como se construyen en Cataluña en el momento en que escribe y algunas nociones acerca de su comportamiento estructural. Aunque no parece tener ninguna relación con el autor anterior ni lo cita, es muy probable que conociera su texto, ya que algunas explicaciones que ofrece son similares, además de dibujar algunas de las disposiciones constructivas que Ballesteros explica, aunque no dibuja.

Juan Torrás y Guardiola fue uno de los primeros catalanes que se tituló como arquitecto en la Escuela especial de Arquitectura de Madrid, en 1854. En 1855 comienza a dar clases de construcción en la escuela de Maestros de Obras de Barcelona, donde fue profesor de Rafael Guastavino.³³ Allí, Torrás fue el encargado de transmitir a los maestros de obras la forma de construir «a la catalana» que llevaba ejecutándose en Barcelona desde los últimos años del siglo XVIII. Esta construcción estaba basada en el uso del ladrillo formando estructuras mucho más ligeras que las tradicionales de piedra y madera.³⁴

En 1870 se cierra la Escuela de Maestros de Obras y sus estudios se engloban dentro de la recién creada Escuela de Arquitectura de Barcelona. Sus clases en esta nueva escuela, en la que se encarga de la asignatura Mecánica Aplicada, le interesan en el uso del hierro en la arquitectura, englobado dentro de un debate candente en ese momento.³⁵

Finalmente, en 1877 formará su propia empresa de construcciones metálicas: Can Torrás del Ferros, que basa su éxito en los cálculos mecánicos ajustados que Juan Torrás era capaz de realizar y que abarataban el coste de la estructura. Los edificios de la Exposición de Barcelona de 1888 suponen un impulso para su empresa,³⁶ de los que

³³ En su libro (1889) Guastavino lo cita como uno de sus mentores (junto a Elías Rogent) y la persona que le hizo pensar en las posibilidades de la construcción tabicada.

³⁴ Sobre el desarrollo de este tipo de construcción es muy interesante consultar la tesis de Rosell (1996). Es también la que describe Renart en sus *Quincenarios*, escritos hacia 1810, ver cap. 4 de esta misma tesis. Así se construirá el Ensanche de Barcelona. Curiosamente, la denominación de «construcción catalana» para denominar a la ejecutada con ladrillo y después, con ladrillo y acero, se acuña en Madrid, cuando, en los primeros años del siglo XX se conoce este sistema llegado desde Barcelona (García Gutiérrez-Mosteiro, 1996)

³⁵ Durante el siglo XIX se impone el hierro y después el acero en la arquitectura industrial, de carácter práctico. Pero todavía en los primeros años del s. XX se debate sobre la conveniencia de utilizarlo en los edificios representativos (Navascues 2007).

³⁶ Elías Rogent compañero de Juan Torrás, acabó dirigiendo las obras de la Exposición Universal de Barcelona de 1888 y fue el responsable de que muchos pabellones, proyectados inicialmente en madera, se construyeran con una moderna estructura de hierro. (Feliú Torrás 2011)

construirá por ejemplo la nave central del Palacio de la Industria, proyectada por Elías Rogent: una celosía de canto variable de 30 metros de luz.³⁷

Además de este interés por la construcción metálica, Torras no olvida los principios de la «construcción catalana», basada en el ladrillo, que explicaba en sus primeros años como profesor de la escuela de Maestros de Obras.

Para empezar, experimenta en sí mismo, y para la construcción de su vivienda, en 1873, desarrolla una «viga mixta» de hierro y ladrillo (ver figura 5.19) que patentará unos años después, en 1876, con el título de «Un nuevo sistema de vigas y suelos colgados» (Feliu Torras 2011)

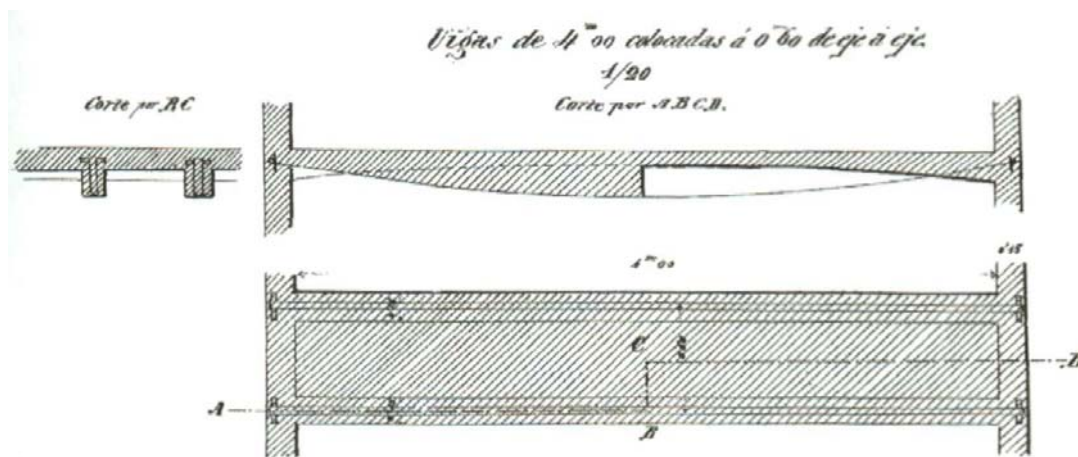


Figura 5.19. Viguetas utilizadas por Juan Torras en la construcción de su propia vivienda, en 1873, y patentadas en 1876.

Torras describe así su patente en la memoria presentada a la oficina de Patentes y Marcas el 23 de diciembre de 1876:

El todo (...) resiste como un solo tablero formado de fábrica de albañilería, reforzada con nervios de lo mismo; en cuya parte inferior hay una llanta curva de hierro que se une en sus estremidades con el tablero(...). Así se tiene una forma aproximadamente de igual resistencia, resistiendo la fábrica de albañilería (..) a la compresión y el hierro a la tensión» (Feliú Torras 2011, 54-55).

³⁷ La búsqueda de estructuras óptimas es una constante en la carrera de Juan Torras. Desarrolla un tipo particular de celosía, formando un tejado a dos aguas con las vertientes en forma parabólica, a la que llama «ala de mosca» y con las que construirá muchos edificios de gran luz, entre ellos la nave central de Palacio de la industria que se cita.

Y será uno de los «unificadores» de la estructura de hierro con las bóvedas tabicadas. Torras empleará casi siempre el mismo sistema constructivo: cerchas metálicas «de igual resistencia» para el orden principal de estructura y bóvedas tabicadas, normalmente de perfil cilíndrico, para el segundo. Así construye las naves de su propia empresa (ver figura 5.20)³⁸ o la granja de vacas La Ricarda en el Prat de Llobregat (ver figura 5.21).



Figura 5.20: Naves de la empresa Can Torras, en Poblenou (Barcelona), anteriores a 1910. Vigas en celosía y bóvedas tabicadas sobre ellas. El sistema constructivo se describe en Martorell (1910, 127): «Bóvedas.- Generatriz y directriz circular. Dimensiones 5,65x14 m. Bóveda simple de dos gruesos de rasilla y otro de ladrillo (8 cm.). Flecha 0,50 m. Tirantes.-Hierros de 22 mm. de diámetro, separados 2,10 m», de donde también se ha extraído la imagen

³⁸ Para su empresa Can Torras construye al menos dos naves empleando un sistema similar: orden principal de estructura metálica sobre el que apoyan bóvedas tabicadas de perfil cilíndrico. Aquí se reproduce la nave de Calderería; en el capítulo 6 la de Herrería. De ninguna de las dos he encontrado la fecha exacta de construcción, pero en cualquier caso son anteriores a 1910, ya que Martorell las fotografía para su artículo publicado ese año.

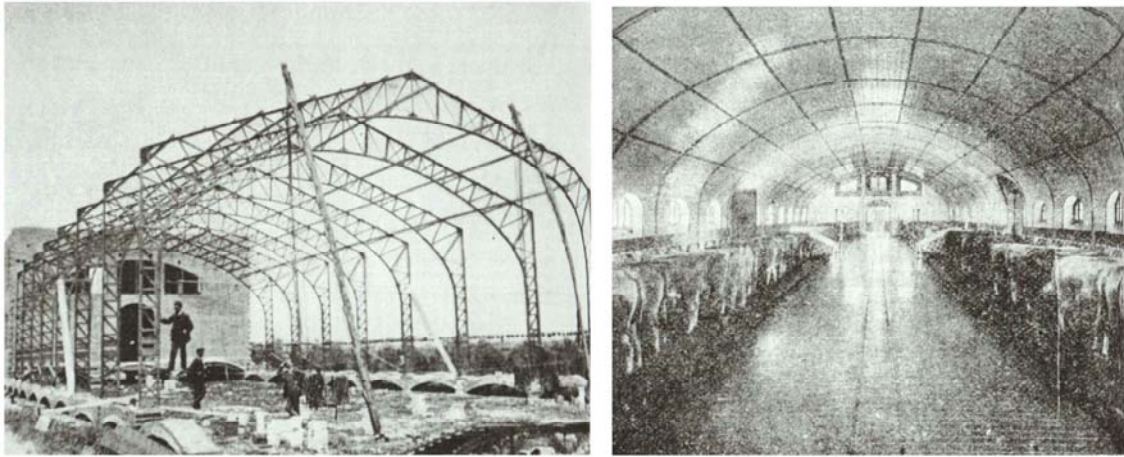


Figura 5.21: Granja de vacas La Ricarda, en El Prat de Llobregat (Barcelona), de 1901. Vigas en celosía y bóvedas tabicadas sobre ellas. A la izquierda, fase intermedia de la construcción, en la que se ve la estructura metálica, todavía sin bóvedas. En este edificio un orden principal de cerchas metálicas que se cubren con una gran bóveda tabicada cilíndrica ayudada por viguetas, también metálicas. A la derecha, interior del edificio terminado (Feliú Torras 2011, 84).

5.3.2.c. *El tratado de Sugrañés, 1916*

Ya son los primeros años del siglo XX cuando Sugrañés recoge ampliamente el uso de bóvedas tabicadas atirantadas con hierro. Dedicar un apartado al atirantamiento de arcos, en las que los cita como algo de uso general:

En las construcciones civiles y especialmente en las casas-habitación, en que ligereza y economía suelen ser los caracteres que las distinguen, se recurre casi exclusivamente á este segundo medio [se refiere a tirantes] para obtener la estabilidad de arcos y bóvedas, sin necesidad de contrafuertes ni muros de extraordinario espesor; para esto se disponen convenientemente los atirantamientos por medio de piezas de hierro ó de madera, al objeto de obtener que los muros o pies derechos que hayan de sustentar los arcos y las bóvedas, trabajen solamente por compresión, es decir, que estos se conviertan en pesos muertos (Sugrañés 1916, 288-89)

Y especialmente aplicados a las bóvedas tabicadas:

Como queda dicho, atirantándolas convenientemente, esta clase de bóvedas se prestan admirablemente para obtener con ellas cubiertas sólidas y ligerísimas, pudiendo el constructor, con gran facilidad de medios, dar solución apropiada á todos los problemas que se le presenten (Sugrañés 1916, 342)

Sugrañés cita numerosos ejemplos de bóvedas tabicadas construidas en combinación con hierro, utilizándose éste como tirantes y también como cerchas y vigas para apoyar

las bóvedas. Las descripciones son muy interesantes, ya que se citan ejemplos contruidos explicitando sus dimensiones.

Comienza con bóvedas sencillas, atirantadas y apoyadas sobre muros, ver figura 5.22.

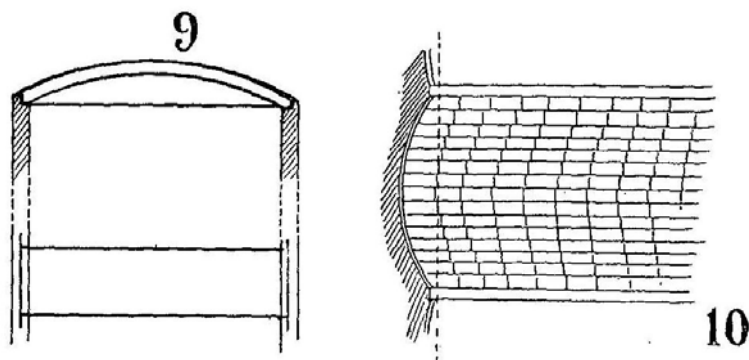


Figura 5.22: Ejemplos de construcción tabicada atirantada. (Sugrañés 1916, Lámina 83)

La fig. 9, Lám. 83, representa una doble bóveda para cubrir una cuadra de 8 m. de luz, la bóveda superior es de cuatro gruesos de rasilla (10 cm. de espesor) y la inferior de un grueso de rasilla y otro de ladrillo delgado (6 cm.), siendo la flecha de $1/8$ de la luz; las bóvedas se entregan en ángulos de 80 X 120 mm. atirantados á trechos de dos metros con tirantes de 35 mm. de diámetro. La bóveda superior se apoya en una serie de tabiques transversales, separados 50 centímetros unos de otros.

En otro ejemplo análogo al anterior, la bóveda, también doble, tiene 12 m. de luz, siendo las dos bóvedas del mismo espesor (7 cm.), la flecha es igualmente de $1/8$ de la luz. Los tirantes en este caso son viguetas de 10 cm. separadas 3 metros, entre unas y otras hay en los muros unos hierros planos curvados hacia el exterior á fin de transmitir á los tirantes los empujes de las bóvedas (fig. 10, Lám. 83). (Sugrañés 1916, 343)

Continúa con bóvedas tabicadas funcionando como segundo orden de estructura, apoyadas en vigas metálicas en celosía. En la figura 5.23 se dibujan algunas de ellas: los números 11 y 12 representan las naves de Can Torras (ver figura 5.20). El 13, una bóveda de doble curvatura atirantada y el 13₁, una celosía en «ala de mosca», un perfil típico de las obras de Juan Torras.³⁹

³⁹ Ver nota 36 de este capítulo.

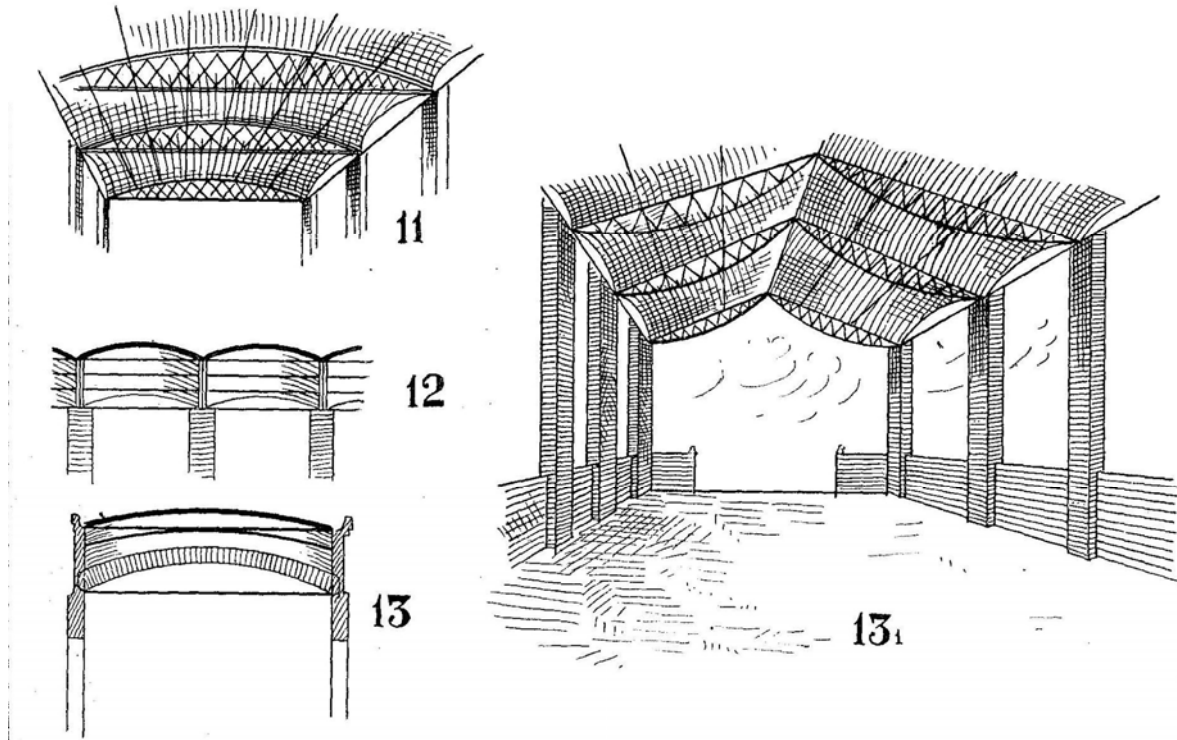


Figura 5.23. Ejemplos de construcción tabicada, bóvedas apoyadas en cerchas o arcos metálicos y además atirantadas. (Sugrañés 1916, Lámina 83)

Así describe Sugrañés los dibujos que se reproducen en la figura 5.23:

En la fig. 11, Lám. 83, se presenta un ejemplo de bóvedas sencillas sobre cuchillos de armaduras; los cuchillos tienen la forma de igual resistencia, siendo, por lo tanto, las bóvedas de directriz y de generatriz circulares. Las bóvedas de este ejemplo tienen 5,50 por 14 m. con una flecha de 0,50 m., son de dos gruesos de rasilla y uno de ladrillos (8 cm.); los tirantes establecidos en sentido de la mínima dimensión de la planta, están separados 2 m. unos de otros y están formados por varillas de 22 mm. La curvatura superior de los cuchillos de armadura sirve perfectamente para la recogida y conducción de las aguas pluviales. La fig. 12, Lám. 83, presenta una sección transversal de estas bóvedas que, como se ve, están sostenidas por simples pilares aislados. (Sugrañés 1916, 343)

También describe Sugrañés sistemas contruidos sólo con ladrillos: bovedas tabicadas atirantadas apoyadas en arcos tabicados, nuevamente atirantados, ver figura 5.24.

Pueden substituirse los cuchillos de armadura de hierro ó de madera por arcos atirantados; tal es el ejemplo que se indica en las figs. 14, 15 y 16, Lám. 83, en las que se dan respectivamente las secciones longitudinal y transversal y una vista de conjunto de este sistema de arcos y bóvedas tabicadas. La longitud de los arcos es de 12,50 m. y su

sección variable desde 60 cm. en los arranques hasta 30 cm. en la clave, con un espesor constante de 0,60; la flecha de los mismos es $1/8$ de la luz.

Las bóvedas son de generatriz y directriz circulares, con una luz ó separación de arcos de 4 m; la bóveda es doble, siendo la superior de 4 gruesos de rasilla (10 cm.) y la inferior de 2 gruesos (5 cm.) Los tirantes de los arcos están formados por dos ángulos de 90.90.11 mm. y los de las bóvedas por hierros redondos de 20 cm. de diámetro. La fig. 16, Lám. 83, da idea del aspecto exterior de la cuadra cubierta con las bóvedas descritas (Sugrañés 1916, 343)

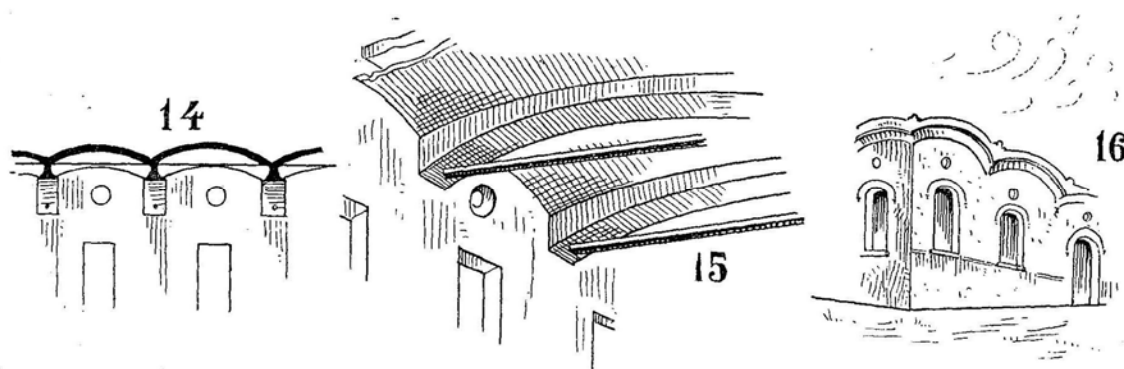


Figura 5.24. Ejemplos de construcción tabicada, bóvedas apoyadas en arcos atirantados (Sugrañés 1916, Lámina 83)

Y por último, sistemas de bóvedas tabicadas baídas, apoyadas sobre pilares, ver figura 5.25. Este dibujo, y la descripción que le sigue, parece de la fabrica Chamón y Triana, que también aparece en Martorell (1910).

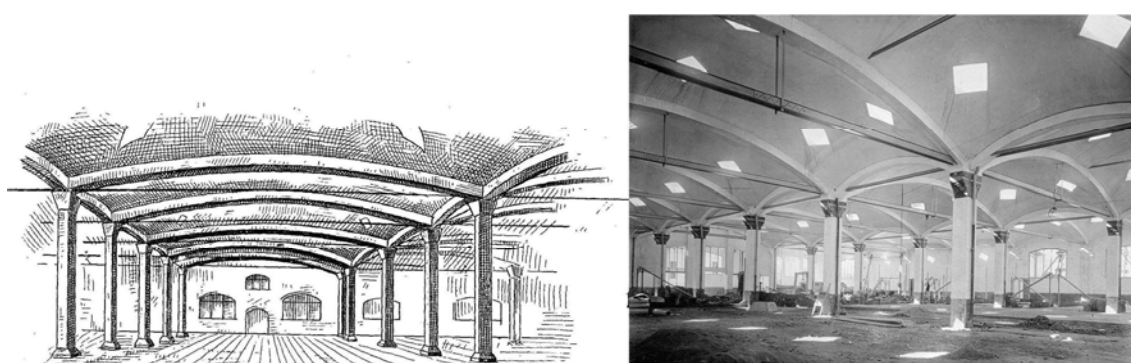


Figura 5.25. A la izquierda, ejemplo de construcción tabicada, bóvedas rebajadas apoyadas en arcos atirantados en dos direcciones (Sugrañés 1916, Lámina 84, fig. 1); A la derecha, fábrica Chamón y Triana (la imagen se conserva junto con el texto inédito de Folguera, ca. 1915)

Otro ejemplo de aplicación de arcos atirantados destinados, al sostenimiento de bóvedas tabicadas es el que se presenta en la fig. 1, Lám, 84, el que ofrece la particularidad de no limitarse á una serie de elementos de bóveda apoyados en paredes, sino que hay tres

series con dos filas de pilastras intermedias. Las dimensiones de la sala en conjunto son de 64 por 48 m. obteniéndose la iluminación de tan vasto recinto por medio de claraboyas abiertas en las bóvedas y cubiertas por baldosas de vidrio. Los arcos tienen 16 metros de luz con una sección de 60x70 cm. y separados unos de otros 8 m. Las bóvedas son dobles, la superior con dos gruesos de rasilla y uno de ladrillos, y la inferior de un solo grueso de ladrillo, suspendida de la anterior por pequeñas tirantillas. Los tirantes de los arcos están formados por dos vigas de 24 cm. de altura y los de las bóvedas por viguetas de 10 cm., reposados 3 metros en las bóvedas extremas y 6 en las intermedias (Sugrañés 1916, 344)

El papel de la estructura metálica que acompañaba a las bóvedas tabicadas fue cambiando con el tiempo. Mucho más tarde, y en la obra construida por Guastavino en Estados Unidos, encontramos esta imagen de la iglesia de Riverside, en Nueva York, construida entre 1927 y 1929, que es una gran estructura metálica que posteriormente se recubre con ladrillo tabicado, con una función meramente decorativa, ver figura 5.26.

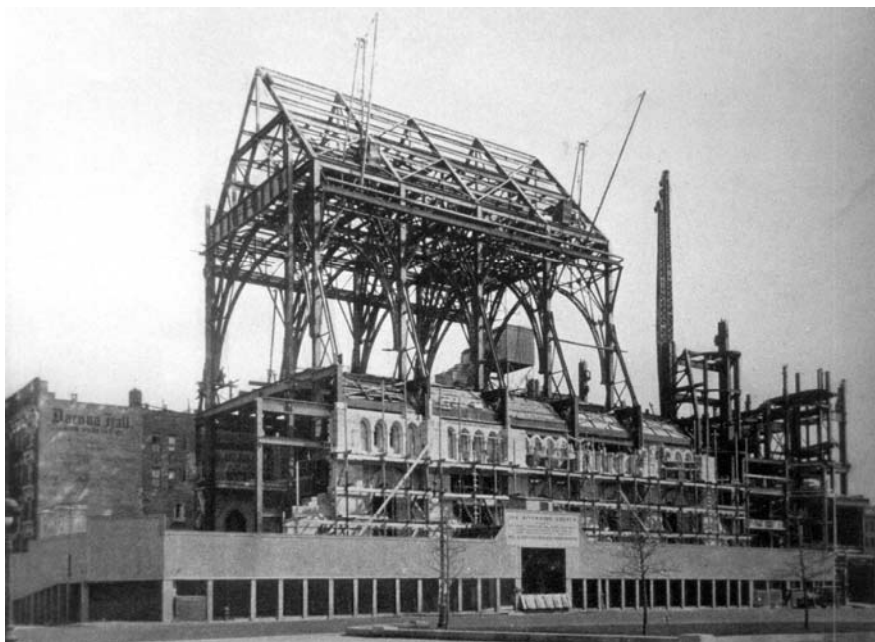


Figura 5.26. Riverside Church, Manhattan, Nueva York. 1927-1929. Estructura metálica que debe soportar las bóvedas neogóticas construidas por los Guastavino (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

CAPÍTULO 6:

LOS NUEVOS TIPOS ARQUITECTÓNICOS DE LA EPOCA INDUSTRIAL

La Revolución Industrial, que comienza en Inglaterra en 1780 y se extiende por Europa en el siglo XIX, da origen a dos nuevos tipos arquitectónicos: los edificios industriales y la vivienda masiva para los trabajadores, en general en zonas urbanas aunque hay casos especiales como las colonias obreras.

España llega un poco tarde a la Revolución Industrial. Era un país poco poblado, con una red de transportes deficiente y una fuerte tradición agrícola. Además, los primeros años del s. XIX son problemáticos: se libra la guerra de la Independencia contra Francia y se pierden las colonias americanas. El país queda arruinado y el gobierno absolutista de Fernando VII no ayuda a recuperarlo. El siglo XIX es muy agitado en España: se suceden gobiernos de diferente pensamiento, cambiados a menudo a través de golpes de estado, levantamientos militares, etc. Además hay tres guerras carlistas, que afectan especialmente a la zona norte del país, en la que se estaba desarrollando más la industria. Todo esto crea una fuerte inseguridad política y económica, lo que hará que España nunca llegue a industrializarse de manera completa.¹ Pero desde 1850 la economía española se va recuperando y se desarrolla cierta actividad industrial, aunque acotada a regiones concretas: principalmente Cataluña, que ya había comenzado una leve industrialización en los últimos años del siglo XVIII; en menor medida Andalucía y poco después Asturias y País Vasco. La fecha «oficial» de inicio de la Revolución industrial en España es 1832, momento en que se funda en Barcelona la fábrica textil Bonaplata, la primera accionada por una máquina de vapor.

¹ Sobre la industrialización en España se ha consultado a J. Nadal, *El fracaso de la Revolución industrial en España 1814-1913* y *Pautas regionales de la industrialización española (siglos XIX y XX)*. Sobre arquitectura industrial en España: J. Sobrino, *Arquitectura industrial en España 1830-1990*, M. Ibáñez, *Arqueología industrial en Bizkaia*, J. Corredor y J.M. Montaner *Arquitectura Industrial en Cataluña. Del 1732 al 1929*

Cataluña, una región con tradición manufacturera,² se convierte en el centro de la industria textil, que monopolizará a lo largo del siglo XIX,³ con la apertura de numerosas fábricas,⁴ al principio en Barcelona y alrededores y después por casi toda la región, especialmente en la costa y en los cauces de los ríos Llobregat, Cardener y Ter: la mayoría del transporte en esta época se hacía por barco, lo que favorece el desarrollo de las zonas costeras y los cauces fluviales de cierto tamaño.

Un poco más tarde llega a otras regiones, aunque con menor intensidad.⁵ La industria siderúrgica y metalúrgica (altos hornos para conseguir hierro colado, hornos de afinado y pudelado y fabricación de piezas metálicas) se desarrolla en buena medida por las necesidades de la industria textil: maquinaria, estructura de los edificios, raíles de tren, locomotoras y cascos de barcos para repartir las mercancías, etc. Inicialmente (1830-1860) se desarrolla en Andalucía, favorecida por una menor conflictividad en las

² Cataluña, especialmente Barcelona y alrededores, desarrolla en el siglo XVIII una importante protoindustria textil, basada primero en las indianas, una técnica de estampación, y después en el tejido del algodón procedente de las colonias americanas. En 1768 existen 22 fábricas en Barcelona, dos en Mataró y una en Manresa (Nadal 1975)

³ «En 1860(...) las fábricas catalanas acaparan más de 8000 de los 14310 caballos de vapor instalados en toda España» (Nadal 1975, 204); «De 1857 a 1913, las importaciones de materia prima [algodón] por los puertos del resto de España sumaron (...) el 7,46% de las entradas por el litoral catalán» (Nadal 1975, 219)

⁴ Estas son algunas de las primeras fábricas textiles, creadas en Cataluña en la primera mitad del s. XIX: En 1833 se inaugura el Vapor de la Compañía en Tarrasa, en 1839 llega a Sabadell. En 1842 se funda La Igualadina Cotonera, en Igualada. En 1843 abre Fabra&Coats en Sant Andreu, en 1844 el Vapor Vell de Sants, en 1847 el gran complejo de La España Industrial o Vapor Nou, todas en Barcelona (Sobrino 1996)

⁵ En 1837 la máquina de vapor llega a Valencia, con la fábrica de sedas La Batifora y un poco después la Fábrica de Hilados y Tejidos de Seda de Lleó Sancho y la Fábrica de Tejidos de Seda de A. Garín. En Málaga se inaugura La Industria Malagueña en 1847. En Vizcaya la Fábrica de Lencería Miravalles en 1854. En Galicia se introducen fábricas para la transformación del lino: O Seijo (Mugardos) y O Roxal (El Ferrol). Hay también un foco importante en Alcoy, fábricas textiles y molines papeleros aprovechando el cauce escarpado del río Molinar (Sobrino 1996)

guerras carlistas.⁶ Desde 1860 hasta 1880, la hegemonía es de Asturias, que posee las minas de carbón necesarias para los hornos y por ello consigue el hierro forjado a mucho menor precio que los altos hornos andaluces.⁷ Finalmente, desde 1880, la primacía de la industria siderúrgica es para Vizcaya, que importaba el carbón de Inglaterra y tenía hierro en abundancia.⁸ El traslado de la industria siderúrgica tiene mucho que ver con la introducción del acero, que en los últimos años del s. XIX empieza a producirse en los convertidores Bessemer: este proceso de fabricación, más directo, requiere mucho menos carbón que el acero fundido y después afinado y pudelado. Así que merece la pena trasladar la industria siderúrgica de Asturias –donde está el carbón- a Vizcaya, donde está el hierro.

En Cataluña no hay grandes industrias siderúrgicas, aunque pervive la técnica tradicional de la fragua catalana, ver capítulo 5 de esta tesis. Pero si existen grandes empresas transformadoras de metales.⁹ En el ámbito estudiado cabe destacar la

⁶ Los Altos Hornos Heredia , fundados en Málaga en 1826, fueron los primeros con fines civiles instalados en España (Nadal 1975). También hay empresas de construcciones metálicas Portilla Hermanos and White, en Málaga y San Antonio, en Sevilla.

⁷ En Asturias se funda Duró y Cía en La Felguera (1868) y existen otras importantes, en Mieres y en Quirós-Trubia. Respecto al transporte, que iba en contra de los altos hornos andaluces: la hulla asturiana costaba, en 1865, 18 pesetas/tonelada en el puerto de Gijón; pero duplicaba su precio en los puertos de Sevilla y Málaga, por el transporte. (Nadal 1975, 137)

⁸ En Vizcaya había abundantes yacimientos de hierro de buena calidad, que se exportaba a Inglaterra. Estos mismos barcos traían de vuelta hulla inglesa, más barata que la española (asturiana) ahorrando así en los fletes de los barcos. Así, la combinación de hierro y carbón abundante en Vizcaya hizo que se desarrollara extraordinariamente la industria siderúrgica (Ibañez 1988). Las siderúrgicas más importantes son Santa Ana de Bolueta (1841), El Carmen de Baracaldo (1854) y las fábricas de La Vizcaya y la Iberia, que en 1902 se fusionan creando Altos Hornos de Vizcaya.

⁹ Destacan por su tamaño las empresas: La Maquinaria Terrestre y Marítima (1855), que fabricaba máquinas de vapor y piezas para construcción, como las de los mercados del Born, San Antonio y Barceloneta en Barcelona; La sociedad Material para ferrocarriles y construcciones, antigua Herrería del Remedio (1865), que fabrica hierros para construcción: vigas doble T, railes de tren; La empresa CanTorrás Herrerías y Construcciones (1878) y Can Girona (1881). En el libro de Manuel Pardo *Materiales de Construcción*, se incluye una relación de todas las empresas siderúrgicas y metalúrgicas de España, indicando su fabricación en 1882. Estas dos últimas no figuran, seguramente por ser de reciente creación cuando se escribe el listado.

compañía Torras, fundada por el arquitecto Juan Torras, ya citado en el capítulo 5 de esta tesis.

Salvo Cataluña, Asturias-País Vasco y, en menor medida Valencia y Andalucía, el resto de España no se va a industrializar hasta bien entrado el siglo XX.¹⁰

6.1. Edificios industriales en España: tipos, aparición y desarrollo

Los tipos de edificios industriales aparecen, como es lógico, en Inglaterra y ligados a la industria textil. El primero que se desarrolla es la fábrica de pisos, el modelo ideal para esta industria, necesitada de una única fuente de energía (primero una turbina hidráulica y luego una máquina de vapor), que transmite la energía a todas las plantas mediante un eje vertical y del que parten nuevos ejes horizontales hasta los telares. Los primeros edificios son grandes contenedores rectangulares que emplean las técnicas constructivas y los materiales tradicionales: muros exteriores de ladrillo o piedra y estructura interior (soportes, vigas, forjados) de madera, aunque con mayor escala de lo habitual. La fábrica *Silk Mill*, en Derby, construida por los hermanos Lombe en 1718-21, fue una de las primeras, y servirá de modelo al resto. En los últimos años del siglo XVIII y a raíz los fuertes incendios que sufrían estos edificios,¹¹ la estructura de madera empieza a sustituirse por un esqueleto metálico. En 1792-93, William Strutt construye un edificio industrial de 6 plantas en Derby, el primero con columnas de fundición (ver figura 6.1, izquierda). En 1794 emplea un sistema similar en *Belper West Mill*. Y unos años después, en 1796 Charles Bage inicia *Shrewsbury Mill*, con estructura metálica completa: vigas y pilares de hierro fundido, sobre las vigas apoyan arcos de ladrillo de canto atirantados con hierro forjado. En pocos años se construyen numerosas fábricas más en Inglaterra empleando sólo estructura metálica: *Salford Mill* (1799-1801), por

¹⁰ El transporte de las mercancías necesarias (carbón, hierro, algodón) se hacía por mar, lo que favoreció en desarrollo industrial de las regiones costeras frente al interior.

¹¹ «The new timber-built textile mills, filled with combustible fibres, with floors soaked by oil drippings from whirling shafts, with unguarded candles or open oil lamps, and with static electrical sparks generated from belts and machines, were even more vulnerable» (Bannister 1950, 231)

Boulton&Watt; *Leeds Mill* (1802-1803), por Charles Bage y *Belper North Mill* (1803-04) por William Strutt, ver figura 6.1, derecha

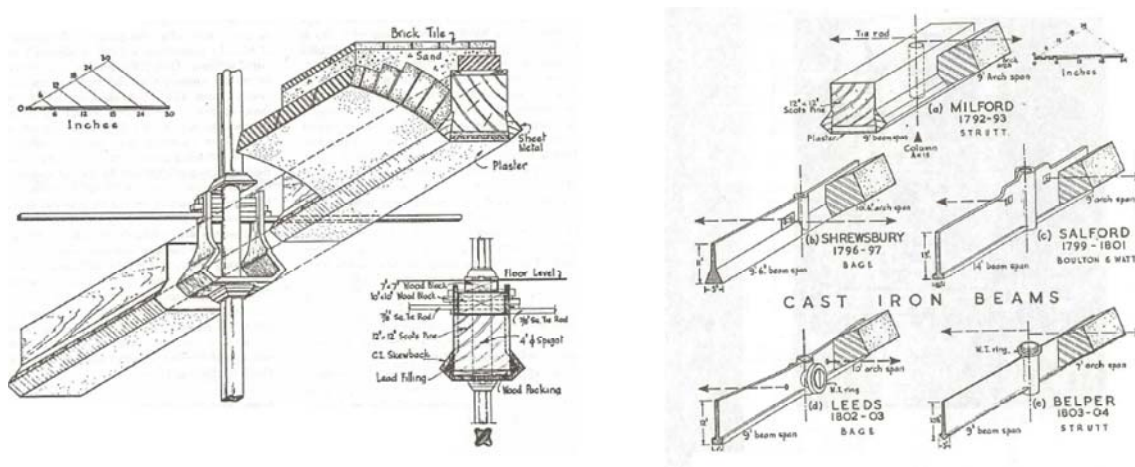


Figura 6.1: Sistemas constructivos empleados en las primeras fábricas inglesas con estructura metálica:

A la izquierda: fábrica Milford, en Derby (1792-93). Las vigas son todavía de madera, protegidas del fuego por un recubrimiento de yeso, pero los pilares ya son de fundición. El forjado es una bóveda de rosca de ladrillo con tirantes de hierro forjado. (Skempton y Johnson 1997, 24)

A la derecha: Vigas empleadas en Milford, de madera, y en otras fábricas, ya de fundición. La forma de las vigas se adapta al material, con mejor resistencia a compresión que a tracción. (Skempton y Johnson 1997, 34)

El modelo inglés de fábrica de pisos, similar al de *Belper North Mill* (ver figura 6.2) será el empleado en las primeras fábricas catalanas, todas ellas textiles.

6.1.1. Las fábricas textiles en Cataluña

En Cataluña, hacia 1820 empiezan a construirse edificios específicos para las nuevas industrias, con necesidades de espacio mayores. El proceso es el mismo que en Inglaterra, pero con unos años de retraso.

Las primeras fábricas textiles en Cataluña tienen vigas de madera apoyados sobre soportes de ese mismo material o paredes de ladrillo.¹²

¹² Como ejemplo de la primera época, tenemos Fábrica Miralda (1818): «Les parets son de paredat ordinari (...) els pilars també són de paredat en totes les plantes; els sostres són de bigues de fusta i revoltó de maó suportats per arcs carpanells a la primera planta i per jàsseres de fusta a la resta» (Gumá 1996, 134)

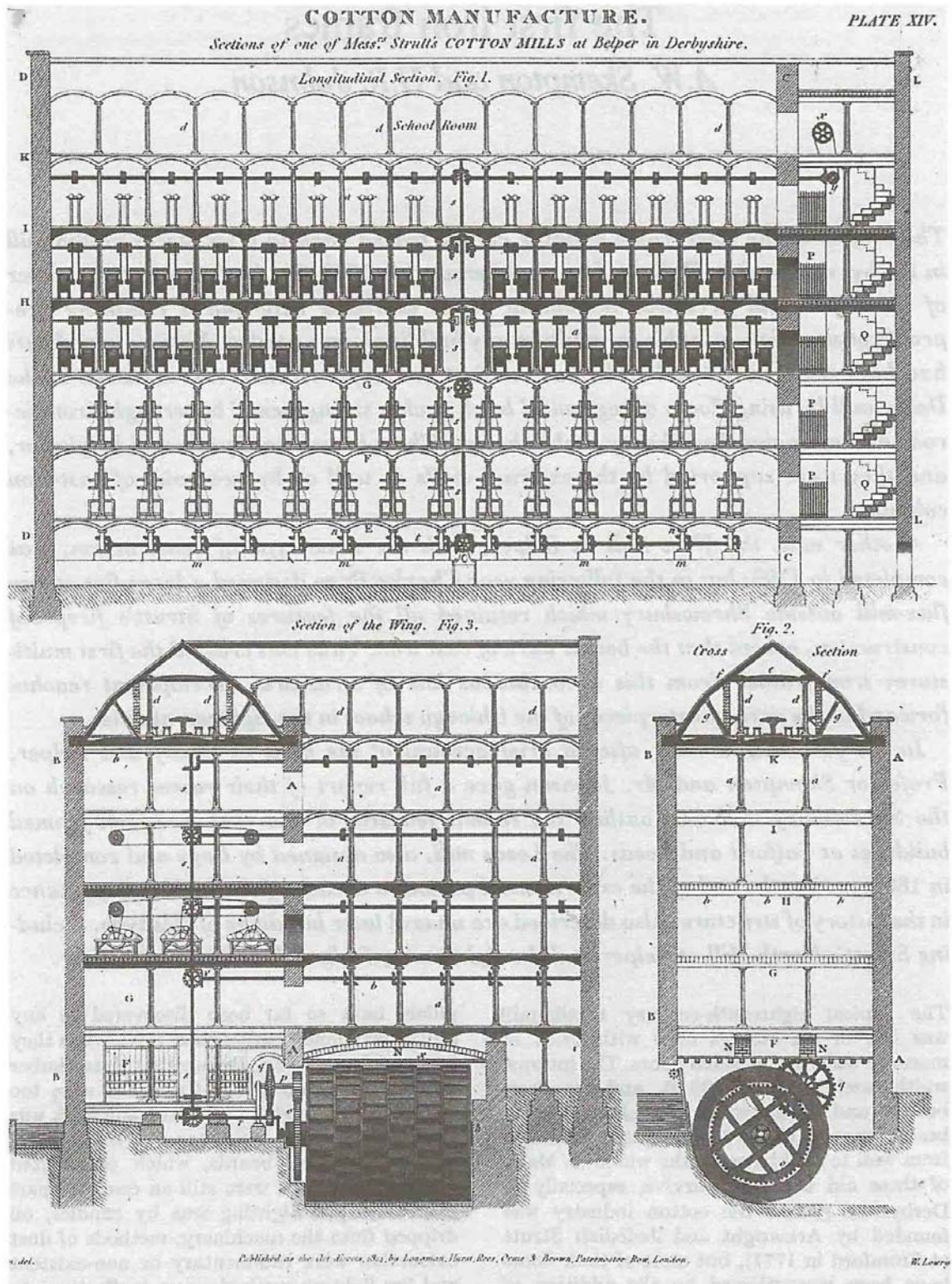


Figura 6.2. Secciones de la fábrica Belper North Hill, obra de William Strutt en 1803-04. Este será el modelo adoptado por las primeras fábricas textiles catalanas. Se ve claramente la gran máquina, en este caso una turbina hidráulica, que transmite la energía a todas las plantas mediante un eje vertical y de ahí a telares o hilaturas mediante ejes horizontales (Skempton y Johnson 1997, 20)

En 1832, como se ha indicado antes, se construye la primera fábrica catalana con columnas de fundición: Bonaplata. Este cambio es importante ya que permite espacios más amplios y diáfanos.¹³ De los modelos ingleses se importan en algunos casos materiales, maquinaria y hasta los planos.¹⁴

Las fábricas textiles catalanas siguen, en general, una malla uniforme: 7 metros entre hileras de columnas y 3,5 metros entre columnas de una misma hilera (Corredor y Montaner 1984, 30). Entre las vigas, los forjados tienen vigas de madera y revoltones o bóvedas de ladrillo atirantadas. Tanto los revoltones entre viguetas como las bóvedas entre vigas se construyen con roscas de ladrillo en los modelos ingleses, pero al llegar a Cataluña se adaptan rápidamente a la construcción local y se ejecutan con el ladrillo de plano, como veremos en el apartado siguiente.

Estas fábricas en altura, o fábricas de pisos, se imponen en Cataluña en el primer periodo de su industrialización, hasta 1870. En la segunda mitad del siglo aparecen nuevos condicionantes que hacen evolucionar el modelo: cada vez es mayor la necesidad de espacio libre, de manera que incluso el avance que suponen las columnas de hierro fundido resulta insuficiente. Se va reduciendo el número de plantas (de los 4 ó 5 iniciales a 2 ó 3 máximo). Así que la última planta se cubre con una cercha y queda sin pilares siendo la más aprovechable. Por otro lado, las fábricas se están trasladando a las afueras de las ciudades, donde pueden ocupar más espacio y además las máquinas de vapor, cada vez más potentes, permiten transmisiones más largas.

Con todos estos cambios y avances, se llega a un nuevo modelo extensivo, de una sola planta: la fabrica-nave. Los materiales y sistemas constructivos de la época permiten unas luces máximas de 12-16 metros, con cerchas primero de madera, luego de hierro

¹³ «Hasta la llegada de las columnas de hierro fundido –aproximadamente en 1832- el tipo no se modernizará, sustituyéndose entonces los muros de carga interiores y los gruesos pilares de ladrillo –que hacían rígido el uso industrial del edificio e impedían la creación de grandes piezas libres- por hileras de esbeltas columnas de hierro fundido» (Corredor y Montaner 1984, 23)

¹⁴ Así ocurrió en la fábrica Arañó del Poble Nou, de 1850. Otros industriales del primer periodo viajan a Inglaterra para instruirse: «Ja a l'any 1830 l'industrial Josep Bonaplata viatja a Anglaterra per a coneixer la indústria, comprar maquinària i aprendre els processos de producció. També hi ha constància de la compra de maquinària i la importació del model anglès d'edifici industrial, per part de l'industrial Joan Güell, fundador del Vapor Vell de Sants» (Gumà 1996, 107)

forjado y finalmente de acero. Así que encontramos fábricas-nave de una sola crujía, con esa amplitud máxima y otras con varias crujías y pilares interiores, pero mucho más separados que en el tipo en altura. Estos edificios siguen un modelo lineal, con luces diferentes para el orden principal (los 12-16 metros ya citados) que para el forjado, que suele construirse con bóvedas tabicadas de unos 3,5 a 4 metros de luz.

Un nuevo avance en la disminución del número de pilares son los edificios no lineales, en los que el sistema constructivo que permite la luz mayor se repite en ambas direcciones. Los pilares se disponen en una malla aproximadamente cuadrada, con mayores separaciones.

6.1.2. Otras zonas de España

Como se explica en la introducción de este capítulo, la industrialización en España fue muy irregular por regiones. En el resto de zonas industrializadas no se aplicarán en general las bóvedas tabicadas a la arquitectura industrial, por distintas razones.

Euskadi y Asturias fue la zona con más industria en el siglo XIX, después de Cataluña, desarrollando sobre todo la siderurgia. La arquitectura de los inicios es poco innovadora, basándose en la de las antiguas ferrerías de las que surge: naves con paredes de mampostería y estructura (cubierta y pies derechos) de madera. El desarrollo de la gran industria siderúrgica es, además, más tardío que la textil. En el País Vasco en concreto no empieza hasta 1880. En este momento ya se ha extendido el edificio tipo nave diáfana, que además resulta especialmente indicado para esta industria, que tiene que mover grandes piezas. De manera que la arquitectura industrial en Vizcaya se va a desarrollar en grandes naves, rectangulares, con cubierta de hierro forjado o de acero. El material era barato porque se fabricaba allí mismo. Algunas empresas metalúrgicas se especializaron en la construcción y montaje de estas naves, pero también era frecuente que cada empresa, sobre todo las grandes se construyeran sus naves con los materiales que producía (Ibáñez 1988, 115). Las bóvedas tabicadas, además de no ser un sistema constructivo tradicional en esa zona, no se utilizaban en luces tan grandes.

Como curiosidad, se reproduce una imagen extraída de la tesis doctoral de Ángel Martín (2003): *Evolución de la tipología estructural en la arquitectura industrial asturiana*. Es

la cubierta de una nave en Gijón, de la empresa Rubiera, construida hacia 1950 con una bóveda tabicada cilíndrica, reforzada con arcos. Este edificio pertenece a otro momento de desarrollo de la bóveda tabicada en España: la posguerra, cuando la escasez de acero y de dinero hizo volver a soluciones constructivas tradicionales, muy económicas.



Figura 6.3. Nave de la empresa Rubiera, en Gijón: bóveda tabicada de cañón reforzada con arcos fajones. Construida hacia 1950. (Martín 2003, 75)

Pero hay otros sitios de España que se industrializaron en el siglo XIX y en los que además se empleaba la bóveda tabicada en la construcción de edificios: Andalucía y especialmente Valencia. Es probable que allí también se utilizara la bóveda tabicada en la arquitectura industrial, pero no hay estudios sobre ello. Un poco más adelante se recoge una «muestra»: las bóvedas tabicadas empleadas en Alcoy (Alicante).

6.2. Aplicación de las bóvedas tabicadas a los edificios industriales

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.¹⁵

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.

Este sistema constructivo con bóvedas tabicadas y atirantadas ya se aplicaba en Cataluña en tipos menores,¹⁶ y a la vez que en la arquitectura industrial, se empieza a utilizar en edificios más representativos, sólo que en ellos se ocultan los tirantes.¹⁷ Finalmente, la libertad compositiva de los edificios industriales acabará por crear un estilo, que se aplicará a otros tipos arquitectónicos, ya en el siglo XX.

6.2.1. Cataluña

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. Esto es común a otras zonas de España, pero Cataluña es, con diferencia, la región más

¹⁵ El problema de aligerar las estructuras de ladrillo de rosca también se plantea en Inglaterra y Francia. La solución inicial fue emplear piezas cerámicas huecas aunque después, al menos en Francia, también se emplean las bóvedas tabicadas.

¹⁶ «un exemple clar d'aquest darrer cas és el de les voltes de maó, que anteriorment eren utilitzades en les plantes baixes o soterrades i que posteriorment el seu ús s'extén a totes les plantes gràcies a la possibilitat de contrarrestar les empentes amb tirants metàl·lics» (Gumà 1996, 140).

¹⁷ Un sistema de construcción similar se emplea en el Hospital de San Pau (Domenech y Montaner), en el Sanatorio del Tibidabo (Rubió y Bellver) y en la Casa Batlló (Gaudí). Pero en estos edificios se ocultan los atirantamientos (Corredor y Montaner 1984, 56).

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.¹⁸

Otra particularidad catalana, ya del final del siglo XIX, es la aparición del Modernismo, ligado además al inicio del 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 *voltes 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, cuya obra se cita más adelante

6.2.1.a. Los primeros ejemplos: adaptación de la fábrica de pisos ingleses

Las primeras fábricas textiles catalanas siguen a rajatabla los modelos ingleses en altura. Pero incluso en estos primeros edificios copiados de Inglaterra se producen dos adaptaciones al modo local:

- Las bóvedas de rosca de ladrillo, empleadas tanto en revoltones entre viguetas de madera como para formar el forjado completo, se sustituyen por bóvedas tabicadas. Al inicio se construyen revoltones entre viguetas de madera, ver figura 6.4.

A les factories angleses les voltes es realitzen amb maó a plec de llibre, amb diferents gruixos segons el lloc ocupat en la secció. A Catalunya no apareix aquest tipus constructiu, sinó que les voltes son totes de maó de pla, generalment de dos fulls i de gruix uniforme (Gumá y Esteve 1996, 109)

Esto es razonable, pues el sistema de forjado de vigueta de madera y revoltón era utilizado en edificios de vivienda colectiva en Barcelona desde finales del siglo XVIII (Rosell 1996).

¹⁸ «[el shed] es más apto para el crecimiento en extensión. Se presta bien a los usos textiles y a acoger talleres metalúrgicos, pero es inadecuado para la siderurgia y la construcción naval por el fraccionamiento de espacio que impone la red de soportes» (Ibáñez 1998, 117)



Figura 6.4: Forjado con vigas y columnas de hierro y forjado de madera, en Ca l'Abadal . Entre las vigas hay revoltones de ladrillo (Gumá 1996, 254)

Pero incluso este sistema de forjado de vigueta de madera y revoltón tabicado se abandona rápidamente para utilizar masivamente el forjado de bóveda tabicada, atirantada entre vigas, con unas luces entre 3,5 y 4 metros, ver figura 6.5.

El tipus de trispol que ha tingut un ús massiu en les indústries tèxtils d'aquest període és el de voltes rebaixades de maó de pla amb tirants. Les trobem ja en les primeres edificacions industrials (Vapor Vell de Sants, de 1846) i s'utilitza fins al final del període i en tot l'àmbit geogràfic estudiat



Figura 6.5: Forjado con vigas y columnas de hierro y forjado de bóvedas atirantadas en la colonia Marsal de Puig Reig (Corredor y Montaner 1984, 99)

Las bóvedas son de perfil circular, muy rebajadas y se construyen con dos, o excepcionalmente 3 gruesos de ladrillo. Por encima llevan tabiquillos y un tablero o pequeñas bóvedas en el otro sentido para llegar al nivel superior sin añadir peso. (Gumá 1996)

Este tipo de forjado se emplea también para cubiertas, sin más que inclinar las vigas metálicas en las que apoyan, como se ve en la figura 6.6, que corresponde a la cubierta del edificio de hilatura de la Colonia Sedó.

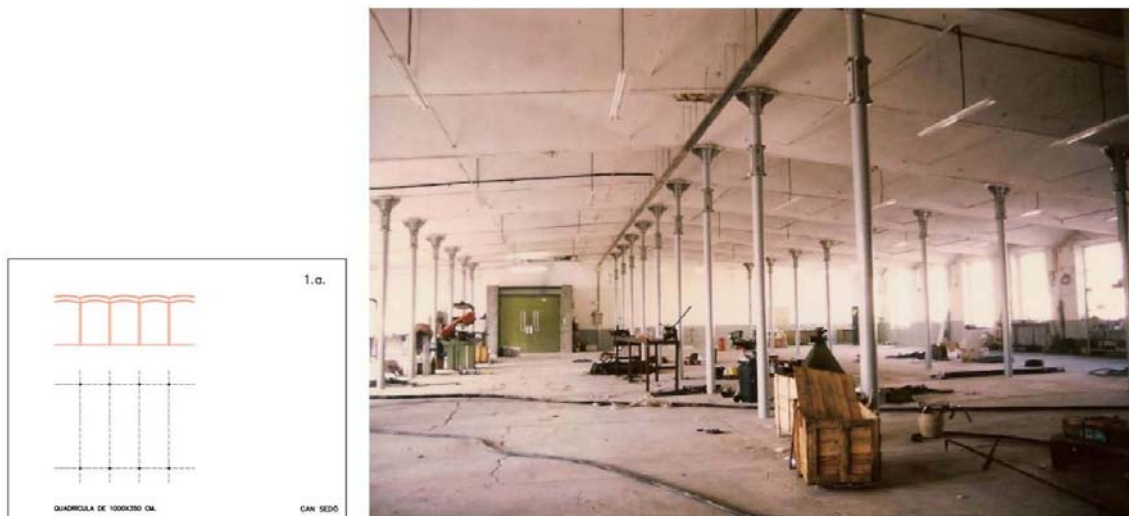


Figura 6.6: Cubierta del edificio de hilatura de la Colonia Sedó, formada por bóvedas tabicadas entre vigas metálicas inclinadas. A la izquierda, esquema de la estructura (Gumá 1996, 210) A la derecha, vista interior (Gumá 1996, 306)

Y, aunque no es lo habitual, en estos primeros edificios encontramos casos en el que arcos y bóvedas tabicados configuran el sistema estructural completo, apoyando directamente en pilares. Así ocurre en la Fábrica La Blanca, ver figura 6.7, construida en Manresa en 1855:

Un cas singular és el de la fàbrica La Blanca de Manresa, de 1855, on l'espai entre pilars de la planta baixa es salva mitjançant arcs de maó de 6,15 m. de llum. Entre els arcs hi recolzen voltes de maó de pla. Tanmateix, aquests arcs no tenen tirants i l'empenta es contrarresta amb el gruix dels murs (101 cm) (Guma 1996, 269)

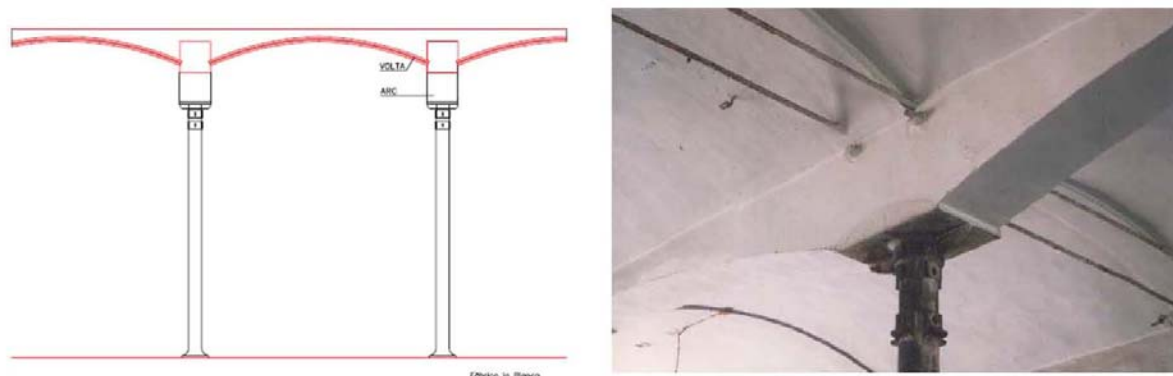


Figura 6.7: Fábrica La Blanca (Manresa 1855). A la izquierda, sección esquemática (Gumá 1996, 277) y a la derecha fotografía (Gumá 1996, 278) del sistema constructivo de los forjados: bóvedas y arcos tabicados, estos sin atirantar, apoyados en columnas de fundición.

6.2.1. b. La creación de un sistema constructivo propio

Las bóvedas tabicadas siguen evolucionando al tiempo que lo hace el tipo de edificio industrial empleado. Cuando aparece la fábrica extensiva y lineal, de una planta, las bóvedas tabicadas se siguen empleando como segundo orden de la estructura, formando forjados, de cubierta, de unos 3,5 metros de luz entre la estructura principal, que son vigas metálicas, normalmente en celosía.

Juan Torras, ya citado en el capítulo 5, fue el impulsor de este tipo estructural, aunque empleando con luces mayores de los 3,5 metros habituales: Las naves de Calderería de su empresa Can Torras (ver figura 5.20, en el capítulo anterior) tienen 5,65 m de luz . Las naves de Herrería son aún mayores: bóvedas cilíndricas de 6 metros de luz y 0,55 m de flecha, apoyadas en cerchas de 19. Las bóvedas tienen 3 hojas (2 rasillas y 1 ladrillo) con un espesor total de 8 cm. Están atirantadas cada 2,10 m con un cable de 22 mm., ver figura 6.8. No está clara la fecha de construcción de estas dos naves: Can Torras se funda en 1877; las naves son descritas por Martorell en 1910, así que ese es el intervalo en el que se construyen.

Pero Juan Torras usa las bóvedas tabicadas como segundo orden de estructura, otras fábricas de este tipo extensivo que emplean bóvedas tabicadas para conformar el sistema estructural completo. El ejemplo más temprano es la fábrica Batlló, construida por Rafael Guastavino en 1868.



Figura 6.8: Cubierta de la nave de herrería de la empresa Torras y Construcciones (Martorell 1910, 128)

La fábrica Batlló de la calle Urgell, construida por Rafael Guastavino a partir de 1868, es un gran complejo industrial que ocupa cuatro manzanas del ensanche, ver figura 6.9. izq. El edificio de hilatura (ver figura 6.9 der.) que se construye sobre rasante, es muy similar a ejemplos anteriores: orden principal de vigas metálicas y bóvedas tabicadas atirantadas entre ellas.

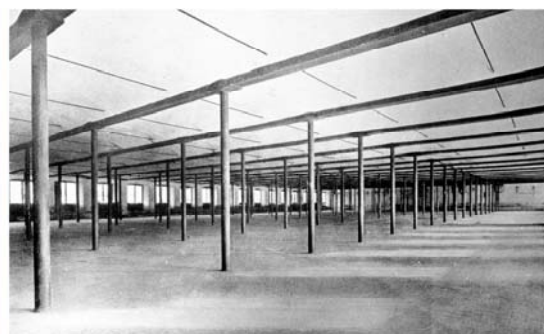


Figura 6.9: A la izquierda, complejo industrial de la Fábrica Batlló, que ocupa cuatro manzanas del Ensanche de Barcelona: en el lado izquierdo del complejo está el edificio de hilatura; bajo el patio central, la sala de telares, iluminada por lucernarios. (Cartel publicitario de la empresa, en ca.wikipedia.org). A la derecha, vista interior de una de las salas de los edificios de hilatura (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

Pero la sala de telares, enterrada bajo el patio central, es una propuesta novedosa: un gran espacio donde el sistema tabicado se emplea para formar la estructura completa. La estructura es una retícula de pilares de fundición, separados 3,7x5,2 m, sobre los que apoyan arcos en dos direcciones y bóvedas tabicadas baídas (ver figura 6.10. izq.) iluminada mediante lucernarios que se abren en la parte superior de las bóvedas. Esta sala también supuso un hito por su gran tamaño: 79x100 m y por la rapidez con la que se ejecutó: el edificio completo llevó solo 2 años (Ochsendorf 2010).

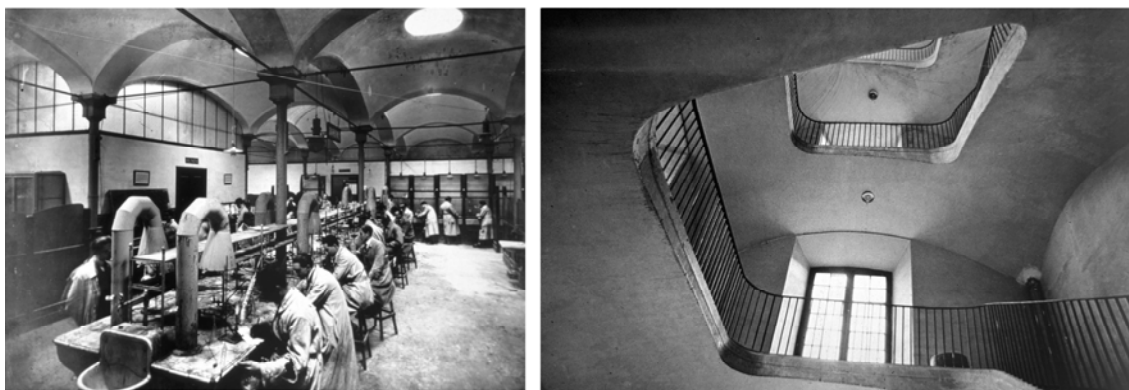


Figura 6.10: A la izquierda, interior de la sala de telares. A la derecha, gran escalera que estudiará Terradas (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

Con este edificio, Guastavino fue un adelantado a su tiempo. Cuando se construye en 1868, las bóvedas tabicadas recibidas con cemento no eran de uso común en Barcelona porque el cemento era caro (Ballesteros 1869) y de composición poco uniforme.¹⁹ Tampoco era frecuente el uso del sistema tabicado para formar el edificio completo: los ejemplos eran más similares a su sala de hilatura, con bóvedas tabicadas como segundo orden de estructura, sobre vigas metálicas. Edificios similares se construirán casi 50 años después, ya en los primeros años del s. XX: el vapor Amat (Tarrasa, 1914), Luis Muncunill o Can Veguería (Cornellá de Llobregat, 1920), de Modesto Feu.

También supuso un hito en la carrera profesional de Guastavino. El mismo, en su libro de 1893, afirma: «The first work of importance of this character constructed in Spain

¹⁹ El propio Guastavino dirá en su libro: «in the embryo state of the manufacture of cements (...) when no manufacturer was able to guarantee his own brand, because of the difficulty in obtaining regularity in it; when each manufacturer had his own formula, a when, in consequence, the market could not be supplied with a sufficient quantity of each brand to make an average tests of strength» (Guastavino 1893, 16)

was in 1868 –the manufactured of Batlló in Les Corts de Serria. It is a series of buildings where there are 2,000 people employed with 1,000 looms and 64,000 spindles» (Guastavino 1893, 42).

El edificio de la fábrica Batlló siempre ha estado relacionado con la construcción tabicada: en 1904 se convierte en la Escuela Industrial de Barcelona, después Escuela del Trabajo. Allí llevarán a cabo numerosos estudios y ensayos Terradas y Bergós (ver capítulos 7 y 8 de esta tesis). En la figura 6.10 der. aparece la gran escalera que estudiará Terradas en 1919.



Figura 6.11: Vista interior de la sala de telares en la Fábrica Batlló en la calle Urgell (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia).

Otro aspecto a destacar de estos primeros edificios industriales es que, debido a su concepción utilitarista, no intentan ocultar las bóvedas tabicadas ni los atirantamientos. La nave de herrería de Can Torras (ver figura 6.8) es un buen ejemplo, en el que incluso las bóvedas tabicadas quedan vistas al exterior configurando el aspecto del edificio. Según indica Corredor y Montaner (1984, 56) el primer edificio industrial en el que se deja el ladrillo visto es en los almacenes del Poble Nou que construye Elías Rogent entre 1874 y 1879, ver figura 6.12.²⁰

²⁰ Elías Rogent Amat (1821-1897) fue un personaje influyente en Barcelona en la segunda mitad del siglo XIX: arquitecto, director de la escuela de arquitectura y de la Exposición Universal de Barcelona de 1888, además de compañero de Joan Torras.

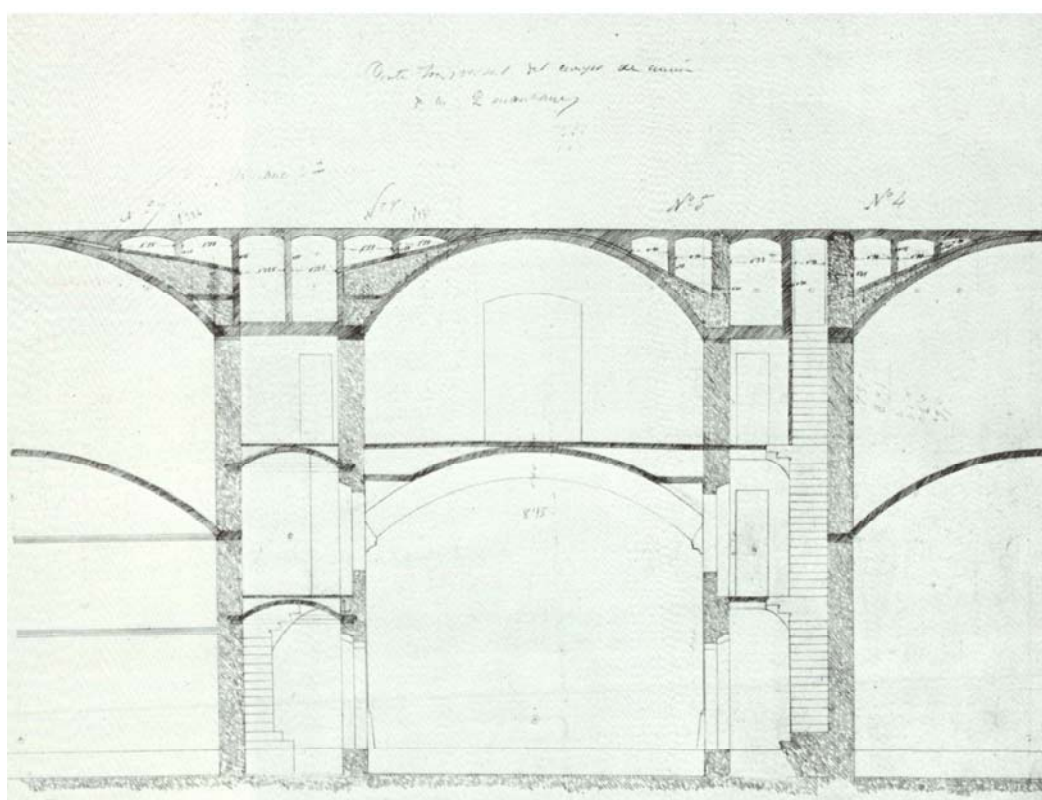


Figura 6.12: Almacenes en Poble Nou proyectados por Elías Rogent. A la izquierda, vista exterior (Hereu Payet 1986, 83). A derecha, sección transversal (Hereu Payet 1986, 87), cortando las bóvedas tabicadas y el sistema de lengüetas y sobre-bóvedas que aligera el sistema constructivo.

6.2.1.c. *Luis Muncunill*

Esta evolución culmina en los últimos años del siglo XIX y se extiende por los primeros del siglo XX: la combinación de la necesidad de espacios cada vez más grandes y libres de pilares en las fábricas con las ideas del movimiento modernista y del incipiente nacionalismo catalán llevan a una eclosión de las bóvedas tabicadas en la arquitectura industrial: se utilizan para solucionar la estructura completa, apoyando en pilares metálicos; las luces que se cubren son cada vez mayores y se explicita el sistema constructivo y estructural, dejando visto el ladrillo y los atirantamientos metálicos. Las formas abovedadas quedan vistas también al exterior, configurando la cubierta e influyendo así en el aspecto general del edificio.

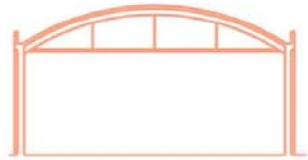
El mejor exponente de este tipo de arquitectura es Luis Muncunill (1868-1931), titulado en Barcelona y arquitecto municipal de Tarrasa desde 1892, donde reside hasta su muerte y lleva a cabo casi toda su obra.

Se detallan a continuación algunos edificios industriales construidos por Luis Muncunill empleando bóvedas tabicadas en distintos tipos estructurales. Las descripciones de los sistemas construidos se han extraído de Martorell (1910), así como algunas fotos. Otras imágenes son de la autora, realizadas en una visita a Tarrasa en enero de 2013.

Vapor Sala (Tarrasa, 1903-04)

Es un edificio lineal, de 170 m, formado por bóvedas cilíndricas, de 12 m y flecha 1/8 de la luz. Los tirantes son viguetas de 10 cm, colocadas cada 3 m y unidos al arco por otras piezas metálicas verticales, de 120x10 mm de sección.

La bóveda es doble, las dos capas formadas por tres gruesos de rasilla y separadas 15 cm. Entre ambas capas hay arcos de ladrillo de 30 cm de ancho que coinciden con las líneas de tirantes y otros tabiques intermedios cada 50 cm. Esta doble bóveda mejora la impermeabilidad y el aislamiento, así como el comportamiento mecánico. (Martorell 1910, 126)



El Vapor Sala. Edifici A



Figura 6.13: Sección (Gumá 1996, 304) y vista interior del Vapor Sala (Martorell 1910, 127)

Vapor Aymerich, Amat y Jover (Tarrasa 1907)

Es un sistema de arcos parabólicos apoyados en columnas de fundición. La luz de los arcos es de 4,10 m. Las bóvedas apoyan en los arcos y tienen generatriz circular, con 8 metros de luz y 1 m de flecha. Son de doble hoja, ambas de 7 cm de espesor (3 gruesos de rasilla). La hoja superior apoya en la inferior mediante tabiques de ladrillo separados 50 cm, de manera que entre ellas queda un espacio libre de 15 cm. Los tirantes son barras circulares de diámetro 30 mm, separados 2 m. (Martorell 1910, 133). Los ladrillos se recibieron con cemento, procedente de Sant Joan de las Abadesas y de Vallirana (Fernandez s.f.), ver desarrollo del cemento en Cataluña en el capítulo 5 de esta tesis.



Figura 6.13: Cubiertas del Vapor Aymerich, Amat y Jover, estado actual (enero 2013)

El edificio actualmente está restaurado y funciona como Museo de la Ciencia y de la Tecnología de Cataluña. Es el mejor exponente, y el más espectacular, de la evolución y búsqueda de un tipo arquitectónico industrial propio de Cataluña, basado en arcos y bóvedas tabicadas.



Figura 6.15: Vapor Aymerich, Amat y Jover. Vista del interior con la fábrica en funcionamiento, a la vista el inmenso espacio formado por una sucesión de bóvedas y lleno de telares (Huerta 2001, 274)



Figura 6.16: Vapor Aymerich, Amat y Jover. A la izquierda, vista general del interior. A la derecha, detalles de la unión ladrillo-tirante y ladrillo-sistema de cuelgue. Ambas imágenes son de estado actual (enero 2013).

Sociedad General de Electricidad (Tarrasa, 1910)

Formada por bóvedas apoyadas en arcos atirantados. Los arcos tienen 12,50 m de luz y flecha 1/8 de la luz, con espesor entre 30 y 60 cm. Las bóvedas tienen 4,25 m de luz y son dobles, la superior de 4 gruesos de rasilla (10 cm) y la inferior, 2 gruesos y 5 cm. Los tirantes de los arcos son angulares de 90x90 mm, y grueso 11 mm; los de las bóvedas son redondos de 20 mm, separados 1,30 m (Martorell 1910, 129).

El edificio es actualmente una cafetería; las bóvedas no están atirantadas; por otra parte, aunque Martorell cita los tirantes en su texto luego no los dibuja (ver figura 6.18 izquierda)

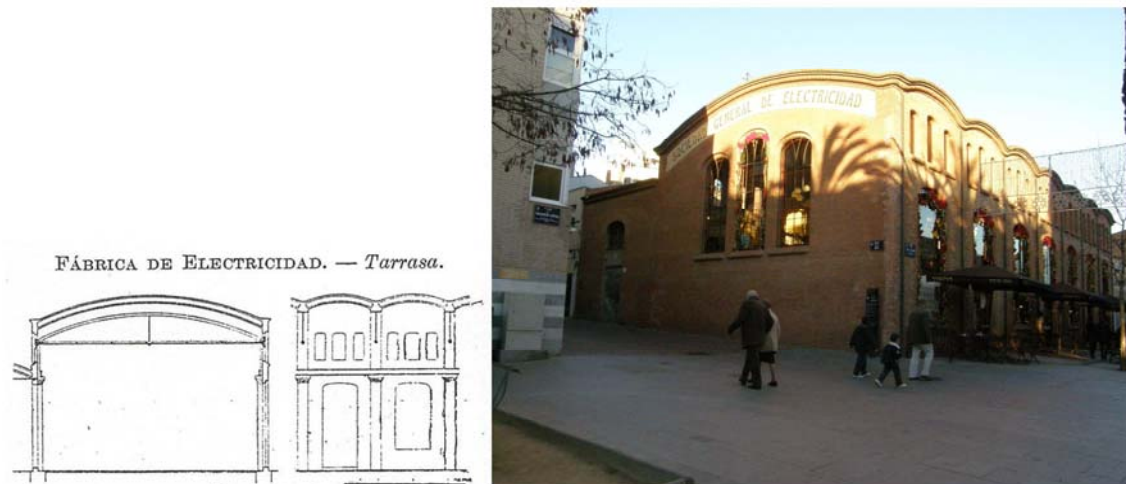


Figura 6.17: A la izquierda, secciones de la Fábrica de Electricidad de Tarrasa (Martorell 1910, 129). A la derecha, vista exterior del estado actual (enero 2013).



Figura 6.18: A la izquierda, interior de la Fábrica de Electricidad de Tarrasa. A la derecha, detalle del arco y de su atirantamiento. Detrás se ve la bóveda, sin atirantar. Imágenes de enero de 2013.

Vapor Amat (Tarrasa 1914-17)

Es un edificio formado por bóvedas baídas, apoyadas sobre pilares de fundición y atirantamientos en ambos sentidos. Tiene lucernarios en la zona superior de las bóvedas (ver figuras 6.16 y 6.17). Actualmente esta restaurado y funciona como centro de exposiciones: la sala Muncunill.



Figura 6.19: Vista exterior del vapor Amat, imagen tomada en enero de 2013.



Figura 6.20: Vapor Amat. A la izquierda, detalle del exterior de las bóvedas. A la derecha, vista interior. Fotografías tomadas en enero de 2013.

6.2.1.d. La fábrica de cementos Asland

Este edificio se construye en la Pobla de Lillet (Barcelona) por iniciativa de Eusebio Güell. Ya se ha citado en el capítulo 5, por ser la primera fábrica de cemento Pórtland a gran escala que se construye en España. Güell envió a un ingeniero industrial catalán,

Isidor Pedraza, a consultar a Guastavino, en Estados Unidos desde 1881. Los planos se realizan en Estados Unidos y vuelven a España firmados por un ingeniero americano, Wallace Ewing, aunque parece claro que fue con la colaboración de Rafael Guastavino, dado el complejo sistema planteado, utilizando masivamente las bóvedas tabicadas (Ochsendorf 2010, 214). Los planos se envían en 1901 y la fábrica se construye entre 1902 y 1904.

Es un edificio singular, con diversas naves enlazadas en sección escalonada, siguiendo la ladera en la que se enclava, para aprovechar la fuerza de la gravedad en el proceso de fabricación del cemento, ver figura 6.21

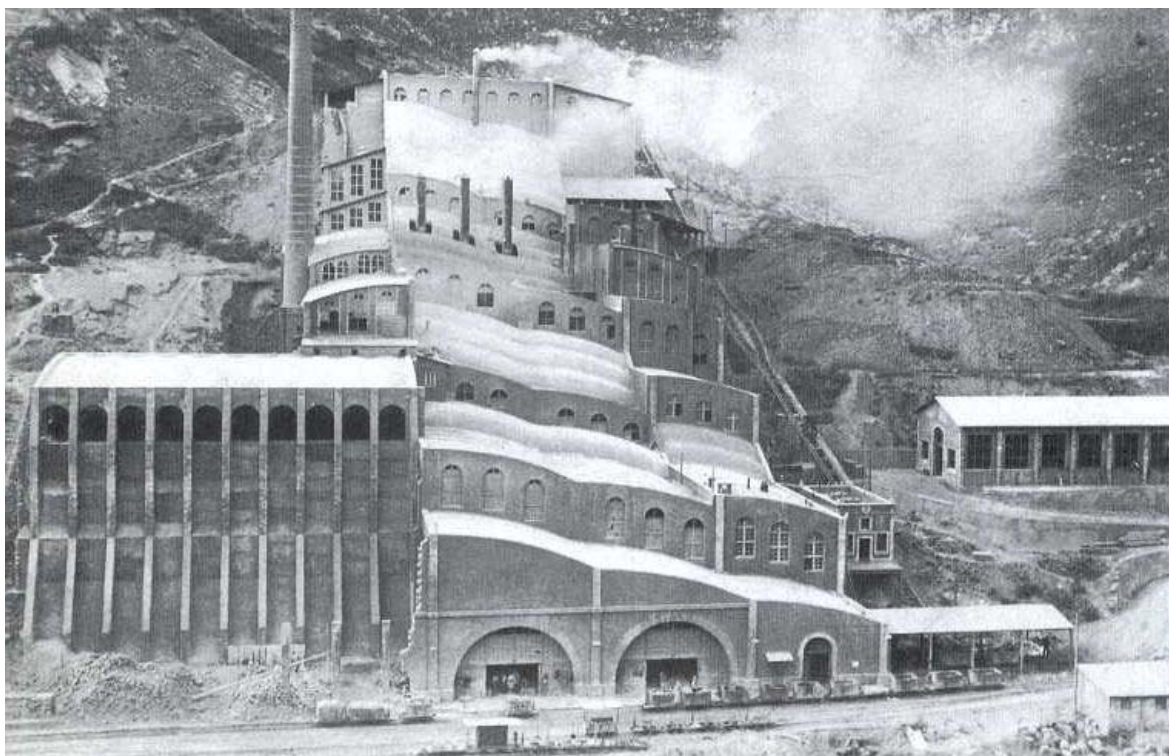


Figura 6.21. Fábrica de Cementos Asland, vista general en 1908. (Fernández 2006, 22).

Las cubiertas tienen un sistema estructural parecido al utilizado en Can Torras (ver figuras 5.20 y 6.8) : cerchas metálicas, que apoyan en los muros laterales o en pilares intermedios, forman el orden principal; encima apoyan bóvedas tabicadas. Las luces no son muy grandes: en el sistema más repetido (aunque hay otros en el inmenso conjunto fabril) las cerchas apoyan en pilares o muros cada 11 m y están separadas 3,25 m: esta es la luz de las bóvedas, atirantadas, ver figura 6.22.

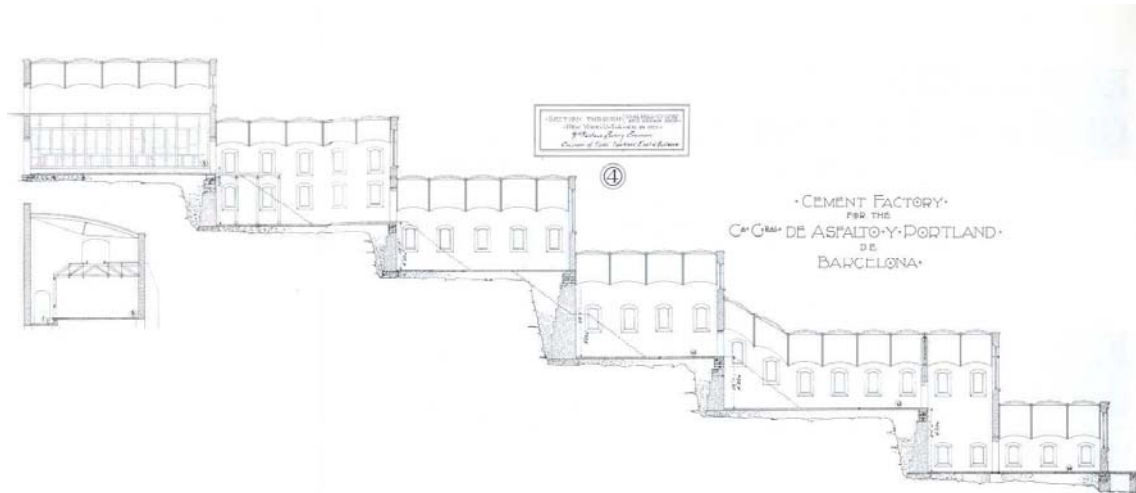


Figura 6.22. Fábrica de cementos Asland, sección original según planos enviados a España en 1901 por el ingeniero Wallace Ewing (Miranda et al., 1986)

El conjunto está en parte restaurado y funciona como Museo del Cemento. La figura 6.23 muestra algunos de los edificios restaurados: el de la izquierda es el museo, en la nave situada en el punto más bajo; a la derecha, un edificio sin uso pero con la cubierta restaurada, incluso las bóvedas parecen rehechas.



6.23. Edificios restaurados dentro del conjunto de la fábrica Asland. A la izquierda, la zona de museo. A la derecha, edificio sin uso. Ambas fotografías se tomaron en enero de 2013.

Pero una buena parte del conjunto está en ruinas, aunque puede visitarse. La figura 6.24 muestra algunos de los edificios en ruinas, repitiendo el sistema estructural.

En la figura 6.25 se ven algunos detalles relativos al sistema constructivo: se puede ver que las bóvedas son de una sola hoja y tres gruesos de ladrillo. Sobre ellas se coloca un relleno macizo, que se hace bastante grueso en los arranques. En ese aspecto, es un

sistema mucho menos depurado que otros anteriores o contemporáneos (bóvedas de doble hoja de Muncunill, contrabóvedas en los almacenes de Elías Rogent).

También puede observarse un forjado de revoltón sobre vigueta metálica, aunque en este caso más separadas de lo que describe Ballesteros (1869): entre cada dos viguetas hay 8 ladrillos.



6.24. Edificios en ruinas o parcialmente restaurados dentro del conjunto de la fábrica Asland. Imágenes de enero de 2013.



6.25. Detalles del sistema constructivo de la fábrica Asland: arriba a la izquierda, sección del centro de una bóveda tipo, con tres gruesos de ladrillo; arriba a la derecha, sección de un arranque, con los mismos tres gruesos y mucho más espesor de relleno; abajo a la izquierda, forjado de vigueta metálica y revoltón tabicado; abajo a la derecha, detalle del encuentro de la estructura metálica con el ladrillo de las bóvedas. Imágenes tomadas en enero de 2013.

6.2.2. *Las fábricas del barranco del Molinar, en Alcoy*

Alcoy desarrolla una importante industria, textil y papelera, en una fecha muy temprana, la segunda mitad del siglo XVIII. La razón es la abundancia de energía hidráulica, ya que Alcoy está situado en el cruce de los barrancos de los ríos Molinar y Barchell. En el río Molinar se situaron las primeras fábricas, muy numerosas ya a finales del s. XVIII.²¹

Dada la situación particular de los edificios, en un barranco, con poco espacio para crecer, y la necesidad de colocarse cerca del río ya que aprovechaban la energía del agua, desarrollan un tipo especial que se describe en Vidal (1988):

Los edificios fabriles, cuya particular situación en la cuenca del Molinar, impuesta por la topografía del terreno, se componen de dos cuerpos con absoluta diferenciación en los tipos estructurales empleados (...) el primer cuerpo es el correspondiente a un semisótano (...) este cuerpo se ejecutaba mediante un sistema de bóvedas de gravedad y pilares de gran rigidez (...) un forjado con las características mecánicas de una planta de accesos, absorbiendo al mismo tiempo los esfuerzos horizontales, debidos al empuje de tierras (Vidal 1988, 67)

Estas bóvedas, construidas en semisótano, son siempre tabicadas. De planta cuadrada, con 20x20 palmos valencianos de luz y apoyados en grandes pilares de 3 o 4 palmos valencianos.²² Esta estructura aboveda desaparece en las plantas sobre rasante en las que, manteniendo la retícula de 20x20 palmos, se convierte en vigas y pilares de madera, ver figura 6.26.

La datación de estas fábricas no está muy clara. Parece que las primeras, las llamadas de primer agua (figuras 6.23 y 6.24) son de los primeros años del s. XIX. Bajando por el cauce del Molinar hacia Alcoy, cada vez son más modernas, siendo las últimas de finales del s. XIX.

Las bóvedas tienen 2 o 3 hojas de ladrillo sobre puestas y encima un pesado relleno hasta alcanzar la cota del forjado. Son más primitivas en su forma de construir que las

²¹ En esa fecha, el agua del río Molinar mueve 12 molinos papeleros, siete harineros y trece batanes (García Perez 1997)

²² El palmo valenciano equivale a 22,5 cm. Así que estas bóvedas miden 4,50 metros en planta y apoyan sobre pilares de 67,5-90 cm.

catalanas, sin bóvedas dobles para mejorar el aislamiento o la impermeabilidad ni lengüetas o sobrebóvedas para disminuir el peso. Es un sistema constructivo similar al empleado en la fábrica Asland, que se describe más arriba.

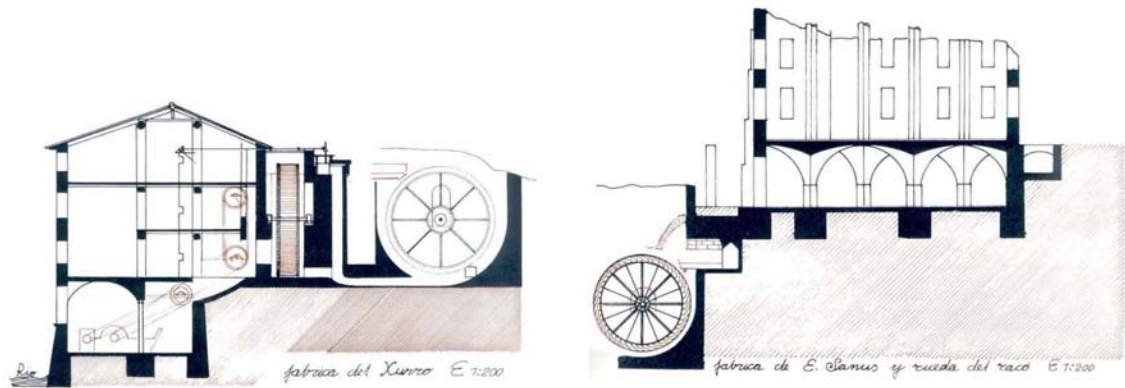


Figura 6.26. Secciones típicas de las fábricas del barranco del Molinar, en Alcoy (Vidal 1988)



Figura 6.27. Vista interior de la fábrica de primer agua de Soler Hermanos, barranco del Molinar, Alcoy. Imagen tomada en abril de 2013.



Figura 6.28. Detalle de una bóveda tabicada en ruinas, de la fábrica de primer agua de Soler Hermanos, barranco del Molinar, Alcoy. Imagen tomada en abril de 2013.

6.2.3. Países del entorno: Francia e Inglaterra. El problema de la incombustibilidad.

Como se ha citado en la introducción al apartado 6.1, en los edificios fabriles de Inglaterra, desde los últimos años del siglo XVIII, las estructuras tradicionales de madera se sustituyen por otras de fundición, hierro forjado y ladrillo para solucionar el problema de los incendios.

En estos edificios, los forjados son bóvedas de ladrillo, rebajadas y atirantadas, similares a las que se usan en Cataluña, pero siempre de rosca. Disminuir el peso de estas bóvedas también fue una preocupación, que solventaron empleando piezas huecas. Estas piezas huecas se emplean por primera vez en Francia en 1785, por el ingeniero y arquitecto Eustashe de Saint-Fart.²³ En 1788 se utilizan por primera vez en Inglaterra, y en pocos años se utilizan en grandes edificios: a partir de 1792, John Soane las emplea en el Banco de Inglaterra, donde la incombustibilidad también era una necesidad debido a la importancia de los archivos en papel, ver figura 6.29.²⁴

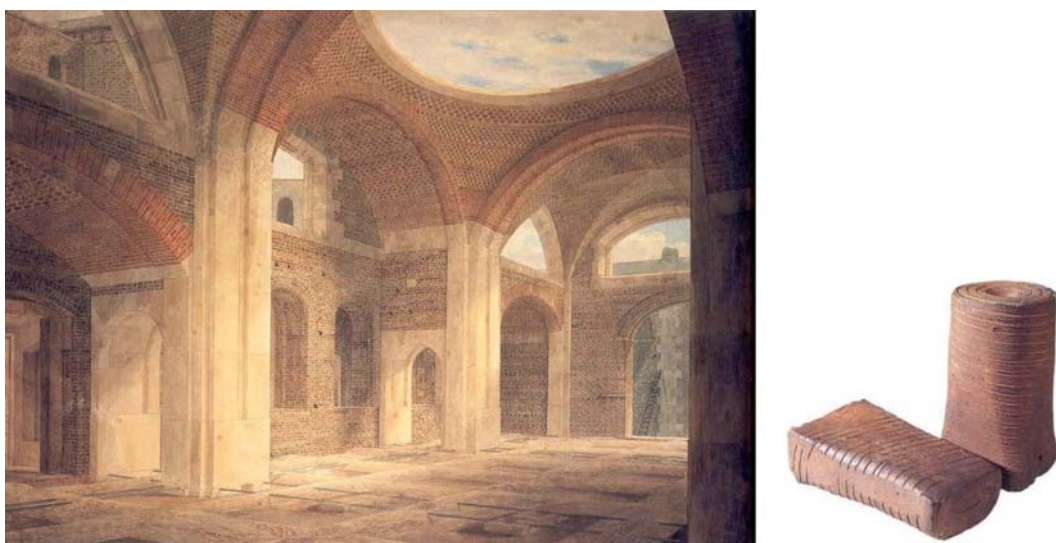


Figura 6.29. A la izquierda, cúpula en construcción de la Oficina de Transferencia de Fondos Consolidados del Banco de Inglaterra, iniciada por John Soane en 1798. A la derecha, piezas cerámicas huecas con las que se construye la cúpula (Richardson y Stevens eds. 2001, 236-237).

²³ «A parallel structural development appeared in Paris in 1785, when M. de St. Fart, an architect specializing in hospitals, revived the late Roman method of constructing light-weight vaults through the use of hollow pots, or what is not called "hollow tile"» (Bannister 1950, 233)

²⁴ «News of these Parisian innovations crossed the Channel immediately. In official circles, Sir John Soane adopted St. Fart's system of pot vaults in rebuilding the Bank Stock Office in 1792-93» (Bannister 1950, 233)

Las piezas huecas cerámicas serán de gran aplicación en la arquitectura industrial inglesa, desde los primeros ejemplos: en la última planta de la fábrica Silk Mill en Derby, construida por William Strutt en 1792, ya se utilizan estas piezas, ver figura 6.30.

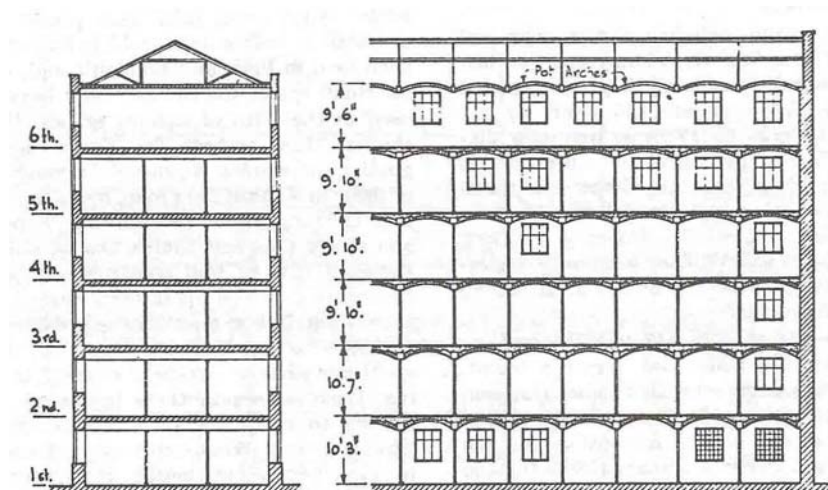


Figura 6.30. Sección de Derby Mill, la fábrica construida por William Strutt en 1792 en la que se utilizan por primera vez columnas de fundición. En la última planta, las bóvedas de ladrillo macizo se sustituyen por piezas cerámicas huecas. Esta estructura más ligera permite colgar las bóvedas de la estructura de madera superior, consiguiendo una planta diáfana, sin pilares intermedios (Skempton y Johnson 1997, 22)

Algo similar ocurre en Belper West Mill, construida por el mismo William Strutt en 1793-95:

West Mill in very similar to the Derby prototype: brick-arch floors, cast iron-pillars (...) protected timber beams 13 in. Square, exposed wrought-iron tie-rods, a pot arch ceiling in the sixth storey and timber roof frames (Skempton y Johnson 1997, 25)

Estas piezas huecas hicieron un papel similar al de las bóvedas tabicadas en la arquitectura industrial catalana: con ellas pueden construirse bóvedas ligeras e incombustibles, solucionando los grandes problemas que plantea la construcción abovedada para edificios industriales.

También se emplearon bóvedas tabicadas en Inglaterra y Francia en la arquitectura industrial durante el siglo XIX. Aunque se sale del tema de la tesis y no se ha estudiado en profundidad, se recogen a continuación algunos ejemplos y datos encontrados.

El sistema tabicado se conocía en ambos países desde la publicación del tratado de Espie. También se había empleado en otros edificios, ya citados en el capítulo 3. Y resolvía los mismos problemas que las piezas huecas: ligereza, incombustibilidad.

Por otro lado, es interesante destacar que se realizan, tanto en Inglaterra como en Francia, ensayos sobre bóvedas tabicadas. Esto ensayos se estudiarán en el capítulo 8, pero se citan ahora: en 1841, Thomas Cubbit, importante constructor inglés, ensaya una bóveda tabicada de 4 hojas de rasilla recibidas con cemento, de 4,8 m. de luz y 0,61 m de flecha, en paralelo a una bóveda de rosca de las mismas dimensiones. El ensayo se publica en la revista de ICE y, aunque no se especifica para que es, si se indica al inicio del artículo que Cubbit había construido bóvedas similares:

In the course of his extensive building engagements, the author had occasion to construct some fire-proof floors; he therefore wished to ascertain how the greatest amount of strength could be attained, with a due regard to the space occupied, and the cost of the structure (Cubitt 1841, 136)

Y en 1865, en Francia, el ingeniero H. Fontaine lleva a cabo una extensa campaña de ensayos sobre bóvedas muy rebajadas de distintos materiales, entre ellas tabicadas. En este caso sí se detalla que el objetivo es construir un edificio industrial:

Les 72,000 metres carrés de planchers que nous construisons sont formés d'une succession de voûtes plates de 4 mètres de portée reposants sur des poutres flexibles. On comprend, d'après cela, l'intérêt considérable qui s'attachait á cet essai (Fontaine 1865, 152)

Que el edificio era industrial se puede deducir del tipo y del tamaño planteado y de las cargas que Fontaine espera que vaya a recibir: 500 kg/m².

También son reveladoras las citas a este sistema en el tratado francés de Claudel y Laroque. En las numerosas ediciones del libro vamos encontrando un desarrollo creciente del apartado dedicado a *Voûtes légères*. En la 2ª edición, de 1859, aparecen por primera vez las piezas cerámicas huecas: *Voûtes légères en briques et en poteries* y se añade un apartado nuevo *Voûtes minces pour planches incombustibles*.

El uso del cemento romano está muy ligado a esta evolución. Además de ser el espíritu de la época, influye el hecho de que Laroque, uno de los dos autores del libro, era fabricante y distribuidor de cemento romano.

L'usage des briques pour la construction des voûtes d'une grande portée et d'une très-faible épaisseur est devenu très-fréquent depuis que l'on possède les mortiers de ciment romain pour en effectuer la liaison. Ces mortiers, par leur propriété hydraulique, leur très-grande dureté et leur cohésion supérieure, ont un avantage très-marqué sur le plâtre (Claudel y Laroque 1859, 446)

También desde la edición de 1859 aparece en el tratado una relación de edificios contruidos por los autores empleando el sistema tabicado «voûtes minces en briques posées à plat sur deux o trois rangs d'épaisseur» (Claudel y Laroque 1859, 449):

- un depósito de agua en Oran (Argelia) de 16 metros de luz, con una flecha de 1,80 m ($L/9$) y tres capas de ladrillo de 3,5 cm de espesor, recibidos con cemento y con una capa de hormigón por encima de 15 cm. Es una bóveda en *arc de cloître*.
- depósitos de agua en Béziers (Hérault), cúpulas de 15,5 y 16 m de diámetro, con flechas de 3,5 y 8 m; contruidas con dos hojas de ladrillo
- la bóveda ojival de la iglesia de Barcelonne (Gers), de 13,5 m de luz; contruida con tres capas de ladrillo
- la propia fabrica de cemento de Vassy, una nave de 49,35 m de largo y 18,6 m de luz. Es una bóveda de cañón, de tres hojas de ladrillo de 2,8 cm de espesor
- los depósitos de agua de Paris, son una serie de bóvedas de arista sobre tramos cuadrados de 4 metros. Tienen 20 cm de flecha ($L/20$), 8 cm de espesor, y están contruidas con dos capas de ladrillo recibidas con cemento.

En la 4ª edición, de 1870, se añaden nuevos depósitos en otros lugares de Francia.

En Inglaterra el sistema tabicado no debió ser de uso muy general. En el mismo tratado de Claudel y Laroque encontramos el siguiente texto, del que parece deducirse que en Inglaterra sólo se utilizaron ladrillos puestos de canto:

Ces dernières années, à l'imitation de ce qui se pratique depuis longtemps en Angleterre, les ingénieurs français ont une tendance à rendre incombustibles les planchers des bâtiments industriels et manufacturiers d'une grande surface, en les composant de voûtes

minces en briques et ciment reposant sur les poutres en fer (...). Ces voûtes doivent être en briques et mortier d'excellente qualité (...). On pose les briques de champ (Claudel y Laroque 1859, 451)

Por otro lado, hay una referencia interesante en Dunn (1908): un edificio construido con bóvedas tabicadas en Inglaterra en 1836:

Thus Mr Charles Fowler, in a paper read before the Institute of British Architect in 1836, describes how he constructed flat terrace roofs on cast-iron girders laid at 3 ft. 8 in. centres, of three courses of tiles (...) at the old Hungerford Wharf and Market. (...) He laid these tiles in neat cement (probably Roman cement) (Dunn 1908, 108)

6.3. Otros tipos arquitectónicos

Los edificios industriales son el principal campo de experimentación para las bóvedas tabicadas durante los años finales del s. XIX, como hemos visto en el apartado anterior. Pero la época industrial supone también la creación de otro tipo arquitectónico: la vivienda masiva, en altura, para los trabajadores de las fábricas. En general se construyen en las ciudades, que en este siglo crecen de población y se amplían, creando ensanches alrededor de sus cascos urbanos históricos. Pero, al menos en Cataluña, se crean también colonias obreras, que agrupan en un solo lugar (normalmente fuera de la ciudad) industria y vivienda obrera.

En ambos casos se utilizaran las bóvedas tabicadas para su construcción, aunque con menor espectacularidad que en los edificios industriales.²⁵

6.3.1. La vivienda urbana en la época industrial

Al igual que ocurre con las industrias, Barcelona es la primera ciudad que sufre un importante incremento de población, ya en la segunda mitad del s. XVIII, que hace necesaria la creación de un nuevo tipo de vivienda, en altura, sustituyendo a las viviendas unifamiliares de una o dos plantas. Se les llama *casas d'escaleta* porque el

²⁵ La bóveda tabicada también se empleará en edificios representativos. Un buen ejemplo es el Hospital de San Pau, en Barcelona; sobre él pueden consultarse varios artículos del profesor González Moreno Navarro (González et al. 2011; Casals et al. 2012).

elemento más característico de ellas era la pequeña escalera, incluida en una caja vertical, que daba acceso a los distintos pisos.²⁶

Según indica Rosell (1996), al hilo de este nuevo tipo arquitectónico aparecen en Barcelona en los últimos años del siglo XVIII los elementos y características de lo que -a lo largo del siglo XIX y especialmente en la época modernista- se llamará construcción a la catalana:

- Uso masivo del ladrillo, que desplaza a la piedra en las fachadas y a la madera en forjados y cubiertas. Se consigue así una construcción más ligera y por ello más económica.²⁷

- Definición de tres elementos nuevos, con nuevas necesidades, en estas casas de vecinos: la escalera, el forjado de revoltón y la cubierta plana (terrado). Todos ellos se construirán con ladrillo.

La escalera se va a construir con bóveda tabicada apoyada en una caja perimetral igualmente de ladrillo (Rosell, 1996). Los forjados, que en este tipo de edificios necesitan mayor aislamiento al separar dos viviendas, sustituyen los entablados de madera por revoltones, que se construirán también con ladrillo tabicado.²⁸ El terrado también se construirá con ladrillos, pero en este caso apoyados sobre un entablado, no formando bóvedas.

Rafael Guastavino, en su obra realizada en Barcelona antes de emigrar a Estados Unidos, construye algunos bloques de viviendas en el Ensanche, además de su propia vivienda, ver figura 6.31. Aunque de ellos sólo se conservan planos de planta (en los que no se detalla el sistema constructivo) y fotos de la fachada, en su libro de 1893 afirma haberlas construido empleando bóvedas tabicadas:

²⁷ «Tècnicament, tant l'escala com el sostre i el terrat, formen part d'una mateixa recerca estructural que busca l'alleugeriment de la massa construïda a base d'augmentar la seva (Rosell 1996, 293) «El sentit d'aquella modernització és fonamentalment funcional i, sobretot, econòmic, basat en l'alleugeriment que permetia construir amb menys temps i menys cost els habitatges per a atendre la conseqüent demanda de caire popular » (Rosell 1996, 294)

²⁸ «Josep Renart no ens parla de la casa d'escaleta, però sí de com el revoltó anava substituït l'empotissat en la unió de les bigues del sostre, cosa que constitueix la veritable garantia de separació real entre les plantes» (Rosell 1996, 164)

Under these impressions and conditions I commenced work in Barcelona, beginning with my own private residence, on the corner of Aragon and Lauria Streets (...). I also made some applications of the system in the private houses of the bankers D. Víctor Blajot and D.A. Anglada, and others (Guastavino 1893, 15-16)



Figura 6.31. A la izquierda, vivienda que Guastavino construyó para si mismo en Barcelona, en 1872. A la derecha, bloque de viviendas en el Ensanche, proyectado por Guastavino para Victor Blajot en 1871 (Archivo Guastavino /Collins. U. Columbia)

Por otro lado, se conservan planos de un edificio de apartamentos construido por Rafael Guastavino en Nueva York en 1883, ver figura 6.32. Dado el poco tiempo que llevaba en el país, parece probable que estos planos reflejaran la manera en que construía en Barcelona: bóvedas tabicadas muy rebajadas formando todos los forjados y las escaleras. Con respecto al sistema constructivo que describe Rosell, el cambio más relevante es que los forjados no tienen vigas de madera cada 50 cm, aproximadamente, y revoltones de ladrillo, sino vigas de acero bastante separadas (unos 2,50 m, midiendo sobre el dibujo de la figura 6.32). Este es el mismo proceso que ocurrió en la arquitectura industrial, ver apartado 6.2. de esta tesis)

Estos elementos nuevos, darán origen a una manera de construir que se llamará en el siglo XIX (y especialmente fuera de Cataluña) a la catalana.²⁹

²⁹ «El nom de construcció catalana és, en part, el producte de la mitificació operada al final del segle XIX, d'una manera de construir que havia reeixit a partir de 1850. Aquesta mitificació, en la qual participaren els mateixos arquitectes modernistes catalanes, tingué la seva base en l'acceptació palesa del sistema a fora de Catalunya » (Rosell 1996, 297)

La construcció catalana, doncs, és un sistema basat en les tècniques del maó que realitza el paleta. Un sistema estructuralment fonamentat en la capacitat de travada d'uns pocs elements que pugen gradualment tots alhora. Aquest sistema no podria existir si no fos per les característiques especials del maó i de la rajola que fem servir a Catalunya.

Ès una manera de construir senzilla, fàcil y ràpida, de gran lleugeresa, cosa que la fa molt funcional des del punt de vista econòmic.

(...) Des del punt de vista tècnic, es tracta d'un sistema que ha anat assimilant, a més del maó, les innovacions fonamentals del segle basades en l'ús del ferro, del ciment, etc. (Rosell 1996, 198)

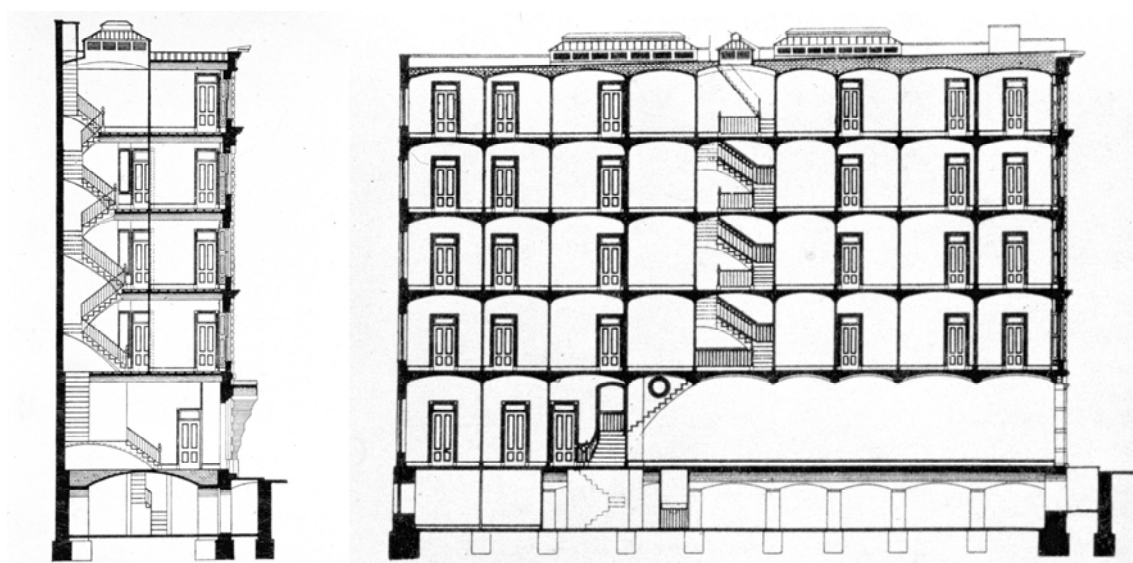


Figura 6.32. Secciones transversal (a la izquierda) y longitudinal (a la derecha) del edificio de apartamentos en Manhattan que Rafael Guastavino proyecta y construye en 1883 (Archivo Guastavino /Collins. U. Columbia)

Madrid es uno de los lugares a los que se exportará, ya en los últimos años del siglo XIX, esta construcción a la catalana. El principal artífice de este cambio fue el arquitecto madrileño Juan Bautista Lázaro, que lo importa de Barcelona, a donde viaja en 1880. Allí entra en contacto con Doménech y Montaner, compañero de estudios, y este le introduce en el modo de construcción habitual en las viviendas del Ensanche: muros y tabique de ladrillo, vigas metálicas y revoltones de ladrillo tabicado. Lázaro observa ventajas (ligereza, incombustibilidad, economía) sobre la construcción de viviendas típica de Madrid (muros entramados de madera y adobe, viguetas de madera y entrevigado de cascotes de yeso y botes cerámicos huecos. y decide importar el sistema constructivo, trayendo incluso obreros catalanes (García Mosteiro 1996; Rosell 1996)

Posteriormente, en los primeros años del siglo XX, el mismo Lázaro utilizará bóvedas tabicadas en algunas iglesias de Madrid.³⁰

6.3.2. *Las colonias obreras en Cataluña*

Las colonias obreras que agrupan las naves de fabricación, las viviendas de los obreros y del propietario y una serie de servicios comunes, existen en Inglaterra desde el s. XVIII. Se sitúan en los cauces fluviales para aprovechar la energía hidráulica y en el medio rural porque en los inicios de la industrialización eran frecuentes los trabajadores que combinaban el campo y la fábrica, incluso que trabajaban en su casa para la fábrica. A lo largo del siglo XIX se siguen construyendo estas colonias, ligadas al movimiento utopista.³¹

En Cataluña el sistema de colonias obreras se desarrolla en la segunda mitad del siglo XIX. Es una «vuelta al campo», después de un periodo de fuerte industrialización urbana. Se volvió a la industria rural buscando una mano de obra menos conflictiva que el proletariado urbano, protagonista de numerosas revueltas desde 1850. Se desarrollan por iniciativa privada, a cargo de los industriales textiles, que forman verdaderas ciudades industriales, dedicadas al trabajo y en la que el empresario asume algunas funciones estatales: policía, educación, obra social, reglamento del trabajo. Es una mezcla de espíritu filantrópico y social, que quiere mejorar las condiciones de vida de los trabajadores, con otro más paternalista y caciquil: el dueño de la fábrica era a la vez una especie de señor feudal que administraba justicia y daba protección civil.

Se colocan en la orilla de los ríos para aprovechar la energía del agua, principalmente el Llobregat, el Cardener y el Ter-Freser. En su desarrollo es importante la implantación del ferrocarril, para transportar la mercancía.

³⁰ Perpetuo Socorro (1892-1897), Reparadoras (1897-1901), San Vicente de Paúl (1900-1904), la desaparecida de las Hijas de la Caridad (1906-1910), Capilla del colegio de las Ursulinas (1889-1898) capilla del asilo de San Diego y San Nicolás (1903-1907) (García Mosteiro 1996)

³¹ Colonia Lanark, fundada en 1800 por Robert Owen, Saltaire, creada en 1851 por Sir Titus Chalk, Charles Fouquet.

Las primeras colonias catalanas se sitúan en el Llobregat, tanto en la zona baja (de Manresa hacia el mar) como más arriba (de Berga a Manresa). Además de la propia fábrica, incluyen zonas de vivienda y espacios comunes. Los edificios de vivienda también se construyen con bóveda tabicada, en forjados, escaleras y otros elementos

6.3.2.a. Colonia Marsal, en Puig Reig, fundada en 1886.

Las viviendas son adosadas en hilera (ver figura 6.33 izq.) Se construyen con bóvedas tabicadas: los forjados entre plantas, atirantadas y la escalera (ver figura 6.33 der.). Los dinteles de las ventanas son arcos tabicados. Las bóvedas de los forjados tienen 7 m de luz y una flecha de 0,50 m; están atirantadas. Cubren una vivienda completa, dividida en tres estancias paralelas (ver figura 6.34). La flecha es muy pequeña; aun así, las bóvedas están en buenas condiciones.



6.33. Colonia Marsal (Puig Reig, Barcelona). A la izquierda, vista exterior de las hileras de viviendas. Los arcos sobre puertas y ventanas son tabicados. A la derecha, detalle de una escalera tabicada. Imágenes tomadas en enero de 2013.



6.34. Colonia Marsal (Puig Reig, Barcelona). Interior de las viviendas, cubiertas por bóveda tabicada atirantada. Imágenes tomadas en enero de 2013.

6.3.2.b. Viladomiu Nou, fundada en 1880

Las viviendas son un bloque en altura, con un corredor exterior desde el que se accede a ellas. Los forjados de ambos elementos (corredor y viviendas) son bóvedas tabicadas y atirantadas. Hay dos dimensiones: 2,40 m de luz y 23 cm de flecha; 3,00 m de luz y 27 cm de flecha. La primera es la básica, que cubre las viviendas; la más ancha aloja las escaleras de acceso entre corredores.



6.35. Colonia Viladomiu Nou (Gironella, Barcelona), vista del exterior. A la derecha, Interior de una de las viviendas, con bóveda tabicada atirantada. Imágenes tomadas en enero de 2013.

PARTE III

LAS BÓVEDAS TABICADAS EN EL S. XIX: ASPECTOS ESTRUCTURALES

CAPÍTULO 7.

EL ENFOQUE CIENTÍFICO DE LAS ESTRUCTURAS: TEORÍA DE LAS BÓVEDAS TABICADAS

Se estudian en este capítulo 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.

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.¹ 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, y 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 aparición, en la segunda mitad del s. XIX, del cemento, y su supuesta resistencia a tracción (ver capítulo 5 de esta tesis) enreda aún más el debate y en los últimos años del siglo XIX y los primeros del XX los autores se dividen entre los que piensan que las

¹ Philippe de La Hire, uno de los fundadores de la teoría científica de las bóvedas afirmaba en 1712: «Los arquitectos emplean algunas reglas para hallar el espesor que se les debe dar [a los estribos de las bóvedas], pero como éstas no están basadas en ninguna demostración geométrica, no se puede decir que estén demostradas» (Huerta 2004, 5)

bóvedas tabicadas no soportan tracciones y se comportan como el resto de estructuras de fábrica y los que piensan que sí las soportan, al menos las que emplean el cemento como aglomerante. Los primeros emplean análisis de equilibrio, bien en un solo plano, mediante líneas de empuje, o empleando la teoría de la membrana en las bóvedas de doble curvatura, principalmente cúpulas. Los segundos las consideran más cercanas a una «lámina metálica» e intentan resolverlas mediante la recién desarrollada teoría elástica. La limitación en el desarrollo matemático y la falta de herramientas informáticas dificulta la aplicación de la teoría elástica, haciéndola prácticamente inaplicable en geometrías complejas, más allá de un arco de perfil circular. Pero como es la novedad, incluso los autores que emplean análisis de equilibrio justifican su elección frente al cálculo elástico por estas dificultades en el desarrollo para formas complejas.

7.1. El cálculo tradicional de estructuras tabicadas

Desde que en el siglo XIV comienzan a emplearse en España hasta bien avanzado el siglo XIX, las bóvedas tabicadas se diseñan empleando reglas de proporción, de la misma forma que el resto de estructuras de fábrica.²

En capítulos anteriores de esta tesis se han citado algunas de estas reglas geométricas. Se estudian aquí las que se refieren de manera específica a las bóvedas tabicadas, que son sólo dos: las propuestas por Fray Lorenzo en 1639, en la primera parte de *Arte y Uso de Arquitectura* y las de Josep Renart en su 4^o *Quincenario*, manuscrito hacia 1810. Las proporciones que dan ambos autores son muy distintas y he buscado también una explicación de esta diferencia.

Las reglas se refieren siempre al espesor que hay que dar a los muros para soportar el empuje de la bóveda, nunca al de la propia bóveda. Esto se debe a que el espesor constructivo de una bóveda tabicada de 2-3 gruesos de ladrillo (8-10 cm), aunque muy delgado, es suficiente para contener una línea de empujes en el tercio superior de la altura, que es el que queda libre. Por debajo, lengüetas y macizados ayudan a la

² Para consultar un completo desarrollo de las reglas de proporción empleadas en estructuras de fábrica, consultar Huerta (2004, 2^a parte)

bóveda que tiene así un espesor superior al de los gruesos de ladrillo. Ningún constructor tradicional lo hubiera explicado así, pero sabían que el espesor de la bóveda no era el problema.

7.1.1. Las reglas de Fray Lorenzo.

En la primera parte de su tratado de Fray Lorenzo, escrito en 1639, encontramos las primeras reglas proporcionales para el cálculo de estribos aplicadas específicamente a bóvedas tabicadas: una proporción entre luz y espesor de muro necesario, diferenciando lo que ocurre si el muro tiene contrafuertes y si no los tiene.

Estas reglas, ya explicadas en el capítulo 2, se citan aquí de nuevo, resumidas en una tabla:

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

Tabla 7.1: Dimensiones que deben tener los estribos para bóvedas tabicadas de diferentes formas, según San Nicolás (1639)

Los valores son válidos para la bóveda de cañón de un templo, en las que lo habitual era el arco de medio punto. Por esta misma razón no introduce ningún valor dependiente de la altura, ya que son válidas para las alturas normales de un templo:

Labrada la imposta, el assiento della ha de ser por lo menos sobre su quadrado, que guardando el arco el medio punto, vendrá a tenerla el hueco proporción sexquialtera (...). Tampoco se ha de asentar más que sobre la proporción sexquialtera, y con la monte del arco, siendo de medio punto, vendrá a tener el hueco la proporción dupla (San Nicolás 1639, 31).

Estas reglas de Fray Lorenzo se repiten en casi todos los tratados españoles del siglo XVIII (Briguz y Brú, García Berruguilla, Plo y Camín, Bails) aunque casi ninguno cita la fuente original (ver capítulos 2 y 3 de esta tesis)

7.1.2. Validez de las reglas de Fray Lorenzo para tabicadas

Podemos plantear un análisis de equilibrio sobre un edificio de las características que describe Fray Lorenzo: bóveda de cañón de medio punto, espesor de muro $1/5$ de la luz libre, relleno hasta $1/3$ de la altura de la bóveda y lengüetas $1/3$ más; espesor de bóveda 10 cm; peso específico de bóveda, relleno y muro 18 kN/m^3 (ver figura 7.1); la altura del muro se ha considerado hasta la clave de la bóveda, como corresponde a una situación en cubierta.³

La línea de empujes está contenida en el muro para las relaciones H/L que propone Fray Lorenzo ($H=L$; $H=1,5\cdot L$) y también mayores. Midiendo la excentricidad de la resultante (x) para cada altura considerada puede obtenerse el coeficiente de seguridad geométrico (c) como $c=d/2\cdot x$, siendo d el espesor del muro. Los valores son muy elevados: $c=5$, para $H=L$ y $c=4,38$ para $H=1,5\cdot L$, las proporciones que indica Fray Lorenzo. Incluso para $H=2\cdot L$, una proporción poco usual, el coeficiente de seguridad es 4,12. Estos valores son algo más grandes que se obtienen en edificios reales, entre 3 y 4.⁴ En la tabla 7.2. Se resumen los coeficientes de seguridad del análisis de equilibrio dibujado en la figura 7.1 (en la columna de la izquierda) junto con algunas variaciones posibles del mismo (en las columnas de la derecha): suponiendo que la bóveda tenga un espesor menor (8 cm en lugar de 10), que el relleno alcance $2/3$ de la altura de la bóveda o que el muro sea de piedra maciza (peso específico 22 kN/m^3). En todos estos supuestos obtenemos coeficientes de seguridad todavía mayores.

³ El peso específico de 18 kN/m^3 es el que se indica en la normativa actual para ladrillo macizo; este dato no puede variar mucho con el tiempo, por eso se ha utilizado tal cual. En cuanto al muro, puede ser de ladrillo o de sillería con un relleno en su interior. En este último caso, quizá el peso sería algo mayor de los 18 kN/m^3 considerados, pero difícil de estimar. El valor empleado va un poco a favor de seguridad.

⁴ Aunque un edificio es teóricamente estable si la línea de empujes está contenida en el espesor del muro, cuando la línea se acerca al borde el estribo puede girar ligeramente abriéndose en la zona superior. Esta apertura de los apoyos produce grietas en la bóveda e incluso su derrumbe, además de incrementar el empuje sobre el muro. Estos coeficientes de seguridad tan elevados mantienen el muro sin desplomes y evitan estos problemas (Huerta 2004, 104-126)

ANÁLISIS REBANADA 1 METRO. BOVEDA CIRCULAR $F=L/2$

ESPESOR BÓVEDA 10cm, ESPESOR MURO $L/5$

MACIZA HASTA $1/3$ DE LA VUELTA

LENGÜETAS HASTA $1/3$ MAS

PESO ESPECÍFICO BÓVEDA Y RELLENO 18 kN/m^3

PESO ESPECÍFICO MURO 18 kN/m^3

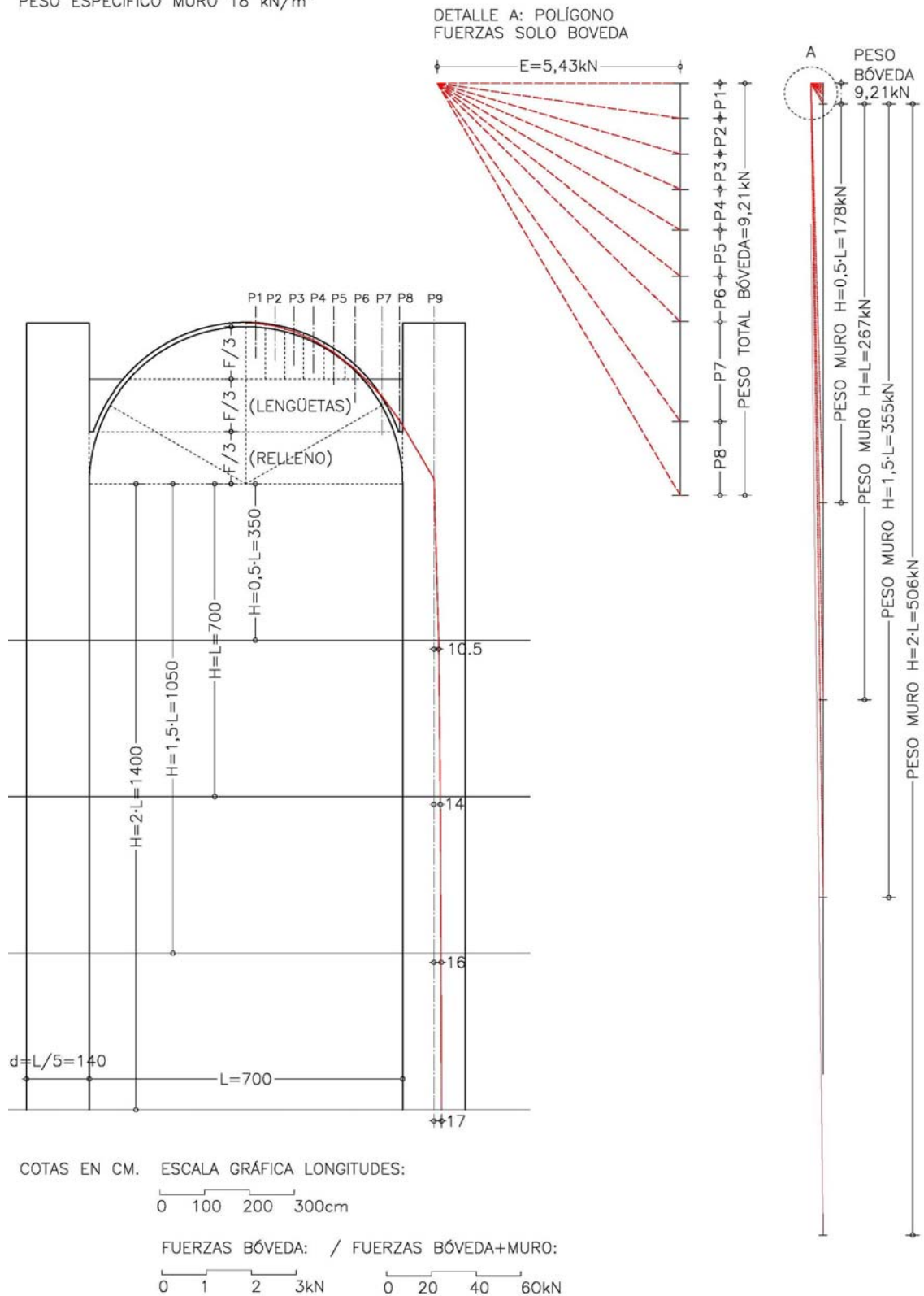


Figura 7.1: Análisis de equilibrio sobre un edificio de las características descritas por Fray Lorenzo.

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

Tabla 7.2: Excentricidad de la resultante y coeficiente de seguridad geométrico para distintas hipótesis de análisis sobre el edificio de la figura 7.1.

Por tanto, las reglas de Fray Lorenzo son válidas para los edificios que el construía, con valores incluso excesivamente seguros. Fray Lorenzo es consciente de que el valor de L/5 es un poco elevado:

Si en el Templo, cuyas bobedas han de ser tabicadas, no pudiere haber estribos tendran de grueso las paredes la quinta parte de su ancho y aun ay lugar en esta parte de ade1gaçar mas (San Nicolás 1639, 31)

La razón de este exceso puede ser la siguiente: una bóveda tabicada pesa muy poco en relación al muro que la sustenta: en el ejemplo de la figura 7.1, el peso de la bóveda supone un 7,5% del peso de los muros, por eso permite muros más delgados que otras. Un pequeño incremento del peso sobre la bóveda por razones imposibles de controlar durante la vida útil de un edificio puede incrementar el empuje y hacer necesario el muro de espesor L/5.

Por otro lado, los valores prescritos por Fray Lorenzo son discutidos por otros autores de su época, ver capítulo 2 de esta misma tesis. El valor de L/9 que defiende Pedro Sánchez para la iglesia de San Martín de Valdeiglesias es claramente inseguro: la línea de empujes no se sale de un muro con este espesor pero el coeficiente de seguridad es muy bajo: 1,47 para $H=L$ y 1,32 para $H=1,5 \cdot L$. Así que tenía razón Pedro Peña al criticar su escaso espesor. Pero el muro de ancho L/6 que finalmente impone el arquitecto real Juan Gómez de Mora sigue dando coeficientes de seguridad válidos: 3,43 para $H=L$ y 3,07 para $H=1,5 \cdot L$. En la tabla 7.3 se resumen estos valores: en la columna izquierda se repiten los valores obtenidos con el análisis de la figura 7.1; en la columna central, los

coeficientes obtenidos con un muro de espesor $L/6$ para distintas proporciones H/L y en la columna derecha para el muro de espesor $L/9$. Estas dos columnas se obtienen de un análisis de equilibrio igual al representado en la figura 7.1.

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

Tabla 7.3: Excentricidad de la resultante y coeficiente de seguridad geométrico para espesores de muro menores que los prescritos por Fray Lorenzo.

7.1.3. Las reglas de los Quincenarios de Josep Renart

Del manuscrito de Renart ya se ha hablado en el capítulo 4. En lo que respecta a los estribos necesarios para sustentar bóvedas tabicadas, se citan unas reglas de proporción del mismo tipo que las de Fray Lorenzo: una relación entre el espesor del muro y la luz de la bóveda. Se reproducen a continuación en una tabla:

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

Tabla 7.4: Dimensiones que deben tener los estribos para bóvedas tabicadas de diferentes formas, según Renart (ca. 1810)

Como se ve, las reglas de Renart son mucho más arriesgadas: frente a $L/5$ que recomendaba Fray Lorenzo para una pared sin contrafuertes, Renart dice que basta con un espesor entre $L/9$ y $L/12$, en función de la forma de la bóveda y de si lleva o no lunetos.

En el capítulo 4 se estudia el 4º *Quincenario* de Renart, en el que aparecen estas reglas de proporción junto a otras, relativas a bóvedas de cantería y de rosca de ladrillo.

Las reglas para bóvedas de cantería son muy similares a las de otros tratados, y en concreto a las de Fray Lorenzo: Renart propone un ancho de estribo entre $L/2$ y $L/4$, en función de la forma del arco (ver figura 4.1). Se refiere siempre en ellas a bóvedas de cañón. Pero más adelante, Renart propone un ancho de estribo mucho menor: $L/7$, indicando que es válido para bóvedas baídas, esquifadas o de arista: «El empuje de las bóvedas baídas o bufadas de rosca de mahones y de sillería será en sus paredes y en sus rincones de las paredes y ángulos pilares, el séptimo de su ancho» (Renart, 4º *Quincenario*, 71).

Renart no especifica la altura de los muros sobre los que construye estas bóvedas ni el uso previsto. Hay algunos ejemplos en el texto en los que sí indica el uso, pero nunca la altura.

7.1.4. Validez de las reglas de Renart para tabicadas.

¿Porqué son tan distintas las proporciones de Renart que las indicadas por Fray Lorenzo? Ambos son constructores experimentados, no teóricos de la arquitectura. Ambos construyen bóvedas tabicadas «tradicionales», de ladrillos recibidos con yeso. No utilizan cemento ni atirantamientos metálicos.

Pero las reglas proporcionales, como las que formulan Fray Lorenzo y Renart, no suelen ser universales, sino válidas para una situación concreta. Las de Fray Lorenzo están pensadas para los edificios que construía, para los que funcionan bien, incluso con un exceso de seguridad, ver apartado 7.1.2.

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

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

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

Además de la doble curvatura, la forma en que Renart construye estas bóvedas refuerza su comportamiento bidireccional:

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

En la figura 7.2. se analiza un edificio de las características que describe Renart. El análisis es el mismo que en la figura 7.1: se dibuja una bóveda de cañón seguido, pero en este caso rebajada, con flecha $L/6$. Los riñones están rellenos hasta $1/3$ de la altura y hay lengüetas en $1/3$ de la altura más. El peso específico del conjunto es 18 kN/m^3 y se ha despreciado el peso de las lengüetas. Los muros laterales reciben el empuje de esta bóveda, que puede analizarse por rebanadas ya que funciona de manera unidireccional. El espesor del muro es $L/9$, que es el indicado por Renart para una bóveda de esta geometría. Las alturas consideradas son menores que en el análisis de la figura 7.1: $H=L$ y $H=0,5\cdot L$, ya que los edificios que construía Renart, principalmente viviendas en Barcelona, no parece razonable que fueran más altos (aunque en los *Quincenarios* no se cita cual es esta proporción)

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

ANÁLISIS REBANADA 1 METRO. BÓVEDA CIRCULAR REBAJADA $F=L/6$

ESPESOR BÓVEDA 10cm, ESPESOR MURO $L/9$

MACIZA HASTA $1/3$ DE LA VUELTA

LENGÜETAS HASTA $1/3$ MAS

PESO ESPECÍFICO BÓVEDA Y RELLENO 18 kN/m^3

PESO ESPECÍFICO MURO 18 kN/m^3

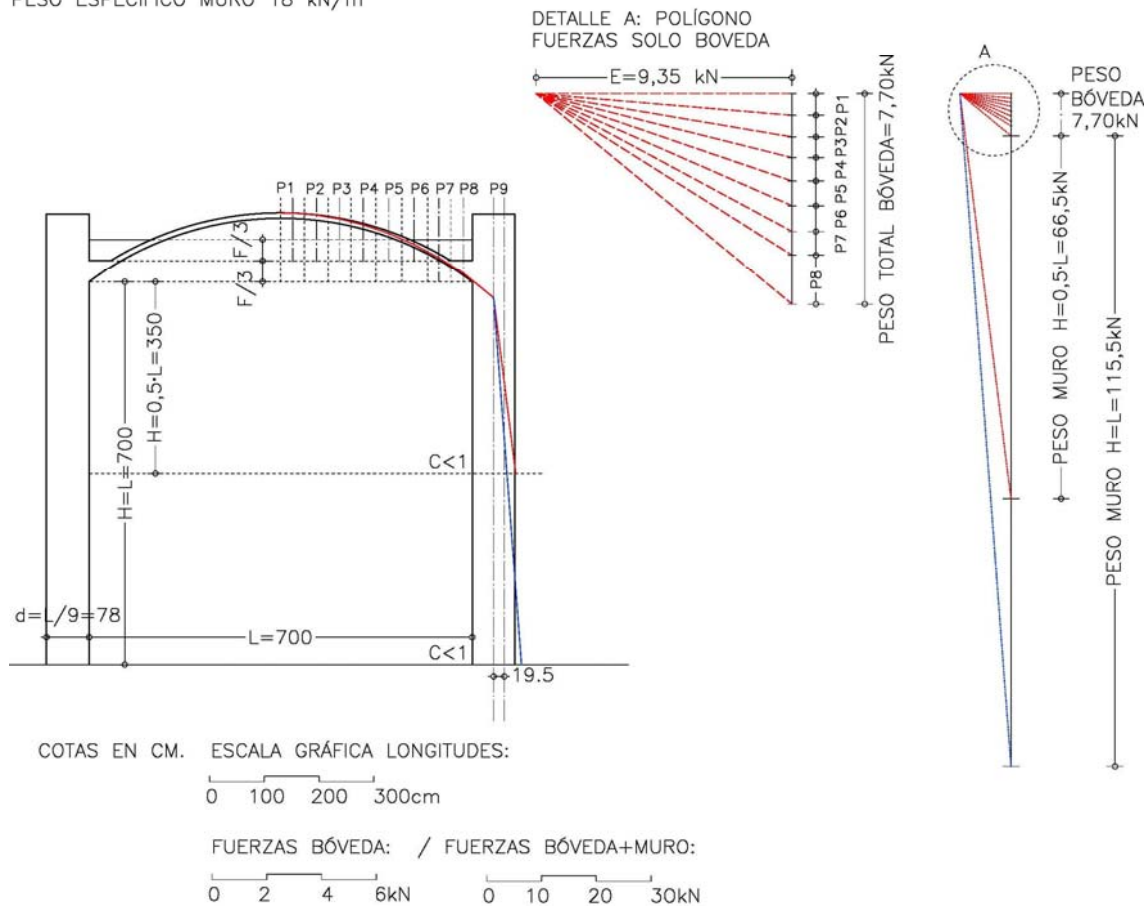


Figura 7.2: Análisis de equilibrio unidireccional sobre un edificio de las características descritas por Renart.

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

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

-Una menor relación H/L en los edificios que construye Renart, principalmente viviendas. Este aspecto ya se ha tenido en cuenta en el análisis de la figura 7.2, realizado para proporciones $H=L$ y $H=0,5\cdot L$. Pero para ninguno de estos valores la bóveda es estable.

- La situación de las bóvedas en un edificio de viviendas, con varios metros de muro por encima. Repitiendo el análisis de la figura 7.2, ya sólo para una proporción $H=0,5\cdot L$, más adecuada para una vivienda, y considerando cierto peso de muro por encima (ver figura 7.3) se obtienen los siguientes datos: para conseguir un coeficiente de seguridad de 2 es necesario colocar 5,70 metros de muro por encima; para conseguir $c=3$ hay que colocar 11,20 m de muro por encima

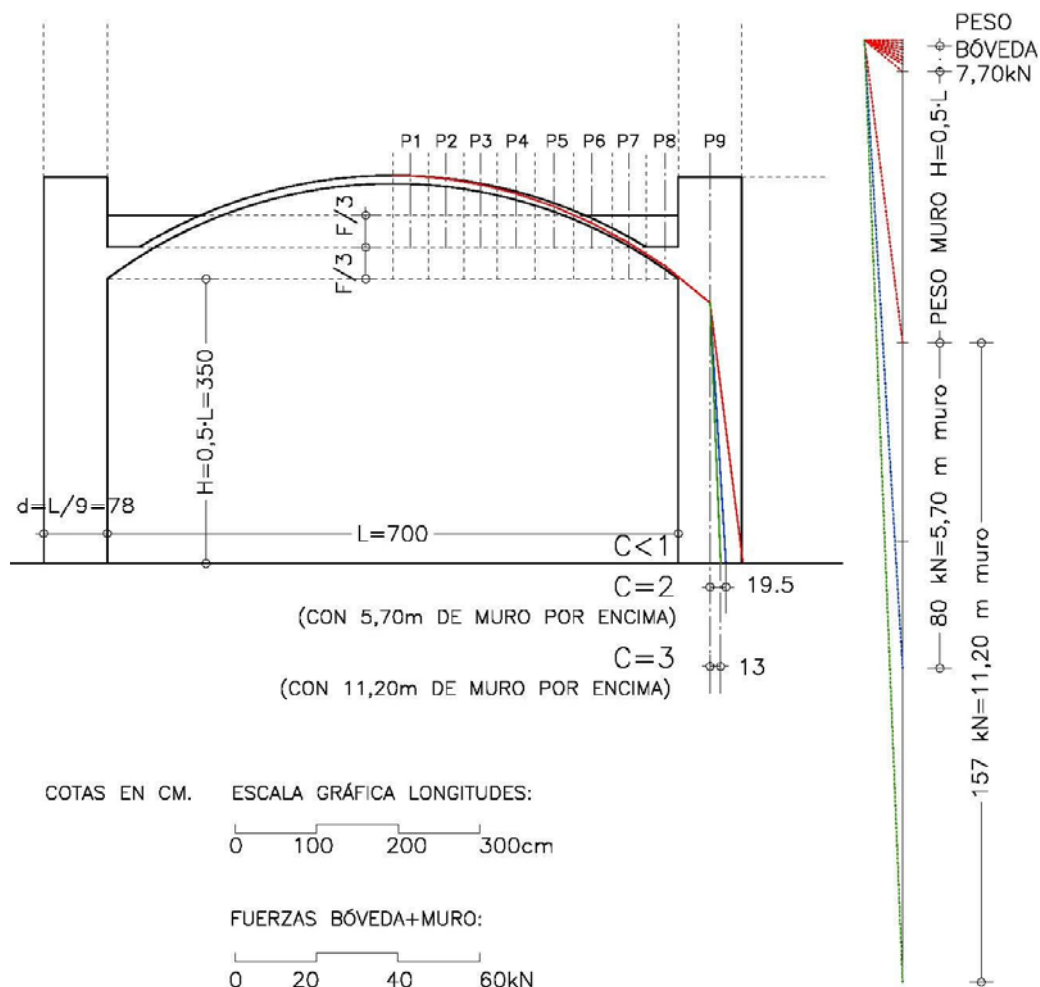


Figura 7.3: El mismo análisis de la figura 7.2 pero añadiendo el peso de cierta altura de muro por encima

Estas alturas de muro no son descabelladas a la vista de algunos ejemplos de los propuestos por Renart en su *Quincenario*: la bóveda del coro de una iglesia; las bóvedas de la planta baja del Cuartel de las Atarazanas de Barcelona. En los últimos años del siglo XVIII y principios del XIX, a la vez que la ciudad aumenta de población, se desarrolla en Barcelona la casa de vecinos o *casa d'escaleta*, de varias plantas. En Rosell

(1996) se describe la forma habitual de construir estas viviendas, con algunos ejemplos contruidos por Renart. Aunque Rosell describe los forjados con vigas de madera y revoltones de ladrillo, es probable que, al menos en plantas bajas y bajo rasante, se sustituyeran por bóvedas tabicadas, para evitar el uso de madera en sitios húmedos.

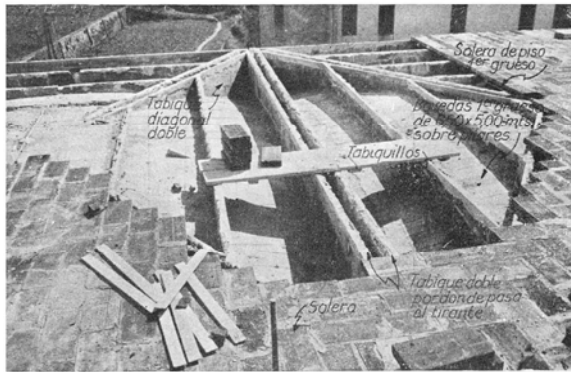
La otra explicación para las propuestas de Renart es el comportamiento espacial de las bóvedas que construye, que son principalmente baídas, en rincón de claustro o de tipo imperial. Para valorar este efecto, se analiza el ejemplo concreto, descrita por Renart varias veces en su *Quincenario*, de la casa de campo de Narciso Plandolit (ver cita más arriba). Es una bóveda de perfil imperial, con dimensiones en planta 50x30 palmos (10x6 m) y 5 palmos (1 m) de monte. No se indica la altura hasta los arranques, se ha supuesto 4 m. Los muros son de 3,5 palmos (70 cm).

Dada la forma de construir las bóvedas que propone Renart, con unas lengüetas muy rígidas en las esquinas (ver cita más arriba), podemos suponer que el grueso del empuje se transmite por ellas, y, dado que el espesor de la lengüeta es grande, que la línea de empujes que se forma es el funicular de las cargas, una parábola para carga repartida. Este es el método de cálculo que propondrá Ignacio Bosch Reitg en 1949 (ver apartado 7.4.1.b de esta tesis) para sus bóvedas de doble curvatura, construidas de manera similar, ver figura 7.4. izq.

A continuación se analiza la bóveda de la casa de Narciso Plandolit siguiendo el método de Bosch Reitg:

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

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



Carga permanente con bóvedas.

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

Figura 7.4: A la izquierda, bóvedas construidas por Ignacio Bosch Reitg en 1949: doble curvatura, tabiques dobles en las esquinas y enrasado con tablero de ladrillo superior. A la derecha, peso propio de esta solución constructiva, que es muy parecida a la empleada por Renart en la casa de Narciso Plandolit.

Como carga superficial se toman los 110 kg/m² que indica Bosch, ver figura 7.4. der. más 200 kg/m² de carga de uso,⁵ en total 3,1 kN/m².

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

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

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

E es el empuje obtenido según la fórmula anterior y H es la altura considerada hasta el arranque de la bóveda, 4,00 m, ver esquema en figura 7.5.

La estabilidad de la bóveda depende de la longitud de los muros laterales que deben movilizarse para que la bóveda caiga. La opción más favorable sería considerar la totalidad del muro, de manera que la mitad de la longitud hacia cada lado desde las esquinas contribuye a resistir el empuje de la bóveda.

En estas condiciones, el momento equilibrante es:

⁵ Este valor es difícil de estimar. Renart indica que la planta de arriba es un almacén para los frutos de la finca. Se toma 200 kg/m² como el valor actual de sobrecarga de uso en vivienda.

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

Para calcular P se ha considerado la mitad del muro hacia cada lado ($A=0,5 \cdot L_A=3,00 \text{ m}$ y $B=0,5 \cdot L_B+e_{\text{muro}}=5,70 \text{ m}$), una altura de $8,12 \text{ m}$ (4 m para la planta baja, 3 m para la superior más la monte de la bóveda) y un peso específico de muro de 18 kN/m^3 . D es la distancia del centro de gravedad de la figura rallada a la esquina A , ver esquema en figura 7.5.

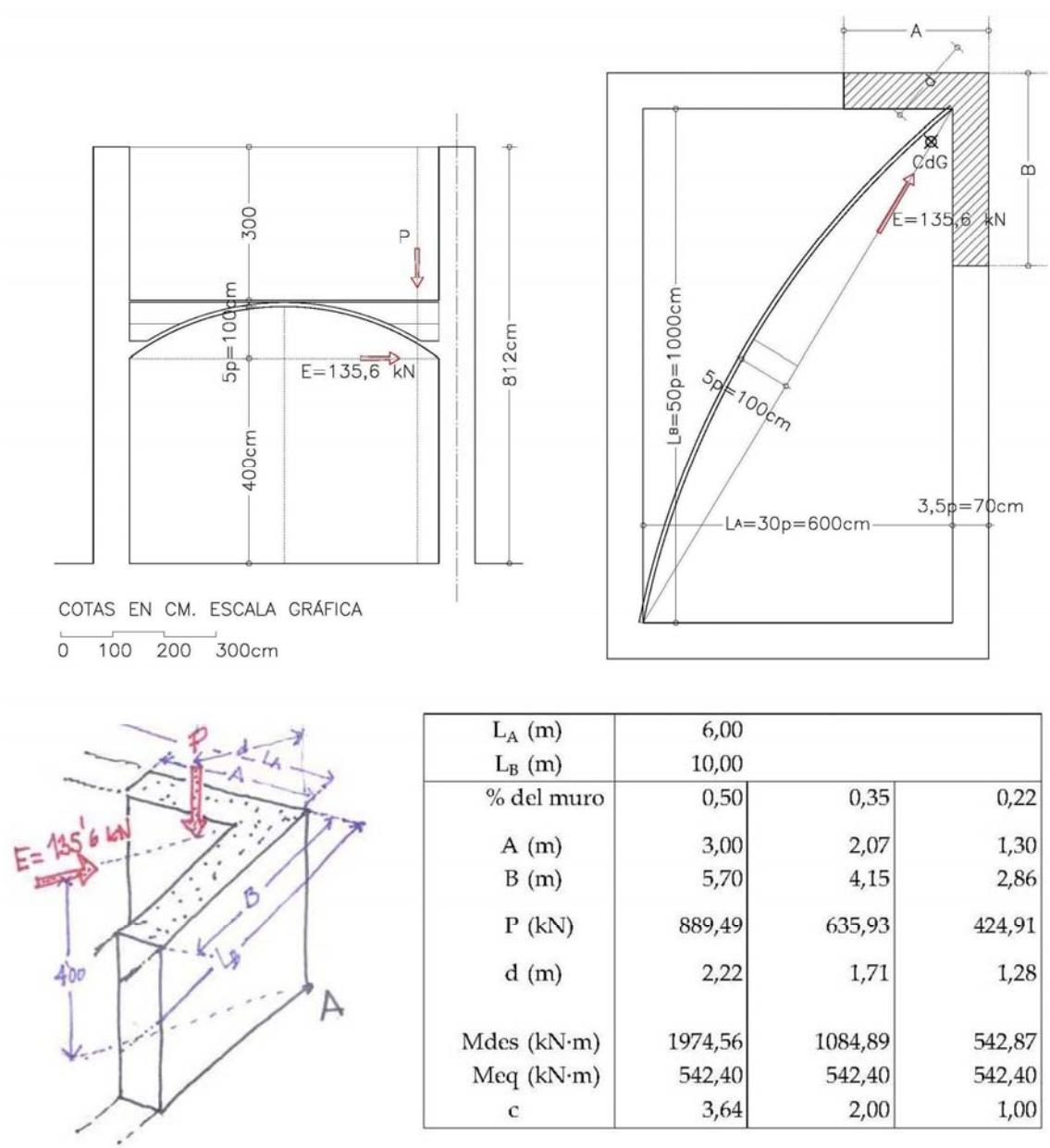


Figura 7.5: Análisis bidireccional de una bóveda en la vivienda de Narciso Plandolit. Arriba, planta y sección. Abajo, esquema de cálculo y tabla de resultados.

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

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

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

Planteando un análisis similar pero con un área menor de muro, obtenemos los siguientes resultados (ver tabla abajo a la derecha, en figura 7.5)

-Para conseguir un coeficiente de seguridad de 2,00 necesitamos la colaboración de un 35% de la longitud del muro hacia cada lado de la esquina

-Para coeficiente 1 (equilibrio estricto) basta con que colabore el 22% del muro hacia cada lado de la esquina.

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

7.2. La teoría monolítica

La teoría monolítica, que defiende la distinta «naturaleza» de las bóvedas tabicadas en comparación con otras estructuras de fábrica, comienza en Francia en 1754, con la publicación del libro del conde d'Espie *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles*, en el que afirma que las bóvedas tabicadas no producen empujes sobre los muros por su comportamiento como un sólido conjunto. Importantes constructores y tratadistas, primero españoles y después franceses defenderán esta idea de Espie, a pesar de su falta de justificación científica. Por último, Rafael Guastavino recoge la teoría monolítica y la convierte en la «construcción cohesiva», con la que defenderá las ventajas de sus bóvedas tabicadas frente a otras cuando emigra a Estados Unidos.

7.2.1. *El Conde d'Espie*

El conde d'Espie fue uno de los responsables de la expansión de la bóveda tabicada en Francia (ver capítulo 3 de esta tesis), dado el éxito de su libro que se cita más arriba. Una buena parte de este libro, bajo el epígrafe *Parallele des Voutes ordinaires avec des Voutes Plates*, lo dedica Espie a exponer las ventajas de las bóvedas tabicadas sobre el resto, defendiendo como la más importante que no empujan sobre los muros en los que descansan:

Les Voûtes 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, pourvû qu'ils soient bons & bâtis solidement cela suffit, car je ne suis pas du sentiment de ceux qui croient que ces Voutes poussent les murs l'experiance que j'ai acquis à ce sujet me démontre le contraire, & les exemples que je vais citer acheveront peut-être de détromper ceux qui fout ptévenus de cette idée. (Espie 1754, 44)

Para «demostrar» su afirmación Espie analiza algunos edificios construidos en Francia con bóvedas tabicadas apoyadas sobre muros esbeltos y relata ensayos y experimentos, llevados a cabo por él o por conocidos suyos. Pero ni unos ni otros ofrecen conclusiones científicas acerca de la falta de empujes de estas bóvedas.

Se resumen a continuación los experimentos que describe Espie para probar que las bóvedas tabicadas tienen propiedades superiores a otras. Todos ellos los realiza él mismo en su casa de Toulouse u otros caballeros «de su confianza»:

- Una bóveda tabicada está apoyada sobre cuatro paredes. Una de las paredes se desplomó mucho de manera que la bóveda queda apoyada en tres paredes sin derrumbarse por ello (Espie 1754, 49). No ofrece ningún dato sobre las dimensiones de la bóveda ni la magnitud del desplome de la pared
- Un conocido del conde d'Espie mando construir en el suelo una bóveda tabicada de una sola hoja de ladrillo, de un *toise* (1,95 m) en cuadro,⁶ y flecha L/6. La bóveda se construye en un marco de madera que luego se retira. Se reproduce a continuación el

⁶ Un *toise*, según el *système du Roi de France* que se emplea en Francia cuando Espie escribe su libro, equivale a 6 pies de 32,48 cm, unos 195 cm.

texto de Espie porque es muy explicativo acerca del grado de «precisión» con el que se describen los experimentos.

Après quoi on la chargea de pierres tant qu'on y en put mettre, cela ni causa pas non plus la moindre alteration: enfin on chercha à la détruire en l'accablant de pierres que plusieurs personnes y jetterent dessus à grand force; ces pierres après plusieurs coups réitérés y firent des trous, mais ne la détruïsirent point entièrement (Espie 1754, 51)

- Otro conocido de Espie mando construir una bóveda tabicada sobre cuatro paredes. Después de seca la mando cortar, dejándola apoyada solo en las cuatro esquinas: «malgré cela on la chargea d'un poids très-considérable sans qu'elle fit le moindre effort» (Espie 1954, 52)

Termina Espie sus explicaciones con el siguiente texto, que relaciona esta falta de empujes en las bóvedas tabicadas con su composición, de ladrillos y yeso fuertemente unidos, lo que las hacen trabajar como una pieza sólida, monolítica:

Mais elle n'a causé par sa chute aucune poussée ni aucun ébranlement dans les murs, preuve certaine qu'elles n'ont point de poussées comme les autres Voutes; car le Plâtre lorsqu'il est bien lié avec le Brique fait de toute la Voute entière un corps massif qui n'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 sortenue (Espie 1754, 56-57)

Así, en el libro de un aficionado a la arquitectura y con una falta absoluta de demostración científica, comienza la idea de que las bóvedas tabicadas no empujan debido a su monolitismo. Como en el caso de los aspectos constructivos, pero con repercusiones prácticas más importantes, estas ideas incorrectas se extienden por los tratados más renombrados, primero en Francia y después en España, dando lugar a una polémica sobre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas que sigue en pie en la actualidad.

7.2.2. *Influencia del conde d'Espie*

Numerosos autores posteriores recogen las afirmaciones de Espie. Los más relevantes, son Blondel y Patté, ya citados en el capítulo 3 de esta tesis, que dedican un capítulo

entero de su *Cours de Architecture* a las bóvedas tabicadas. Al final del capítulo, en el artículo VI: *Reflétions sur les Vôutes Plates*, analizan su comportamiento estructural, que se basa en la idea monolítica anunciada por Espie:

Si l'on pouvoir espérer de lier tous les voussoirs d'une voûte quelconque à l'aide du mortier, de manière à ne former qu'un tout d'une inhérence aussi intime que peuvent l'être, par exemple, toutes les parties du couvercle d'un pot de terre, il n'est pas douteux qu'il n'y auroit alors rien à craindre de la part de la poussée; il suffiroit que les murs fussent en état d'en soutenir les poids (Blondel y Patté 1771-77, 111)

Si Espie fue el primero en describir el comportamiento monolítico de las bóvedas tabicadas, Blondel y Patté fueron los difusores, dada la influencia de su tratado. Su símil de la «couvercle d'un pot de terre» será repetido en prácticamente todos los textos posteriores.

También en Blondel y Patté se enuncia por primera vez la idea de que el posible empuje de estas bóvedas se debe a la expansión del yeso al fraguar, que nuevamente será repetida por muchos autores después:

En vain M. le Comte d'Espie a-t-il prétendu que ces voûtes n'avoient point de poussée; elles en ont toujours pour un tems, sinon de la part des briques, du moins de la part du plâtre (Blondel y Patté 1771-77, vol.6: 115-116)

Y a esta expansión del yeso atribuyen las ruinas en algunos edificios construidos con bóveda tabicada:

Ce furent uniquement les effects du plâtre, contre lesquels on avoit négligé de se précautionner, & c'est à cette cause qu'on doit attribuer le peu de succès de la plupart des ouvrages qui ont été faits en ce genre à Paris" (Blondel y Patté 1771-77, vol.6: 116)

Rondelet, que también cita las bóvedas tabicadas en su conocidísimo *L'art de bâtir*, esta de acuerdo con las ideas de Espie, contribuyendo aún más a su difusión:

Le compte de l'Espie se croit autorisé à soutenir qu'il ne faut pas une très grande épaisseur dans les murs bien construits pour soutenir ces espèces de voûtes, qui n'ont point de poussée, et qui ne forment qu'une seule piece, plus capable d'entretenir les murs, que d'agir pour les renverser (...) et je pense comme cet auteur, qu'une voûte de ce genre bien faite, qui n'a éprouvé ni rupture ni désunion, ne doit avoir aucune poussée (Rondelet 1802, vol.3: 389-390)

Y también con Blondel y Patté en lo que se refiere al yeso, único causante del posible empuje en una bóveda tabicada si no se toman las debidas precauciones:

mais comme il y a une infinité d'accidents étrangers à la construction des voûtes (...) il est prudent de ne pas se fier entièrement à la force du plâtre; quelques chaines de fer convenablement placées, peuvent obvier à tous ces accidents (Rondelet 1802, vol.3: 389-390)

La teoría monolítica, que comienza en Francia, llega a España por dos vías:

- La traducción del libro de Espie que publica Joaquín Sotomayor en 1776. A pesar de la «Censura Previa» del arquitecto Ventura Rodríguez que la precede (ver cita completa en capítulo 3 de esta tesis, aquí se reproduce lo que se refiere de manera concreta al monolitismo), en la que desmiente enérgicamente la falta de empujes de las bóvedas tabicadas:

que la bóveda no cause empuje y se pueda mantener en paredes como las que ordinariamente en los edificios comunes.

Pero esta suposición, o creencia, es lisonjera, no obstante la experiencia 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 (...) y las vemos quebrantadas por muchas partes y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje (Ventura Rodríguez, «Censura Previa» al inicio de Sotomayor, 1776. Sin paginar)

- El tomo IX del tratado *Elementos de Matemáticas* de Benito Bails: *De la Arquitectura Civil* (1796), también citado en el capítulo 3. En lo relativo a tabicadas es prácticamente una traducción de Blondel y Patté (1771-77), reproduciendo sus ideas de la «tapa de puchero»:

Si fuese posible trabar con mezcla las dovelas de una bóveda de modo que formasen un todo de partes tan adherentes unas con otras, que se pareciese a una tapadera o cobertera de puchero, es constante que no tendría ningún empujo, y no necesitarían las paredes en que estribase más grueso que el competente para aguantar el peso de la bóveda. (Bails 1796, 579)

Y de los problemas causados por el yeso:

El empleo del yeso pide mucho pulso en la fábrica de estas bóvedas. Ya dexamos dicho (367) que este material hincha, y por lo mismo es importantísimo precaver su accion en esta fábrica, y su empujo contra los machones; y este es un punto al qual no han aténdido lo que era menester algunos prácticos (Bails 1796, 580)

Otros autores españoles, ya del siglo XIX (citados en el capítulo 4 de esta tesis) son más dubitativos al respecto del empuje, pero todos reproducen aunque sea de pasada las ideas de Espie y las Blondel y Patté:

- Fornés y Gurrea se contradice en su tratado de 1841, afirmando simultáneamente que «el mayor o menor empuje de las bóvedas pende de su mucha estension, ó de ser mas ó menos rebajadas, y de su grueso, y que en las tabicadas este es apenas reparable» (Fornés y Gurrea 1841, 46) y poco después: «su fábrica se reduce á un cuerpo sólido, igual por ejemplo á una cobertera de puchero, sin mas empuje que el de su peso» (Fornés y Gurrea 1841, 47)
- En el tratado de Ger y Lóbez (1898):

La estabilidad de las bóvedas tabicadas depende de la adherencia del mortero con los ladrillos, mediante la cual forman un solo cuerpo, pudiendo considerarse como vaciadas en un molde de mezcla en el cual se hubieran introducido ladrillos para aumentar la resistencia. Por lo tanto, una vez fraguadas, es muy pequeño el empuje que ocasionan y mucho menos si se les ha dado algún peralte (Ger y Lóbez 1898, 261)

En este momento ya se ha extendido el uso del cemento en sustitución del yeso, que se sigue considerando un mal aglomerante por su expansión al fraguar

El yeso, como se sabe, pierde su fuerza y se destruye con la humedad produciendo con su expansión un empuje considerable en las paredes, por lo que son preferibles las mezclas hidráulicas (Ger y Lóbez 1898, 260)

La idea del comportamiento monolítico puede extenderse con facilidad a otros tipos de bóveda y así, en Sugrañes (1916) la encontramos aplicada a bóvedas de hormigón, llevando a afirmaciones tan absurdas como esta:

Las bóvedas de hormigón, empleadas ya por los romanos, propiamente no pueden considerarse como bóvedas, puesto que después de fraguado el mortero que lo forma, obran como masas monolíticas, no existiendo empujes laterales y actuando como peso muerto (Sugrañes 1916, 342)

7.2.3. Rafael Guastavino y la «construcción cohesiva»

Rafael Guastavino, en su libro de 1893, que titula precisamente *Essay on the theory and history of the cohesive construction*, convierte la teoría monolítica de Espie en la «construcción cohesiva», relacionando el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas con la naturaleza:

Here, in that "Monasterio de Piedra", I saw a grotto of immense grandeur, one of the most sublime and extraordinary works of nature. Imagine Trinity Church, Boston, covered by a immense natural vault, supported by walls of the same nature (...)

I had just left Barcelona, after completing some building (...) according to the Cohesive System; but with this great specimen of nature's architecture before me, I recognized how small and insignificant my work had been (Guastavino 1893, 12-13)

Guastavino divide las construcciones en «mecánicas» y «cohesivas». El primer tipo «is founded in the resistance of any solid to the action of gravity when opposed by another solid. From these (...) forces (...) results the equilibrium of the total mass, without taking into consideration the cohesive power of the material set between the solids» (Guastavino 1893, 45). A cambio, la construcción cohesiva «has for a basis the properties of cohesion and assimilation of several materials; which, by a transformation more or less rapid, resemble Nature's work in making conglomerates» (Guastavino 1893, 45).

Explica con varios ejemplos esta diferencia: en la figura 7.6 se reproducen dos construcciones en voladizo: la primera (arriba, Fig. 43) no sería posible: «we can readily see that its construction would be impossible, as the joints have no cohesive strength» (Guastavino 1893, 90). La segunda (abajo, Fig. 44), perteneciente a la construcción cohesiva, sí: «in such a way that the cohesive strength of each particle of the structure will resist the force of gravity acting on that particle. (...) we will have both tension and compression acting to maintain stability» (Guastavino 1893, 90-92)

En otros puntos de su libros asocia la construcción cohesiva a las cúpulas, a la arquitectura oriental, al uso del ladrillo delgado (rasillas), con mayor superficie de contacto en sus caras, y especialmente a los morteros hidráulicos «The time that cements began to be generally used in modern days was from 1845 to 1850, and from

this date commenced the renaissance of the “Cohesive Construction”» (Guastavino 1893, 41)

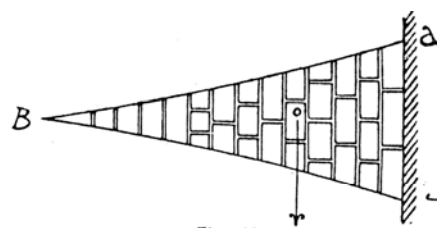


Fig. 43.

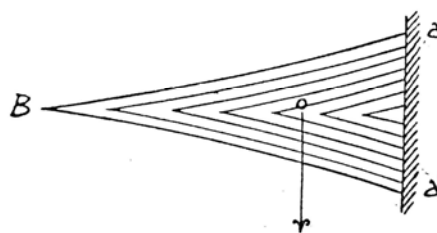


Fig. 44.

Figura 7.6. Arriba (Fig.43) ejemplo de construcción por gravedad. Abajo (Fig. 44) ejemplo de construcción cohesiva (Guastavino 1893, 90)

También relaciona la cohesión con la resistencia a tracción varias veces en sus textos: «The resistance of this tension depends upon the cohesion of the joints or the resistance to tension of the mortar » (Guastavino 1893, 54); «we have for the cohesive construction the following advantages over (...) any arch built by mechanical construction: (...) the resistance to deflection (bending-moment)» (Guastavino 1893, 55).

7.2.4. Validez de la teoría monolítica-cohesiva

Es evidente que el supuesto monolitismo de las bóvedas tabicadas, entendido como una unión más resistente entre ladrillos y aglomerante que en otras bóvedas, no implica en absoluto que no empujen sobre los apoyos. Para corroborar lo absurdo de esta idea basta recordar la cita de Sagrañés (1916) afirmando que las bóvedas romanas de hormigón también son monolíticas y por tanto, no empujan. Podemos imaginar el Panteón de Roma como una construcción monolítica pero nunca como una bóveda sin empujes.

La palabra «cohesión» que usa Guastavino, y que actualmente significa: «cualidad de las cosas cuyas partes están fuertemente unidas física o espiritualmente» (Diccionario

Maria Moliner, 2ª ed.), se emplea en muchos tratados del XIX como «resistencia a tracción», especialmente aplicada al cemento (ver capítulo 5 de esta tesis), material al que Guastavino atribuye muchas de las ventajas de sus bóvedas. Guastavino, con la definición de construcción cohesiva, quiere asignar resistencia a tracción a las bóvedas tabicadas, al menos a las recibidas con cemento. Este tema se discutirá después (ver apartados 7.5 y 7.6), pero aunque fuera cierto que tuvieran una pequeña resistencia a tracción, esto no anula el empuje sobre los apoyos.

Lo que sí es cierto es que las bóvedas tabicadas son muy ligeras y eso permite apoyarlas en muros bastante delgados. En el apartado 7.1 de esta tesis se ve como una bóveda de cañón de medio punto con las proporciones de una iglesia es estable sobre muros de espesor $L/6$; para bóvedas en cielo de coche, baída etc. y aplicadas a viviendas, pueden ser aún más delgados. Esto es la mitad del $L/3$ que recomiendan los autores para bóvedas de cantería y para luces no muy grandes es probable que el espesor necesario para una bóveda tabicada no fuera mayor que el de los muros ordinarios sobre los que no apoyan bóvedas, con un espesor mínimo constructivo.

Respecto a la expansión del yeso al fraguar y a su posible efecto sobre el empuje de las bóvedas:

La expansión de fraguado se debe al proceso de absorción de agua, en el que se produce una cristalización para pasar del yeso en polvo (semihidrato) al yeso fraguado (doble hidrato). Es variable con la composición del polvo del yeso y mayor cuanto más lenta es la velocidad de hidratación; oscila entre 1 y 2 mm por metro para yesos de construcción actuales (Villanueva y García Santos 2001, 56). En la figura 7.7 se indican la expansión y el tiempo en que se produce para distintos tipos de yeso.

Tomando un valor medio (1,5 mm/m), para una bóveda 10 metros de luz y flecha $L/6$, la longitud del arco es 10,72 m y la expansión supone un aumento de longitud de la bóveda de 16 mm para la capa de yeso intermedia y de 1-2 mm para las hojas de ladrillo recibidas con yeso (suponiendo que las juntas ocupan un 10% de la longitud total de la bóveda, más de lo usual); la mitad hacia cada muro o apoyo lateral. Si la bóveda apoya en un muro de 5 m de altura, el desplome debido a la expansión del yeso sería un 0,15%: no parece muy relevante, además de que es raro que no pueda

amortiguarse en la composición heterogénea de un muro de fábrica, lleno de pequeños huecos.

PRODUCTO	AMASADO A/Y	TIEMPO DE EXPANSIÓN	ESTADO DE CONSERVACIÓN	
			Pasta cubierta con agua	Pasta no cubierta
SEMIHIDRATO	0,9 0,45	2 horas	2,75 mm/m 4,2 mm/m	1,25 mm/m 3,23 mm/m
ANHIDRITA II i	0,43	14 meses	8,5 mm/m	
YESO: $\frac{3}{4}$ SH $\frac{1}{4}$ Anlls	0,4	15 días	1,4 mm/m	
YESO: $\frac{3}{4}$ SH $\frac{1}{4}$ Anll i	0,63	5 meses	1,25 mm/m	
	0,4	5 meses	2 mm/m	
	0,4	en 1 año = 80 % del máximo	3,2 mm/m	
YESO: $\frac{1}{2}$ SH $\frac{1}{2}$ Anll i	0,63	5 meses	2,5 mm/m	

Figura 7.7. Valor de la expansión para distintos tipos de yeso. Arriba, las fases (semihidrato, anhidrita) por separado; Abajo, distintas mezclas de fases con valores habituales en construcción actual (Villanueva y García Santos, 55)

Por otro lado, esta expansión puede absorberse con una deformación hacia arriba de la misma a medida que se va construyendo, perfectamente posible debido al pequeño peso de estas estructuras.

Lo que no queda claro es por qué son los autores franceses los primeros en citar este problema. Podría ser que el yeso empleado en Francia fuera muy distinto al de España y expandiera más. Pero no parece probable, ya que la expansión es pequeña en cualquier caso, de manera independiente de su composición (ver figura 7.7). El tema de la expansión del yeso al fraguar es citado por primera vez por Blondel y Patté (1771-1777): las bóvedas tabicadas son un sistema constructivo todavía poco conocido en el norte de Francia; no hay muchos edificios construidos ni se han realizado ensayos científicos así que su afirmación es difícilmente demostrable. Pero su tratado será muy difundido, de manera que sus opiniones son muy influyentes: por eso todos los autores a partir de ellos las reproducen, sin citar en ningún caso ningún dato técnico que apoye la teoría.

Dado que en esta respuesta la práctica es importante, se ha consultado con Carlos Martín, propietario de una empresa de restauración especializada en yesos y bóvedas tabicadas: su opinión, respaldada por un buen número de bóvedas ejecutadas o restauradas, es que la posible expansión del yeso no tiene ninguna influencia sobre el comportamiento de las bóvedas.⁷

7.3. Análisis de equilibrio de arcos tabicados: líneas de empuje.

Los análisis de bóvedas empleando líneas de empuje que se han desarrollado en el apartado 7.1 son una interpretación actual, una manera de comprobar los tamaños y formas construidos siguiendo reglas de proporción. En realidad, hasta el siglo XVII no se intuye el funcionamiento de un arco y hasta bien entrado el siglo XIX no se define el concepto de línea de empuje. Se estudia aquí la aplicación de la teoría de arcos a las bóvedas tabicadas, precedido por un breve resumen de su desarrollo general.

7.3.1. El desarrollo de la teoría científica de estructuras

Las primeras aproximaciones al comportamiento de un arco se producen en el siglo XVII, a cargo de Robert Hooke y Gregory.⁸

Durante el siglo XVIII, numerosos autores ingleses y franceses avanzan en el conocimiento del funcionamiento mecánico del arco.⁹

⁷ Comunicación personal. Carlos Martín es el propietario de la empresa CREA RESTAURACIÓN. Ha realizado numerosas obras de restauración, así como de obra nueva, empleando bóvedas tabicadas en iglesias como San Felipe de Novelda (Alicante), Loeches (Madrid), San Juan de la Penitencia (Alcalá de Henares) entre otras. Además, ha participado y publicado comunicaciones en varios congresos relacionados con la historia de la construcción (Martín Jimenez 2009, Martín Jiménez y García Muñoz 2012). Su opinión es muy relevante por aglutinar aspectos teóricos y prácticos de la construcción tabicada.

⁸ Hacia 1670, Hooke afirma: «Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido, se sostendrá el arco rígido». Este enunciado se publica en forma de anagrama, y no se descifrá hasta 1705. En 1698 Gregory llega a una conclusión parecida: «Sólo la catenaria es la verdadera y legítima forma de un arco. Y si arcos de otras formas se sostienen es porque hay una catenaria en su espesor» (Huerta 2004)

Pueden destacarse las siguientes memorias: La Hire (1712): «Sur la construction des voûtes dans les édifices» en la que imagina un mecanismo de rotura del arco, basado en el deslizamiento de una cuña superior sobre la inferior; Couplet (1730): «Sur le pousseé des voûtes». En ella plantea la rotura sin posibilidad de deslizamiento, producida por la formación de un número suficiente de articulaciones. Danyzy (1732), Gauthey (1771) y Boistard (1810) confirman mediante ensayos que la rotura se produce por rotación, no por deslizamiento. En 1773 Coulomb presenta una memoria en la que resuelve por completo el problema de la estabilidad de una bóveda, obteniendo la posición de la junta de rotura empleando el método de máximos y mínimos.

En todo este desarrollo teórico, que se produce fundamentalmente en Francia, se había olvidado la teoría de la catenaria invertida enunciada por Hooke y Gregory en los últimos años del siglo XVIII. Pero entre 1830 y 1840 aparece, de manera simultánea en Francia (Méry), en Inglaterra (Moseley) y en Alemania (Gerstner), el concepto de línea de empujes, que unifica las teorías de Hooke y de Coulomb.¹⁰ En todas ellas está definida claramente la línea de empujes de un arco de dovelas como el lugar geométrico definido por los puntos de paso de la resultante de fuerzas por cada uno de los planos de corte entre dovelas.

Méry establece las líneas de empuje máximo y mínimo: la más peraltada y la más rebajada dentro del tercio central del arco,¹¹ acotando así el valor del empuje entre dos valores, y define la seguridad referida a un arco de mínimo espesor, asegurándose que las tensiones en el interior del arco no superen un décimo de la tensión de rotura del

⁹ Un desarrollo completo de la teoría científica de arcos y bóvedas se puede leer en Huerta (2004, apéndice A) y (2008)

¹⁰ En Alemania: Gerstner (1831–34): *Handbuch der Mechanik*.; en Francia: Méry 1840. «Mémoire sur l'équilibre des voûtes en berceau»; en Inglaterra: Moseley 1835 «On the equilibrium of the arch»

¹¹ Respetando la ley de tensiones y deformaciones de Navier, recién expuesta cuando Méry escribe su memoria, si la línea de empujes está contenida en el tercio central del arco, no aparecen tracciones dentro del material. En realidad, nunca aparecen tracciones en los arcos de fábrica: si la línea de empujes se acerca al borde más allá del tercio central, el arco se agrieta en lugar de asumir tracciones, ver Heyman (1982).

material. Moseley aplica el principio de mínima resistencia y afirma que la línea de empujes es la que produce un valor mínimo de éste, es decir, la más peraltada.

Expuesta la teoría, sólo quedaba buscar una manera sencilla de aplicarla. Para ello se desarrollaron métodos gráficos, el primero a cargo del propio Méry y los siguientes por Barlow (1846), Snell (1846) y Scheffler (1857). Pero el avance definitivo se produjo con la aplicación del polígono de fuerzas y el polígono funicular al dibujo de líneas de empuje. El primero en enunciar estas aplicaciones fue Rankine, en 1858, pero su planteamiento, muy teórico, hizo que su aportación pasara desapercibida. En 1866 Culmann publica su libro *Die graphische Statik*, popularizando con él los métodos gráficos para la obtención de líneas de empujes, que aplicarán de manera sistemática todos los ingenieros desde 1870.

7.3.2. Aplicación de las teorías de Méry y Moseley

La primera aplicación de las líneas de empujes a las bóvedas tabicadas la encontramos en el artículo «Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques», publicado en 1865, en *Nouvelles Annales de la Construction* por el ingeniero Fontaine. En el artículo se describe una serie de ensayos sobre bóvedas tabicadas que se estudian en profundidad en el capítulo 8 de esta tesis.

Pero además de los ensayos, al inicio del artículo, Fontaine escribe una breve descripción de estado de la teoría de bóvedas en el momento en que los realiza, citando principalmente la idea de la línea de empujes que Moseley y Méry han enunciado 20 años atrás y el principio de mínima resistencia de Scheffler.¹²

Y para terminar, bajo el epígrafe *Courbes de pression*, Fontaine obtiene los empujes que una carga de 1000 kg/m² causa sobre los apoyos, ver figura 7.8.

¹² Scheffler aplica el principio de mínima resistencia de Moseley a la posición de la línea de empujes (Huerta 2004, 72). Entonces la línea de empujes pasa por el extradós en la clave y por el intradós en los apoyos resultando así el empuje mínimo. Lo que Fontaine llama teoría de Méry consiste en hacer pasar la línea de empujes por el tercio central del arco. Así, y siguiendo la ley de Navier, que él llama ley del trapecio, no aparecen tracciones en ningún punto de la bóveda.

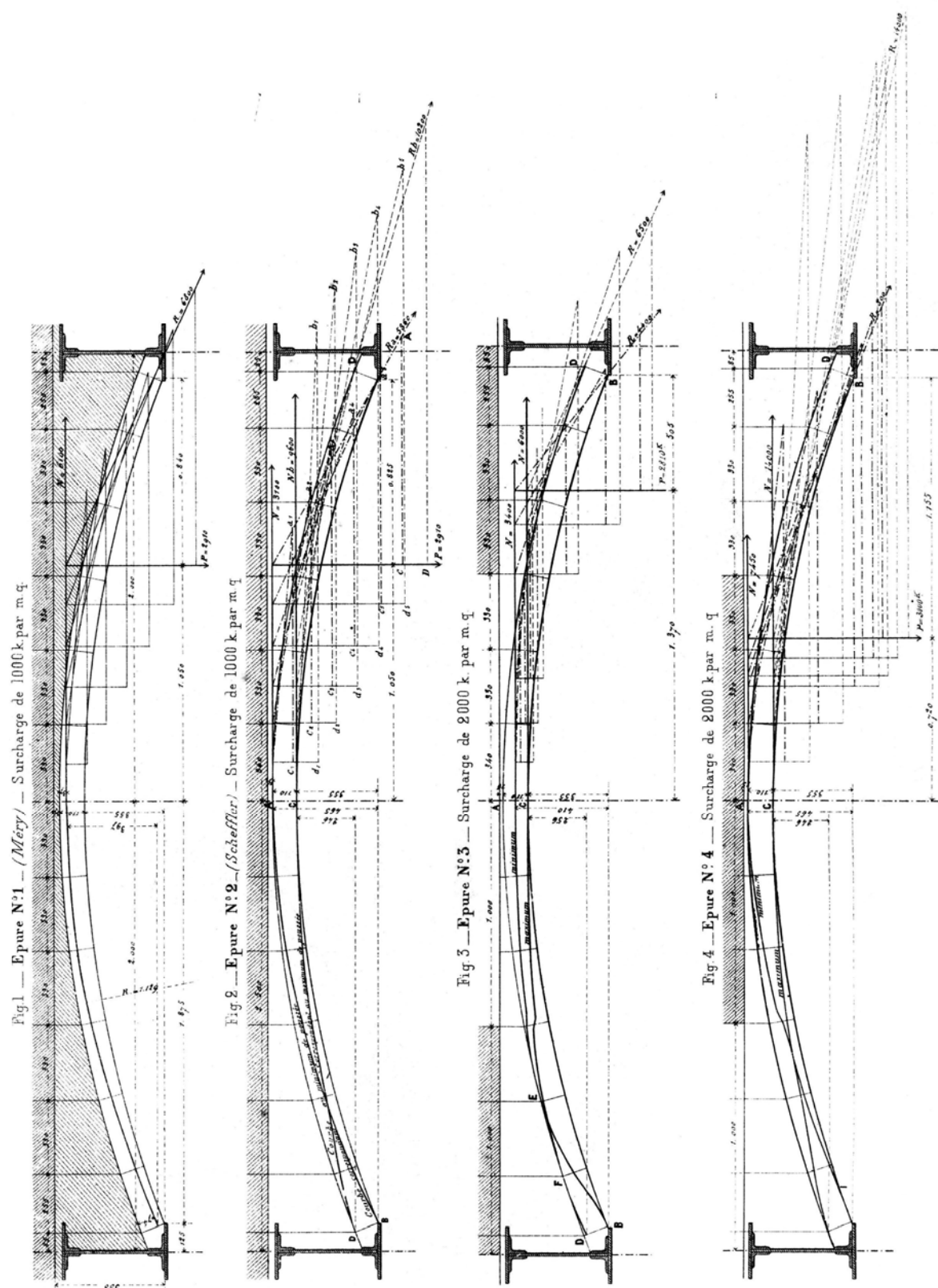


Figura 7.8: Dibujo de las distintas líneas de presión sobre las bóvedas previamente ensayadas (Fontaine 1865, pl. 45, Fig. 1-4). Se indican pesos, distancias y el valor del normal N sobre la bóveda, proyectando el empuje horizontal obtenido.

Para ello, aplica los conceptos de la teoría de bóvedas que ha explicado al inicio del artículo: Scheffler y Méry, ver nota 11.

-Con una carga uniforme de 1000 kg/m² (10 kN/m²) dibuja la línea de empujes contenida en el tercio central del arco, siguiendo la teoría de Méry, ver Fig. 1 en figura 7.8 y obtiene un empuje de 6100 kg (61 kN) y las líneas de empuje máximo y mínimo, ver Fig. 2 en figura 7.8, obteniendo valores de entre 5100 y 9600 kg (51 y 96 kN) y aplicando el principio de mínima resistencia de Scheffler, la *verdadera* línea de empujes correspondería con el valor mínimo, es decir, 5100 kg (51 kN)

-Para una carga de 1000 kg/m² (10 kN/m²) aplicada de manera no uniforme (primero concentrada en los laterales y después alrededor de la clave de la bóveda), dibuja también las curvas de empuje mínimo y máximo, siguiendo el principio de mínima resistencia de Scheffler. En el primer caso, el empuje mínimo sería 3400 kg (34 kN) y en el segundo, 7450 kg (74,5 kN), ver Fig. 3 y Fig. 4 en figura 7.8

Esta parte del artículo es muy didáctica, Fontaine explica detalladamente, con ayuda de unas tablas, como obtener los pesos y distancias necesarias para hallar la resultante del peso de media bóveda, y el equilibrio de momentos necesario para obtener el empuje que equilibra este peso, para mínimo empuje (la línea de empujes pasa por el intradós en los arranques) y para máximo empuje (pasa por el extradós), ver figura 7.9.

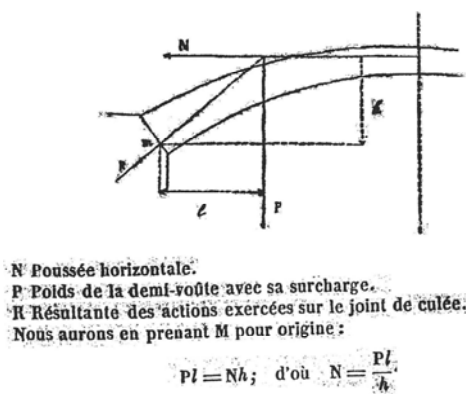


Tableau des éléments de l'épure N° 1.

Indication des solides.	VOISSINS.			REMPLISSAGE.			SURCHARGE.			Somme des poids. Somme des moments.	SOLIDES.	Poids cumulé.	Moments cumulé.	Distance du centre de gravité à l'axe.
	Poids.	Moment.	Distance à l'axe.	Poids.	Moment.	Distance à l'axe.	Poids.	Moment.	Distance à l'axe.					
1	k. 73	m. 12	0.17	k. 23	m. 4	0.17	k. 340	m. 58	0.17	k. 436	1	k. 436	m. 74	0.17
2	72	36	0.50	36	19	0.51	330	167	0.505	435	1+2	874	296	0.341
3	72	59	0.825	66	36	0.84	330	275	0.835	468	1+2+3	1,342	685	0.508
4	73	84	1.15	109	128	1.17	380	388	1.175	512	1+2+3+4	1,854	1,283	0.691
5	74	109	1.48	165	248	1.50	330	497	1.505	569	1+2+3+4+5	2,423	2,136	0.881
6	60	105	1.77	173	311	1.79	255	456	1.79	488	1+2+3+4+5+6	2,911	3,006	1.05

Figura 7.9. A la izquierda, equilibrio de momentos para obtener la línea de empuje mínimo. A la derecha, tabla de pesos, distancias y momentos de una de las bóvedas estudiadas, la Fig. 1 en figura 7.8. (Fontaine 1865, 156-57)

La razón es que en 1865, este proceso todavía no era evidente y Fontaine quiere darlo a conocer, en especial el método propuesto por Scheffler, que le parece el más adecuado:

Ces trois exemples suffiront pour montrer la marche à suivre dans tout les cas. Après quelques tracés, on arrivera à se familiariser avec la méthode de M. SCHEFFLER qui, nous le répétons, donne des résultats plus exacts que les précédentes (Fontaine 1865, 159)

7.3.3. *Los Guastavino*

Rafael Guastavino, en sus escritos, cita numerosas maneras de abordar el cálculo de una bóveda tabicada: sencillos análisis de equilibrio, una tabla de empujes elásticos, etc. Se irán estudiando con detalle en los distintos apartados de este capítulo. Pero los únicos que utiliza en la práctica, según los dibujos que se conservan de sus proyectos en el Archivo Guastavino/Collins de la Universidad de Columbia, son de equilibrio, y además asignando a las fábricas sólo resistencia a compresión.

7.3.3.a. *Escritos*

Dentro de su libro *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction*, publicado en Boston en 1893, Rafael Guastavino ofrece breves instrucciones para el cálculo de bóvedas tabicadas. El libro no es un manual para constructores, mas bien busca publicitar su sistema constructivo en Estados Unidos. Por eso los métodos de calculo propuestos no son exhaustivos, solo sirven para demostrar lo delgada que puede ser una bóveda tabicada.

Para una bóveda de cañón con carga repartida, propone obtener el empuje con la fórmula del arco parabólico:

$$E = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot F}$$

siendo q la carga repartida, l la luz libre del arco y F su flecha.

Con el valor de E , que es muy similar a la fuerza de compresión que debe resistir la fábrica, al ser esta muy rebajada, y el valor de la tensión de rotura a compresión, obtiene el área mínima del arco o bóveda de cañón.¹³

$$E = A \cdot \sigma_c$$

Utiliza el mismo método para otro tipo de cargas. Para un arco con una carga puntual en la clave, propone utilizar la fórmula equivalente:

$$E = \frac{P \cdot L}{4 \cdot F}$$

Y para cúpulas, afirma que el espesor debe ser la mitad ya que también lo es la superficie respecto a una bóveda de cañón, ver figura 7.10.

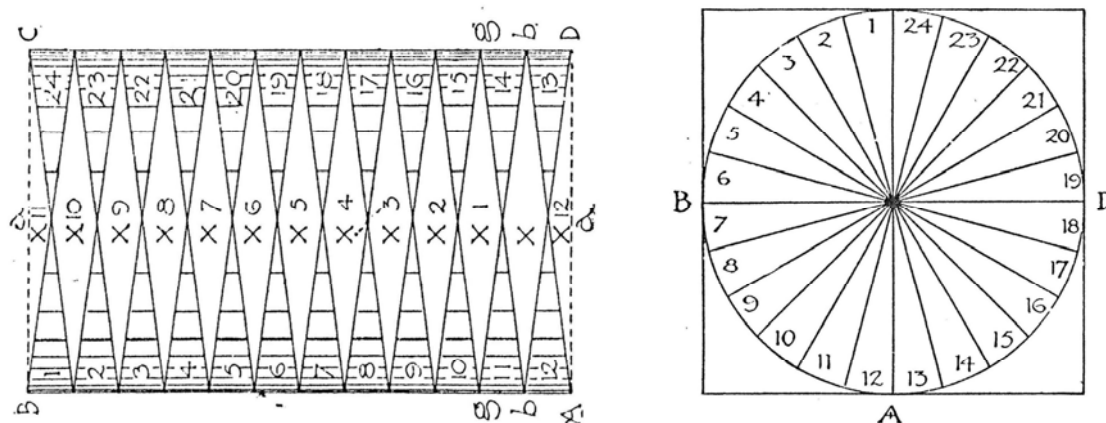


Figura 7.10. Justificación de porqué el espesor necesario para un cúpula tiene que ser la mitad que el de una bóveda de igual luz: su superficie es la mitad (Guastavino 1893, 73-74)

Pero el problema de las bóvedas tabicadas, con un espesor muy pequeño, es que funcionen bien bajo cargas móviles o asimétricas, como ya se indicaba en el tratado de Blondel y Patté (1771-78), 100 años antes. Guastavino también es consciente de este asunto «The remark has been made that these kind of arches cannot be used for a moving or concentrated load» (Guastavino 1893, 62). Para solucionarlo propone obtener el espesor en la clave con las fórmulas anteriores, en función del tipo de carga,

¹³ Como valor de tensión de rotura por compresión utiliza 14,21 N/mm², valor obtenido en los ensayos que realiza en 1887 y cuyos resultados publica en Guastavino (1893). En esos mismos ensayos obtiene resistencias a tracción y a cortante que luego nunca utilizará. (ver capítulo 8 de esta tesis)

y después dibujar tangente a este espesor las distintas líneas de empuje que produce la carga móvil (ver figura 7.11). Rellenando el espesor correspondiente a todas las líneas el arco será seguro.

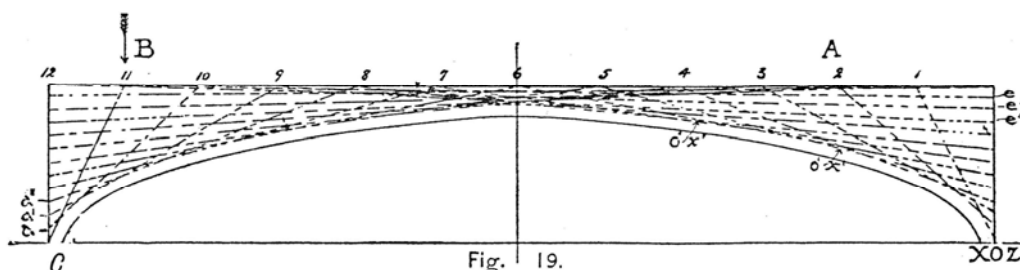


Figura 7.11: Demostración gráfica de que, si se construyen lengüetas, es posible dibujar una línea de empujes para cualquier carga puntual situada en el trasdós de la bóveda. (Guastavino 1893, 63) En Heyman (1977, 77) se apunta lo mismo pero para arcos muy rebajados de cierto espesor.

Además, no es necesario que este relleno sea macizo, evitando así grandes pesos sobre la bóveda (letra cursiva en el original):

Consequently it is inside of this area, between the level of the floor and the line of lowest lines of the arch (Fig. 19) where the curve of pressure rests; that means that if we fill up solid, or in such a way as to take the place of solid materials, as, for example, in tubular girders, we are sure that the curve of pressure will always be inside of the arch. (Guastavino 1893, 63)

El procedimiento describe las mismas lengüetas de las que habla Fray Lorenzo en 1639 y que Guastavino construirá en sus obras en Estados Unidos, ver figura 7.12.

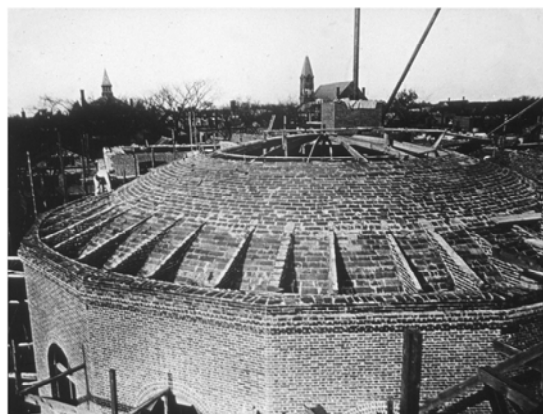
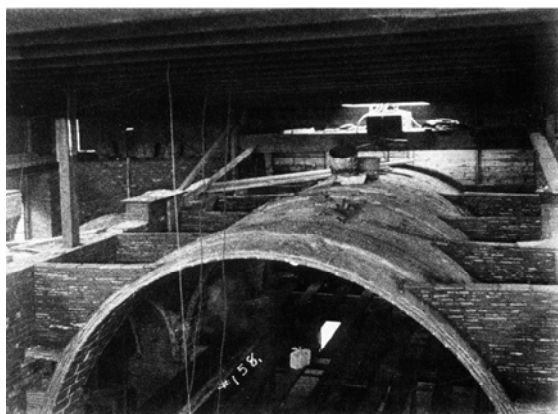


Figura 7.12. Construcción de lengüetas para rigidizar: a la izquierda, una bóveda tabicada cilíndrica (Biblioteca Pública de Boston, 1889, Massachussets); a la derecha, una cúpula (East Boston High School, 1899, Massachussets). Ambas obras son de la compañía Guastavino. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

El texto de Guastavino está lleno de contradicciones en lo que se refiere al cálculo de bóvedas tabicadas. Frente a afirmaciones como esta: «we know that if an arch is built with the condition that the curve of pressure is inside of the middle third, the arch is safe» (Guastavino 1893, 62), referidas a la teoría de Méry de la que se habla más arriba, también escribe, en un ejemplo: «3 inches must be adopted in order to increase the resistance to bending moment» (Guastavino 1893, 65).¹⁴ O, en lo referido a la manera de resistir una carga variable, además de la construcción gráfica de la figura 7.11, escribe lo siguiente: «We know that in every arch the curve of pressure changes according to the position of the load; this means that every arch must be prepared for work by deflection or tension» (Guastavino 1893, 53-54)

Todo mezclado con afirmaciones poco demostrables acerca de la construcción cohesiva, por ejemplo en lo referido a cúpulas, afirma: «Domes in the Cohesive System cannot be considered as a modification of the barrel arch but an absolutely different constructive member for covering spaces» (Guastavino 1893, 73), para luego plantear como solución a una cúpula la misma fórmula que para una bóveda de cañón pero con la mitad de área, ver figura 7.10.

En cualquier caso, el único «número» que se plantea en el libro, completado con algunos ejemplos de aplicación, es un análisis de equilibrio, basado en que la fábrica esté trabajando sólo a compresión y despreciando los valores de tracción, flexión y cortante obtenidos en los ensayos. Por otro lado, en esas condiciones, los valores de resistencia no son relevantes ya que las tensiones de compresión en cualquier fábrica son muy bajas en comparación con la resistencia de rotura del material. Así lo comprueba él mismo también en los ejemplos, obteniendo espesores absurdamente bajos: 4,75 mm para un arco de 4,5 m de luz (Guastavino 1893, 64) y 12,88 mm para una cúpula de 12,2 m (Guastavino 1893, 67).

Como sabe que estos espesores no son reales, aplica un coeficiente de seguridad de 10 sobre la tensión de rotura considerada para obtener valores más cercanos a los que

¹⁴ Con esta frase hace referencia a los posibles momentos derivados de un análisis elástico, según indica en una tabla incluida al final de su libro en la que se plantea este tipo de análisis para un arco tabicado (ver apartado 7.5. de esta tesis).

sabe que deben colocarse: unos 5 cm para la bóveda de 4,5 m de luz y unos 13 cm para la bóveda de 12 m, redondeando incluso por encima para adaptarse a un número determinado de gruesos de ladrillo.¹⁵

Por otro lado, Guastavino propone la fórmula del empuje del arco parabólico para obtener el espesor del arco, pero no da ninguna indicación sobre el grosor de los muros o tirantes, que es lo más relevante.

A la vista de todo lo anterior, lo más probable es que a su llegada a Estados Unidos, Guastavino no utilizara ningún método numérico para calcular sus bóvedas, sino que siguiera trabajando con reglas de proporción y dimensiones usuales, que traía aprendidas de su años de formación y su trabajo previo en Barcelona. De ahí el uso de un excesivo coeficiente de seguridad, hasta llegar a los dos o tres gruesos de ladrillo habituales, o la justificación mediante las líneas de empuje de una carga móvil de las lengüetas, ya descritas por Fray Lorenzo 250 años antes. Pero la época había cambiado y era necesaria una demostración científica de las decisiones tomadas.

7.3.3.b. Proyectos y dibujos

Por otro lado, los dibujos de la compañía Guastavino que se conservan en la Universidad de Columbia incluyen algunos relativos al cálculo de bóvedas y cúpulas. Son siempre análisis de equilibrio, bien mediante líneas de empuje o siguiendo la teoría de la membrana, como se verá en el siguiente apartado.

Se incluyen a continuación dos de estos dibujos, en los que se realizan análisis mediante líneas de empuje: la nave principal de la catedral de St. John the Divine, en 1908 (ver figura 7.13) y en St. Columbus Church, de 1906 (ver figura 7.14).

En el plano de la figura 7.13 se representan varios dibujos sobrepuestos, que se explican a continuación.

¹⁵ El coeficiente de seguridad 10 fue habitual a lo largo del s. XIX, pero se empleaba para pasar del valor de rotura del material que formaba la fábrica (ladrillo, piedra) hasta el valor de trabajo de la fábrica completa (ver Huerta 2004) Dado que Guastavino nensayó probetas de fábrica (ladrillos+yeso o cemento) seguir empleando el valor de 10 es excesivo.

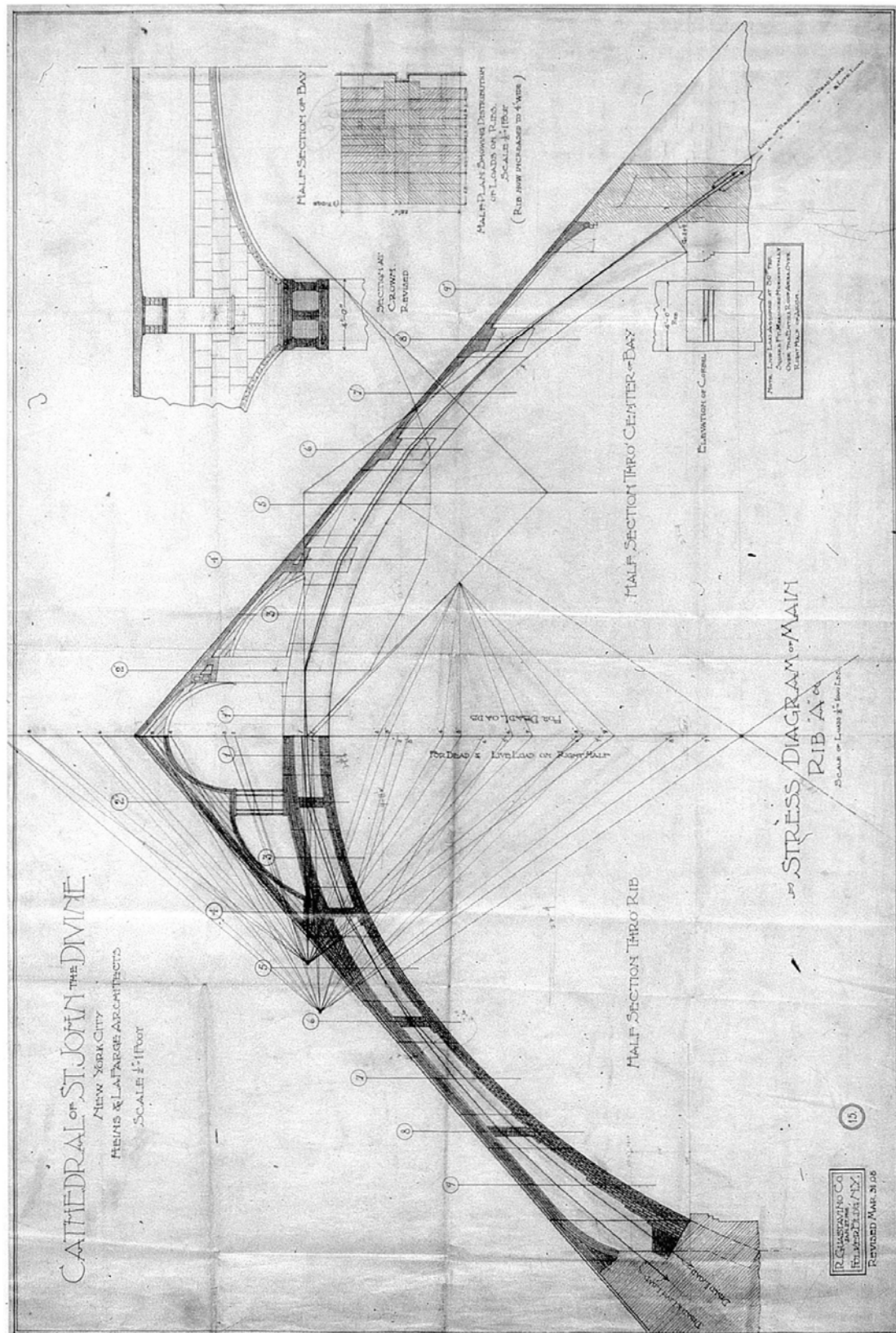


Figura 7.13. Análisis de equilibrio, mediante una línea de empujes, de un tramo de la nave de la catedral de St. John the Divine, en Nueva York. Plano fechado en 1908. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

A la izquierda, una sección por la costilla hueca que funciona como nervio. A la derecha, una sección por la mitad de la nave. Sobre las secciones se dibujan dos líneas de empuje: la correspondiente sólo al peso propio y la del peso propio más la sobrecarga aplicada sólo en la mitad derecha del arco. En el centro del dibujo, alrededor de la clave del arco, están también dibujados los polígonos de fuerzas empleados para trazar ambas líneas de empuje. Se indica una escala de longitudes y una escala de fuerzas, como corresponde a un plano de análisis gráfico. Ambas líneas de empuje están contenidas holgadamente en el espesor de la costilla hueca, lo que parece suficiente para dar por válido el arco. Se puede deducir que las costillas se consideran la parte resistente, ya que la sección por el centro de la bóveda está dibujada, pero no se dibuja ninguna línea de empujes relativa a ella ni contenida en su espesor. Sobre el plano perpendicular a la costilla no se hace ningún análisis: se dibuja la sección y un esquema de reparto de cargas a las costillas.

El plano de la figura 7.14 es un análisis similar, pero incluyendo también la estabilidad del muro. En la mitad izquierda de la figura se dibuja la bóveda y la línea de empujes contenida en su interior. Dada la geometría compleja de la bóveda –arcos de círculo con varios centros- y su similitud con la línea de empujes, el proceso parece más bien el contrario: se dibuja primero la línea de empujes y después se adapta a ella la forma de la bóveda.

En la mitad izquierda se dibuja el polígono de fuerzas empleado para trazar la línea de empujes, con una escala distinta para la bóveda (pesos 1 a 10) que para el muro (pesos 11 a 13). Respecto a la estabilidad del muro, en este edificio parece que se resuelve sólo con peso, sin ayuda de tirantes de acero. A destacar el elevado coeficiente de seguridad geométrico que presenta este edificio: el muro va incrementando su espesor hacia abajo, de forma que en la cimentación el espesor total es $L/2,17$. Con estas proporciones, el coeficiente de seguridad, obtenido como se explica en el apartado 7.1 ($c=d/2 \cdot x$) es 3,82.

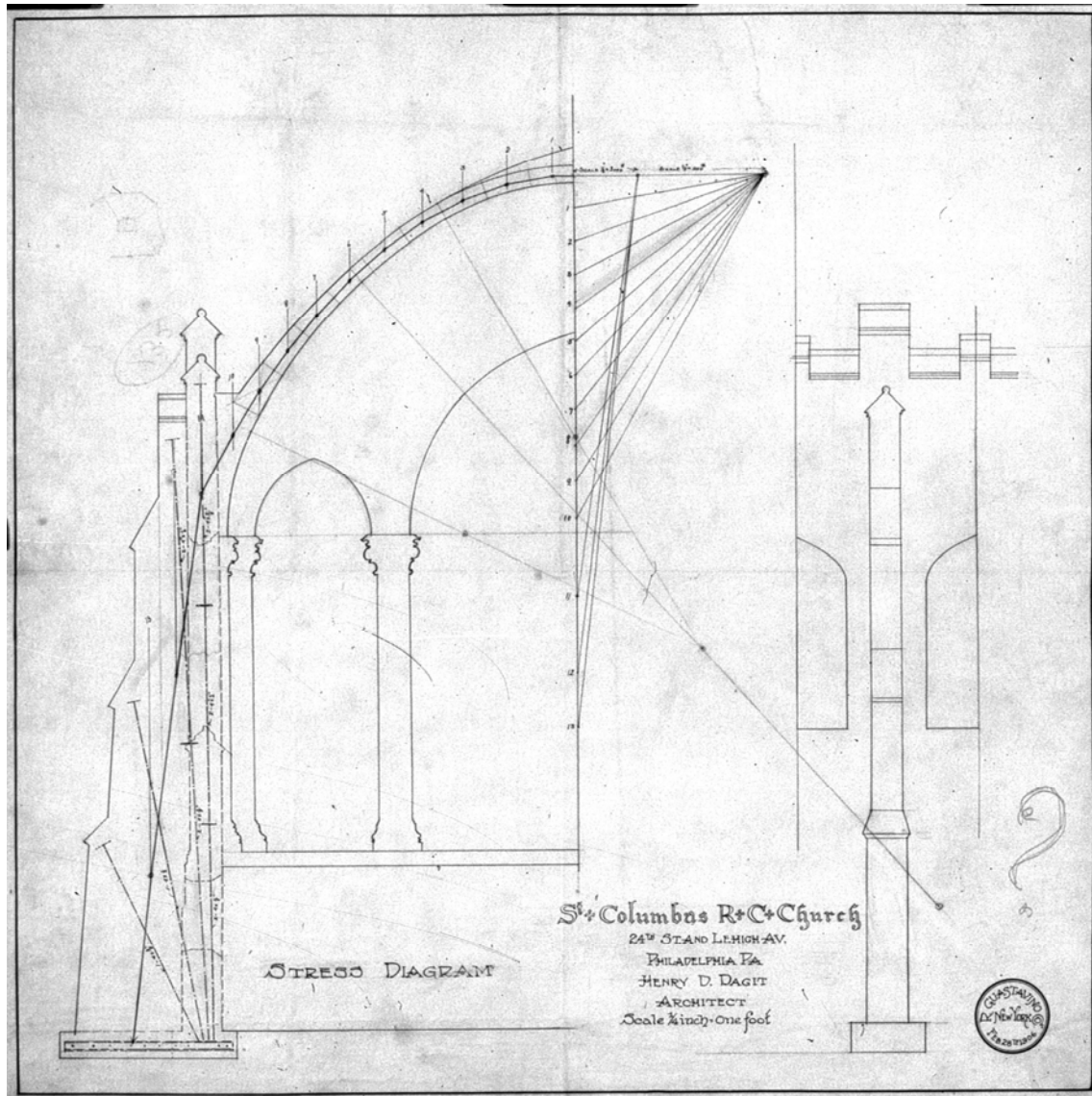


Figura 7.14. Análisis de equilibrio, mediante una línea de empujes, de St. Columbus Church, en Philadelphia. Plano fechado en 1906. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

En otros casos (ver figura 7.15) se emplean complejos sistemas de refuerzo metálico para dirigir los empujes hacia los estribos (tirante horizontal formando un «arco» entre estribos) y después hacia el suelo (tirantes verticales en el propio estribo)

Dada la relación entre luz libre y espesor de estribo ($E_{\text{ESTRIBO}} = L/3,5$) y con el espesor del muro ($E_{\text{MURO}} = L/8$), que cumplen a la perfección las medidas enunciadas por Fray Lorenzo en 1639: «cuando la bóveda hubiere ser tabicada de ladrillo, basta que lleven las paredes de grueso la octava parte de su ancho y los estribos que cumplan con el grueso hasta la cuarta parte de su ancho» (San Nicolás 1639, folio 30v), la colocación de

estos refuerzos metálicos parece más bien un tema de confianza en el acero, que era el material novedoso, que una necesidad.

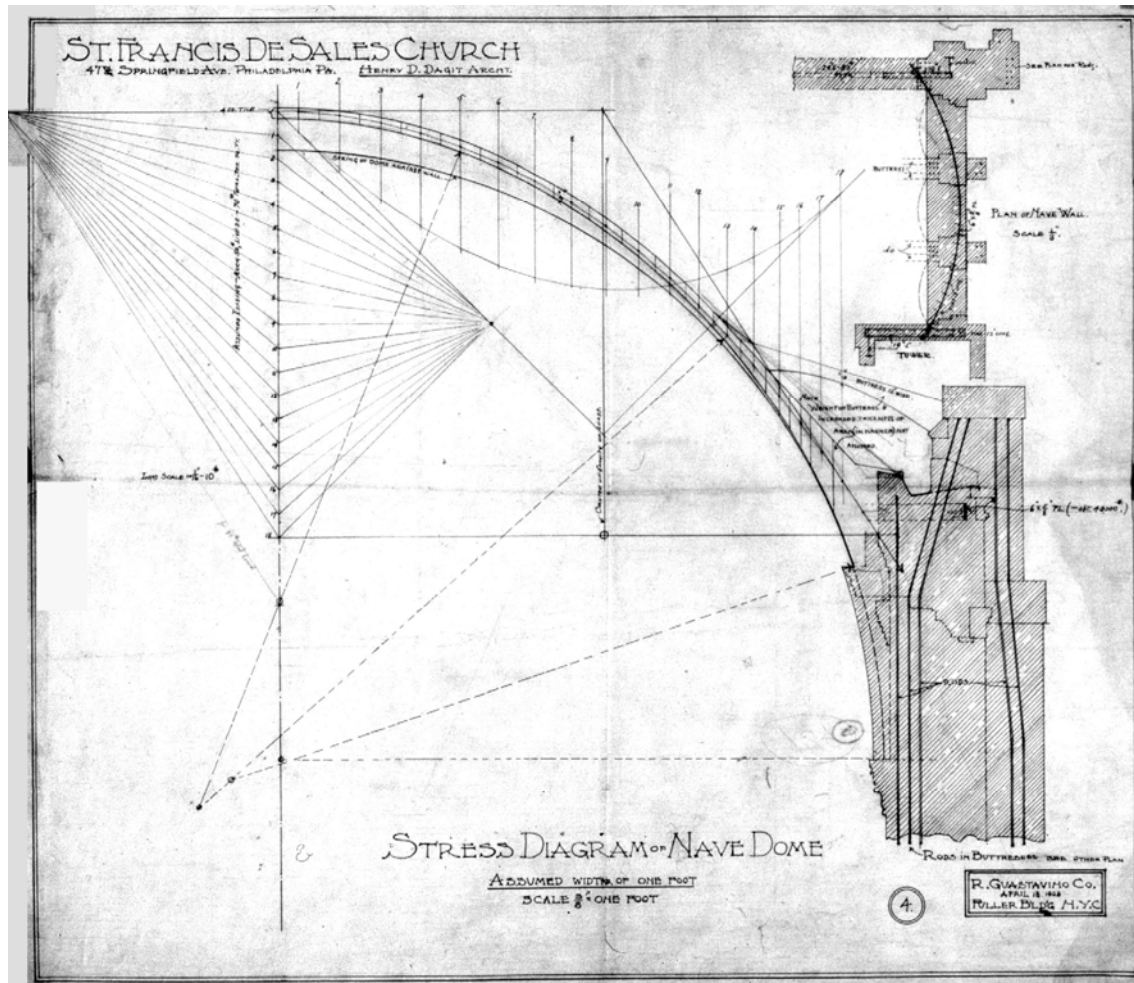


Figura 7.15. Análisis de equilibrio, mediante una línea de empujes, para St. Francis de Sales Church, en Philadelphia. Plano fechado en 1908. Archivo Guastavino/Collins en U. Columbia

Este sencillo método de cálculo, por líneas de empujes en un solo plano, se mantuvo mucho tiempo, como puede constatare estudiando los dibujos conservados en el archivo Guastavino/Collins de la Universidad de Columbia: en un dibujo para la capilla del Trinity College, de 1921 todavía se dibuja un análisis similar a los descritos en las figuras 7.13, 7.14 y 7.15.

En resumen, y a la vista de la documentación disponible (planos y escritos), los Guastavino sólo emplearon análisis de equilibrio para levantar sus cúpulas y bóvedas, tanto estas líneas de empuje aquí vistas como análisis de membrana que se estudiarán en el siguiente apartado.

7.3.3.c. Coppet Berg 1889

Los ensayos realizados por Guastavino en 1887 (ver capítulo 8 de esta tesis) son citados en el manual de construcción *Safe Building: a treatise* (Coppet Berg 1889, 176), 4 años antes de ser publicados por el propio Guastavino. El autor, Louis de Coppet Berg, es un ingeniero civil y dedica un breve apartado a las bóvedas tabicadas: *Spanish tile arches*, dentro del capítulo *Arches*. Coppet Berg transcribe los valores obtenidos por Guastavino para compresión y tracción (ver figura 7.16 izq.), aplicándoles también un coeficiente de seguridad aproximado de 10. Más adelante propone un ejemplo de aplicación, en el que dibuja una línea de empujes contenida en el espesor del arco y después divide la fuerza máxima (4700 lbs., 21,33 kN) entre la sección del arco (ver figura 7.16 der.). El valor obtenido es menor que el resistencia a compresión obtenido en el ensayo, y con esto el arco se considera seguro. El valor de resistencia a tracción, aunque se especifica (ver figura 7.16 izq.) no se utiliza para nada: «The secret of the strenght of this arches consist in their following closely the curve of pressure, thus avoiding tension in the voussoirs, as far as possible» (Coppet Berg 1889, 176)

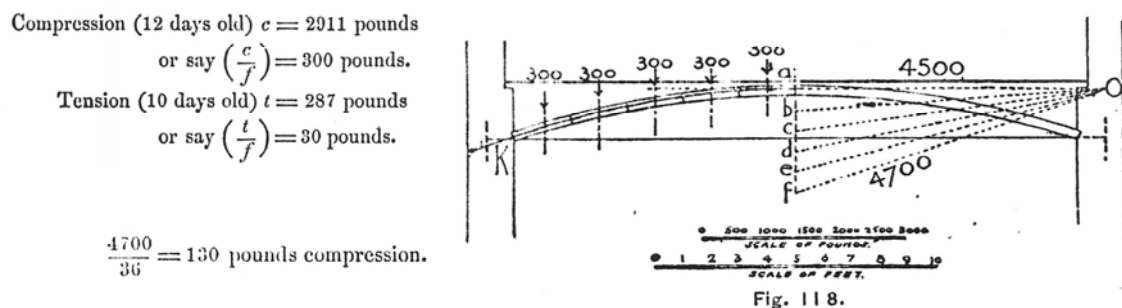


Figura 7.16: A la izquierda, valores de resistencia a tracción y compresión a emplear en bóvedas tabicadas, partiendo de los ensayos de Guastavino y aplicando un coeficiente de seguridad de 10 (Coppet Berg 1889, 176); A la derecha, línea de empujes sobre un arco de ejemplo; A la izquierda abajo, comprobación de tensiones sobre el arco (Coppet Berg 1889, 178).

Como la bóveda que emplea es muy rebajada (flecha= $L/10$, el valor habitual en las bóvedas de Guastavino), no tiene problemas en encajar la línea de empujes en el espesor del arco. Y sobre como se contrarresta el empuje no dice nada, aunque dibuja un tirante bajo la bóveda (ver figura 7.16 der.)

El problema vuelve a ser las cargas móviles o concentradas, para lo que Coppet Berg, a diferencia de Guastavino, no ofrece ninguna solución:

If, however, instead of a uniform load, we have to provide for very heavy concentrated load, or heavy-moving loads, or vibrations, it would not be advisable to use this arches (Coppet Berg 1889, 178)

7.3.4. España

En España son más tardíos los descritos que hacen referencia al calculo de bóvedas tabicadas mediante líneas de empuje. Esto es coherente con un menor desarrollo científico que el de otros países, como Francia o Estados Unidos, y se repetirá en el capítulo de ensayos, que también empezarán después.

7.3.4.a. Martorell 1910

La primera referencia la encontramos en el artículo de Jerónimo Martorell «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado». Martorell (Barcelona, 1877-1951) obtuvo el título de arquitecto en la Escuela de Barcelona en 1903. Realizó varias obras empleando la bóveda tabicada atirantada, algunos de los cuales describe en su artículo. Después fue director de Conservación de Monumentos e impulsor del área de arquitectura del Centro Excursionista de Cataluña.

Este artículo de Martorell ya se ha citado en el capítulo 6 de esta tesis, ya que describe con mucho detalle y datos la forma en que están contruidos los edificios más relevantes de la arquitectura industrial en Cataluña, formados por bóvedas tabicadas atirantadas:

Todo arco, toda bóveda, es cosa bien sabida, produce un empuje (...) sobre los elementos donde apoya. Es condición inherente a su naturaleza.

Históricamente estos empujes han sido equilibrados (...) con macizos de obra que (..) gracias a su peso, los han vencido (...)

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 (...); combinar la obra de ladrillo con el hierro, de modo que aquélla forme los muros y cubiertas, los elementos sujetos a compresión, empleando el hierro atirantado, para dominar los esfuerzos oblicuos que se desarrollen (...)

Los elementos que forman la nueva estructura, bóvedas de ladrillo tabicadas y tirantes de hierro, existían de antiguo y eran de uso corriente; ni uno ni otro han sido ahora descubiertos. Mas eran aplicados independientemente; la novedad que proclamamos, consiste en la combinación de los mismos (Martorell 1910, 119-20)

Ha leído a Guastavino, cuyo libro de 1893 cita en el artículo y queda influenciado por sus ideas acerca del sistema cohesivo:

Las bóvedas tabicadas no son articuladas como las de piedra, sino que presentan cierta rigidez, cierta cohesión general, de la que depende su resistencia, condiciones muy favorables. Guastavino analiza el valor de la cohesión y de los esfuerzos transversal y a la tensión de las bóvedas tabicadas, detallando los coeficientes que en 1877 obtuvo, en los estudios y experiencias practicadas junto con el ingeniero A.V. Abbott (Martorell 1910, 123)

Y que esta cohesión disminuye el empuje: «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)

A pesar del enunciado de estas ideas generales sobre el comportamiento de las bóvedas tabicadas, Martorell propone un análisis de equilibrio para ellas: una línea de empujes contenida en el espesor de la bóveda y un tirante que resista el empuje, ver figura 7.17.

Martorell afirma que el procedimiento que describe en la figura 7.17 «es el corriente» (Martorell 1910, 144) y que los valores obtenidos, si no exactos, son al menos seguros, además de la sencillez del cálculo gráfico que propone:

El cálculo mecánico (...) de las estructuras de ladrillo y hierro atirantado, es algo prolijo y complicado.

Los procedimientos de mecánica gráfica (...) 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; pero como a pesar de ello la composición arquitectónica (..) y la facilidad de construcción, los considera todavía inferiores a lo conveniente, de ahí que pueda considerarse como excelente método de guía (Martorell 1910, 143)

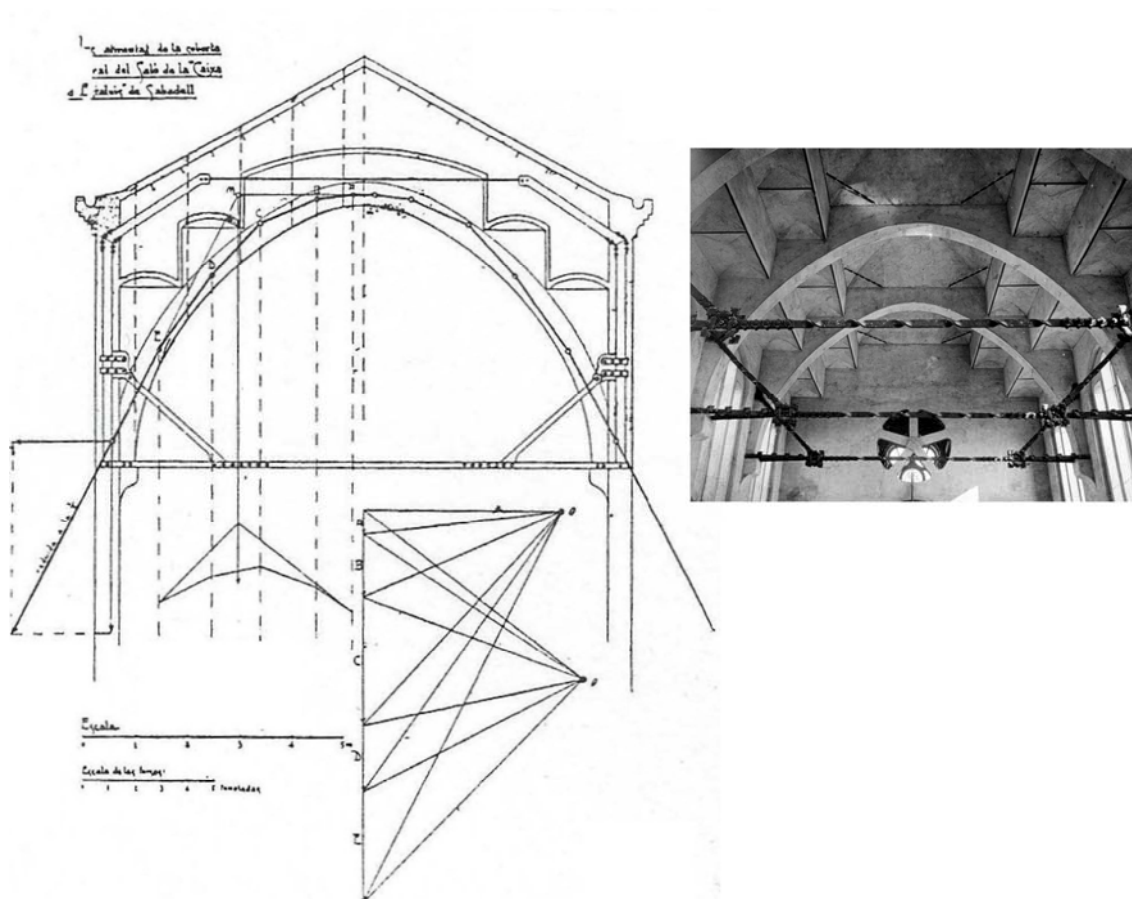


Figura 7.17. A la izquierda, procedimiento gráfico propuesto por Martorell para el cálculo de una bóveda tabicada atirantada en el salón de actos de la Caja de Sabadell : línea de empujes contenida en el espesor de la bóveda y tirante que absorbe el empuje (Martorell 1910, 144). A la derecha, imagen de esa misma bóveda (Martorell 1910, 138). En este edificio, que ya no es una nave industrial, los tirantes se mezclan con otras piezas metálicas de carácter decorativo formando un entramado que intenta enmascarar el atirantamiento.

No queda muy claro en el artículo a que se refiere con «cálculo mecánico». En ningún momento cita la teoría elástica, ya en desarrollo, aunque si la posibilidad de que las bóvedas tabicadas resistan tracciones, ver figura 7.18.

¿Porqué Martorell no aplica los coeficientes obtenidos por Guastavino en Estados Unidos, que conoce (ver cita más arriba)? Como en muchos autores posteriores, encontramos en Martorell una separación entre lo que hay que decir: el discurso de la cohesión, la elasticidad y la posibilidad de resistir tracciones de estas bóvedas; y la manera en que realmente se enfrentan al diseño y cálculo de las bóvedas en sus edificios: un análisis de equilibrio, teniendo en cuenta sólo la resistencia a compresión de la fábrica de ladrillo.

La mecánica gráfica nos dice, que para un grueso de bóvedas determinado, la forma teórica (Fig. 27) debería ser la A, pero en la práctica, podemos darle la B y la C y todas las intermedias. ¿Cuáles son los límites B y C? He ahí una contestación que sólo se obtendrá con pruebas experimentales; según el ladrillo, según las condiciones de adherencia de los morteros, su resistencia á la compresión y tensión, variarán estos límites. Los coeficientes que se usen en el cálculo para evaluar la resistencia á la flexión y los esfuerzos transversales de las bóvedas tabicadas, dependen de estas experiencias, que de un modo oficial, todavía están por efectuar.

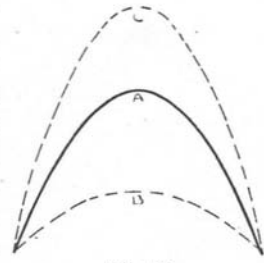


Fig. 27

7.18. Texto e imagen explicativa del comportamiento mecánico de las bóvedas tabicadas (Martorell 1910, 143)

7.3.4.b. Moya 1947

Luis Moya Blanco (Madrid 1904-1990) fue arquitecto y director de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Empleó las bóvedas tabicadas en la posguerra española en importantes edificios, como la Universidad Laboral de Gijón, la iglesia de San Agustín y el Museo de América, en Madrid.

El contexto del país es muy distinto de los escritos anteriores: este libro está escrito en la posguerra, un momento en que el régimen económico propuesto por la dictadura (la autarquía) había llevado a una gran escasez de hierro y cemento Pórtland. Moya busca una manera de construir que minimice el uso de ambos materiales. Por otro lado, Moya (como Guastavino, Martorell y Bosch) es un arquitecto práctico, que está construyendo bóvedas tabicadas tal y como las propone en sus escritos.

Sobre el tema del cálculo, Luis Moya destaca dos temas, de los que habla en numerosos párrafos de su libro:

- La importancia de las lengüetas, a las que llama costillas, en la resistencia de las bóvedas. Estas costillas sirven para asegurar la resistencia frente a cargas móviles u horizontales, dada la extrema delgadez de las bóvedas:

Como (...) carecen de armadura metálica, se requiere, en casos de esfuerzos laterales, la adición de costillas de rasilla para conservar la forma elegida. Es tan importante la acción

de estas costillas, que se pueden construir bóvedas de rasilla de silueta inaceptable, según el cálculo corriente de una bóveda elástica, con tal de añadirles estos elementos (Moya 1947, 22)

En una bóveda corriente (...) se construye la línea de presiones para las cargas fijas y las móviles, como en el caso corriente, afinando el trazado hasta conseguir que la forma sea la correcta, por lo menos, para las cargas fijas de mayor importancia, y teniendo siempre en cuenta la delgadez que ha de resultar (...). La bóveda, que resultará inestable teóricamente en muchos casos, se acompañará con las costillas necesarias para asegurar su rigidez (Moya 1947, 33)

- La necesidad de construir estas bóvedas con pequeñas flechas, entre $L/5$ y $L/12$. Para estos valores, se puede sustituir la curva funicular de las cargas, parabólica, por un arco de círculo rebajado sin mucho error, ver figura 7.19. Además, las flechas pequeñas facilitan la ejecución, al ser posible colocar todos los ladrillos desde una única plataforma colocada a la altura de los arranques.

Las bóvedas tabicadas deben ser muy rebajadas para que resulten baratas y de fácil construcción. Sea cualquiera su forma, conviene que la flecha esté comprendida entre $1/5$ y $1/12$ de la luz (Moya 1947, 21)

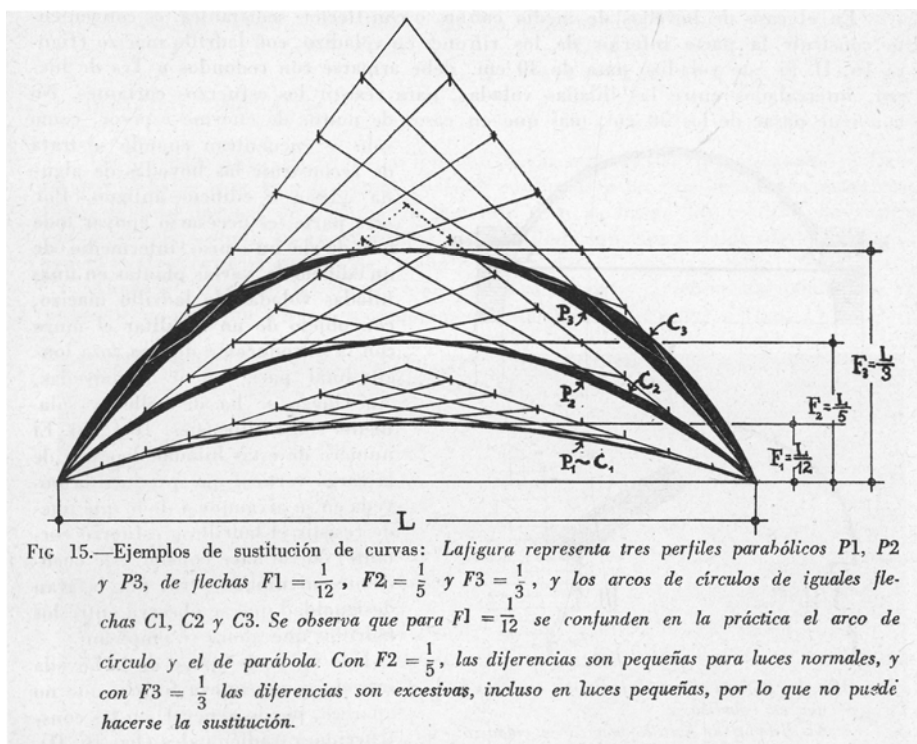


Figura 7.19. Sustitución de curvas parabólicas por arcos de círculos rebajados (Moya 1957, 23)
El cálculo elástico a Moya no le parece aplicable a este tipo de bóvedas.¹⁶

Respecto del cálculo, no hay todavía coeficientes que permitan calcular estas bóvedas, pues se desconoce por completo el coeficiente de elasticidad, y sólo vagamente los de compresión y tracción (...) Y con esto no se tendría bastante, pues la resistencia de estas bóvedas depende especialmente de la conservación de su figura (Moya 1957, 32)

Diseñada la forma de la bóveda, Moya habla de cómo contrarrestar los empujes sobre los apoyos: «El contrarresto constituye el principal problema, ya que, por el rebajamiento que conviene por las razones antes expuestas, se producen empujes muy importantes» (Moya 1957, 35). Se plantean las opciones clásicas: grandes contrafuertes o tirantes. La primera le parece muy costosa a Moya, por lo que se decanta por los atirantamientos, ocultos en el perímetro si es posible, ver figura 7.20.

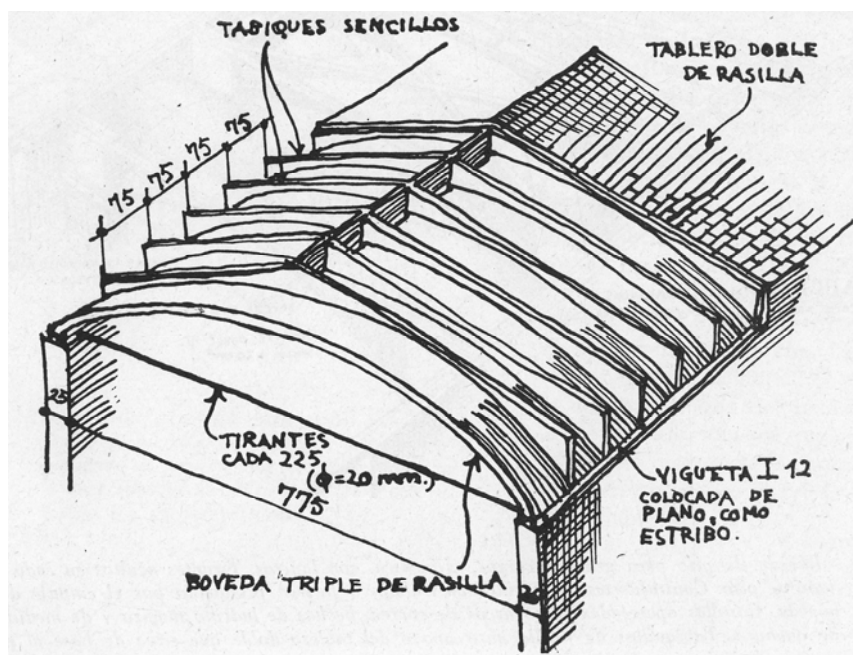


Figura 7.20. Sistema constructivo propuesto por Luís Moya: bóvedas tabicadas de perfil muy rebajado, con costillas superiores y atirantamientos, tanto vistos como ocultos en el perímetro (Moya 1957, 31)

¹⁶ Moya hace algunas referencias a lo largo del texto a las «bóvedas elásticas», refiriéndose con ellas a las membranas de hormigón armado.

Frente a la doble lectura que encontramos en Martorell (1910) y también en Bosch Reitg, que se estudia en el apartado siguiente, Luis Moya lo tiene muy claro: las bóvedas tabicadas sólo resisten compresiones y se calculan dándoles la forma correcta, de manera que la línea de empujes de las cargas fijas esté contenida en su espesor. Es de vital importancia completar la bóveda con lengüetas, a las que llama costillas, ya que contienen las líneas de empuje de las cargas móviles o asimétricas que pueda sufrir la bóveda. Aunque estas lengüetas son importantes en cualquier bóveda (Fray Lorenzo, en 1639, las recomienda también para cantería y rosca de ladrillo), en las tabicadas lo son más, ya que su bajo peso propio hace que la línea de empujes cambie más de forma cuando se mueven las cargas.

7.4. Análisis de equilibrio de bóvedas y cúpulas tabicadas.

Hasta aquí se han explicado análisis de equilibrio de estructuras tabicadas que se representan en un plano, aplicadas a arcos o a bóvedas de cañón seguido, que pueden considerarse una sucesión de arcos con la forma de su directriz.

Pero la mayoría de las estructuras tabicadas que se han construido no pueden explicarse en un solo plano. Ya Fray Lorenzo describe la manera de construir medias naranjas, bóvedas baídas, de arista o esquifadas, aunque no especifica nada distinto de las bóvedas de cañón en lo que se refiere al tamaño necesario para sus estribos, sólo respecto al proceso constructivo.

Renart parece más consciente del comportamiento bidireccional de las bóvedas que construye: distingue distintos tamaños de estribos en función del tipo de bóveda (ver tabla 7.4) e insiste en varios puntos de su manuscrito en que el empuje de bóvedas baídas, de perfil imperial, etc., se transmite principalmente por las esquinas (ver apartados 7.1.3 y 7.1.4. de esta tesis)

Rafael Guastavino Moreno es el primer autor que atribuye un comportamiento bidireccional a las bóvedas tabicadas, incluso por encima de otras, debido a su construcción por hojas con juntas discontinuas que las convierte en «elementos cohesivos»

Dentro de su libro escribe el apartado *Analysis of some peculiarities of the system* (Guastavino 1893, 80), en el que describe el comportamiento espacial de las bóvedas

con dos sencillos ejemplos: cómo se forman líneas de carga diagonales que descargan las vigas ac y db (ver figura 7.21 izq.) y cómo una bóveda tabicada de cañón que se fractura en diagonal es capaz de mantenerse en pie por la formación de los arcos diagonales $D-a$, $D-a'$, etc., en su interior (ver figura 7.21 der.)

Ambos ejemplos ilustran, para Guastavino, la validez de su teoría cohesiva:

Any of this examples cannot be explained by the voussoir theory and gravity system, and I suppose that they are sufficient to illustrate in this *essay* the incompatibility of these theories with the results of actual experience (...) and in consequence why not explain the theory of the cohesive arches by the theory of *cohesive elements*? (Guastavino 1893, 88)

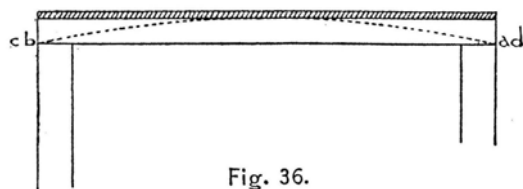


Fig. 36.

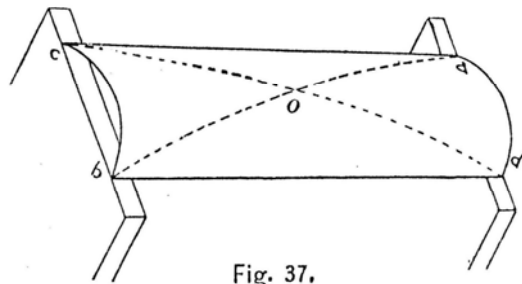


Fig. 37.

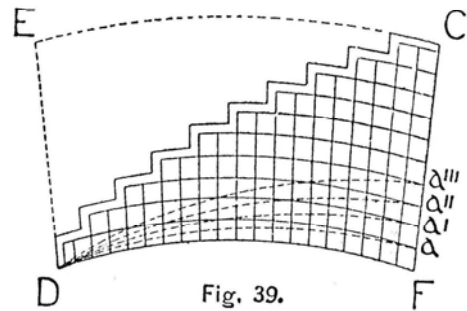


Fig. 39.

Figura 7.21: Ejemplos de comportamiento espacial de las bóvedas tabicadas. A la izquierda (Figs. 36 y 37) formación de arcos diagonales que llevan la carga hacia los puntos a , b , c , d . A la derecha, los mismos arcos diagonales explican porqué se mantiene en pie una bóveda de cañón agrietada o rota en diagonal (Guastavino 1893, 84-85)

En este apartado del libro Guastavino insiste de nuevo en la resistencia a tracción de las bóvedas para explicar este fenómeno, pero no es necesaria para que se formen los arcos diagonales que dibuja; tampoco es cierto que la teoría del arco de dovelas no pueda explicar los ejemplos. Es una más de las contradicciones del texto de Rafael Guastavino.

Se explican a partir de aquí distintas teorías y ejemplos de aplicación a bóvedas tabicadas de análisis de equilibrio bidireccionales. Todos son de equilibrio porque para llegar a la solución no se tienen en cuenta datos acerca del material que forma la estructura ni se hacen hipótesis sobre sus deformaciones, sólo se plantean ecuaciones de equilibrio de fuerzas. Esto hace que el proceso matemático sea sencillo y que la solución obtenida sea independiente de algunos parámetros difíciles de controlar, como la manera en que se construirá la bóveda (materiales, proceso) o cuanto se moverán los apoyos.

Se agrupan en dos apartados. En el primero (método de los cortes) se explican los ejemplos en los que se trabaja en varios planos que simplemente van apoyando unos en otros. En el segundo se explican los que tienen en cuenta la colaboración conjunta en ambos planos, principalmente la teoría de la membrana.

7.4.1. Método de los cortes

El método de los cortes, empleado para analizar bóvedas de fábrica desde mediados del siglo XVIII,¹⁷ debe su nombre y su rigor técnico al análisis límite para estructuras de fábrica desarrollado por Jacques Heyman (1967, 1977, 1999)

La aplicación más directa es para las bóvedas de arista con nervios siguiendo las diagonales: cada uno de los paños entre nervios se divide en una serie de arcos paralelos que trabajan de manera independiente y descansan sobre los nervios diagonales, que recogen sus pesos y empujes y los llevan hasta los apoyos, situados en las cuatro esquinas (ver figura 7.22 izq. arriba)

Esta división se basa en suponer que ese es el camino que siguen las fuerzas en la bóveda, similar al camino que tomaría una bolita rodando por su extradós, como lo dibuja Pol Abraham en 1934 (ver figura 7.22 izq.)

El proceso de análisis es sencillo: se busca una línea de empujes contenida en el espesor de cada uno de los arcos paralelos (puede ser la de empuje mínimo); las reacciones de

¹⁷ El primero en utilizarlo fue Frezier, en su influyente tratado *La théorie et la pratique...* (1737-1739). Pero la sistematización del método se debe al tratado de Ungewitter y Morhmann (1890) donde se aplica al diseño de bóvedas de crucería para iglesias neogóticas y se publican unas tablas para simplificar el proceso numérico (Huerta 2008)

estos arcos son las cargas sobre el arco diagonal. Nuevamente, se busca una línea de empujes en el interior de este arco; la resultante será el empuje sobre el contrarresto (muro, estribo, atirantamiento) en la esquina. Este tipo de análisis, gráfico, se realizó en los primeros años del siglo XX, aplicado a estructuras góticas (algunos ejemplos en Huerta 2004, 471 y 511).

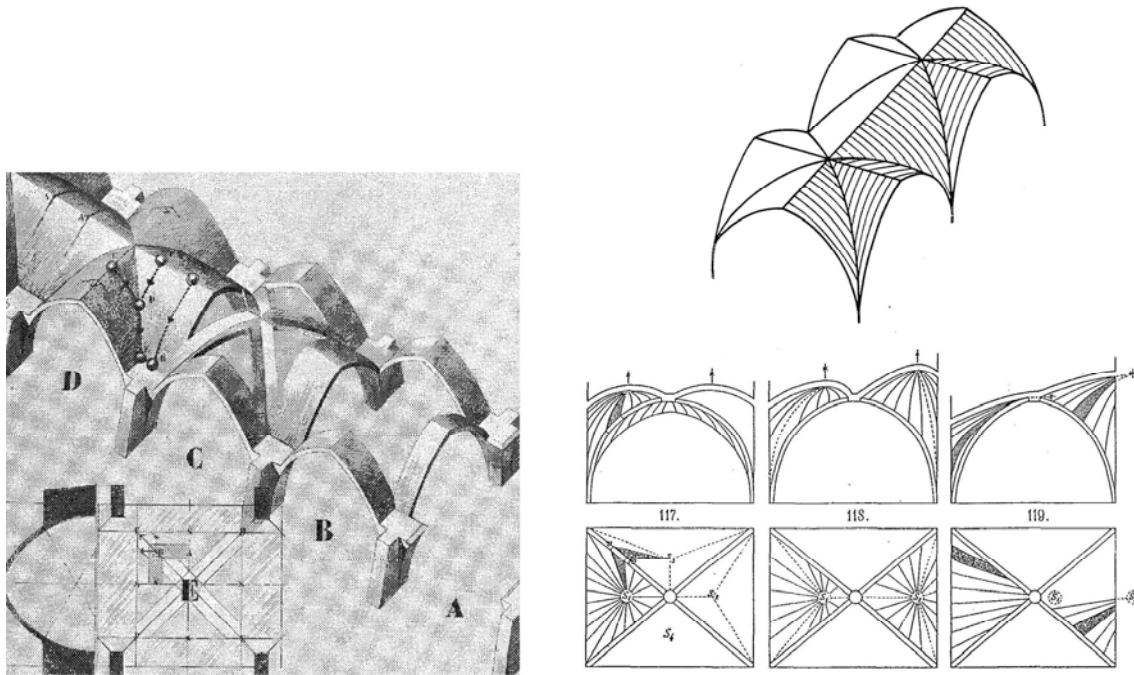


Figura 7.22. A la izquierda, símil para explicar el por qué del método de los corte (Abraham 1934). A la derecha, posibles divisiones para una bóveda de arista o de crucería: arriba, la división más sencilla y evidente para analizar por cortes una bóveda de nervios cuatrimpartita (Heyman 1977, 130); abajo, divisiones más complejas para plementos de doble curvatura (Ungewitter 1890)

Hay muchas variantes en este análisis: los arcos en los que dividimos el paño pueden seguir o no la forma en que esta aparejada la fábrica, si el paño es cupuliforme también trabajarán los arcos formeros y los perpiaños, además de los diagonales. Pero en el marco del análisis límite, si encontramos una solución de equilibrio posible, la estructura también encontrará al menos esa solución y será estable. Por eso puede plantearse el análisis más sencillo de los posibles: división en arcos paralelos, perpendiculares a los nervios diagonales, que serán los que reciban toda la carga. Aunque pueden elegirse otras divisiones más complejas, como se refleja en el tratado de Ungewitter y Morhmann de 1890 (ver figura 7.22 der.).

El método de los cortes puede extenderse a cualquier tipo de bóveda: en Huerta (2004) se recoge el análisis para una bóveda de crucería del gótico español del siglo XVI, donde los plementos son esféricos, formando una bóveda baída con nervios en la superficie, ver figura 7.23. El análisis se realiza dividiendo la bóveda en una serie de arcos verticales, que tendrán directriz circular (ver figura 7.23 izq.). Estos arcos apoyan en los perpiaños, que deben recibir sus reacciones y trasladarlas a los estribos. Esta división es una de las posibles y no tiene nada que ver con la disposición de los nervios en planta (ver figura 7.23 der.).

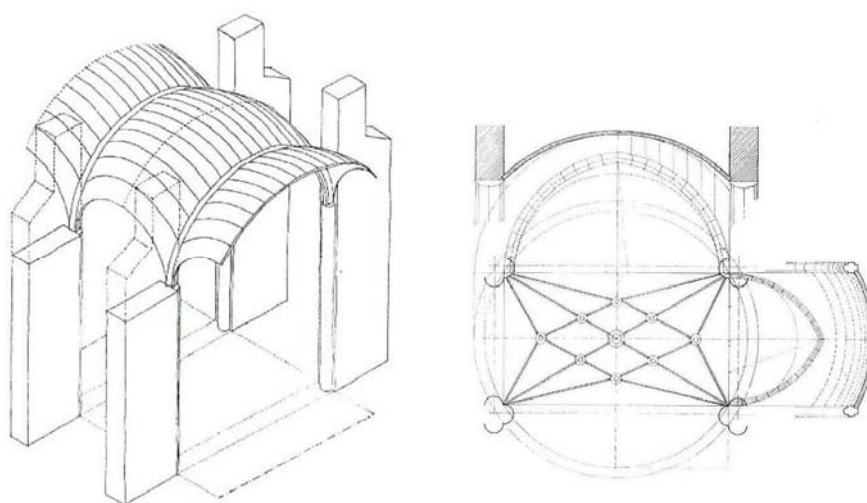


Figura 7.23. Análisis siguiendo el método de los cortes de una bóveda baída del gótico tardío español. A la izquierda, división en arcos verticales. A la derecha, situación de los nervios en planta (Huerta 2004, 483)

Y también es aplicable a las cúpulas, que pueden dividirse en una serie de gajos despreciando la unión entre ellos (que sí se tiene en cuenta en un análisis de membrana, como se verá en el siguiente apartado). Esta división por gajos es bastante realista, ya que un pequeño y habitual cedimiento de los muros de apoyo agrieta la cúpula según los meridianos convirtiéndola en una sucesión de gajos sin conexión entre sí (ver figura 7.24 izq.). Estos agrietamientos fueron observados por Poleni en su análisis de la cúpula de San Pedro de Roma y le hicieron plantearse un análisis por gajos idéntico al aquí descrito (ver figura 7.24 der.)

Los mismos autores que emplean análisis de equilibrio de arcos tabicados usan el método de los cortes -que no es más que una aplicación de las líneas de empujes en

varios planos sucesivos- para el análisis de las bóvedas tabicadas. Se estudian a continuación algunos ejemplos.

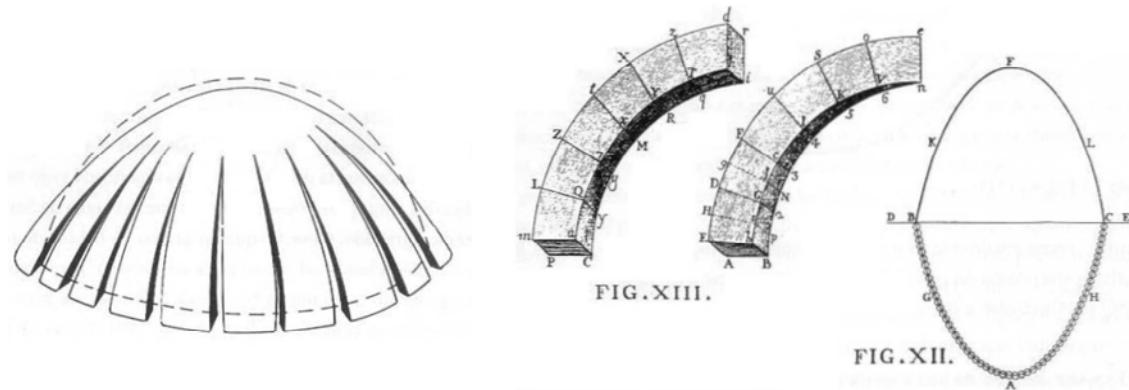


Figura 7.24. A la izquierda, agrietamientos usuales en una cúpula de fábrica que la convierten en una sucesión de gajos (Heyman 1999, 43). A la derecha, gajo empleado por Poleni en el análisis de la cúpula de San Pedro en 1748 (Heyman 1999, 45).

7.4.1.a. Los Guastavino

En el libro de Rafael Guastavino Moreno ya se menciona el método de los cortes para analizar una cúpula (ver figura 7.10 en este mismo capítulo). En los planos de sus proyectos también queda claro que lo utilizaron, incluso en épocas muy posteriores a la edición del libro (1893). La figura 7.26 representa el análisis mediante este método, y empleando sucesivas líneas de empuje, de una bóveda del Army War College.

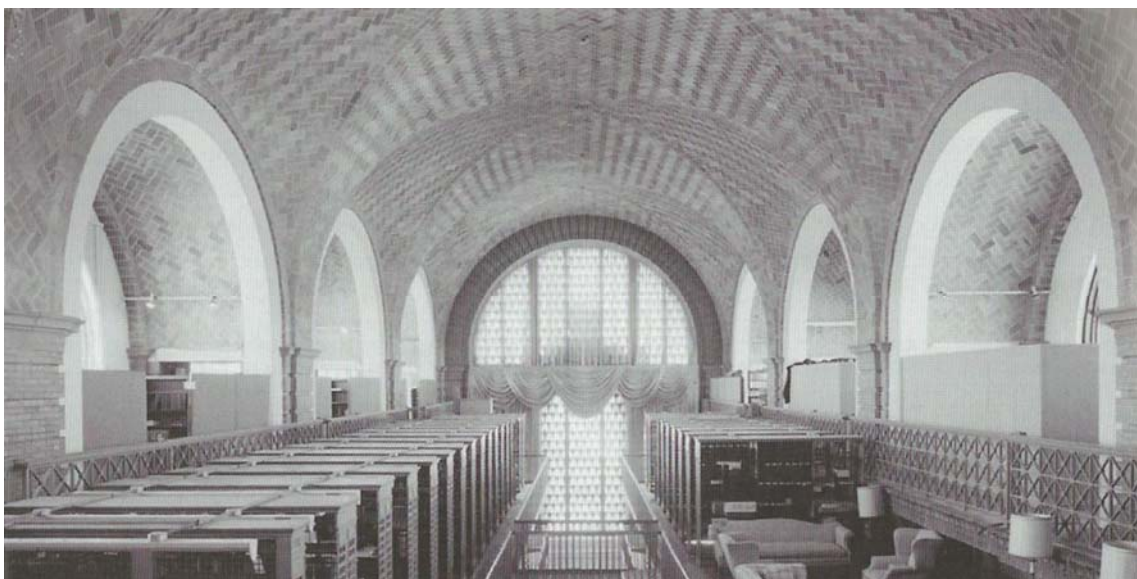


Figura 7.25. Bóveda de arista en el Army War College, con la misma geometría que la analizada en el plano de la figura 7.26 (Reese 2011, 120)

El Army War College se construye hacia 1905. Los arquitectos son los conocidos McKim, Mead and White. El edificio tiene un espacio central (cubierto con una cúpula) y dos alas laterales, cubiertas con bóvedas de arista, que descansan en unas pequeñas bóvedas laterales al modo de las capillas entre contrafuertes del gótico catalán (ver figura 7.25). La compañía Guastavino construirá las cúpulas y bóvedas de la cubiertas, además de de las escaleras.¹⁸

Pero el plano de la figura 7.26 no es de la construcción original: en 1943 las bóvedas de las naves laterales del Army War College (ver figura 7.25) están agrietadas, algunos ladrillos han caído al interior y la compañía Guastavino, que todavía sigue trabajando, es llamada para explicar la causa de las grietas y buscar una solución. El plano de la figura 7.26 es el análisis que realiza el Irving Berg, ingeniero en la compañía Guastavino, para demostrar que las bóvedas no presentan ningún problema grave de estabilidad.

En este análisis no se han traspasado las cargas a los arcos diagonales, sino a los formeros y perpiaños: se dividen los paños en planta por las diagonales (*Plan of Typical...*) y se obtiene el peso de cada franja; después se analizan los arcos formeros (*Cross-Section AA*) los perpiaños (*Rib A*); también se analiza el arco al final de la pequeña bóveda lateral (*Rib B*), bajo el peso del triángulo central de esta pequeña bóveda (ver división en diagonales en *Plan of Typical...*)

Como se ve en este análisis, el método de los cortes permite una gran libertad, tanto en los referido a como se reparten las cargas a los diferentes elementos resistentes (empleando lo que hoy llamaríamos «áreas tributarias») como en la consideración de cuales son los elementos resistentes principales y secundarios (qué apoya en qué). En este caso, se han elegido formeros y perpiaños, dado que en la arista no hay ningún nervio de refuerzo, solo el encuentro entre cañones.

¹⁸ Todos estos datos, y muchos más, acerca del Army War College, pueden consultarse en Reese (2011), donde se hace un análisis exhaustivo de tres edificios construidos por la compañía Guastavino y sus reparaciones posteriores. Uno de ellos es precisamente el Army War College.

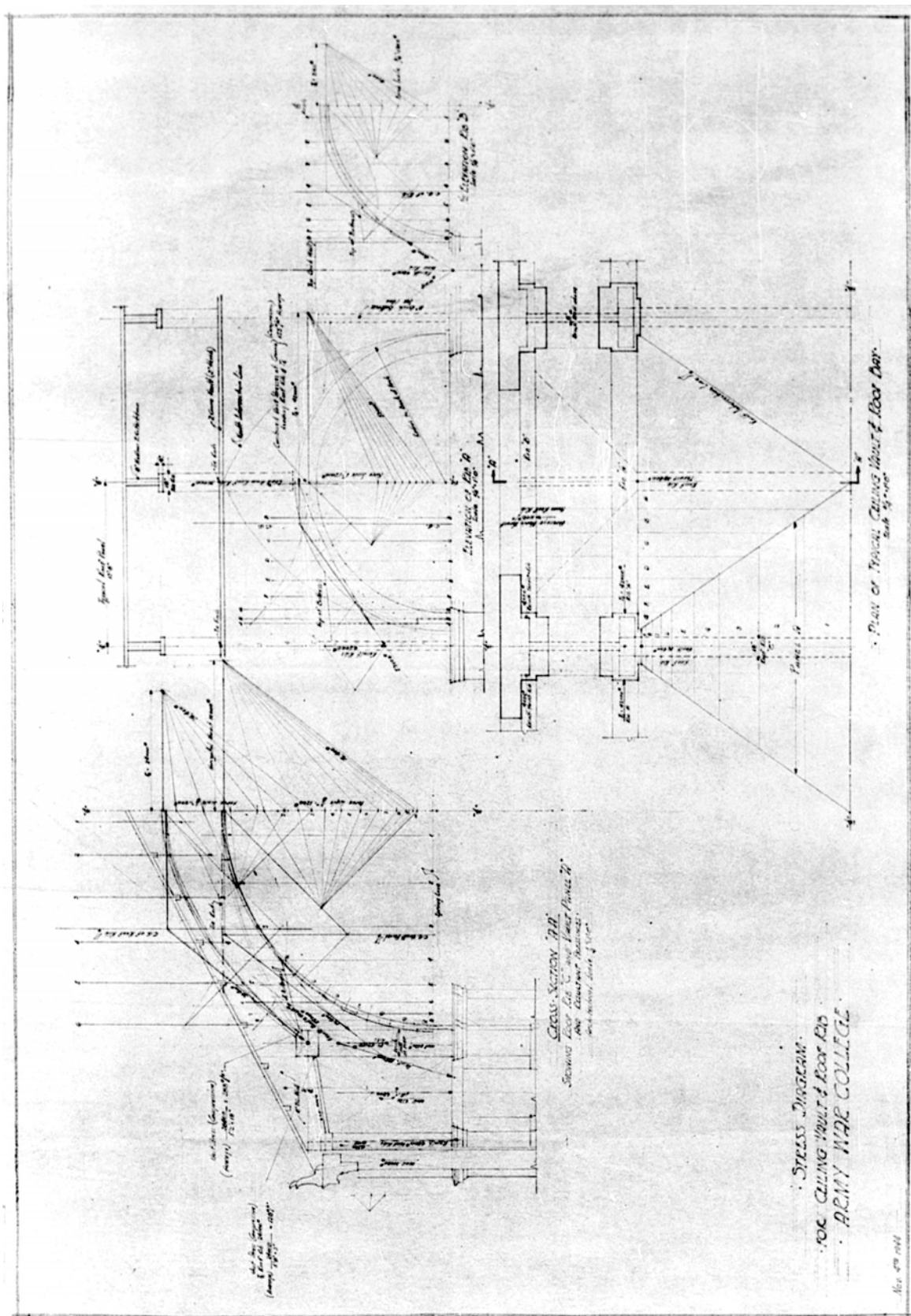


Figura 7.26. Análisis de equilibrio, empleando el método de los cortes, de una bóveda de arista del Army War College. El plano está fechado en 1944.

7.4.1.b. Bosch Reitg 1949

Cambiando de país y de contexto, se estudia ahora el método de análisis de bóvedas tabicadas propuesto por Bosch Reitg, arquitecto que desarrolló la mayor parte de su obra en Gerona, donde construyó numerosos edificios empleando bóvedas tabicadas.

El artículo de Bosch Reitg en que detalla este método de cálculo es «La bóveda vaída tabicada». Está escrito en la misma época y con los mismos condicionantes que el de Luis Moya (ver apartado 7.3.4.b de esta tesis): la posguerra española, momento en que se vuelven a utilizar las bóvedas tabicadas por ser una estructura muy económica y que necesitaba poco acero.

Dentro de esta idea de construcción barata, Bosch defiende que el doblado de la bóveda es innecesario. Pero las bóvedas de Bosch, aunque no están dobladas (en el sentido de tener varios gruesos de ladrillo sobrepuestos) son de dos hojas: la propia bóveda y la solera superior, conectadas por tabiquillos. Se forma así una sección hueca muy resistente.¹⁹ Como ventajas aduce Bosch la ligereza de esta construcción y la mejor aplicación del cálculo elástico: al tener una sola hoja, la composición es más uniforme y resulta más real que el módulo de elasticidad sea un valor único y constante.

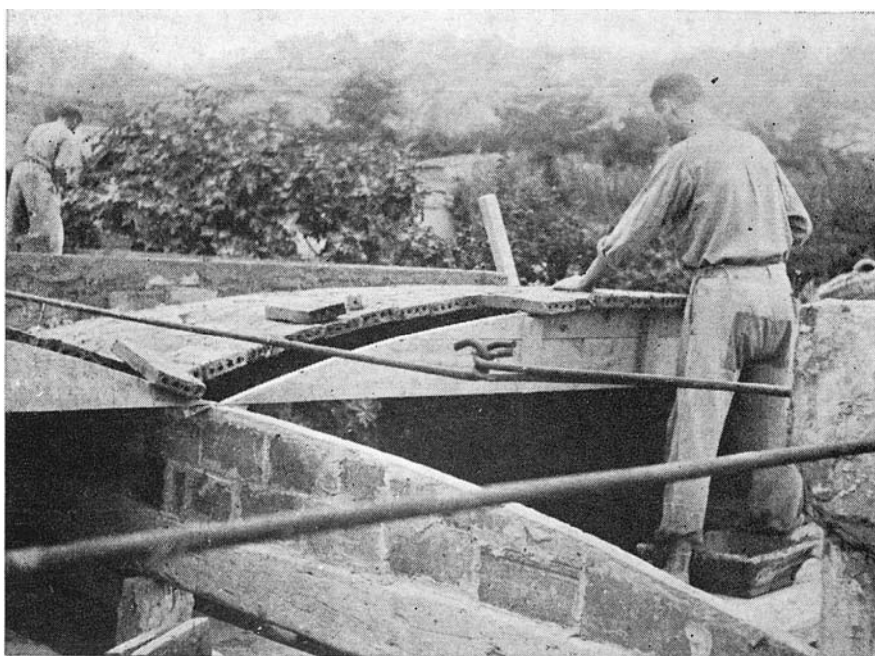
Defiende también las bóvedas de doble curvatura por su mayor resistencia a cargas asimétricas. Entre ellas elige, por su facilidad de construcción, lo que llama bóveda baída, aunque en realidad no lo es: Bosch propone construirlas desplazando una cimbra de perfil circular rebajado sobre un arco del mismo perfil, ver figura 7.27, de manera que la bóveda no sería una esfera cortada por cuatro planos.²⁰

¹⁹ Este tipo de construcción tabicada es tradicional en la arquitectura barroca de Valencia, donde encontramos numerosos ejemplos de grandes cúpulas tabicadas, formadas por dos hojas únicas separadas por un espacio intermedio. A este respecto se puede consultar Soler, 2012.

²⁰ En Bosch (1949) el autor llama específicamente baídas al tipo de bóvedas que construye. En Cabrera, Sala y Jordi (2005) se les llama *voltes de quatre punts*. En Chamorro y Llorens (2012), baídas. En cualquier caso, las diferencias geométricas son mínimas y el método de construcción propuesto por Bosch Reitg facilita mucho la construcción con albañilería, que no necesita la forma esférica para unificar el corte de las dovelas como ocurre en las bóvedas de cantería.

Esta geometría de bóvedas debía ser habitual en Cataluña desde tiempo atrás: en Ballesteros (1869) ya se habla de ellas: « Para una bóveda esférica o elipsoidal, según sea el espacio que hay que cubrir

En 1949 la teoría elástica (ver apartado 7.5. de esta tesis) ya está muy desarrollada y Bosch cree en la posibilidad de aplicarla a las bóvedas tabicadas. Así lo cita en numerosos puntos de su artículo, «Al principio se intentó resolver el cálculo de bóvedas tabicadas asimilándolas a sistemas dovelados, obteniendo resultados totalmente negativos» (Bosch 1949, 190). Recoge el artículo de Bayó (1910), con la posibilidad de que el funicular de las cargas esté fuera del arco, y cómo dimensionar un arco de espesor variable en función de la separación entre su línea media y el funicular. También recoge las investigaciones de Terradas asimilando una escalera tabicada a una placa curva. Y cita a otros autores europeos que están desarrollando cálculo elástico de estructuras de geometrías complejas.²¹



cuadrado o rectangular, se colocan dos cerchas iguales en cada uno de dos muros paralelos del espacio de que se trate, las cuales marcan la curva sección paralela a dichos muros; a lo largo de ellas se va corriendo otra cercha colocada en un plano perpendicular a las primeras o sea paralelo a los otros dos muros y que tienen la curva sección en este sentido (...) Con esta construcción se ve desde luego que la figura de las bóvedas no resulta ni esférica ni elipsoidal, pero forma una superficie curva en todos sentido s que presenta buen aspecto y toda solidez deseable, particularmente si se escojen para las cerchas curvas adecuadas al objeto»

²¹ Todos estos artículos se estudian en el apartado 7.5 de esta misma tesis, dedicado al análisis elástico de bóvedas tabicadas.

Figura 7.27. Construcción de una bóveda tabicada de doble curvatura como las propone Bosch Reitg: desplazando una cimbra circular muy rebajada a lo largo de un arco del mismo perfil (Bosch 1949, 187)

Pero cuando Bosch propone su propio método para calcular estas bóvedas tabicadas se da cuenta de que ninguno de los anteriormente expuestos es aplicable en la práctica:

Todo cuanto hemos indicado nos da idea de lo complejo del cálculo exacto de estas bóvedas, al cual, por su misma complicación, llegaríamos a soluciones poco prácticas, con sistemas de integrales dobles, reñidas con el espíritu práctico que ha de prevalecer en la técnica arquitectónica (Bosch 1949, 193)

Bosch propone la aplicación del método de los cortes, dividiendo la bóveda en fajas curvas concéntricas al perímetro (ver figura 7.28). Estudia cada faja por separado y luego transmite la reacción a las diagonales, que llevan la carga hasta los pilares. Este modelo casa mal con el modelo elástico y Bosch es consciente de ello:

es preciso hacer constar que (...) no es sistema que pueda admitirse en el cálculo exacto (...). Sin embargo, no con el deseo de escamotear la teoría de la elasticidad, sino facilitar prácticamente el cálculo, es lo que nos mueve a plantear así el problema, cuyos resultados conforman perfectamente con la práctica experimental (Bosch 1949, 193-96)

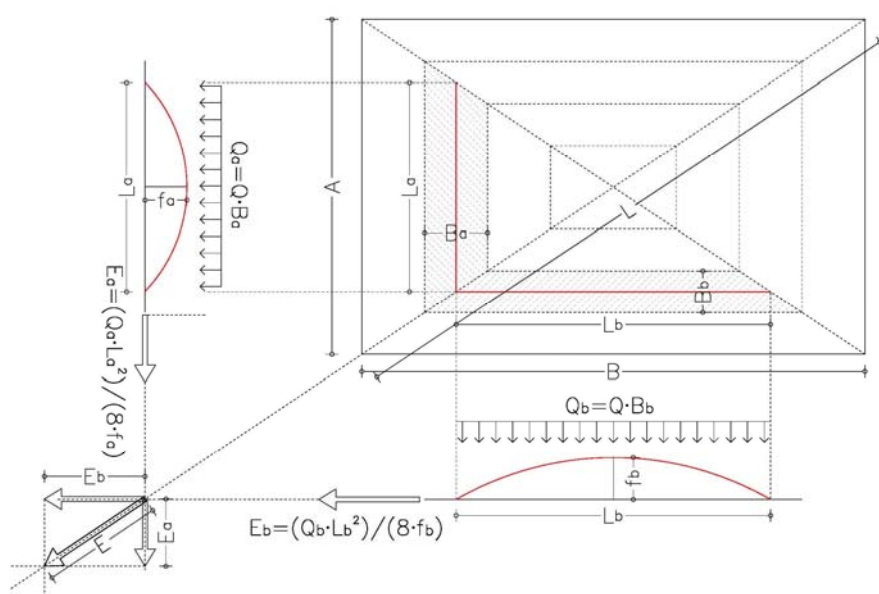


Figura 7.28. Esquema de cálculo propuesto por Bosch para una bóveda «baída» tabicada: división en fajas, valor de los empujes parciales y composición del empuje total sobre la diagonal

El método de cálculo que propone Bosch es el siguiente:

Como trabaja con arcos circulares muy rebajados, los asimila a un arco parabólico y obtiene su empuje por la fórmula del mismo:

$$E = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f}$$

Particularizando la fórmula del empuje parabólico para las fajas concéntricas en que Bosch divide la bóveda, obtenemos los dos empujes de cualquier faja intermedia, representada por el arco que puede dibujarse en su eje, de luces L_a y L_b (figura 7.28)

$$E_a = \frac{Q \cdot B_a \cdot L_a^2}{8 \cdot f_a}$$

$$E_b = \frac{Q \cdot B_b \cdot L_b^2}{8 \cdot f_b}$$

Siendo Q la carga superficial en la bóveda, B_a y B_b los anchos de las fajas, L_a y L_b las «luces» de los arcos en el eje de cada faja y f_a , f_b las flechas de esos arcos.

El empuje parcial de cada arco-faja lo lleva a las diagonales. Para que el empuje final E esté orientado según la dirección de la diagonal, es preciso que la relación entre los empujes E_a y E_b sea la misma que entre los lados de la planta A y B ($E_a/E_b = A/B$)

Además, hay una relación de proporcionalidad directa entre A y L_a con B y L_b ($L_a/A = L_b/B$) e inversa con los anchos de las fajas ($B_a/B = B_b/A$). Sustituyendo estas relaciones geométricas en las fórmulas de los empujes parciales E_a y E_b , se obtiene que para que se cumpla la relación que permite que el empuje final E vaya por la diagonal ($E_a/E_b = A/B$), es preciso que las flechas f_a y f_b sean iguales.

Esto se consigue con el método constructivo que propone Bosch, dos cimbras iguales que se desplazan una sobre otra (ver figura 7.27), de manera que puede calcularse de manera muy rápida el empuje final sobre los cuatro apoyos con la fórmula siguiente:

$$E = \frac{Q \cdot A \cdot B \cdot L}{2 \cdot 8 \cdot f}$$

Siendo Q la carga superficial en la bóveda, A y B sus lados, L la luz del arco diagonal y f la flecha común a todos los arcos (ver figura 7.28)

En las bóvedas que propone Bosch en su artículo, este empuje total se lo llevan unos tirantes de acero que se colocan en el perímetro de la bóveda (a la altura de los arranques en los casos habituales o por encima de la clave si se quieren dejar ocultos), dimensionados para trabajar a 1200 kg/cm^2 (120 N/mm^2). El pilar de apoyo (una sección del muro) trabaja entonces a sólo a compresión centrada, de manera que para una bóveda tipo de $3 \times 5 \text{ m}$ de planta y cargas habituales en viviendas, es suficiente una superficie de muro de ladrillo de $15 \times 15 \text{ cm}$. Bosch considera una resistencia máxima de la fábrica de ladrillo de 15 kg/cm^2 ($1,5 \text{ N/mm}^2$).

Y, aunque no lo cita, también es importante el efecto rigidizador de los tabiquillos y la solera superior, formando una sección hueca, de cerámica, armada donde aparecen tracciones.²² Es interesante cotejar el modelo de cálculo que propone Bosch (arcos concéntricos a los lados que llevan el empuje a las diagonales) con la disposición de tabiques conectores, que sigue exactamente ese esquema, ver figura 7.29.

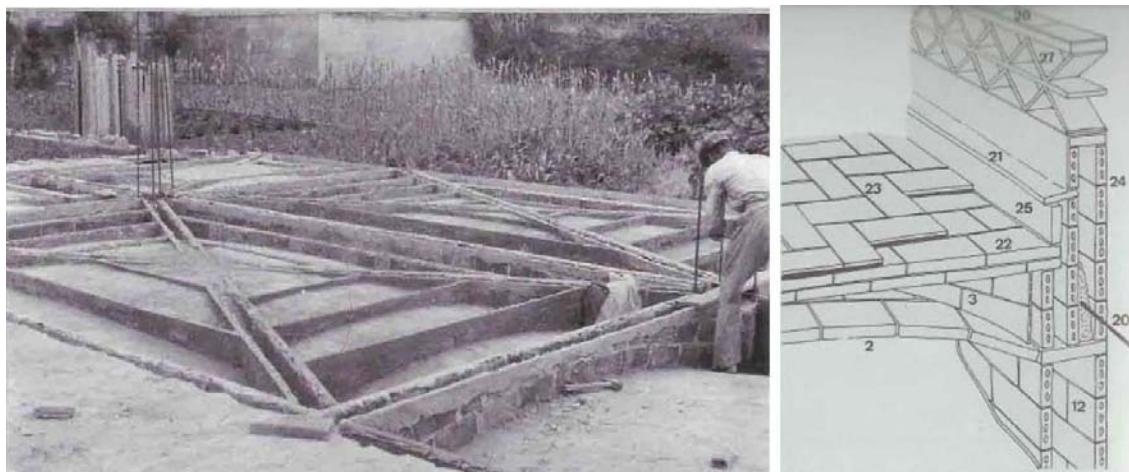


Figura 7.29. A la izquierda, fotografía de la ejecución de una bóveda tabicada en dos hojas, con la hoja inferior y los tabiquillos que la conectan con la hoja superior plana, todavía sin construir (Cabrera, Sala y Jordi 2005, 89) y a la derecha, esquema de la doble hoja con el tirante de hierro, oculto en el muro para contrarrestar los empujes (Cabrera, Sala y Jordi 2005, 34)

²² La posibilidad de resistir cualquier carga puntual asimétrica en un arco de trasdós horizontal ya fue enunciada por Guastavino en 1893, ver apartado 7.3.3. de esta tesis.

El método que propone Bosch sirve para obtener el empuje sobre los apoyos, y dimensionar tirantes y muros de apoyos. En lo que se refiere a la propia bóveda, confía en que la forma de la línea de empujes sea parabólica y por tanto, contenida en el espesor de la forma de las bóvedas que construye, circulares y muy rebajadas. Pero esto sólo es cierto en el caso de carga uniforme. Dado el bajo peso propio de las estructuras tabicadas, habrá otras hipótesis. Para hacer frente a ellas, Bosch confía en la doble curvatura de las bóvedas baídas:

Los problemas que en cuanto a cargas asimétricas se presentan en el empleo de sistemas ultraligeros, justifica que fijemos la atención en las bóvedas de doble curvatura o cupulares, por quedar prácticamente anulados (...) Igualmente ocurre con las posibilidades del pandeo (Bosch 1949, 186)

El artículo de Bosch profundiza aún más en la contradicción citada en el análisis del artículo de Martorell (1910). Lo que en Martorell era la construcción cohesiva y la resistencia a tracción del ladrillo, 40 años después se ha convertido en la teoría elástica, que el autor considera la verdadera manera de calcular las bóvedas tabicadas. Pero como no tiene herramientas para calcularlas así, utiliza las líneas de empujes, la «vieja teoría» como la llama Goday (ver apartado 7.5 de esta tesis), en la práctica.

7.4.2. *La teoría de la membrana*

El análisis de membrana consiste en buscar una solución de equilibrio²³ con los esfuerzos (de compresión y de tracción) contenidos en la superficie media de una cáscara, de manera que no aparecen momentos flectores ni esfuerzos cortantes.

Que exista o no esta solución de equilibrio depende de las cargas, de los apoyos y sobre todo, de la geometría de la cáscara. Normalmente existe en las superficies de doble curvatura. Para cáscaras de revolución, como las cúpulas, existe, y podemos definir dos familias de fuerzas: las meridianas (N_φ) y las paralelas (N_θ), que equilibran cualquier elemento de la estructura, ver figura 7.30.

²³ El análisis de membrana es una solución de equilibrio, al igual que las líneas de empujes y el método de los cortes, porque no tiene en cuenta datos acerca del material que forma la estructura ni hace hipótesis sobre sus deformaciones.

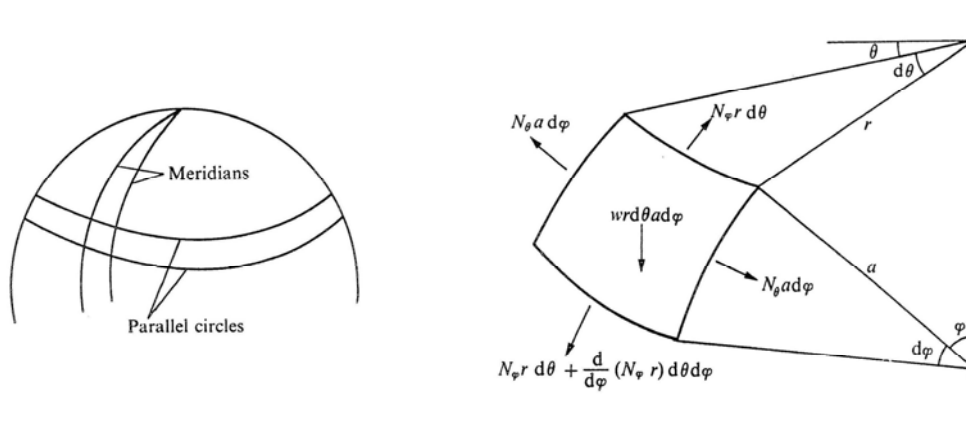


Figura 7.30. Izquierda: Fuerzas meridianas y paralelas en una superficie de revolución. Derecha: equilibrio de un elemento infinitesimal de la superficie aplicando la teoría de la membrana: fuerzas contenidas en la superficie media (Heyman 1977, 9)

El primero en enunciarla fue Rankine, en 1858, desarrollando un método analítico aplicado a cúpulas de revolución. Poco después, en 1866, Schwedler desarrolla un método, también analítico para aplicar la teoría de la membrana a cúpulas de barras (Huerta 2001, 99)

Pero el análisis de membrana se populariza, al igual que ocurre con las líneas de empuje, cuando se desarrollan métodos gráficos de cálculo, más sencillos de aplicar.

El análisis de membrana, mediante procedimientos gráficos, se utilizará en la primera mitad del siglo XX para analizar cúpulas tabicadas, la mayoría de las cuales se construyen esféricas y rebajadas.

Frente al método de los cortes que se estudia en el apartado anterior, la teoría de la membrana implica un comportamiento bidireccional de la estructura, representado por las familias de fuerzas meridianas (N_φ) y paralelas (N_θ).

En el caso usual de una cúpula esférica, ya no se comporta como una serie de gajos inconexos sino como una superficie (ver figura 7.31). La solución de equilibrio en membrana (fuerzas contenidas en la superficie media de la esfera), requiere la colaboración de los paralelos en compresión en la zona superior de la cúpula y en tracción en la zona inferior. El punto en el que se pasa de paralelos comprimidos a traccionados está a unos 52° del eje, como puede deducirse de todos los análisis gráficos que se estudian a continuación.

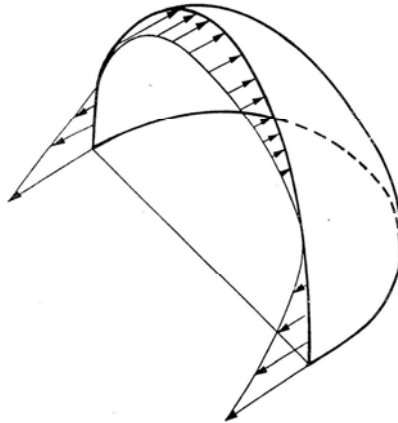


Figura 7.31. Comportamiento superficial de una cúpula siguiendo la teoría de la membrana (Heyman 1977, 106)

7.4.2.a. Eddy 1878

En 1878, Eddy es el primero en proponer un método gráfico de análisis de membrana, aplicado a cúpulas esféricas y cónicas de metal y a cúpulas esféricas de fábrica. El método propuesto para la última es muy diferente ya que la solución de membrana para una cúpula semiesférica implica que las fuerzas paralelas son de tracción a partir de un ángulo de unos 52° desde la vertical. Esto no es posible en fábrica salvo que se coloquen tirantes de metal en esta zona.

La figura 7.32 reproduce la imagen con la que Eddy explica su método.

En el dibujo están sobrepuestos los análisis para una cúpula de metal, que resiste tracciones y para una cúpula de fábrica, que no las resiste. Para las primeras utiliza el polígono de fuerzas de la derecha: la vertical ab es el peso de un gajo de la cúpula, dividido en 8 partes. Las fuerzas meridianas siguen el eje de la cúpula ($a-a_1-a_2 \dots -a_8$) y su intensidad se mide sobre el esquema de la derecha, a la escala de fuerzas elegida: $a-s_1$, $a-t_1$, $a-s_2$, $a-t_2$, hasta $a-s_8$, son siempre de compresión; las fuerzas paralelas se miden sobre el mismo esquema, son las horizontales d_1-s_1 , t_1-y_1 , s_2-x_2 , t_2-y_2 hasta s_8-d_8 .

Empiezan siendo de compresión, de valor decreciente. Para un ángulo de $51^\circ 49'$ estas fuerzas paralelas se hacen 0 y a partir de ahí, adoptan un valor creciente de tracción.

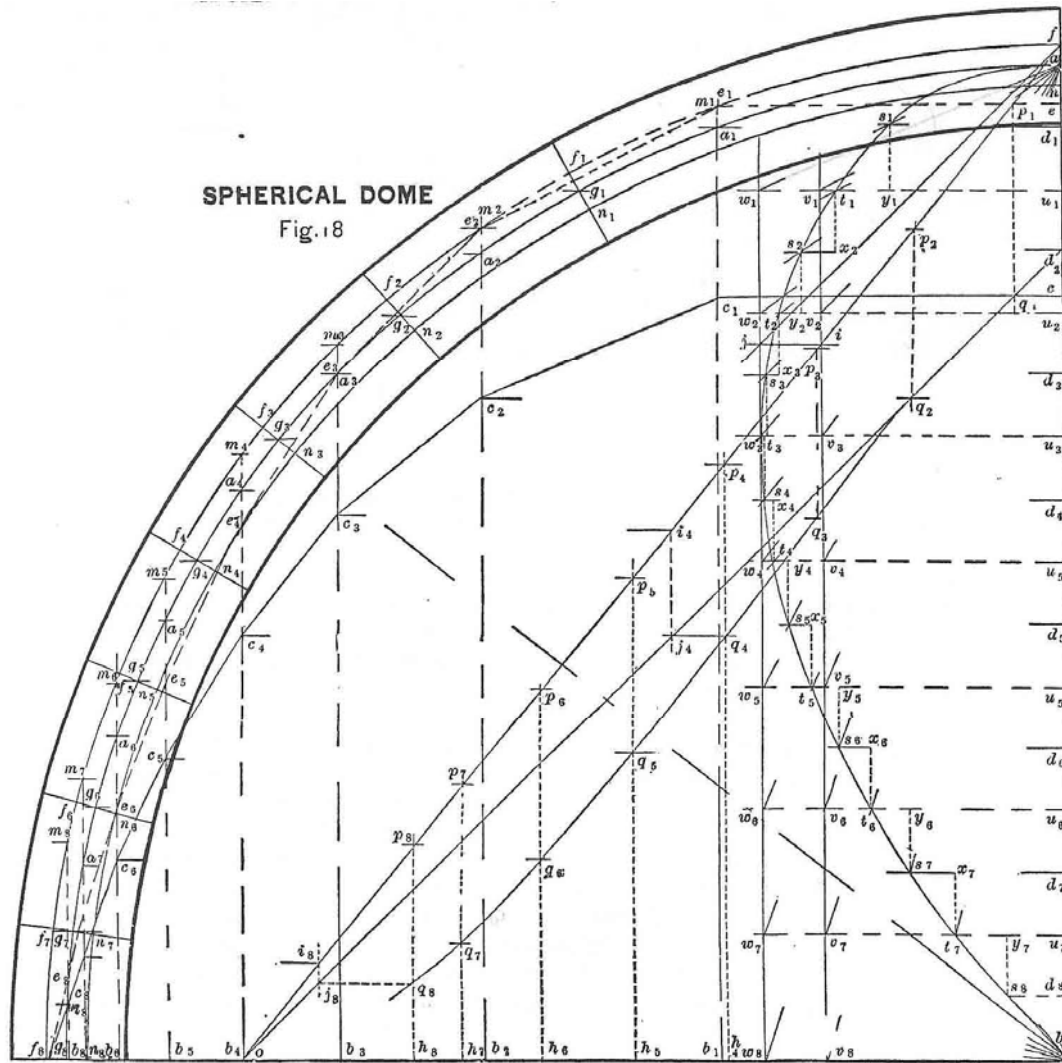


Figura 7.32. Método gráfico de Eddy para analizar una cúpula semiesférica siguiendo la teoría de la membrana (Eddy 1878, 54)

Una cúpula semiesférica construida con un material que resista tracciones no deja empujes sobre los arranques, sólo una carga vertical. Si la cúpula no es un semicírculo completo, sí produce un empuje sobre los apoyos, que será máximo en el punto en que las fuerzas meridianas se hacen 0 ($51^{\circ} 49'$ desde la vertical) y puede medirse en el polígono de fuerzas de la derecha: es la distancia desde la vertical de los pesos ab hasta la curva $a-s_1-t_1-\dots-b$.

El polígono de fuerzas representa el equilibrio de un gajo de la cúpula. Lo que se mide en horizontal es el empuje radial R . Para obtener el valor de la fuerza paralela T , se emplea la relación entre R con r (radio de la circunferencia) y T con l (longitud del arco que abarca el gajo en planta).

$$T = \frac{R \cdot r}{l}$$

Si el ángulo de apertura en planta del gajo es $57,3^\circ$, esta relación es 1 y las fuerzas meridianas pueden medirse directamente en el polígono de fuerzas, ver figura 7.33 izq.

Para otros ángulos, se puede hacer una proporción, ver figura 7.33.der.

Y si se utiliza el peso de la circunferencia completa, la relación entre radio y longitud total es $1/6,28$, de manera que puede obtenerse la fuerza paralela T dividiendo el empuje radial correspondiente al peso total entre $6,28$

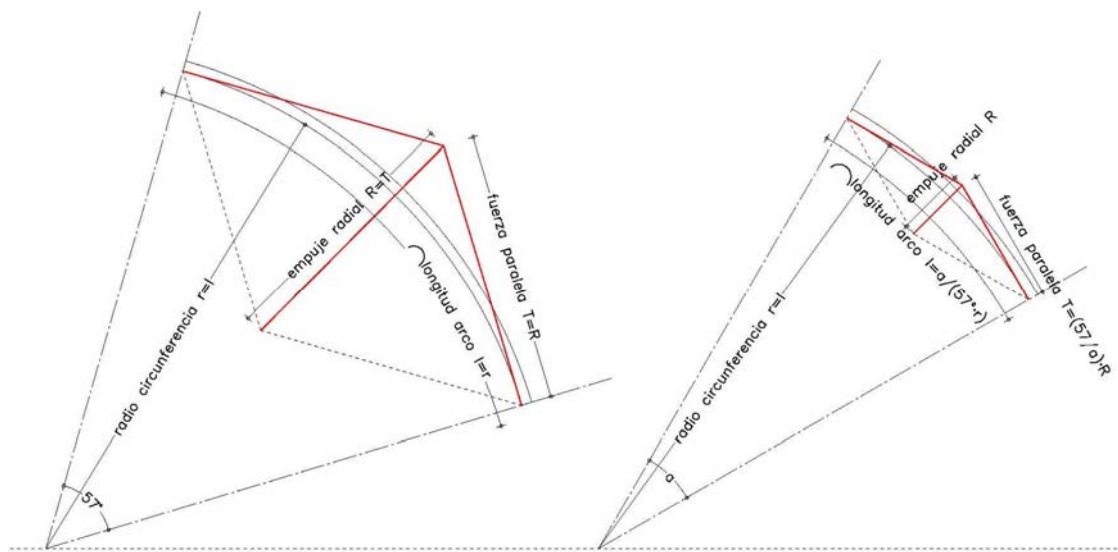


Figura 7.33. Relación entre empuje radial E y fuerza paralela T en un gajo de cúpula. A la izquierda, para un gajo de $57,3^\circ$, valor para el que $E=T$. A la derecha, relación para cualquier otro ángulo.

El proceso para calcular una cúpula de fábrica es completamente distinto, ya que también lo es el comportamiento del material: «Below the point when the compression vanishes we shall not assume that the bond of the masonry is such that it can resist the hoop tension which is developed» (Eddy 1878, 57).

El método gráfico que propone Eddy es bastante farragoso, el esquema es:

- Traza una línea de empujes $c-c_8$ partiendo de f_8 (punto exterior del tercio central en los arranques) y con una distancia polar correspondiente al empuje máximo que produce la cúpula analizada como una membrana: la vertical de los pesos se traslada a w_1-w_8 , tangente a la curva $s_1-t_1-s_2-t_2-b$.

- A partir de esta línea de empujes, se traza otra análoga pero contenida en el tercio central de la cúpula, al menos en la zona inferior, en la que las fuerzas paralelas son 0; además debe ser el de empuje mínimo, para cumplir con el principio de mínima resistencia. La nueva línea de empujes es la e_1-e_8 , que se sale del tercio central sólo en la zona superior, donde hay compresiones paralelas. Y el empuje es menor que el inicial: la vertical de los pesos se traslada a v_1-v_8 .

Por tanto, la cúpula puede trabajar como una serie de arcos separados desde e_1 hasta los arranques. Desde a hasta e_1 tiene un comportamiento bidireccional, con ayuda de las compresiones paralelas.

El método propuesto por Eddy para analizar cúpulas de fábrica parte de las premisas del análisis de su época: las posibles líneas de empujes deben estar contenidas en el tercio central de la fábrica para que el arco sea seguro y la línea de empujes *verdadera* es la que produce el mínimo.²⁴

7.4.2.b. Dunn 1904

En 1904, Dunn escribe su conocido artículo «Notes on the stresses in framed spires and domes». En él reproduce el método de Eddy para calcular cúpulas que resistan tracciones. Tanto el texto como las figuras son más claros y aplicados, lo que hizo muy popular este análisis, ver figura 7.34.

Sobre las construcciones gráficas de Eddy (figura 7.32) y Dunn (figura 7.34) puede medirse la fuerza radial pero no la que sigue la dirección de los paralelos de la cúpula (que es para la que se dimensionaría un tirante de acero en caso de tracciones). Para medir esta fuerza paralela haría falta usar la fórmula $T=R \cdot r/L$, explicada anteriormente, o usar una construcción gráfica similar a la de la figura 7.33. En Dunn (1904) aparece una construcción gráfica en la que pueden medirse fuerzas radiales y paralelas, aplicada específicamente a una cúpula de barras, en la que la planta no es una esfera sino un polígono de «n» lados: las fuerzas paralelas se obtienen a partir de las radiales y pueden medirse en la parte superior del dibujo.

²⁴ Agrupando así las teorías de Méry (tercio central) y Scheffler (empuje mínimo).

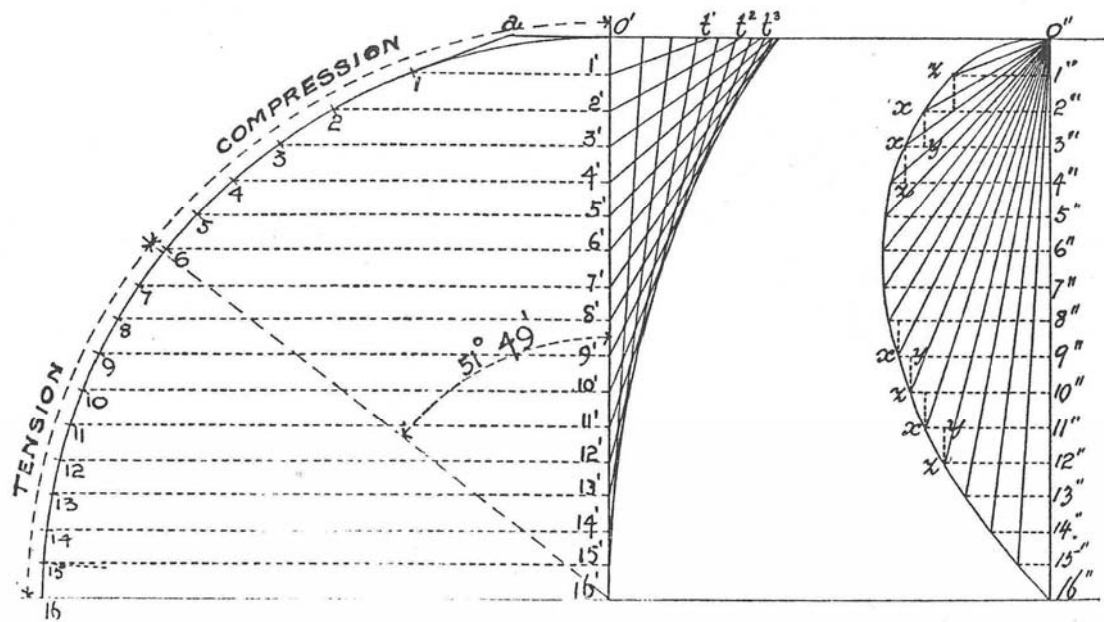
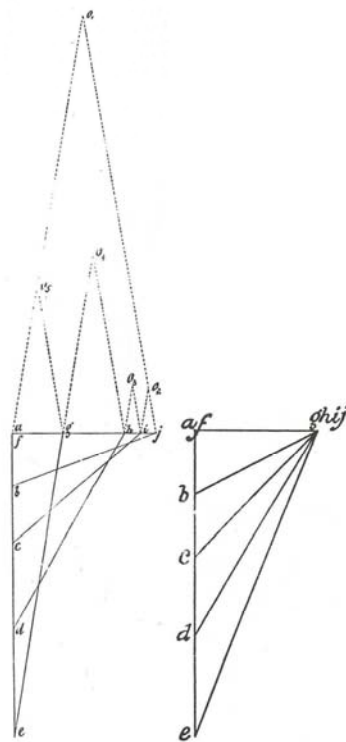


Figura 7.34. Construcción gráfica propuesta por Dunn para analizar, siguiendo la teoría de la membrana, cúpulas que resisten tracciones. El dibujo de la derecha es el mismo que propone Eddy. A la izquierda a parece el polígono de fuerzas, con los pesos en la vertical, las fuerzas radiales (que pueden transformarse en paralelas, ver figura 7.33) en la horizontal y las fuerzas meridianas en las inclinadas, siguiendo la tangente a la cúpula en cada corte (Dunn 1904, 404)



10. It will readily be seen that the loads might be so arranged that all the stresses in the rings, except in the top and bottom rings, would disappear, the stress diagram taking the form shown in fig. 9; or the form of the dome, if the loads were fixed, might be so varied as to produce the same result. Such a dome would be maintained by the united action of the ribs acting as simple arches. The stress diagram shows also that an alteration in any load has no effect upon the ribs or rings above it.

Figura 7.35. Método gráfico propuesto por Dunn para analizar una cúpula de barras. El texto incluido en la figura explica como modificar el polígono de fuerzas inicial (Fig. 8, a la izquierda) para que no aparezcan fuerzas siguiendo los paralelos (Fig. 9, a la derecha) (Dunn 1904, 403)

Y aunque este artículo de Dunn está dedicado a cúpulas que resisten tracciones además de compresiones: «The results (...) are assemed by some writers to apply to stone domes of considerable thickness; but they are only correct for thin domes of material capable of resisting tension and compresion» (Dunn 1904, 405), en la construcción gráfica de la figura 7.35 se apunta la manera de modificar la dirección de las fuerzas meridianas para que no aparezcan tracciones según los paralelos, de manera que podría aplicarse a una estructura de fábrica.

Este método de análisis gráfico que propone Dunn en 1904 es ampliada por W.S. Wolfe, profesor de la universidad de Illinois, en su libro «Graphical Analysis» (1921), ver figura 7.36.

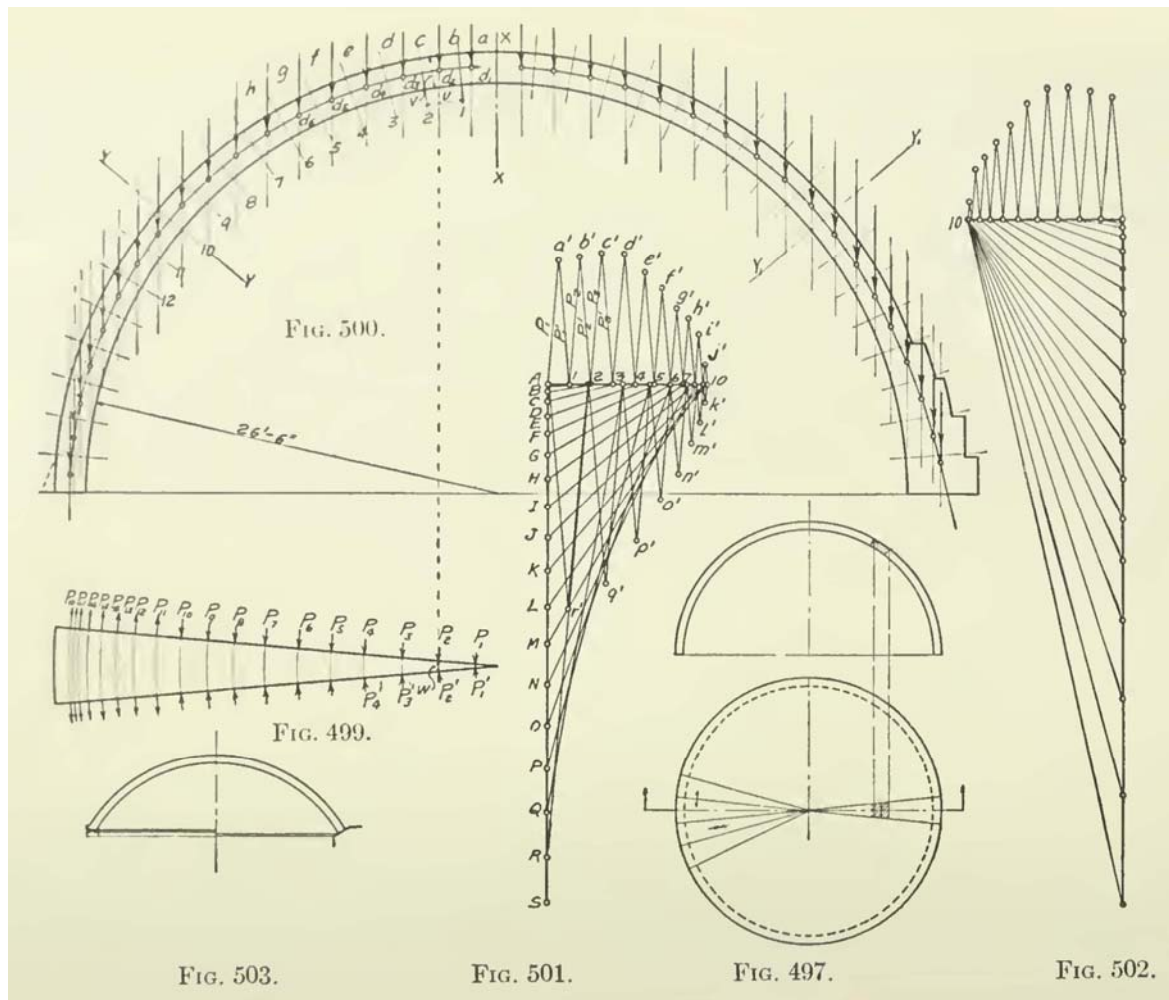


Figura 7.36. Método gráfico propuesto por Wolfe en 1921 para analizar cúpulas según la teoría de la membrana. A la izquierda de la figura 500 y en la 501 se dibuja el procedimiento para cúpulas de un material que resista tracciones; a la derecha de la figura 500 y en la figura 502, lo mismo para una cúpula que no resista tracciones.

Para realizar el análisis gráfico, se divide la cúpula en planta una serie de gajos (ver Fig. 497 y 499 en figura 7.36). A partir de esta división, Wolfe distingue dos análisis: para cúpulas que resisten tracciones (mitad izquierda de la Fig. 500 y Fig. 501 en figura 7.36) y para los que no las resisten (mitad derecha de la Fig. 500 y Fig. 502 en figura 36). En las cúpulas que resisten tracciones, el método gráfico es el mismo que propone Dunn en 1904 (ver figura 7.34 y 7.35): las fuerzas meridianas siguen la dirección de la tangente a la circunferencia en cada punto; las paralelas son perpendiculares al ángulo del corte del gajo y se dibujan sobre el mismo polígono de fuerzas que las meridianas. Estas fuerzas paralelas al inicio son de compresión (hacia arriba en el polígono de fuerzas) y luego de tracción (hacia abajo), llegando a equilibrar el empuje si la cúpula es una semiesfera completa.

En las que no resisten tracciones, dibuja fuerzas paralelas sólo donde son de compresión. A partir del punto en que se hacen 0 salen, en el polígono de fuerzas, el resto de fuerzas meridianas, que dejan de ser tangentes a la línea media de una esfera, de manera que hay que aumentar el grosor o cambiar la forma de la cúpula para que la línea de empujes no se salga de la fábrica.

7.4.2.c. *Dunn 1908*

En 1908 Dunn escribe un nuevo artículo dedicada a cúpulas de fábrica, a las que atribuye distinto funcionamiento al no resistir tracciones:

Concrete, stone and brick are not well adapted for resisting tensile stress, and if the dome below the point of zero stress cannot supply the necessary resistance on the meridian planes it splits into separate segments, lune shaped, which act as a series of radiating arches stressed on the upper and lower beds only (Dunn, 64)

El artículo está dividido en dos partes, en la primera se hace un repaso histórico de las cúpulas: romanas, renacentistas, etc. En la segunda se citan varios ejemplos de las cúpulas construidas por los Guastavino en América, siendo este artículo la primera aplicación concreta del análisis de membrana a cúpulas tabicadas.

Entre las cúpulas construidas por los Guastavino, hace referencia a la que cubre el vestíbulo del Bi-Centennial Building de la universidad de Yale, ver figura 7.37, muy

rebajada, de manera que siguiendo un análisis de membrana está comprimida en toda su superficie y empuja sobre los apoyos.

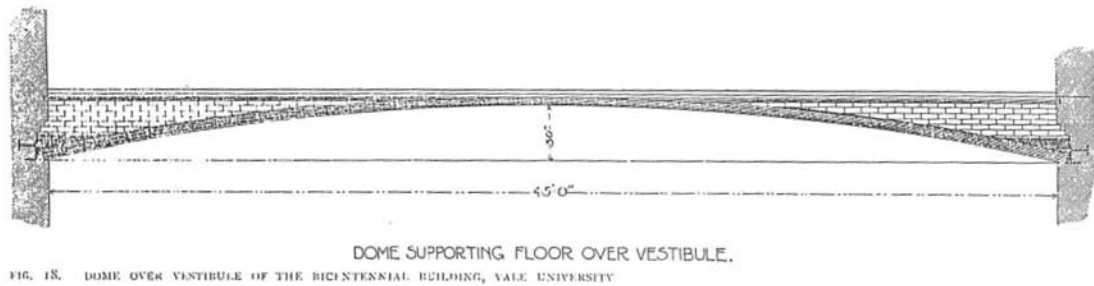


Figura 7.37. Cúpula sobre el vestíbulo del Bi-Centennial Building de la Universidad de Yale, construida por los Guastavino . 45 ft. de luz (unos 13,50 m) y 2 ft. 6 in de flecha (75 cm, $L/18$), (Dunn 1908, 109)

Así describe Dunn el comportamiento de esta cúpula:

It covers a circular room 45 ft. in diameter, and the dome has a rise of 2 ft. 6 in. only. With such a large span and small rise the tile arch is in compression on all meridian and parallel sections, and the tie in steel at the support has to take the whole thrust, which constantly increases from the crown to the tie (Dunn 1908, 108)

Para calcular el empuje que debe soportar el tirante inferior, propone un sencillo esquema, ver figura 7.38, que es una parte de las construcciones gráficas anteriores, pero sobre la que solo se dibuja el empuje final: ab es la fuerza meridiana y ac la paralela, es decir, la tracción que debe resistir el tirante. Para que esta tracción pueda medirse directamente sobre el dibujo, es necesario que ab se refiera a un gajo de cúpula de $57,3^\circ$ ($1/6,2832$ del total), como ya explica Dunn en su anterior artículo (1904)

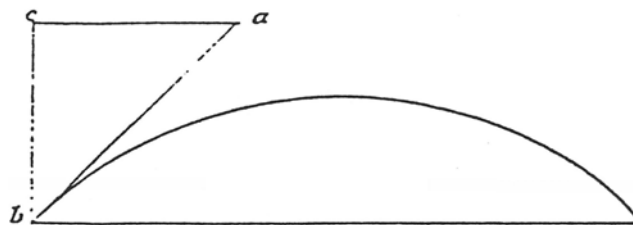


Figura 7.38. Esquema gráfico para obtener el empuje sobre el tirante en la bóveda de la figura 7.36. (Dunn 1908, 70)

El texto de Dunn es muy sencillo de entender y no desarrolla ningún método de cálculo, pero denota un perfecto comportamiento de las cúpulas de fábrica: En la parte final del artículo reflexiona sobre cómo puede conseguirse que una cúpula no tenga que resistir tracciones:

It is possible to modify the stresses in domes by either varying the shape or by varying the loading. For instance in the dome of Fig. 3 [una cúpula esférica] he might so alter the shape or curvature of the part beloww the point of zero stress or the weight of that part by increasing the thickness or using a heavier material that there would be no stresse on the meridians. The trust at the point of zero stress would continue constant to the base, when it could be taken up by a tie or by the abutment (Dunn 1908, 112)

También es el primero en afirmar que en una cúpula semiesférica sometida a su propio peso, la tensiones son proporcionales al radio:

Whatever the thickness of the shell of a closed hemispherical dome, or of a dome of less than a hemisphere in section, the unit stresses –the stresses per square inch- are the same for the same radius. If we increase the thickness in any case, we increase the load in the same proportion, so that increasing the thickness does not increase the strenght, unless to resist casual loads (Dunn 1908, 111)

Los Guastavino, a los que Dunn cita con frecuencia en este artículo, utilizan los métodos propuestos por Dunn para el análisis de sus delgadas cúpulas tabicadas, como se estudia a continuación.

7.4.2.d. Los Guastavino

Los principales «aplicadores» de la teoría de membrana a cúpulas tabicadas fueron los Guastavino, especialmente el hijo. Rafael Guastavino Moreno muere en 1908, momento en que su hijo Rafael Guastavino Expósito se hace cargo de la empresa. En ese mismo año publica Dunn su artículo, en el que describe algunas cúpulas de los Guastavino y afirma que pueden obtenerse los empujes en ellas siguiendo el método que describe en su artículo anterior (Dunn, 1904): «The stresses in these tile domes may be calculated by the method given in my paper in the *Transactions of the Royal Institute of British Architects* before referred to» (Dunn 1908, 111).

En el archivo Guastavino/Collins de la Universidad de Columbia se conservan numerosos dibujos de cálculo que emplean análisis de membrana para cúpulas trabajando sólo a compresión o soportando tracciones con ayuda de refuerzos metálicos. Estos planos abarcan un periodo de tiempo largo: desde 1904 (para la cúpula de St. John the Divine, en Nueva York) hasta 1947 (para el Supreme Court Building de Tallahasee, Florida)

Son muy interesantes dos dibujos que muestran un procedimiento genérico para analizar una cúpula de 100 pies (30,5 m) de luz:

El primero (ver figura 7.39) es la misma construcción gráfica que encontramos en Dunn (1908) para una cúpula esférica.

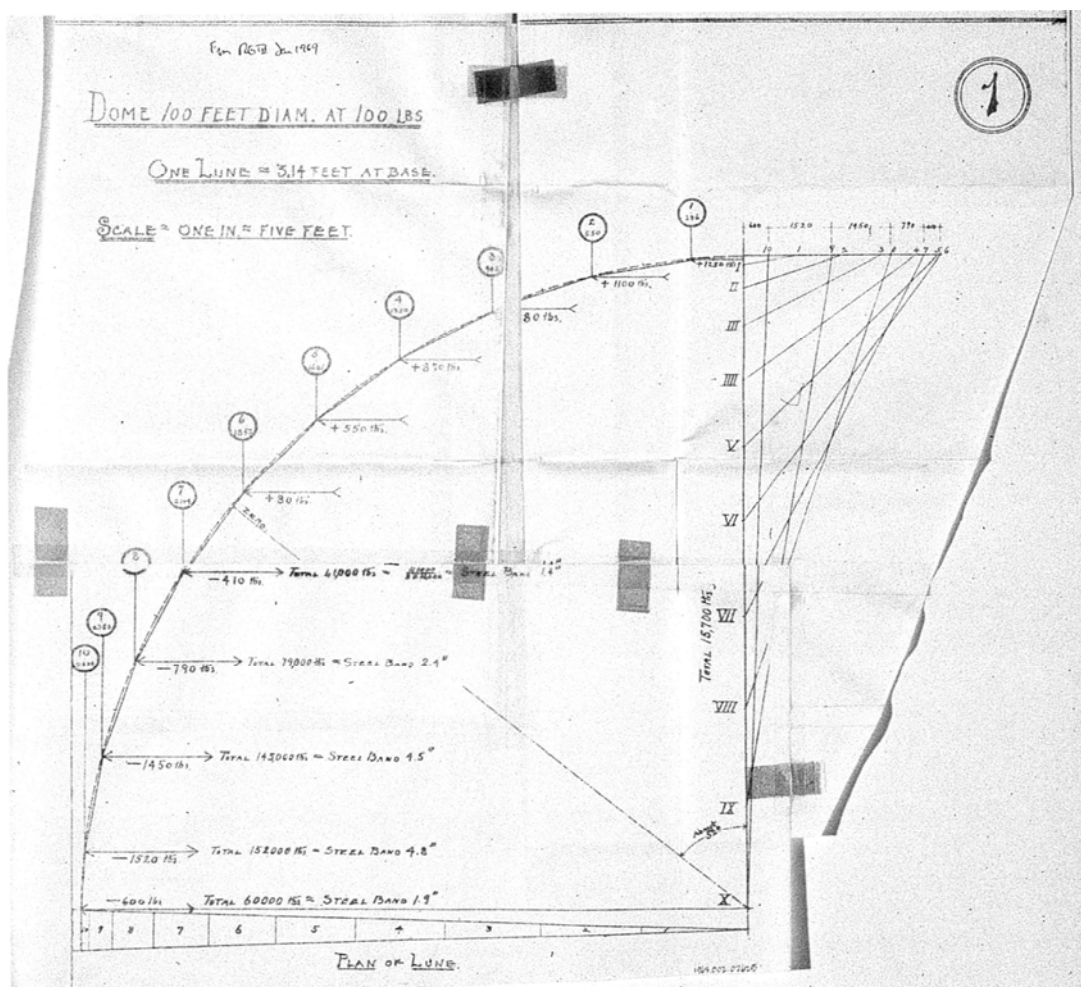


Figura 7.39. Análisis genérico de membrana para una cúpula de 100 pies de diámetro. Se marca el ángulo de 52°; a partir de él aparecen tracciones según los meridianos y se colocan sucesivos anillos de acero para resistirlas. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

Se indica el gajo que se analiza, que corresponde a 1/100 total (3,14 pies para una cúpula de 100 pies de diámetro=314 pies de longitud). Sobre la vertical se indican los pesos de cada porción de cúpula analizada; las rectas inclinadas son las fuerzas meridianas, siempre de compresión; en horizontal se indica el empuje radial R, que empieza siendo de compresión; se marca también el ángulo de 52° desde la vertical, para el que es 0, a partir de ahí aparecen tracciones.

En el dibujo no se indica ninguna comprobación relativa a las fuerzas de compresión, ni la meridianas ni las paralelas en la zona superior de la cúpula. Es de suponer que la resistirá la fábrica, pero no se indica espesor necesario. Pero a partir del punto en que los empujes radiales comienzan a ser de tracción sí se calculan las secciones de acero necesarias para resistirlas:

Como el empuje radial que se dibuja sobre el polígono de fuerzas corresponde a 1/100 de la cúpula, lo multiplica por 100 para obtener el empuje radial de toda la cúpula (máximo 1520 lbs. $\times 100 = 152000$ lbs., 690 kN). A partir de este valor, obtiene unas pletinas de acero para resistirlos. En el cálculo faltan algunos pasos intermedios, ya que a partir de las fuerzas radiales habría que obtener las paralelas (dividiendo por 6,28 el empuje radial total de la cúpula) y un área de acero a partir de ella. En cualquier caso, hay una proporcionalidad directa entre el tamaño propuesto para las pletinas y la fuerza que deben resistir.

El segundo dibujo (ver figura 7.40) muestra un análisis idéntico hasta el punto de aparición de tracciones según los paralelos. A partir de ahí, se mantienen en 0 cambiando la dirección de las fuerzas meridianas, que dejan de coincidir con la superficie media de una esfera.

Este dibujo es una modificación del anterior (la cúpula tiene la misma geometría y los mismos pesos), sobre el que se cambia la trayectoria de las fuerzas para que no aparezcan tracciones. Se dibujan sobrepuestas las dos trayectorias de fuerzas: la BC es la del dibujo anterior, con forma circular; la BA es la curva que consigue que no aparezcan fuerzas (ni de tracción ni de compresión) a partir del ángulo de apertura de 52° que también se indica en el dibujo. Ambas curvas son coincidentes hasta ese punto.

Este dibujo es un proceso de diseño de la forma que debe tener una cúpula sin tracciones. Esta es la más interesante de las soluciones empleadas en sus esbeltas bóvedas de ladrillo tabicado, que aplicarán en numerosos edificios.

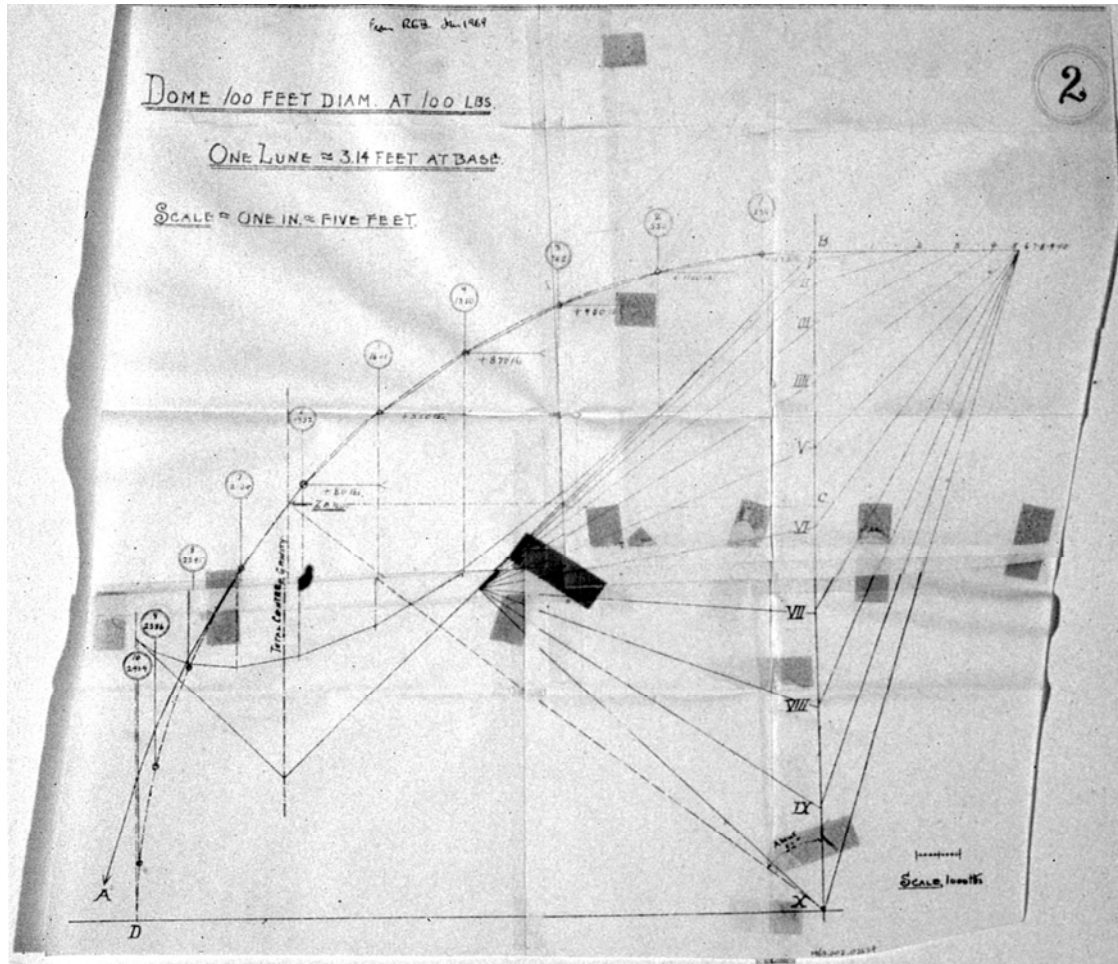


Figura 7.40. Análisis genérico de membrana para una cúpula de 100 pies de diámetro sin tracciones. A partir del ángulo de 52° se modifica la forma para que las fuerzas según los paralelos sean 0, según el polígono de fuerzas de la derecha. Así no aparecen tracciones. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

Además de plantear estos análisis genéricos, los Guastavino los aplican en muchos de los edificios que construyen. La solución más sencilla es emplear cúpulas esféricas rebajadas, con un ángulo de apertura menor de 52° , de manera que no aparecen tracciones manteniendo la forma circular –más sencilla de construir– y sin añadir refuerzos metálicos en la cúpula. Estas cúpulas rebajadas dejan un importante empuje sobre los apoyos, que se contrarresta con un único anillo metálico en el arranque.

Así es el análisis para la iglesia Tenth Church of Christ Scientist, en Chicago (ver figura 7.41). Se analiza en este dibujo un gajo de $1/20$ de la cúpula, para el que se obtienen las cargas debidas al peso propio. La cúpula no es de espesor constante: tiene 3 hojas de ladrillo en la zona superior y 4 en la zona inferior.

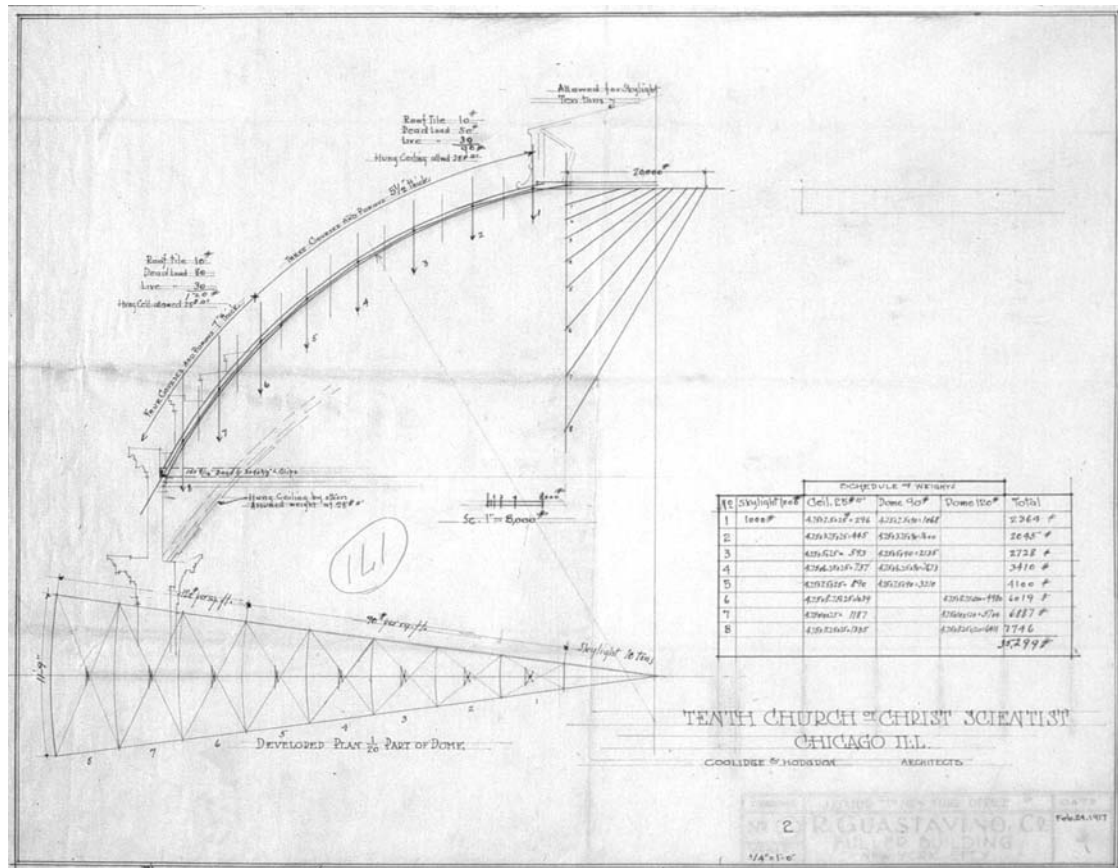


Figura 7.41. Análisis gráfico para una cúpula esférica rebajada en la iglesia Tenth Church of Christ Scientist, de Chicago. Plano fechado en 1917. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

Es una superficie esférica, con un solo centro que se indica en el propio dibujo. El radio es 12,6 m, la luz 22,6 m y el ángulo de apertura es 64° . A partir de los 52° deberían aparecer tracciones según los paralelos, pero en el polígono de fuerzas se ve que sólo hay compresiones. Aunque la apertura es algo mayor de los estrictos 52° , la línea de empujes (del peso propio) está contenida en el espesor de la superficie sin tracciones porque, a partir del punto de aplicación del peso 7 (que coincide aproximadamente con el ángulo de apertura de 52°) deja de ser una circunferencia separándose un poco de la superficie media pero sin salirse del espesor.

Si la cúpula debe ser semiesférica y muy esbelta, la única solución es colocar anillos de acero en la zona inferior, siguiendo los paralelos. Así se construye la cúpula del American Museum of Natural History, en Nueva York (ver figura 7.42)

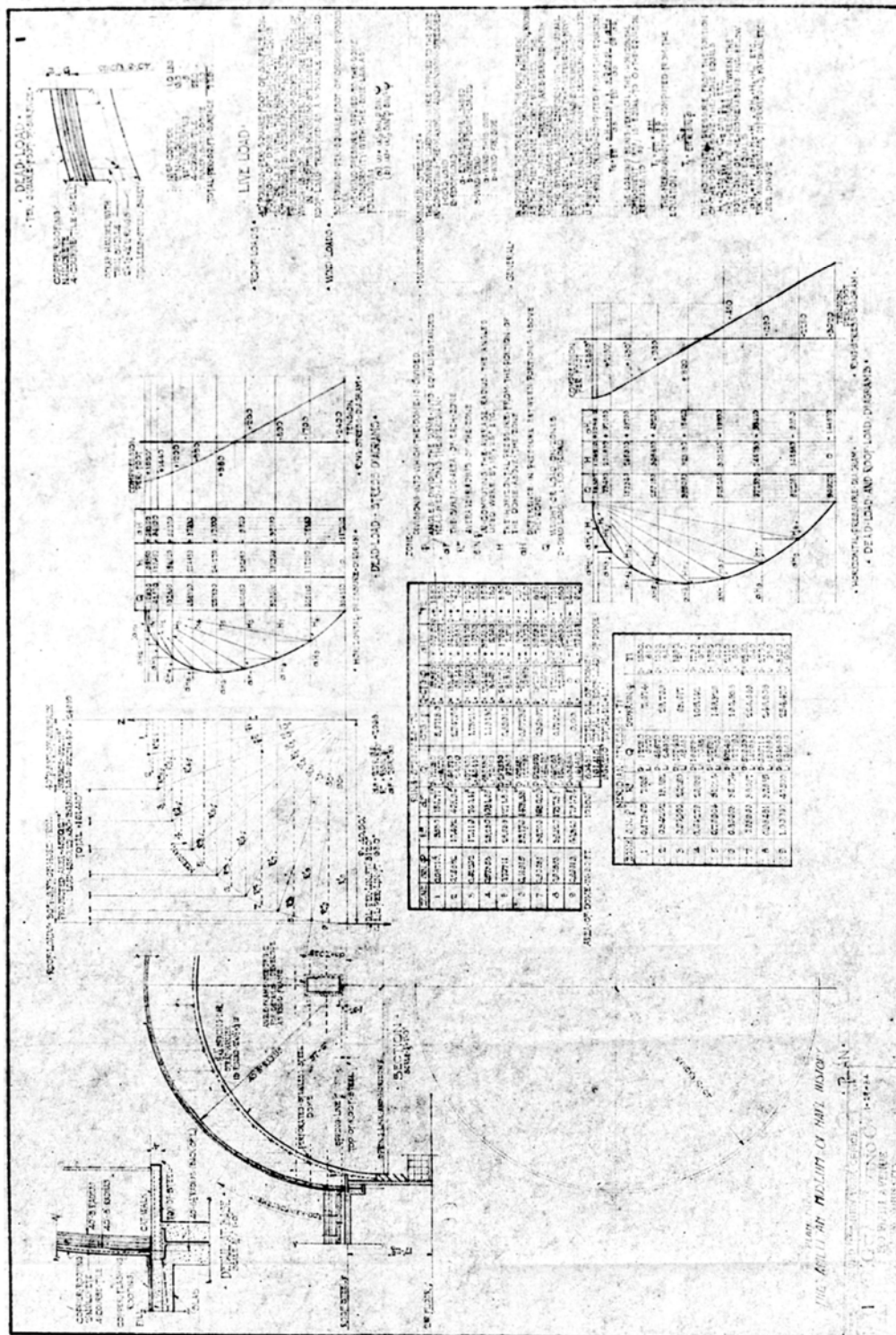


Figura 7.42. Análisis de membrana de una cúpula semiesférica en el American Museum of Natural History. Plano fechado en 1934. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

Otra forma de evitar (o al menos reducir) la aparición de tracciones en las cúpulas es hacer más pesada la zona inferior. En la figura 7.43 se reproduce un análisis gráfico para la cúpula del Supreme Court Building de Tallahassee, en Filadelfia. Es una cúpula rebajada, de radio 23 pies (6,96 m) y luz libre 38 pies (11,50 m); el ángulo de apertura es 75° . A partir del punto en que aparecen tracciones según los paralelos si se sigue un análisis de membrana (así se representa en el polígono de fuerzas adjunto al dibujo de la cúpula) la cúpula se regresa. Esto hace que, manteniendo la línea de empujes en la superficie media (membrana), las tracciones según los paralelos sean menores.

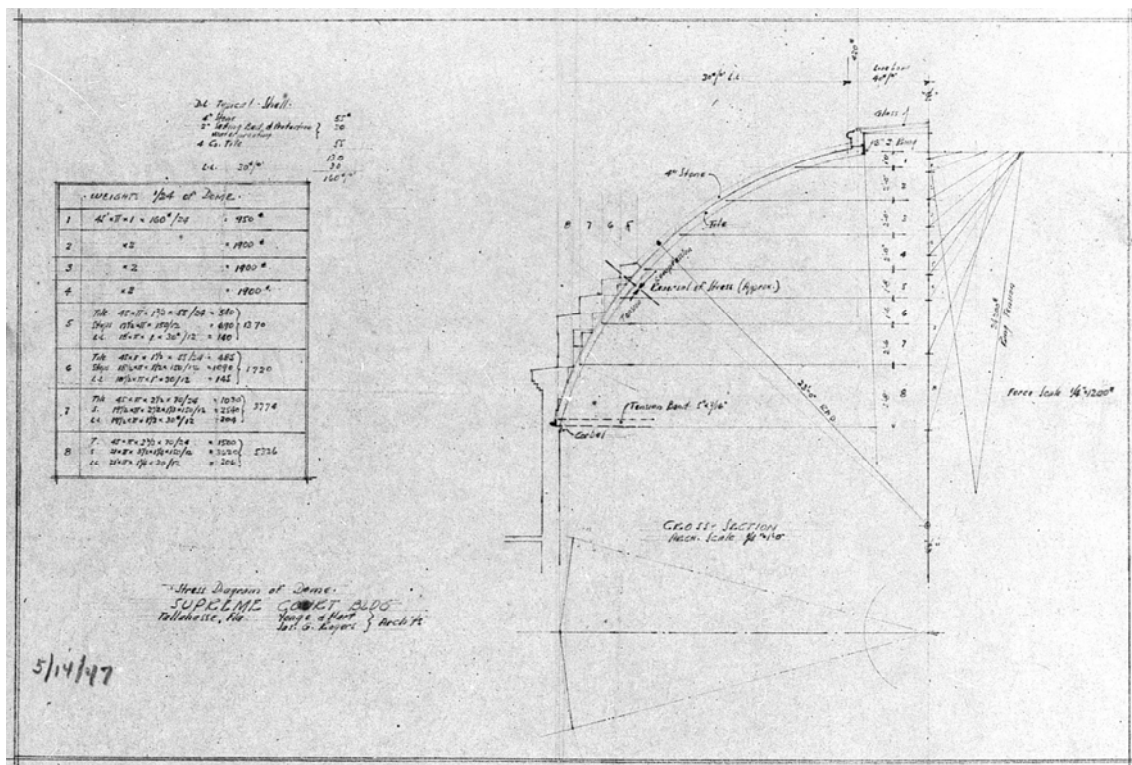


Figura 7.43. Análisis de membrana para la cúpula del Supreme Court Building en Tallahassee. Plano fechado en 1947. La zona inferior de la cúpula se regresa para incrementar el peso y reducir las tracciones según los paralelos. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

También el mayor grosor permite que la línea de empujes pueda estar contenida con más holgura en el interior de la fábrica sin tracciones en los paralelos, para lo que tiene que dejar de ser circular. En el dibujo no está representada la línea de empujes considerada por los Guastavino así que no es posible saber cual de las dos posibilidades se elige (siguiendo la superficie media hasta abajo o perdiendo esta superficie media y sin tracciones). En cualquier caso, se coloca un tirante en la zona inferior de la cúpula.

Pero la solución más novedosa de las empleadas por los Guastavino es adaptar la forma de la zona inferior de la cúpula para que no aparezcan las tracciones sin regruesar las cúpulas. El método es sistemático, como lo demuestra el análisis genérico de la figura 7.40, y además se aplica a numerosos edificios, como la cúpula del edificio para la Girard Trust Company (ver figura 7.44)

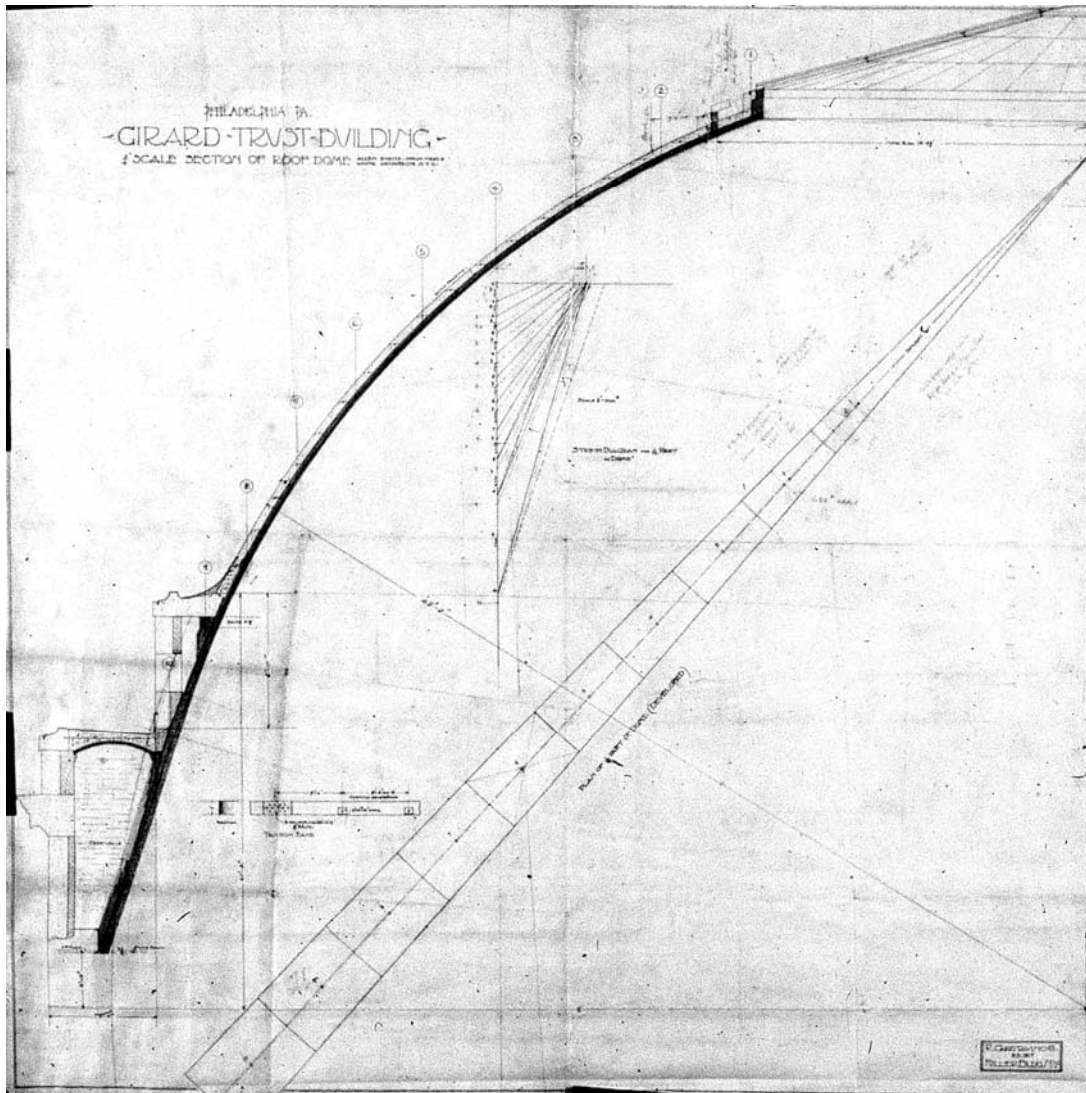


Figura 7.44. Análisis gráfico para la cúpula del Girard Trust Company. Plano fechado en 1931. (Archivo Guastavino/Collins, U. Columbia)

Esta cúpula es ligeramente rebajada (ángulo de apertura 87°), el radio es de 48 pies (14,5 m). Sobre el dibujo se ha medido una luz libre de 30 m y un espesor de 10 cm, así que la relación radio/espesor es 160. Es esférica en la zona superior, hasta un ángulo de apertura de unos 70° . De ahí hacia abajo se modifica la forma de la cúpula, que deja de

ser esférica y se adapta a la trayectoria de las fuerzas sin tracciones según los paralelos (la línea de empujes de un gajo de cúpula). Además, se añade peso para que esta trayectoria se separe menos de un arco de círculo. A pesar de todas estas operaciones, se colocan bandas de acero en la zona inferior de la cúpula, como se especifica en el propio dibujo.

Como resumen de los métodos de cálculo empleados por los Guastavino, a la vista de sus escritos y de los planos conservados en el archivo Guastavino/Collins de la Universidad de Columbia.

- Rafael Guastavino Moreno (el padre) había aprendido en Barcelona el sistema tabicado. Conocía las medidas habituales de bóvedas y muros y también sabía que era importante construir lengüetas y rellenar los senos. En su formación académica (estudió en la Escuela de Maestros de Obras con Juan Torras) es probable que aprendiera procedimientos de cálculo de equilibrio en un plano, mediante líneas de empuje. En su libro, escrito en 1893, mezcla estos conocimientos previos con resultados de ensayos realizados ya en Estados Unidos y con algunas consideraciones acerca de la elasticidad de las bóvedas. Pero en sus planos se reflejan cálculos por equilibrio, utilizando líneas de empuje (ver figuras 7.13, 7.14 y 7.15)

- Al menos a partir de 1904 y casi hasta el cierre de la empresa emplean análisis gráficos bidireccionales, basados en la teoría de la membrana, para el cálculo de sus cúpulas. En estos análisis, y a pesar del concepto de cohesión que atribuye Guastavino padre a las bóvedas tabicadas en sus escritos, asumen que la fábrica tabicada sólo resiste compresiones, colocando refuerzos metálicos cuando es necesario para resistir las tracciones y adaptando la forma de las cúpulas a la línea de empujes de un gajo de cúpula, sin colaboración de los paralelos, cuando no se van a colocar refuerzos.

7.4.2.e. España

Algunos autores españoles analizan las bóvedas tabicadas empleando la teoría de la membrana, aunque al igual que ocurre con las líneas de empuje, con unos cuantos años de retraso: Juan Bergós en 1945 y Bassegoda Musté en 1947 y 1952

Juan Bergós 1945

Juan Bergós fue arquitecto, profesor de construcción en la Escuela del Trabajo de Barcelona y discípulo de Gaudí, al que conoció en sus años de estudiante en Barcelona. Escribió varios libros de construcción, en todos ellos habla de bóvedas tabicadas, un sistema constructivo todavía habitual en Cataluña en la época que escribe.

Como otros autores anteriores, Bergós cita el análisis elástico de manera teórica al referirse al cálculo de bóvedas tabicadas. En *Formulario Técnico de Construcciones* (1936), un libro teórico en que Bergós hace un repaso a distintos elementos estructurales y a la forma de calcularlos encontramos el siguiente texto:

Dada la elasticidad notable que poseen los arcos y bóvedas tabicados, se aplican a todos ellos las fórmulas de flexión de vigas curvas (...) suponiéndolas articuladas, o a lo más semiempotradas, por sus extremos.

Con mayor motivo se aplican los métodos de cálculo de piezas curvas elásticas a las bóvedas tabicadas armadas (Bergós 1936, 414)

Pero en 1945 publica *Construcciones urbanas y rurales*, un libro en el que explica, de manera mucho más práctica, como ejecutar algunos elementos de construcción. En lo que se refiere a bóvedas tabicadas, detalla como comprobar la estabilidad de una cubierta esférica tabicada y la de una bóveda de escalera.

La cúpula esférica la analiza siguiendo la teoría de la membrana, ver figura 7.45. Como es muy rebajada –la flecha es 1/8 de la luz, y el ángulo de apertura 29°– está comprimida en todos sus puntos. En el borde inferior calcula un zuncho metálico en L para recibir el empuje total de 752 Kg.

Bergós sigue un proceso de cálculo similar a los descritos por los autores americanos: obtiene las fuerzas meridianas y el empuje radial midiendo en el polígono de fuerzas; a partir del empuje radial (R) obtiene las fuerzas paralelas (T) como $T=R \cdot l/r$. En la cúpula todas estas fuerzas son de compresión, y obtiene las tensiones en la fábrica dividiendo por el área transversal. Repite la operación para el zuncho de acero inferior, traccionado. Como tensiones admisibles de los materiales emplea: 4 kg/cm² (0,4 N/mm²) para el ladrillo y 600 kg/cm² (60 N/mm²) para el acero.

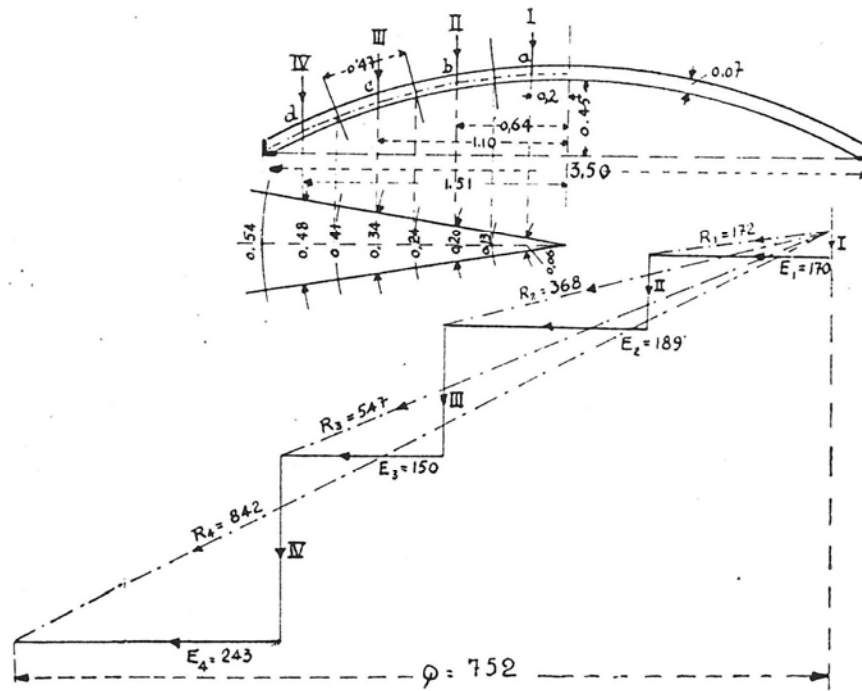


Figura 7.45. Comprobación de estabilidad para una cúpula esférica tabicada, empleando análisis de membrana (Bergós 1945, 317)

Bassegoda Musté 1947

Buenaventura Bassegoda y Musté, arquitecto y profesor de la escuela de Arquitectura de Barcelona, escribe hacia 1950 varios artículos acerca de las bóvedas tabicadas, transcripciones de discursos y conferencias pronunciados en la academia de Ciencias y Artes de Barcelona y en otras instituciones

Escribe dos artículos relativos al funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas, el primero en 1947: «La bóveda catalana» y el segundo en 1952 «Bóvedas tabicadas»

En su peculiar estilo, a veces difícil de entender, habla de la manera de abordar el cálculo de una bóveda tabicada. Repasa lo escrito sobre el tema hasta el momento, siendo bastante crítico con los autores franceses que defienden la falta de empujes de las estructuras tabicadas y el problema que supone el yeso:

Es el dogma de la época. La bóveda de concreción no exige contrarresto (...) La ponderosa cúpula del Panteón de Agripa sería la magnífica tapadera monolítica, que no castiga a empujón perpetuo los muros de apoyo; (...). La realidad es muy otra. La bóveda *no duerme nunca*, es una vieja paremia oriental.

(...) Era tan halagüeña la eliminación de ese grave morbo (...) que los maestros dieciochescos no titubearon en achacar sus daños al mortero de yeso.

(...) No carguemos tanto al singular chivo expiatorio (...); poco ha de influir el ligero aumento de volumen del yeso al cristalizar (Bassegoda Musté 1947, s.p.)

También estudia la aplicación de la teoría elástica a arcos y bóvedas tabicadas, que se ha desarrollado desde 1910, con la que tampoco está de acuerdo, tanto por la consideración de la resistencia a tracción: «La idea de la resistencia de las fábricas a tracciones significaba buscar pan de trastrigo y no pudo prosperar» (Bassegoda Musté 1952, 13), como por la dificultad de establecer las propiedades elásticas del material:

¿Cómo establecer un módulo de elasticidad constante en materiales heterogéneos y además, tan variables en sus características respectivas según las vicisitudes de su fabricación y puesta en obra? Admitir la ley de Hooke en las fábricas equivale a liarse la manta a la cabeza (Bassegoda Musté 1947, s.p.)

Bassegoda Musté propone una solución de equilibrio, pero, consciente de la delgadez de las bóvedas tabicadas:

El triunfo de la Grafostática en el estudio de las bóvedas de cantería indujo a la aplicación de curvas de presiones a las concretas y a las tabicadas. Más, en estas últimas, nos sudaba el hopo al intentar encerrar en el parvo espesor de la fábrica latericia el antifunicular de las cargas concentradas.

El estupor ante tamaña rebeldía engendró la superstición del trasgo milagrero que (...) toma a su cargo la resistencia a tracciones en el material incapaz de soportarlas (Bassegoda Musté 1952, 12)

Llega a la conclusión de que tienen un funcionamiento bidireccional, para lo que se apoya en la forma de las grietas que se forman en ellas. Así que el método de cálculo propuesto es la teoría de la membrana, que es la que se está aplicando en la época en que escribe Buenaventura Bassegoda para las superficies de hormigón. Y las tracciones que se producen en zonas concretas de cúpulas y bóvedas, siguiendo este modelo de cálculo se contrarrestan colocando acero. Por ejemplo, para el caso más conocido de una cúpula semiesférica:

El cálculo no puede ser más sencillo (...): compresiones según ambas líneas de curvatura, que son aquí meridianos y paralelos, pero en éstos van menguando con la latitud, hasta anularse y convertirse en tracciones, que deben ser contrarrestadas por zunchos o por tentemozos, si no queremos que el cascarón se raje (Bassegoda Musté 1952, 14)

7.5. Análisis elástico de bóvedas tabicadas: el enfoque de la resistencia

Numerosos autores aplican, al menos desde un punto de vista teórico, el análisis elástico a las bóvedas tabicadas. Además del contexto que se explica debajo (apartado 7.5.1.), que llevó a aplicarla en cualquier estructura de fábrica, el desarrollo de la teoría monolítica de Espie, convertida en construcción cohesiva por Rafael Guastavino Moreno (ver apartado 7.2) extendió la creencia de que las bóvedas tabicadas tienen un comportamiento muy distinto al resto de fábricas, incluso que resisten tracciones, por lo que un análisis elástico sería más adecuado para ellas que para otras estructuras de fábrica.²⁵

Otros autores obtienen los esfuerzos dentro de la bóveda mediante análisis de equilibrio pero después obtienen tensiones en la sección suponiendo una distribución elástica, de doble triángulo, aunque con distintos valores máximos para compresión y tracción.

Pero si analizar un arco dentro del marco elástico es difícil en los primeros años del siglo XX, debido al complejo proceso matemático que conlleva, analizar una bóveda de geometría compleja es imposible. Así lo reconocen la mayoría de los autores, que siguen aplicando métodos de equilibrio en la práctica, como se ha visto en algunos ejemplos de los apartados 7.3 y 7.4 de esta tesis, aunque de manera teórica enuncian la teoría de la elasticidad como la más adecuada. Se estudian a continuación estos autores, precedidos por un breve desarrollo de cómo la teoría elástica empieza a aplicarse a los arcos de fábrica en general.

7.5.1. La aplicación de la teoría elástica a los arcos de fábrica

Conocida la teoría y los métodos gráficos de aplicación expuestos en el apartado anterior se obtiene fácilmente una línea de empujes pero ¿cómo saber si era la

²⁵ El discurso de la aplicación o no del cálculo elástico a las estructuras tabicadas siempre está mezclado con la posibilidad de resistir tracciones. Es razonable, ya que para poder aplicar un análisis elástico de manera más o menos sencilla es necesario un material homogéneo, tanto en lo referido al módulo de elasticidad como a la resistencia a compresión y tracción. Actualmente hay programas informáticos de análisis que permiten hacerlo con distintas resistencias, pero son muy recientes (ver Huerta 2008)

verdadera? Este asunto preocupaba a los ingenieros de final del siglo XIX y se emplearon distintos métodos para despejar la incógnita: Scheffler aplica el principio de mínima resistencia enunciado por Moseley en 1833: siguiendo esta teoría, la línea real es la que produce el mínimo empuje; Cullman afirma que la línea verdadera es la más cercana a la línea media del arco, Villarceau inventa un método para diseñar un arco «seguro»: la directriz debe coincidir con una de las líneas de empujes de la carga permanente.

Pero el problema de la indeterminación persiste y cada vez causa más desasosiego entre los ingenieros. Se llegan a construir arcos de fábrica con tres articulaciones interiores en el afán por fijar la posición de la línea de empujes.²⁶

Por fin, en 1852 Poncelet, en su «Examen critique et historique des principales théories ou solutions concernant l'équilibre des voûtes», avanza que la manera de resolver la indeterminación inherente al hiperestatismo de un arco de fábrica consiste en aplicar la teoría elástica: fijar unas condiciones de deformación y aplicar las propiedades elásticas del material. La teoría elástica se aplica a arcos metálicos o de madera desde la mitad del siglo XIX, pero hay dudas sobre su aplicación a fábricas. En los tratados se distingue entre los arcos elásticos (de acero o de madera) y los arcos rígidos (de fábrica). Los primeros se resuelven por la teoría elástica y los segundos mediante líneas de empuje.

En 1879 Winkler propone por primera vez la aplicación de la teoría elástica a los arcos de fábrica, con una memoria titulada «La posición de la línea de empujes en las bóvedas»: Winkler obtiene la línea de empujes de un arco ideal, construido con un material uniforme, sobre cimbras indeformables y apoyado en estribos infinitamente rígidos y afirma que esa es la «verdadera» línea de empujes.

Castigliano, ese mismo año, estudió un puente considerando la fábrica un material elástico unilateral, de manera que no resiste tracciones: cuando la línea de empujes se

²⁶ En Huerta (2008). Bayó, en su artículo de 1910 que se estudiará en profundidad más adelante, recoge esta posibilidad: «el ingeniero alemán Liebbrand [aconseja] el empleo de cuñas de plomo, en la junta de clave y en las de fractura; circunscribiendo así en estrecho límites la zona dentro de la cual puede pasar el polígono de presiones, reduciendo su estudio al de los arcos articulados» (Bayó 1910, 163)

sale del tercio central hay una parte de la sección que deja de trabajar, en lugar de traccionarse.

Entre 1895-96, la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Austriacos realizó una campaña de ensayos sobre arcos de fábrica y hormigón, de gran luz, para verificar la teoría elástica. Fijándose sólo en la primera parte del ensayo, observaron una proporcionalidad entre fuerzas aplicadas y deformaciones medidas, dibujaron gráficos de tensión-deformación y fijaron un valor para el módulo E del material. Todo esto les sirvió para dar por válida la teoría elástica aplicada a los arcos, que fue la oficial a partir de entonces.

7.5.2. *Rafael Guastavino Moreno*

A pesar de que, como se describe en los apartados 7.3.3. y 7.4.1.a) y 7.4.2.d). los Guastavino, padre e hijo, emplean métodos de equilibrio para diseñar sus bóvedas y cúpulas, en su libro de 1893, Guastavino incluye una tabla con datos para obtener esfuerzos y tensiones en base al análisis elástico de una bóveda tabicada, ver figura 7.46.

La tabla fue elaborada por un profesor del MIT, Gaetano Lanza, para una bóveda de directriz circular, flecha $L/10$ y carga uniforme. Es el tipo más utilizado por Rafael Guastavino Moreno en sus primeros años en Estados Unidos. Se particulariza para arcos entre 5 y 24 pies (1,5-7,2 m) de luz; la flecha es $L/10$ para todos los casos y el espesor varía entre 2 y 6 pulgadas (5,1-15,2 cm), según el tamaño del arco.

El análisis del profesor Lanza supone la bóveda doblemente articulada en los apoyos; sección y características del material constantes a lo largo de la luz. Así, el momento es 0 en los apoyos y máximo en la clave. El esfuerzo normal se mantiene casi constante, debido a la poca flecha del arco, aunque aumenta un poco hacia los apoyos.

Los valores que se indican en la tabla corresponden a un arco de 1 pie de ancho sometido a una carga superficial de 1 libra/pie². Para otros valores de carga, se multiplican las siete últimas columnas por su valor.

TABLE OF THEORETICAL STRESSES FOR ARCHES 10% RISE
WITH UNIFORM LOAD (W) PER SQ. FT.

Span in Feet.	Rise in Inches.	Thickness in Inches.	Area of Sec., 12 in. wide.	I of Section, 12 inches wide.	Bending-moment at crown, Inch pounds $= W \times$	Stress due to bending-moment $= W \times$	Thrust at crown $= W \times$	Stress due to thrust at crown $= W \times$	Thrust at springing $= W \times$	Stress due to thrust at springing $= W \times$	Maximum stress at crown $= W \times$
5	6	2	24	8	.540	.0675	6.16	.25667	6.673	.278	.32417
5	6	3	36	27	.540	.03	6.16	.17111	6.673	.18536	.20111
6	7.2	3	36	27	.7776	.0432	7.392	.20533	8.008	.2227	.24853
7	8.4	3	36	27	1.0854	.0588	8.624	.23956	9.3425	.2595	.29836
8	9.6	3	36	27	1.3824	.0768	9.856	.27378	10.677	.2966	.34458
9	10.8	3	36	27	1.7496	.09719	11.088	.30800	12.013	.3372	.40518
10	12.0	3	36	27	2.16	.12	12.320	.34222	13.346	.3707	.46222
11	13.2	3	36	27	2.6136	.1452	13.552	.37644	14.598	.4055	.52164
12	14.4	3	36	27	3.1104	.1728	14.784	.41067	16.016	.4449	.58347
12	1.44	4	48	64	3.1104	.0972	14.784	.308	16.016	.3337	.4052
13	1.56	4	48	64	3.6504	.1140	16.016	.33367	17.351	.3615	.44767
14	16.8	4	48	64	4.2336	.1323	17.248	.35933	18.685	.3768	.49163
15	18.0	4	48	64	4.860	.15187	18.480	.38500	20.02	.4171	.53687
16	19.2	4	48	64	5.5296	.1728	19.712	.41067	21.355	.4449	.58347
16	19.2	5	60	125	5.5296	.1106	19.712	.32853	21.355	.3559	.43913
17	20.4	5	60	125	6.424	.1285	20.944	.34907	22.689	.3781	.47757
18	21.6	5	60	125	6.9884	.13977	22.170	.36960	24.024	.4004	.50937
19	22.8	5	60	125	7.7976	.15595	23.408	.39013	25.359	.4225	.54608
20	24.0	5	60	125	8.64	.1728	24.64	.41067	26.693	.4449	.58347
20	24.0	6	72	216	8.64	.12	24.64	.34222	26.693	.3707	.46222
21	25.2	6	72	216	9.5256	.1323	25.872	.35933	28.028	.3893	.49163
22	26.4	6	72	216	10.4544	.1452	27.104	.37644	29.363	.4079	.52164
23	27.6	6	72	216	11.4264	.1587	28.336	.39355	30.697	.4263	.55225
24	28.8	6	72	216	12.4416	.1728	29.568	.41067	32.932	.4449	.58347

To obtain bending-moments, stresses, and thrusts in the last seven columns, multiply the figures in column by load per square foot, including the weight of material.

Figura 7.46. Tabla para obtener los empujes que causa una bóveda tabicada de directriz circular, rebajada (flecha=L/10) y sometido a carga uniforme (Guastavino 1893, 148)

Para comprobar la validez de los resultados de la tabla, se estudia en detalle uno de los arcos indicados, en concreto el que tiene 12 pies de luz y en consecuencia 1,2 de flecha. En la figura 7.47 se dibuja la geometría del arco estudiado y la columna de la tabla (ver figura 7.46) que indica el empuje de los arcos. A la derecha de esta columna, se indica el empuje de un arco parabólico de la misma flecha y luz ($E=W \cdot L^2 / 8 \cdot f$). Comparando con el obtenido mediante el análisis elástico la diferencia es mínima: en el arco parabólico, el empuje es un 1,5%

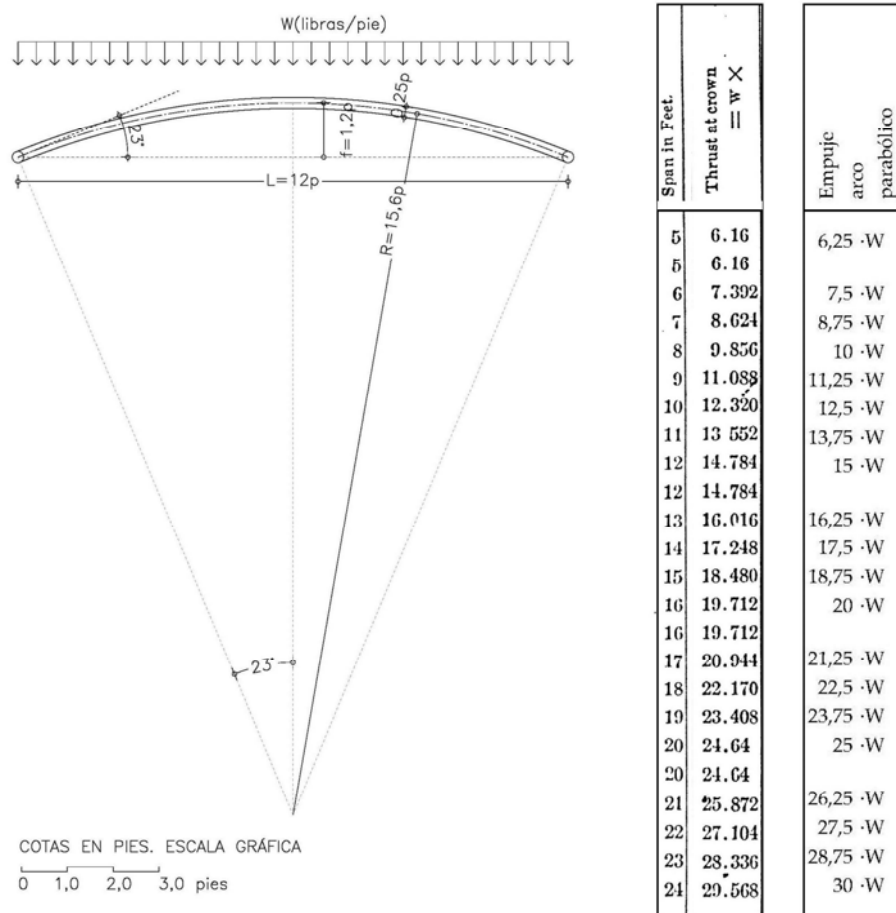


Figura 7.47. A la izquierda, geometría y para un arco circular de luz 12 pies y flecha $L/10$, propuesto por Guastavino en su libro de 1893. A la derecha, extracto de la tabla (ver figura 7.46): luz del arco y empuje elástico, comparado con el empuje del arco parabólico con la misma luz y carga.

A partir del empuje que se ofrece en la tabla para este arco ($14,784 \cdot W$), del valor obvio de reacción vertical ($W \cdot L/2 = 6 \cdot W$) y de la carga aplicada, pueden dibujarse los diagramas de M y N : el esfuerzo normal crece ligeramente hacia los apoyos conforme se va inclinando. M se obtiene por puntos planteando equilibrio de momentos en distintos puntos del arco: el máximo está en la clave y es $3,11 \cdot W$ (en libras-pulgada) como se indica en la tabla,²⁷ disminuye hacia los apoyos, cambia de signo a 2,28 pies del apoyo y tiene un máximo negativo de $0,88 \cdot W$ a 1 pie del apoyo, ver figura 7.48 izq.

²⁷ Se indican las unidades del momento flector porque no son las mismas en las que se introduce la carga. Al estar los valores de reacciones, N y M en función de W , podrían ser válidos para cualquier sistema de unidades. Pero para llegar al valor de M que se dibuja, hay que multiplicar los resultados por 12 para pasar de pies a pulgadas.

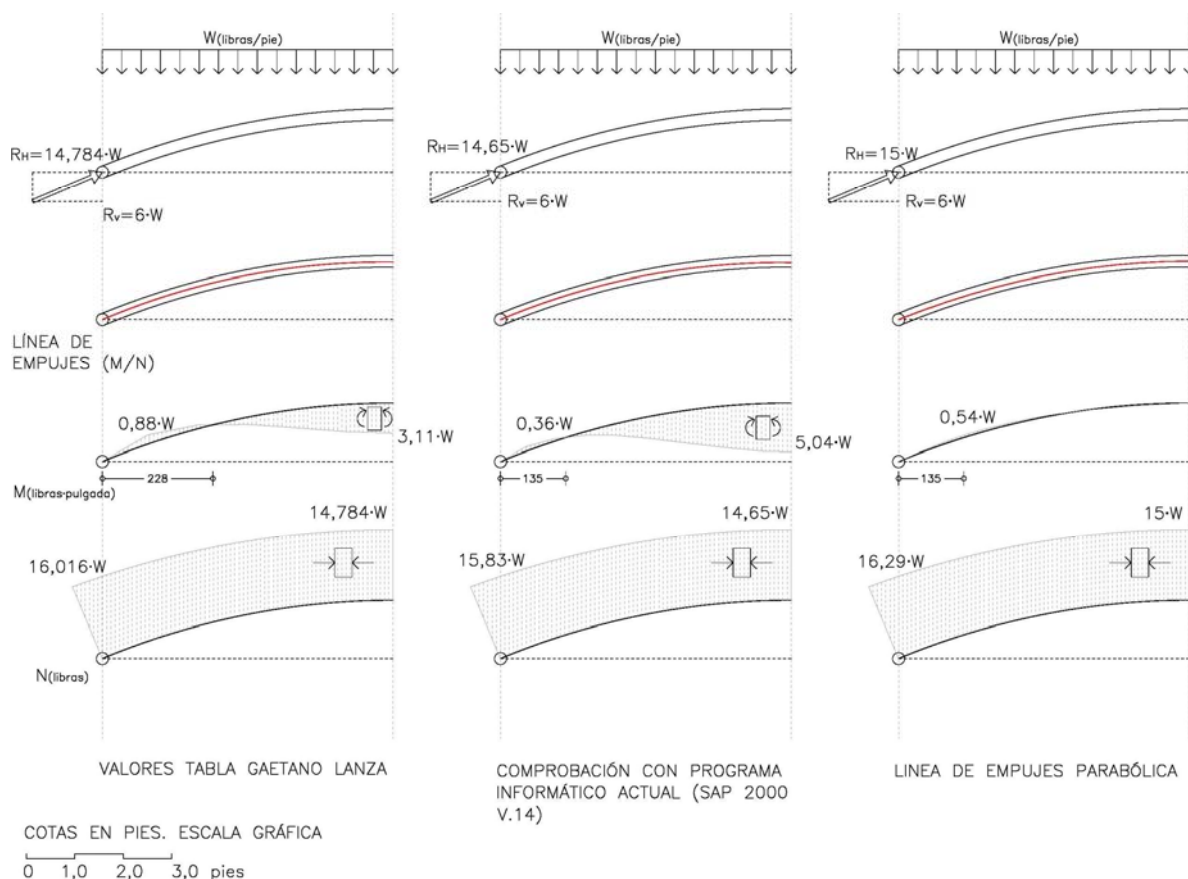


Figura 7.48. Posibles análisis de un arco circular rebajado con flecha= $L/10$. Se indica la línea de empujes (obtenida como M/N) y los diagrama M y N para llegar a ella.

A la izquierda, según los valores indicados en la tabla de Gaetano Lanza. En el centro, análisis elástico y lineal empleando un programa informático actual. A la derecha, suponiendo una línea de empujes parabólica, que es el funicular de la carga uniforme y repartida.

El análisis elástico de este arco se ha repetido con un programa informático actual (SAP 2000 v.14) obteniendo datos muy similares (ver figura 7.48 centro): el empuje es $14,65 \cdot W$ (una diferencia del 0,9% con respecto al $14,784 \cdot W$ obtenido por Gaetano Lanza). Sin embargo, esta pequeña diferencia de empujes hace que el momento máximo en la clave casi se duplique ($5,04 \cdot W$ en lugar de $3,11 \cdot W$) con respecto al que se indica en la tabla. La razón de esta diferencia es que los momentos son muy pequeños en relación a las cargas y a los empujes. De manera que un pequeño cambio en el empuje repercute mucho en el valor del momento, aunque en ambos casos es muy pequeño.

Para ambos análisis se dibuja la línea de empujes dividiendo M/N . Está contenida holgadamente en el interior del arco.

Por último, se expresan los valores de M y N que se obtienen suponiendo la línea de empujes parabólica, y se dibuja. También cabe sin problemas en el interior de la fábrica. Las diferencias entre los tres análisis son mínimas.

Obtenidos los esfuerzos, la tabla indica el valor de las tensiones, también en función de la carga W .²⁸ Para obtenerlas, emplea la fórmula clásica de flexión compuesta y distribución elástica:

$$\sigma = \sigma_N \pm \sigma_M = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot \frac{e}{2}$$

Siendo N el esfuerzo normal, M el momento flector, A ($B \cdot e$) el área transversal, I el momento de inercia de la sección ($B \cdot e^3/12$) y e el espesor de la bóveda (Los valores de A y de I para los distintos espesores considerados están expresados también en la tabla, para un ancho de 12 pulgadas)

Por ejemplo, para el arco de 12 pies que se estudia y con un espesor de 3 pulgadas, se obtienen los valores:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{17,748 \cdot W (\text{lbs})}{36 (\text{in}^2)} + \frac{3,11 \cdot W (\text{lbs} \cdot \text{in})}{27 (\text{in}^4)} \cdot \frac{3 (\text{in})}{2} = 0,41 \cdot W \pm 0,17 \cdot W$$

$$\sigma = 0,58 \cdot W (\text{C}) / 0,24 \cdot W (\text{C}) \text{ lbs/in}^2$$

Que son idénticos a los que se expresan en la tabla. Como el momento es muy pequeño, aún suponiendo esta distribución elástica, la sección está comprimida en su totalidad; esto ya se ha comprobado más arriba viendo que la línea de empujes está contenida en el arco (ver figura 7.48 izq.)

Pero la utilidad que atribuye (o que dice atribuir) Guastavino a la tabla es el contraria: obtener el valor de carga segura (W) que puede aplicarse a una bóveda de la geometría

²⁸ Aunque el valor de W se introduce en libras/pie, las tensiones que se obtienen multiplicando por los coeficientes de la tabla estan en libras/pulgada².

y espesor recogidos en la tabla a partir de unos valores máximos de resistencia. Estos valores son los obtenidos en los ensayos de 1887 (ver capítulo 8 de esta tesis), aplicando un coeficiente de seguridad de 10, aunque es consciente de que podría ser menor:

In calculating the safe load which might be put on the arches, we use ten per cent of these ultimate resistances, thus introducing a much larger factor of safety than is usually employed in such calculations. As a matter of fact the arches may be strained to within one-fifth or one-fourth of the ultimate resistance of the material with perfect safety (Guastavino 1893, 149)

No se hace mención a ella en ningún otro punto del libro, aparte de la posible aparición de momentos flectores, ya citada más arriba: «3 inches must be adopted in order to increase the resistance to bending moment» (Guastavino 1893, 65). Tampoco hay constancia, ni por sus escritos ni por sus dibujos, de que los Guastavino emplearan esta tabla en el diseño de sus bóvedas.

Tampoco los valores obtenidos en este cálculo son muy interesantes: si se obtiene el empuje haciendo equivaler el arco circular a uno parabólico –perfectamente válido en arcos tan rebajados– el empuje es prácticamente el mismo (ver figura 7.47 der.). Guastavino conoce, cita en su libro y probablemente use, la fórmula del empuje de un arco parabólico, mucho más sencilla de aplicar. Pero el valor del empuje sirve para obtener el tamaño del contrarresto necesario (muros o piezas metálicas), no para hallar el espesor necesario en la bóveda: ya hemos visto más arriba que Guastavino tiene que aplicar un coeficiente de seguridad excesivo para llegar a un espesor constructivamente razonable.

La incorporación de esta tabla al libro es parte, como los ensayos que se estudiarán en el apartado siguiente, de la labor afianzadora de su sistema constructivo, desconocido en Estados Unidos, a su llegada a ese país. A pesar de su escasa utilidad práctica, hay que destacar el hecho de que se incluyera en el libro un análisis elástico para un arco de ladrillo en una fecha tan temprana como 1893, demostrando una vez más el carácter visionario de Rafael Guastavino Moreno.

7.5.3. España

En España encontramos autores que defienden la aplicación del análisis elástico a las bóvedas tabicadas desde los primeros años del siglo XX, al menos desde un punto de vista teórico. En anteriores apartados de esta tesis (7.3 y 7.4) se menciona como varios autores de los que proponen métodos de equilibrio para analizar las bóvedas tabicadas, dan por hecho que el cálculo «verdadero» es el elástico y justifican sus propuestas en aras de la sencillez.

Así ocurre en Martorell (1910):

El cálculo mecánico (...) de las estructuras de ladrillo y hierro atirantado, es algo prolijo y complicado.

Los procedimientos de mecánica gráfica (...) aplicados á los arcos de ladrillo y de un modo especial a las bóvedas tabicadas (...) [pueden] considerarse como excelente método de guía (Martorell 1910, 143)

Y en Bosch Reitg (1949):

Todo cuanto hemos indicado nos da idea de lo complejo del cálculo exacto de estas bóvedas, al cual, por su misma complicación, llegaríamos a soluciones poco prácticas, con sistemas de integrales dobles, reñidas con el espíritu práctico que ha de prevalecer en la técnica arquitectónica (Bosch 1949, 193)

A continuación se estudian los autores que defienden el análisis elástico y además intentan aplicarlo en la práctica. Todos se estrellan contra las dificultades matemáticas que conllevan estos análisis, especialmente en geometrías complejas, más allá de un sencillo arco circular como el propuesto por Rafael Guastavino en 1893. El ejemplo más conocido es el de Esteve Terradas, que plantea el análisis elástico de una escalera tabicada.

También se estudian aquí los autores que defienden el análisis elástico de manera teórica y no proponen nada en la práctica (ni análisis de equilibrio ni elásticos)

7.5.3.a. Doménech y Estapá 1900

En el artículo de Doménech y Estapá «La fábrica de ladrillo en la construcción catalana», publicado en 1900, encontramos una posición intermedia: Doménech cree que es posible considerar resistencia a tracción en las bóvedas tabicadas:

El secreto mecánico de la construcción de estas bóvedas (...) está en no limitar el cálculo de los mismos á la resistencia al esfuerzo de compresión de los materiales empleados, sino aprovechar también la resistencia á la tensión y al esfuerzo transversal que ofrecen nuestros ladrillos auxiliados por los morteros de cal y cemento (Doménech 1900, 38)

Esta resistencia la considera debida en buena parte al uso del cemento como aglomerante «Hoy con el uso más generalizado de la mezcla de cemento y arena se han aumentado notablemente la resistencia tensiva de las bóvedas tabicadas» (Doménech 1900, 45)

Pero no llega a planear un análisis elástico para obtener los esfuerzos, ni le preocupa la unicidad de la solución, estando más cerca del planteamiento de los empujes mínimos que plantearan años atrás Moseley y Scheffler: «La Naturaleza misma (...) es la que se encarga de decidir qué línea de presiones es la que más conviene a cada caso, para que todas las secciones sufran el mínimo de los esfuerzos» (Doménech 1900, 42).

Es interesante la forma en que elige esta línea de empujes para la que los esfuerzos son mínimos: es la parábola que se dibuja en la figura 7.49 izq.: la que menos se separa del arco creando sólo momentos flectores negativos.²⁹ Esto se debe a que Doménech piensa que «son más resistentes a la tensión los gruesos superiores de las bóvedas, por ser costumbre construir el primer grueso con yeso [que] no ofrece luego la resistencia tensiva que necesitamos» (Doménech 1900, 42). Por ello interesa que sean la secciones superiores del arco, tomadas con cemento, las que estén traccionadas.

²⁹ Domenech dibuja la línea de empujes, no el diagrama de momentos. Por eso queda por debajo del arco pero los momentos flectores son negativos, lo que no concuerda con la representación habitual de los diagramas de momentos flectores, al menos en España.

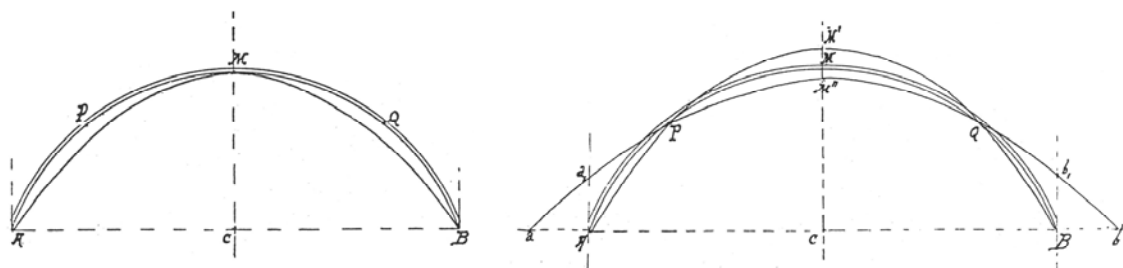


Figura 7.49: Líneas de empujes propuestas por Doménech y Estapá. Izquierda: Línea de empujes ideal para un arco tabicado, solo produce momentos negativos, con máximos en P y Q (Doménech y Estapá 1900, 43). Derecha: Líneas de empuje posibles si el arco se agrieta en P y Q por exceso de flexión, $AM'B$ más peraltada y pasando por los apoyos A y B y otra más tendida ($aM''b$) que produce momentos en los apoyos. La primera es más favorable para los apoyos pero tracciona la cara inferior del arco y la segunda sólo puede darse si los apoyos admiten momentos (Doménech y Estapá 1900, 44).

Doménech es consciente de la fragilidad de un arco de ladrillo, y de que esta situación «ideal» solo se alcanza cuando no hay ninguna grieta:

Si por causa del esfuerzo de flexión (...) cede el material y se rompe la bóveda, entonces la línea de presiones o de equilibrio se transforma, pasando (...) por los puntos de rotura, porque en ellos sólo puede ejercerse esfuerzo de compresión y la parábola está obligada á pasar por [ellos] (Doménech 1900, 44)

Dibuja también unas posibles líneas de empuje para esta situación agrietada, en función de la resistencia a flexión que tengan las diferentes zonas del arco, ver figura 7.49 der. Por último, Doménech recoge la situación que se produce si los apoyos no pudieran resistir ningún empuje:

si los apoyos no pudieran ofrecer resistencia alguna al empuje horizontal (...) quedaría reducido el problema á determinar el momento de flexión y el esfuerzo transversal para cada sección del arco o dintel, en un todo conforme á lo que se hace para las vigas rectas, reforzando entonces el arco ó la bóveda para que pudieran resistir aquellas acciones (Doménech 1900, 45)

Sin especificar como se realiza el refuerzo. Sin embargo, en otros puntos del artículo encontramos referencias a refuerzos de acero para resistir tracciones: «y los apoyos pudieran resistir por su propio peso o por medio de tirantes, la componente horizontal de la fuerza que actúa sobre aquéllos» (Doménech 1900, 39) ó «para dar mayor

resistencia en ellos, con otros gruesos o capas de ladrillo ó con el empleo de otros materiales de enlace» (Doménech 1900, 40)

7.5.3.b. Bayó 1910

Bayó, en su artículo «La bóveda tabicada» también considera la resistencia a tracción de las bóvedas tabicadas, de manera que la forma de calcularlas no puede ser ajustarse a una línea de empujes:

La bóveda tabicada no sólo trabaja á la compresión, sino también á la flexión, y, por tanto, los esfuerzos no obedecen al polígono construido (...)

La bóveda tabicada debe asimilarse á piezas ó láminas flexibles, con la diferencia de tener distintos coeficientes elásticos á la tensión y á la compresión (Bayó 1910, 158)

En el artículo de Bayó ya encontramos de lleno la preocupación del cálculo elástico: encontrar la *verdadera* situación de equilibrio. En los arcos metálicos es fácil, construyendo tres articulaciones, pero en los de piedra es más complejo.

Más el problema queda indeterminado, pues todos los polígonos comprendidos en el tercio central cumplen las condiciones dichas, y por esto es desconocido el verdadero polígono de presiones, que debe ser único para una carga dada. (...) Mery (...) supone que el polígono de presiones pasa por el tercio superior de la junta de clave y por el tercio inferior de las juntas de fractura.

Con este procedimiento no se conoce el polígono de presiones verdadero, pues sólo se tiene la *posibilidad de una solución de equilibrio y resistencia* (Bayó 1910, 163; cursiva en el original)

(...) Por pertenecer la bóveda tabicada al grupo de la estructuras con contrafuertes y no poder calcularla igual que los sistema dovelados, deberá hacerse su estudio paralelamente al de los arcos metálicos articulados; las articulaciones ó puntos de paso del funicular que en ella pueden considerarse, son únicamente dos, situados en los arranques (Bayó 1910, 166)³⁰

³⁰ Con las «estructuras con contrafuertes» dentro de las que engloba las bóvedas tabicadas, Bayó se refiere a las estructuras articuladas en ambos apoyos, que a su vez subdivide en tendidas ($M=0$, N de tracción), doveladas ($M=0$, N de compresión) y flectantes (M y N). Las bóvedas tabicadas las incluye entre las flectadas.

Bayó propone un método bastante farragoso para la obtención de la *verdadera* línea de empujes. Supone articulados los apoyos, de manera que basta con obtener un tercer punto de paso para que la línea de empujes quede determinada. Estos puntos son los de inflexión de la deformada del arco, en los que se pasa de flexión negativa a positiva: al ser puntos de $M=0$, la línea de empujes *verdadera* (que podemos llamar elástica, ya que corresponde a ese tipo de análisis) coincide en ellos con la línea media del arco. Para obtener la posición de estos puntos, parte de las fórmulas generales de deformación en flexión, pero se ve obligado a hacer varias simplificaciones para seguir: que el módulo E y el momento de inercia I sean constantes a lo largo del arco, que el arco sea simétrico en cuanto a geometría y cargas; que además sea «equilibrado o de igual resistencia»,³¹ lo que implica que todas las secciones estén trabajando a la misma tensión. La primera condición es fácil de cumplir, incluso habitual en arcos comunes; la segunda es prácticamente imposible, al menos si se quiere cumplir la condición de $E \cdot I$ constante.

Con estas simplificaciones, desarrolla un procedimiento gráfico para hallar los puntos de inflexión (en realidad sólo encuentra uno, al que llama L ; el otro será simétrico respecto al eje, ya que el arco debe serlo para que el método sea de aplicación, ver figura 7.50).

Conocidos tres puntos de paso de la línea de empujes (en realidad 4: los apoyos A y B y los dos puntos de inflexión, al ser simétrica la estructura), esta puede dibujarse en su totalidad y obtenerse el momento máximo multiplicando el empuje por la distancia máxima entre la línea de empujes y la línea media del arco.

Aplica el método dos arcos semicirculares, ambos de 10 m. de luz; uno de 3 m de flecha y otro de 4. El segundo se representa en la figura 7.51. Bayó sólo indica la carga total (7000 kg, 70 kN)³² que Bayó reparte en una serie de cargas puntuales crecientes hacia

³¹ La discusión sobre las estructuras equilibradas, en el sentido que aquí se explica (todas las secciones estén trabajando por igual) fue importante en el diseño de estructuras en los últimos años del siglo XIX y principios del XX. Juan Torras fue uno de los impulsores de esta teoría en Cataluña (ver Feliú Torras, 2011)

³² Esta carga es bastante realista: equivale al peso propio del arco de ladrillo de 20 cm de espesor más una sobrecarga entre 1,5 y 1,9 kN/m² (dependiendo del peso específico del ladrillo, entre 16 y 18 kN/m³)

los apoyos, de manera que se puede suponer que la carga no es uniforme sobre la horizontal, sino sobre la superficie del arco.

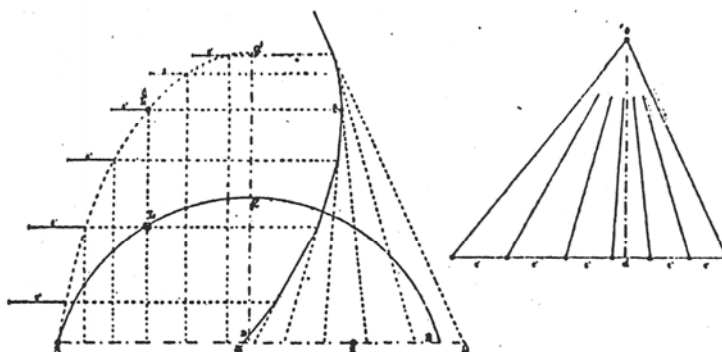


Figura 7.50. Procedimiento gráfico ideado por Bayó para obtener L, punto de inflexión de la deformada del arco (Bayó 1910, 170)

Siguiendo el procedimiento gráfico de la figura 7.50 obtiene la línea de empujes que pasa por el apoyo A y el punto de inflexión L. A partir de ella, obtiene el empuje (1675 kg, 16,75 kN) midiendo sobre el polígono de fuerzas, con la escala de fuerzas indicada (la figura 7.51 está escalada $\times 1,20$ sobre el dibujo original); y el valor del momento multiplicando el empuje por la separación entre línea de empujes elástica y la línea media del arco. El máximo, que se produce en la clave, punto de máxima separación entre la línea de empujes y la línea media de arco es $1675 \text{ kg} \cdot 24 \text{ cm} = 40200 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ (4,02 kN·m)

A partir el empuje (1675 kg, 16,75 kN) y momento máximo (40200 kg·cm, 4,02 kN·m) dimensiona la sección necesaria para la bóveda. Para obtenerla, emplea la fórmula clásica de flexión compuesta con distribución elástica, aplicado a la clave, que es donde se encuentran los momento máximos.

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{N}{A} + \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{H}\right)$$

Siendo N el empuje, que también es el normal en la clave; A el área resistente, e la excentricidad (distancia entre línea de empujes y línea media del arco) y H el espesor del arco³³

³³ Se indica esta notación de la fórmula, equivalente a la más usual actualmente $N/A \pm M/W$ porque así la escribe Bayó en su artículo.

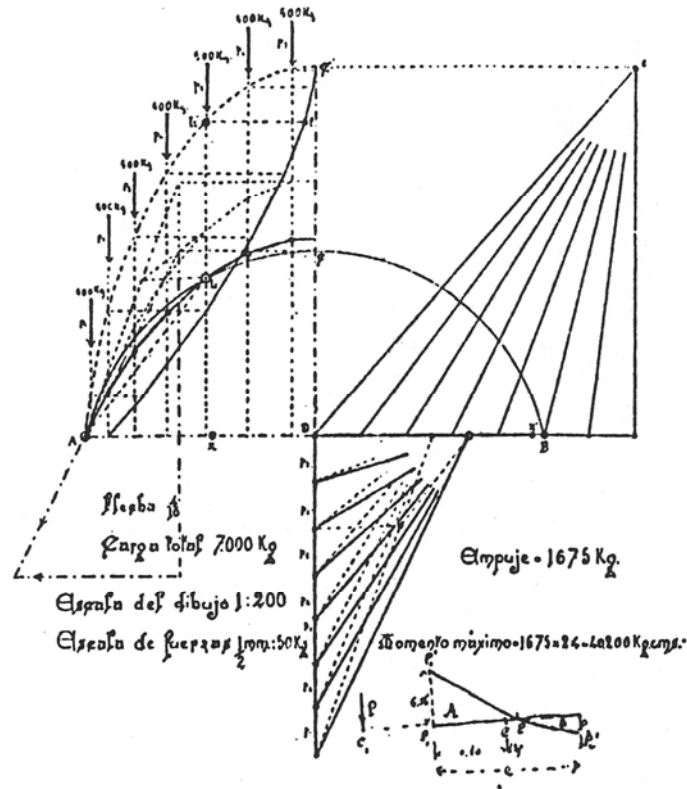


Figura 7.51. Aplicación del método a un arco de 10 m de flecha y 4 de luz. Se dibuja la línea de empujes que pasa por L, el valor del empuje y del momento máximo (Bayo 1910, 173)

Hace un primer tanteo suponiendo la fibra neutra en el centro de gravedad de la sección (rectangular, de ancho 1 m) y obtiene un ancho aproximado de 20 cm. Con la sección así obtenida (100x20), comprueba empleando la fórmula:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{1675 \text{ kg}}{100 \cdot 20 \text{ cm}^2} + \left(1 \pm \frac{6 \cdot 24 \text{ cm}}{20 \text{ cm}}\right) = 0,83 \pm 6,03 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = 6,56 \text{ (C)} / -4,96 \text{ (T)} \text{ kg/cm}^2 \quad (0,65 \text{ (C)} / -0,5 \text{ (T)} \text{ N/mm}^2)$$

Estos valores de M y N implican que una parte importante de la sección estará traccionada. Como valores máximos de trabajo para la fábrica tabicada, cita los obtenidos por Rafael Guastavino «por ensayos practicados en laboratorios yankees» (Bayo 1910, 167) , ver figura 7.52.

Coeficientes de trabajo práctico del ladrillo á los esfuerzos de	compresión.	15 kg. por cm. ²		
	tensión	4 ó 5 » » »		
	cortante	6 » » »		
	desgarro ó adherencia	4 ó 5 » » »		

Figura 7.52. Valores de tensión de trabajo de la fábrica de ladrillo, citados por Bayó en base a los ensayos realizados por Guastavino en Estados Unidos

Aun hace una puntualización más: estos valores de tensión se obtienen suponiendo un único plano de deformación, y esto no es cierto porque «como sabemos que los coeficientes de elasticidad a la tensión y á la compresión son distintos para estas fábricas, serán distintos también los planos de deformación». Recalcula las tensiones con esta nueva premisa y obtiene un valor algo menor para las tracciones (4,73 kg/cm²; 0,47 N/mm²) y algo mayor para las compresiones (7,45 kg/cm², 0,74 N/mm²). El diagrama de tensiones final está dibujado en la parte inferior de la figura 7.51.

Como los valores que obtiene en el cálculo son inferiores a las resistencias de trabajo consideradas,³⁴ Bayó da por bueno el dimensionado de la bóveda justificando, eso sí, el elevado espesor obtenido (20 cm, mucho más de las construcciones habituales en Cataluña en ese momento) por la forma inadecuada del arco:

Del estudio hecho resulta que el espesor supuesto en el primer tanteo es admisible para el trabajo adoptado a la extensión, si bien no se aprovecha el material en la región comprimida; y es grande este espesor por la discrepancia manifiesta de la funícula con el arco de circunferencia elegido con bastante flecha (...) se expone el constructor a grandes errores cuanto más exceda de 1/10 el peralte de los mismo (Bayó 1910, 175)

Para solucionar este problema del desaprovechamiento de la resistencia a compresión del ladrillo propone dos maneras. La primera es la tradicional, construir arcos y bóvedas con la forma adaptada a la línea de empujes de las cargas. Esto, con arcos circulares, equivale a perfiles muy rebajados: «Las formas rebajadas son las más

³⁴ En 1887, Guastavino obtiene valores de rotura de 14,21 N/mm² (142,1 kg/cm²) a compresión y 1,98 N/mm² (19,8 kg/cm²) a tracción. Para llegar a los valores de trabajo que cita, Bayó ha aplicado un coeficiente de seguridad mucho más elevado a compresión (9,5) que para tracción (3,96). Esta «manipulación» de datos se inserta dentro del discurso de la resistencia a tracción de la fábrica de ladrillo y cemento.

empleadas por la generalidad de los constructores, pues así pueden calcular estas bóvedas, como las doveladas, es decir, trabajando a compresión» (Bayó 1910, 184)

La segunda opción es construir los arcos «equilibrados o de igual resistencia» que se han citado más arriba:

mas no podrían hacer lo mismo si pretendieran construir bóvedas de algún peralte, en la que precisa tener en cuenta el momento de flexión. Para obviar las inconveniencias de la flexión que se produce en las bóvedas de gran altura, se construyen equilibradas a la presión, adoptando para ellos formas que comprendan á la curva de presiones (Bayó 1910, 184)

Para llevar a la «práctica» este segundo método, propone construir arcos de espesor variable, en función de la distancia entre la línea media del arco y el funicular de las cargas, ver figura 7.53.

Si (...) se quieren construir bóvedas equilibradas ó de igual resistencia, que respondan al proyecto sugerido por la imaginación del artista, se procederá tal como en la figura D, en que después de determinar el funicular de las fuerzas elásticas, se dan a la bóveda espesores relacionados con los momentos de flexión (Bayó 1910, 184)

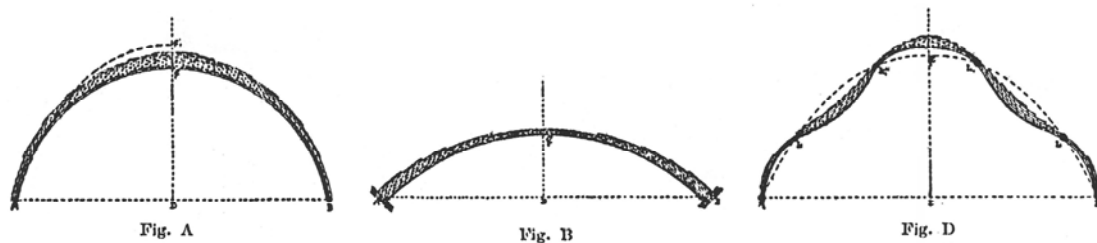


Figura 7.53. Arcos de espesor variable, función de la separación entre el antifunicular de las cargas y la línea media del arco en cada punto (Bayó 1910, 183-84)

Pero esta operación complica el cálculo propuesto, ya que la línea de empujes elástica que propone es válida para un arco de espesor constante. Bayó es consciente de ello y también de que no todos los arcos son simétricos ni están sometidos a cargas simétricas. Para ambas complicaciones, propone variaciones de su método gráfico para obtener la línea de empujes elástica.

Validez del análisis de Jaime Bayó

El método que propone Jaime Bayó es muy interesante: se plantea los problemas posibles, el más sencillo (arco simétrico, de espesor constante y con carga simétrica) y otros más complejos (geometría asimétrica, espesor variable) con rigor matemático; además de plantear una aproximación gráfica a como resolver una estructura hiperestática siguiendo la teoría elástica.

El análisis gráfico de Bayó es bastante exacto en lo que se refiere a la posición del punto de inflexión (2,63 frente a 2,55 m) y al empuje (1675 frente a 1667 kg). En la figura 7.54 se muestra el modelo de cálculo, las reacciones y el diagrama de flectores de un arco de 10 m de luz y 4 de flecha. A la izquierda, los datos son los obtenidos por Bayó. A la derecha, los proporcionados por un programa informático actual (SAP 2000 v14)

Pero el valor de los momentos es bastante diferente en ambos casos: Bayó obtiene un máximo de 40200 kg·cm (4,02 kN·m) situado en la clave. Buscando otros valores a partir de la separación entre línea de empujes y línea media del arco, encontramos un máximo negativo a 1,00 m del apoyo, de valor casi igual al de la clave: 37687 kg·cm (3,77 kN·m). En el análisis realizado con un programa de cálculo, el momento máximo no está en la clave, sino a 0,68 m del apoyo, y su valor casi duplica al obtenido por Bayó: 65700 kg·cm (6,57 kN·m), ver figura 7.54

Este error es probable que se derive de la aproximación gráfica empleada y no es muy relevante en el total del análisis, pero dada la baja resistencia del ladrillo a tracción, este valor del momento invalidaría la sección de espesor 20 cm elegida: el valor máximo de 0,83 N/mm² (ver cálculo de tensiones en la página siguiente)³⁵ ya solo presenta un coeficiente de seguridad de 2,4 respecto al 1,98 N/mm² obtenido por Guastavino en 1887 y citado el propio Bayó.³⁶

³⁵ Ahora se emplea la notación actual de la fórmula de flexión compuesta ($N/A \pm M/W$), dado que N y M son los datos proporcionados por el programa de análisis, y no la excentricidad e

³⁶ Este coeficiente de seguridad nos parece más que suficiente hoy en día. Sin embargo, en los años en que Bayó realiza su análisis los coeficientes de seguridad son más elevados, como se ha indicado en otros puntos de esa tesis. El propio Bayó utiliza valores más altos en su dimensionado (9,5 en compresión y casi 4 para tracción)

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{3103 \text{ kg}}{100 \cdot 20 \text{ cm}^2} + \frac{65700 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{6667 \text{ cm}^3} = 1,55 \pm 9,85 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = 11,40 \text{ (C)} / - 8,30 \text{ (T)} \text{ kg/cm}^2 \quad (1,14 \text{ (C)} / - 0,83 \text{ (T)} \text{ N/mm}^2)$$

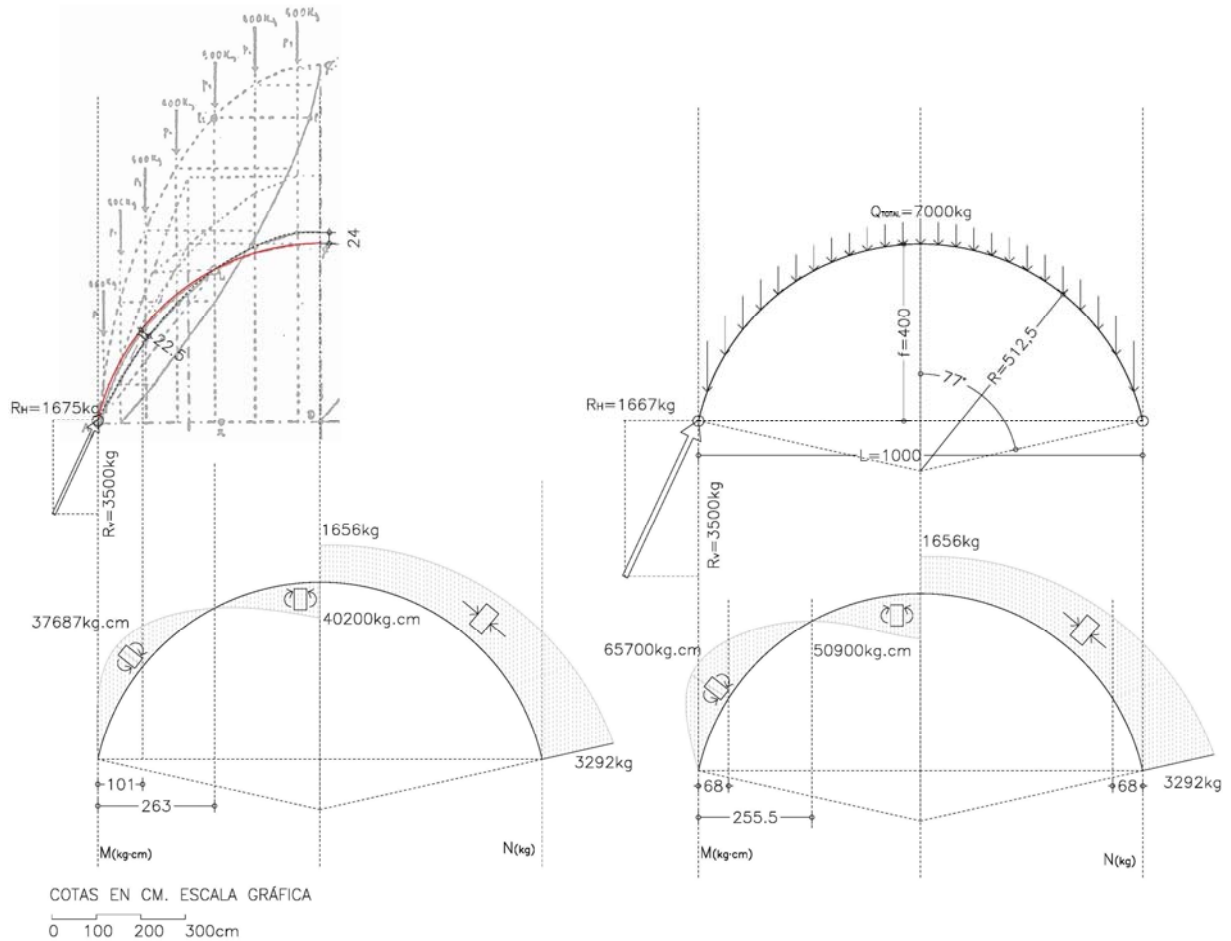


Figura 7.54. A la izquierda, modelo de cálculo, reacciones y diagrama de momentos de un arco de 10 m de luz y 4 de flecha propuesto por Bayó. A la izquierda, lo mismo pero obtenido con un programa informático actual (SAP 2000 v.14)

Por otro lado, podemos realizar un nuevo análisis en el marco del Análisis Límite, buscando una línea de empujes contenida en el espesor del arco (20 cm, según indica Bayó). Esta línea de empujes es posible y se dibuja en rojo en la figura 7.55, al lado de la que obtiene Bayó en su análisis elástico (en verde).

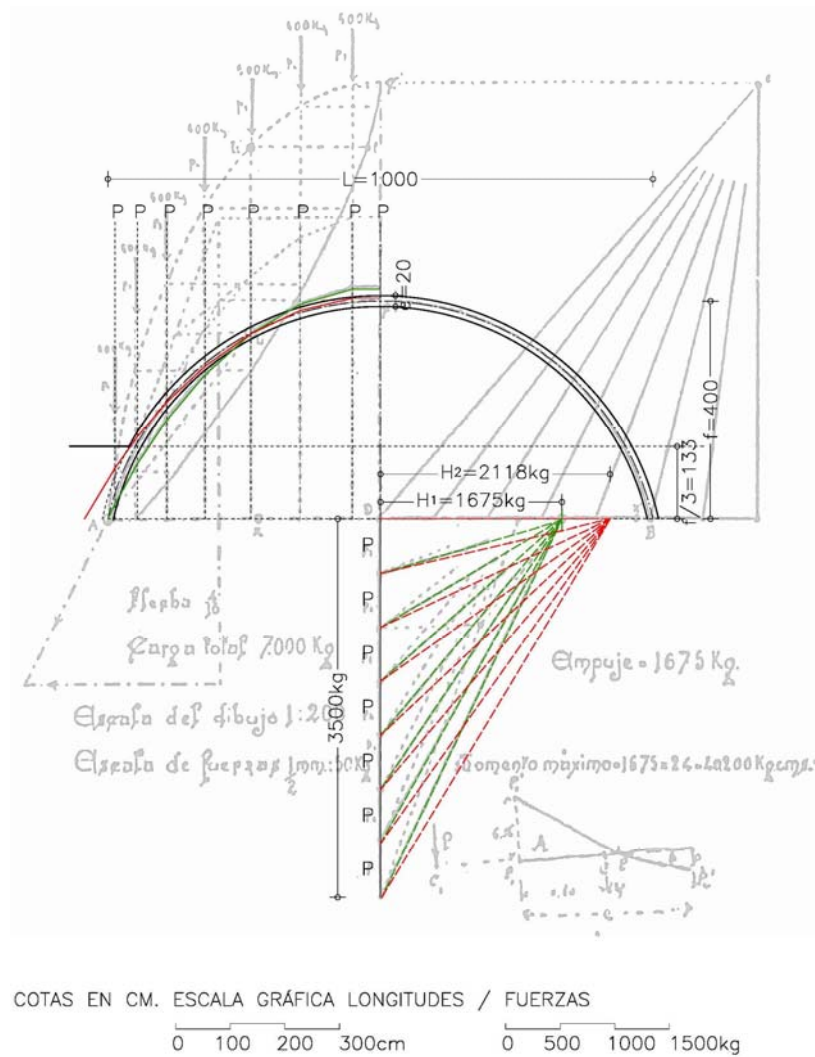


Figura 7.55. Análisis del arco de Bayó empleando las premisas del Análisis Límite. La línea de empujes roja es una cualquiera contenida en el espesor del arco.

Se sale ligeramente del arco en los riñones, pero si están rellenos hasta $1/3$ de su altura como es habitual, el arco es perfectamente estable con el material trabajando a compresión, además con una tensión muy baja:

$$N_{\text{MAX}} = \sqrt{(2118^2 + 3500^2)} = 4091 \text{ kg}$$

$$\sigma = \sigma_N = \frac{4091 \text{ kg}}{100 \cdot 20 \text{ cm}^2} = 2,04 \text{ kg/cm}^2 \quad (0,2 \text{ N/mm}^2)$$

Sólo hay que dimensionar los apoyos (muros o tirantes) para un empuje mayor (2118 kg frente a los 1675 que obtiene Bayó con su línea de empujes elástica, un 26% más), ver los polígonos de fuerzas en verde y rojo en la figura 7.55.

7.5.3.c. *Cardellach 1910*

Este autor entra de lleno en la creencia de que las bóvedas tabicadas resisten tracciones, tanto por el hecho de estar formadas por dos capas:

esta resistencia surge espontáneamente, cual misteriosa sorpresa mecánica, desde el momento en que se procede al doblado de aquella lámina (...). Desde ese instante, la estructura pasa categóricamente a la posesión de una birresistencia notable (Cardellach 1910, 58)

como por la calidad de los materiales empleados:

birresistencia que va progresivamente aumentando con la cualidad de los materiales de construcción, hasta el punto que no es quimérico esperar un día que los esfuerzos tensivos (..) se nivelen sensiblemente con los de compresión, en cuyo caso la estructura tabicada alcanzaría la dócil flexibilidad del sensible muelle de acero . Actualmente, la resistencia tensiva de la arcilla cocida, y en especial la del suelo de Cataluña, así como la potencia a que han llegado los modernos cementos, permite ya el confiar (...) en la elasticidad de las formas (...), hasta el punto de que su cálculo se realiza por la estricta aplicación de la ley trapecial con despreocupación entera de ajustar el perfil de la estructura a la línea potencial de acción externa (Cardellach 1910, 59)

Para conseguir estas propiedades elásticas es imprescindible utilizar cemento: «la elasticidad de estas formas [se debe] a la calidad excelente de los morteros modernos que han venido a reemplazar a la cal grasa y al yeso» (Cardellach 1910, 60).

Encontramos en Cardellach la identificación de la bóveda tabicada con Cataluña «que ha dado fama mundial a la “bóveda catalana” así llamada porque (...) a Cataluña se debe el mayor grado de perfección del principio tabicado» (Cardellach 1910, 60). Esta circunstancia parece deberse a «las circunstancias especiales de nuestra rasilla regional» y a la larga tradición en la zona.

En cuanto al posible empuje de estas bóvedas, puede no existir, al menos de una manera teórica: «Si su contextura y sus materiales permitiesen la igualdad absoluta de resistencia tensivas y comprensivas, podría montarse la estructura sobre rodillos de dilatación» (Cardellach 1910, 61) y si existe «la manera de contrarrestar el empuje es, evidentemente, una cuestión secundaria» (Cardellach 1910, 61) y que sólo afecta a los

apoyos, sean muros o tirantes «el medio de equilibrar el empuje no modifica jamás la esencia de la forma constructiva» (Cardellach 1910, 61)

Al final del artículo, aunque insiste en que no es necesario hacerlo así, recoge la manera de diseñar bóvedas tabicadas mediante una línea de empujes, método válido para constructores *miedosos*.

Si en la arquitectura tabicada que acabamos de definir, viese el constructor de excesiva prudencia, una amenaza constante producida por la tensión a que se permite trabajar las formas estructurales, podremos (..) proyectar tales formas bajo un principio de modernización y racionalidad (...) que haga desaparecer todo escrúpulo (...). Consiste (...), tal principio, en ajustar los perfiles de las formas tabicadas (...) a sus líneas de presiones (Cardellach 1910, 63)

Los textos de Cardellach (pertenecientes a su libro *Filosofía de las Estructuras*) son mucho más teóricos que los anteriores, no ofreciendo ningún método para comprobar sus afirmaciones ni tampoco ejemplos de aplicación.

7.5.3.d. Terradas: *La llibreta della volta*

Esteban Terradas fue un brillante científico; doctor en ciencias exactas y en ciencias físicas, ingeniero industrial y de caminos. En su vida profesional se dedicó tanto a la investigación en ciencia básica como a su aplicación tecnológica. Impartió docencia en varias universidades, de España y Sudamérica.

Al menos desde 1913 estuvo vinculado a la Mancomunidad de Cataluña, realizando trabajos diversos, como científico (por ejemplo, la organización de cursos para el Instituto de Estudios Catalanes, dentro de los cuales Albert Einstein visitó Barcelona en 1923) y como técnico. Además, escribió más de 100 entradas de la Enciclopedia Espasa, todas ellas relacionadas con la ciencia, las matemáticas y la tecnología (Roca 1990)

En 1913 empezó a trabajar como asesor del Consejo de Investigaciones Pedagógicas; una de las primeras decisiones de este Consejo fue la creación de la Escola Elemental del Treball, orientada a la enseñanza práctica y muy bien dotada económicamente. La Escuela se instaló en los edificios de la fábrica Batlló, construida en 1868 por Rafael Guastavino. Los laboratorios (especialmente el de Electricidad y Mecánica Aplicada)

disponían de máquinas de todo tipo, y en ellos llevará a cabo Terradas (y después Juan Bergós) sus ensayos sobre estructuras tabicadas, ver figura 7.56



Figura 7.56. Laboratorio de Electricidad y Mecánica Aplicada de la Escuela del Trabajo, instalado bajo las bóvedas tabicadas de la antigua fábrica Batlló. (Roca 1990, 75)

En 1919 recibe un encargo del presidente de la Mancomunidad, Josep Puig y Cadafalch, para obtener un método de cálculo válido para las bóvedas tabicadas.³⁷

El tema era de actualidad por un doble motivo:

- la bóveda tabicada se estaba identificando con el movimiento catalanista, en el marco de conseguir una arquitectura nacional
 - con la aparición del cálculo elástico en los últimos años del s. XIX, el cálculo de bóvedas empleando análisis de equilibrio mediante estática gráfica parecía inseguro.
- Varios autores (Doménech y Estapá, Bayó, Cardellach y Martorell, todos en 1910)

³⁷ Puig y Cadafalch era además arquitecto y estuvo vinculado desde el inicio con el movimiento nacionalista catalán: en 1892 fue ponente de la 1ª Asamblea Catalanista, celebrada en Manresa, donde se aprobó el primer programa político del catalanismo. Conoció a Terrada en su trabajo con asesor del Consejo Pedagógico y desde entonces hizo numerosos trabajos para la Mancomunidad, relacionados con el desarrollo de la red de telefonía y con los ferrocarriles en Cataluña, buscando un marco adecuado para el desarrollo de la industria (Roca 1990).

habían escrito sobre la resistencia a tracción de la fábrica tabicada y sobre la posible aplicación del cálculo elástico, pero ninguno había llegado a un resultado definitivo para cualquier tipo de bóveda por las dificultades que imponía el cálculo numérico.

Terradas escribe sus resultados parciales en la *llibreta de la volta*, un documento de trabajo, manuscrito y expresado en distintos idiomas. Es difícil extraer datos de ella, pero la conclusión parece clara: a pesar de ser el científico catalán más relevante del momento, no es capaz de concluir el análisis elástico de una bóveda de escalera tabicada. Datos sobre la *llibreta* pueden obtenerse de Goday (1934), Bergós (1953) y especialmente en Rosell (1987)

En la primera página de la *llibreta*, Terradas expresa los objetivos de su trabajo: buscar el valor de la carga de rotura a compresión y a tracción de las bóvedas tabicadas, determinar el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, averiguar los efectos del pandeo, comparar el comportamiento de las bóvedas de rosca y las tabicadas del mismo espesor, etc. (ver figura 7.57)

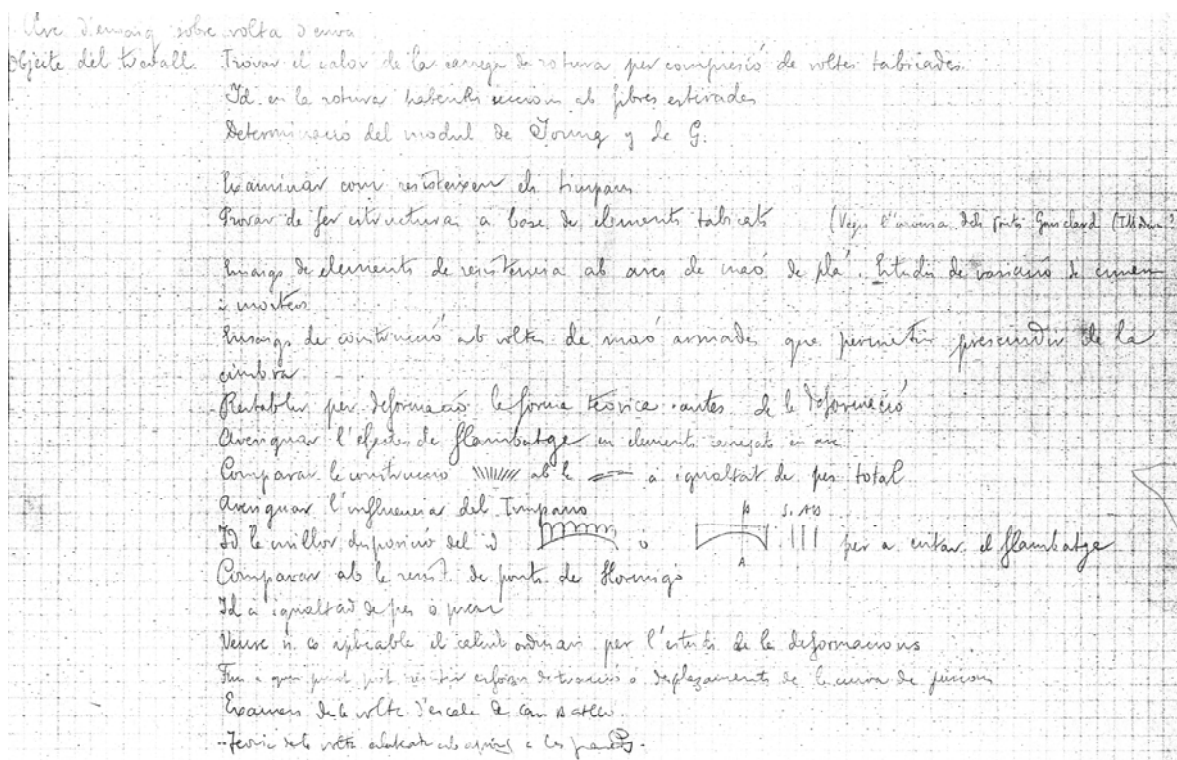


Figura 7.57. Primera pàgina de la *llibreta de la volta*, en la que Terradas expone los objetivos que busca en su trabajo (Terradas, *Llibreta de la volta*, 1)

El trabajo de Terradas tiene una doble vertiente: la teórica, en la aplica la teoría de la elasticidad a las bóvedas de escalera tabicadas; y la práctica, en que se propone cotejar los resultados obtenidos con ensayos sobre bóvedas a escala real y sobre probetas de los materiales que la componen.³⁸

Esta doble vertiente se refleja en la libreta, donde aparecen dibujos preparatorios de ensayos junto a páginas llenas de desarrollos matemáticos (ver figura 7.58)

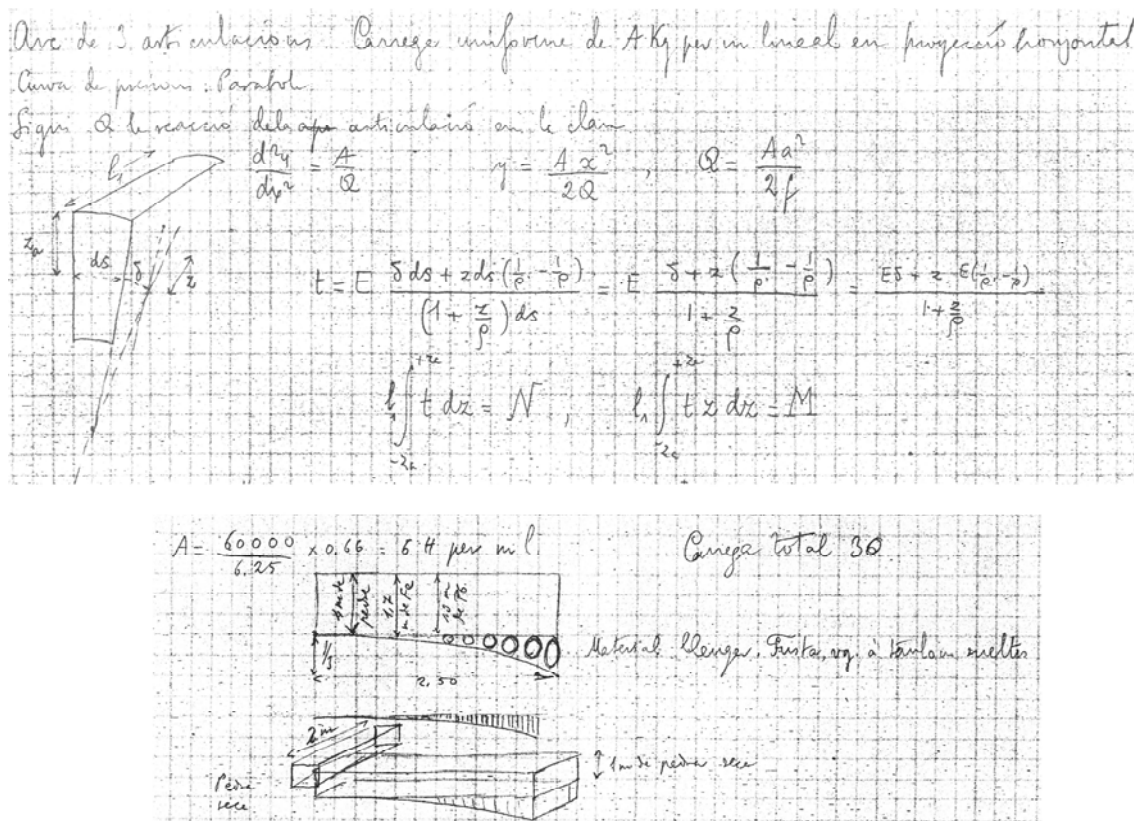


Figura 7.58. Arriba, cálculo analítico buscando la sección de rotura de un arco sometido a carga uniforme (Terradas s.f, 5) y abajo, dibujo preparatorio para un ensayo de carga sobre una bóvedas tabicada muy rebajada (Terradas, *Llibreta de la volta*, 11)

Los ensayos de Terradas están descritos en Bergós (1953) y en Rosell (1987):

³⁸ Esta manera de trabajar tiene mucho que ver con la formación que se impartía en la Escuela del Trabajo de la que Terradas, entre otros, fue fundador. En Roca (1990) se puede consultar más información al respecto, incluidos los planes de estudios de las titulaciones impartidas, que incluían conocimientos muy variados: desde ecuaciones diferenciales hasta manejo de maquinaria de taller.

Ensayó bóvedas de luces diversas, todas con 5 cm de espesor y 5 metros de peralte. No se indica que geometría tienen estas bóvedas, pero parecen de escalera. Los valores que obtiene son los siguientes:

- un valor E entre 80.000 y 100.000 kg/cm² (Bergós 1953, 260).
- datos muy variables para las tensiones de trabajo, según la configuración constructiva: para una bóveda de dos hojas unidas con mortero de cemento, 3,3 kg/cm² a compresión y 0,7 kg/cm² a tracción si las dos hojas de la bóveda ensayada trabajan conjuntamente; si hay un fallo de adherencia y las hojas empiezan a trabajar por separado, 4,65 kg/cm² a compresión y 3,35 kg/cm² a tracción; y si después del fallo de adherencia sólo trabaja una hoja: 9,3 kg/cm² a compresión y 4,65 kg/cm² a tracción. (Rosell 1987,33)

Después pasa al estudio analítico de dos bóvedas de escalera: una de tamaño medio (4 metros de luz), habitual en los edificios de vivienda barceloneses del momento; y otra de gran tamaño, en concreto la que construye Guastavino en el edificio en el que está realizando los ensayos: la antigua fábrica Batlló. Esta escalera tiene 10 metros de luz. Ambas las redibuja Bergós, ver figura 7.59.

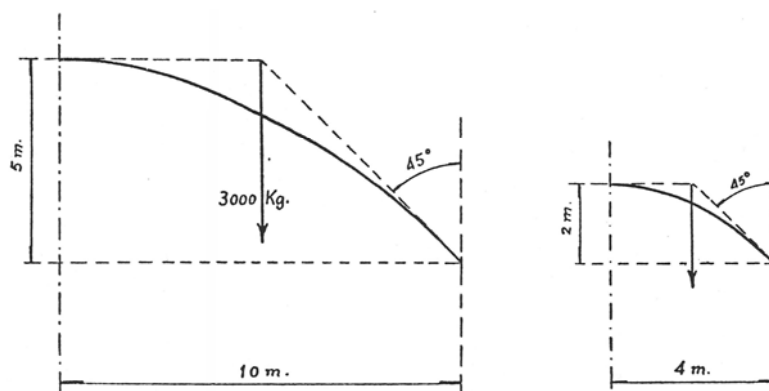


Figura 7.59. Escaleras estudiadas por Terradas y redibujadas por Bergós (1953, 260)

Una de las preocupaciones de Terradas es evaluar el efecto del pandeo en las bóvedas tabicadas, que son láminas muy delgadas pero curvas y con dos o tres apoyos

empotrados, los arranques y la roza lateral en la pared.³⁹ Así lo cita en la primera página de la Llibreta, ver figura 7.57: «Averiguar l'efecte de flambatje en elements carregats en arc» y también en las conclusiones «El càlcul de la resistència de les voltes d'escala rau en l'establiment d'una fórmula convenient per al flambatje de làmines corbes amb determinades condicions límits» (Rosell 1987, 28)

Para evaluar el pandeo, con las herramientas matemáticas de la época (dada su formación, las suyas eran las más avanzadas del momento), debe hacer grandes simplificaciones: cuando considera la escalera una lámina empotrada en dos extremos la asimila a una placa circular y cuando la considera el efecto de la roza lateral, a una lámina plana empotrada en tres lados (Bergós 1953, 261). Es discutible que con estos cambios el resultado se parezca en algo al comportamiento real de una escalera tabicada, que ni es circular, ni es plana ni está perfectamente empotrada en dos ni en tres lados.

Concluye que la gran escalera de la fábrica Batlló necesita tres extremos empotrados (arranques y roza lateral) para ser estable, mientras que la más habitual, de 4 metros de luz, basta con que este empotrada en los dos arranques.

La investigación concluye aquí. Terradas escribe una comunicación provisional a Puig y Cadafalch, ver figura 7.60, que comienza así:

Una volta de escala es una volta de superficie curva. Les forces exteriors son el pes propi, la sobrecàrrega estàtica i la dinàmica dels pesos mòvils. La deformació de la volta, considerada com la d'una làmina, ha de tenir en compte les condicions en els límits, que són: o bé dos empotraments i un suport o tres empotraments en tres dels costats. L'altre costat es lliure (Rosell 1987, 28)

Los resultados de esta comunicación provisional son los que se recogen en Bergós (1953, 260-263). Pero Terradas no queda convencido de los resultados, ya que no coincide lo obtenido en el cálculo analítico con los resultados experimentales, y así lo refleja también en la comunicación provisional (Rosell 1987, 33)

³⁹ Este camino lo continuara Bergós, publicando sus resultados en *Tabicados Huecos* (1965), ver capítulo 8 de esta tesis.

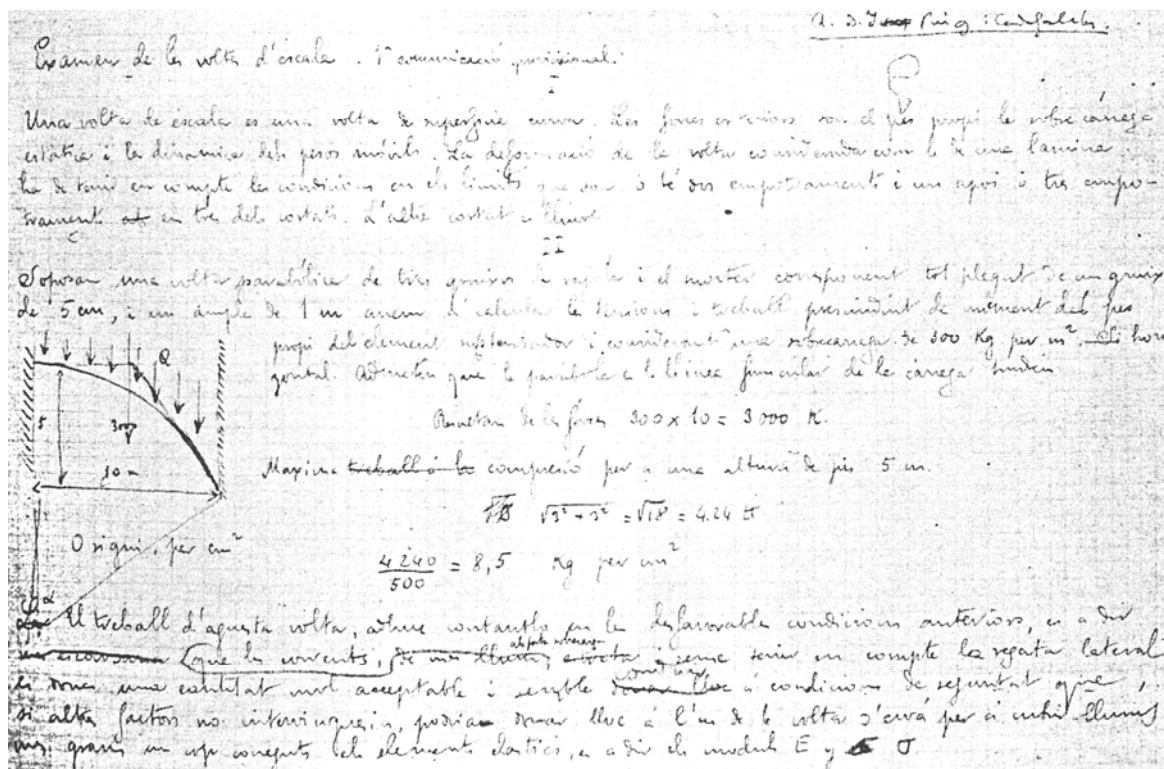


Figura 7.60. Pàgina de la *llibreta de la volta* en la que Terradas empieza la escritura de unas conclusiones parciales para Puig y Cadafach (Rosell 1987, 29)

Algunos datos más sobre el pensamiento de Terradas acerca de la manera de abordar el cálculo de una bóveda pueden extraerse de las entradas que escribe para la Enciclopedia Espasa.

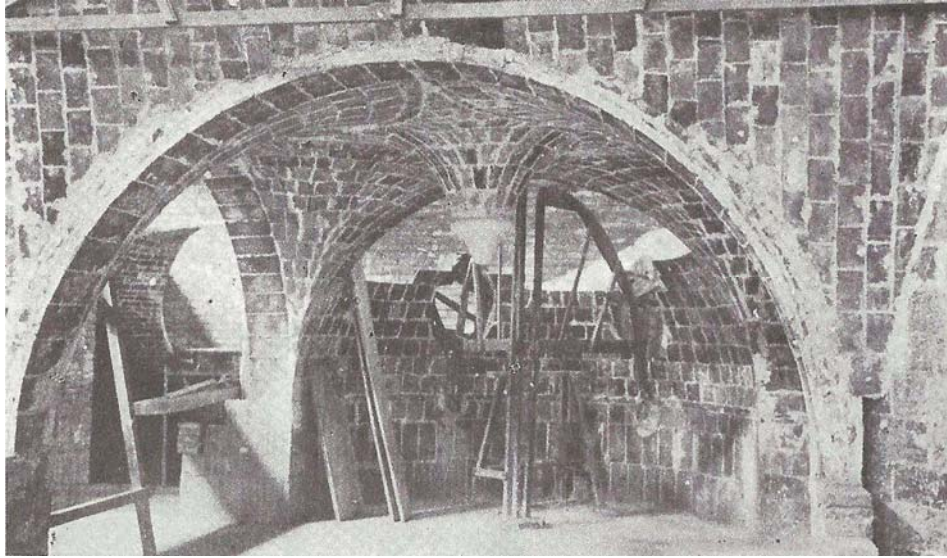
En la entrada «BÓVEDA: Llámase de este modo á una cubierta constituida por piedras naturales o artificiales» hay un largo apartado dedicado al cálculo, que comienza así:

Cálculo de las bóvedas. Las bóvedas se calculan por dos procedimientos distintos. Uno, aplicable á bóvedas de pequeñas dimensiones principalmente, por dar resultados aceptables y ser más cortos, y es el método antiguo ó de las líneas de presión, y el método moderno en que se considera á la bóveda como un cuerpo elástico de una sóla pieza (EUIEA, vol 9, 466)

También escribe las entradas correspondientes a «Placa» y «Elasticidad». En el primero aparece una parte de los cálculos que realiza para la bóveda de escalera asimilada a una placa cilíndrica (Rosell 1987, 31)

Por otro lado, en los laboratorios de la Escuela del Trabajo, dentro de su formación orientada a la práctica, se siguieron construyendo bóvedas tabicadas, para ensayos o

como prácticas del alumnado. En la figura 7.61 se muestra una construcción tabicada realizada en los laboratorios entre 1913 y 1923.



7.61. Bóveda tabicada con un pinjante construida en los laboratorios de la Escuela del Trabajo (Roca 1990, 94)

Por otra parte, Bergós, en la introducción de su libro *Materiales y Elementos de Construcción*, dice:

El haber podido disponer desde 1919 del Laboratorio de Ensayos de la Universidad Industrial de Barcelona, para realizar prácticas con los alumnos de las clases de *Construcciones, Albañilería y Hormigón Armado*, nos ha permitido el estudio experimental de los materiales básicos de la construcción arquitectónica.

(...) Los resultados obtenidos los complementamos con los facilitados por mis inolvidables maestros-investigadores, el genial arquitecto D. Antonio Gaudí y el malogrado ingeniero D. Esteban Terradas

Los ensayos de Bergós, que se estudian en el capítulo 8 de esta tesis, pueden considerarse una continuación de la línea emprendida por Terradas: análisis elástico y enfoque de rotura por resistencia, dando una gran importancia al efecto del pandeo en las bóvedas tabicadas, dada su extrema esbeltez.

7.5.3.e. Goday 1934

El artículo de Goday: «Estudi històric i mètodes de càlculo de les voltes de maó de plà» se mueve en la misma línea que los anteriores a pesar de estar escrito bastante tiempo después.

Como indica su nombre, la primera parte de su artículo es un repaso a la historia de las bóvedas tabicadas. Los puntos a los que dedica su atención están bien elegidos para justificar la aplicación de la teoría elástica que expondrá en la segunda parte: se refiere a Blondel, Patté y Rondelet, citando el símil de la tapa de puchero; después dedica varias páginas a Guastavino, especialmente a la teoría cohesiva que anuncia en su *Essay...*, en 1893. Reproduce los ensayos del libro con los que Guastavino llega a unos valores de resistencia a compresión, tracción y cortante de la fábrica tabicada y cita la tabla de Gaetano Lanza para el cálculo de arcos tabicados siguiendo el procedimiento elástico.

La segunda parte del artículo la dedica a los métodos de cálculo posibles. Cita la teoría basada en las líneas de empujes obtenida por Méry y Moseley: «l'estudi estàtic de les voltes es basava en una teoria que avui denominem la *vella teoria*» (Goday 1934, 14). Frente a ella, propone la nueva teoría elástica: «Si els materials són elàstics, és natural calcular les grans voltes com a arcs elàstics homogenis» (Goday 1934, 15), que le parece especialmente adecuada para las bóvedas tabicadas: «Sortosament, les nostre voltes de maó de pla reuneixen el màxim de condicions per a emmotllar-se a la nova teoria. Aquestes voltes es porten com a veritables plaques metàl·liques corbades » (Goday 1934, 17)

Cita el método desarrollado por Bayó en 1910 como una buena aproximación a los casos sencillos, aunque critica el modelo de arco biarticulado, que no se corresponde con la forma en que se construyen los apoyos. Para Goday, el modelo sería un arco biempotrado. Además, debe ser posible analizar casos más generales «La nova teoria de càlcul dels arcs i voltes cilíndriques en llur major grau de generalitat: voltes amb dues ròtules i voltes empotrades, voltes úniques o múltiples, voltes atirantades, simètriques o asimètriques, etc, la influència de les temperatures, etc » (Goday 1934, 15).

El artículo es muy teórico: cita los posibles métodos de cálculo elástico disponibles en 1934 y la bibliografía donde se desarrollan. Pero no los aplica, porque obtener los esfuerzos elásticos en bóvedas de cualquier geometría es un problema infranqueable en 1934. Goday propone aproximaciones a partir de la solución elástica conocida para bóvedas parabólicas o en arco de círculo, pueden obtenerse las de bóvedas por arista o en rincón de claustro (analizando cada plemento en lonchas y después el efecto de los plemento sobre los arcos diagonales); las bóvedas de escalera pueden imaginarse como un semiarco. Pero con estas simplificaciones el cálculo se aparta del modelo elástico (que debería dar una solución única en el espacio, asunto que no puede resolverse sin ayuda de un programa informático, del que no se disponía en el momento).

Llegados a las cúpulas «la teoría de l'elasticitat no dóna per aquest problema una solució simple i pràctica» (Goday 1934, 20), así que propone un análisis de equilibrio siguiendo la teoría de la membrana, con los esfuerzos contenidos en la superficie media de la cúpula. Este modelo supone tensiones según los paralelos en la parte inferior de la cúpula y a este respecto, afirma: «si es prescindeix de la resistència del morter a la tensió, convé per a atendre l'equilibri de la cúpula amb un suficient reforç o un encerclat de ferro» (Goday 1934, 21)

El siguiente problema que plantea el análisis elástico es la dificultad para estimar las constantes elásticas de los materiales que conforman una bóveda:

Pels materials que integren voltes (pedra, morter, formigó), el coeficient d'elasticitat varia amb l'esforç, varia entre dues pedres de la mateixa pedrera, entre dos maos de la misma fornada (...) Els coeficients no són iguals a la compressió y a la flexió (...). Tot això son objeccions de l'aplicació a les voltes de les fórmules de deformació. (Goday 1934, 15-16)

Al respecto de la obtención de constantes elásticas, Goday cita los ensayos de Terradas, reproduciendo los datos obtenidos en un apéndice de su artículo:

L'enginyer Esteve Terrades ha trobat (...) les següents xifres:

Constant $E=100.000$ [kg.] per centímetre quadrat

Amb maons i rajoles i ciments usals, s'admeten com a coeficients 10 quilograms per centímetre quadrat a la compressió i 0 quilograms a la tensió

Amb materials escollits, 14 quilograms a la compressió i 2 quilograms a la tensió.

(Goday 1934, 28)

Con respecto a los valores de rotura que obtiene Guastavino en 1887 (y que también cita Goday en los apéndices de su artículo), los de Terradas son aproximadamente 1/10. Coincide con el coeficiente de seguridad usual para pasar de tensiones de rotura a tensiones de trabajo.⁴⁰

7.5.3.f. Bosch Reitg 1949

El artículo de Bosch Reitg ya se ha citado en el apartado 7.4: Bosch defiende la teoría de la elasticidad de una manera teórica, pero acaba proponiendo un método de equilibrio para simplificar los cálculos.

En relación a la posibilidad de analizar las bóvedas tabicadas empleando la teoría elástica, cita el artículo de Bayó (1910) como un gran avance «hacia la solución práctica del complejo cálculo en sistemas de una sóla curvatura» (Bosch 1949, 190) aunque hace referencia a algunas incoherencias en el modelo empleado: los apoyos articulados, difíciles de construir, y la heterogeneidad de los materiales que componen la bóveda, que complican la asignación de un módulo de elasticidad. En relación con esto, defiende que sus bóvedas de una sóla hoja son más homogéneas y se adaptan mejor al modelo de material elástico.

Pero el principal escollo es que las bóvedas que propone Bosch son de doble curvatura, a las que asimila a placas curvas. Cita algunos estudios sobre análisis de placas realizados hasta ese momento, solo para geometría sencilla (bóvedas cilíndricas, cúpulas) y carga simétrica. Como aplicación a las tabicadas, cita el desarrollo de Terradas para bóvedas de escalera.

Finaliza esta parte de su artículo con el siguiente párrafo, muy esclarecedor:

Todo cuanto hemos indicado nos da idea de los complejo del cálculo exacto de estas bóvedas, al cual, por su misma complicación, llegaríamos a soluciones poco prácticas, con sistemas de integrales dobles, reñidas con el espíritu práctico que ha de prevalecer en la técnica arquitectónica (Bosch 1949, 193)

⁴⁰ Aunque ya se ha citado anteriormente la incorrección que supone tomar un coeficiente de 10 sobre los ensayos sobre probetas de Guastavino.

7.5.3.g. *Pereda Bacigalupi 1951*

El objetivo de Ángel Pereda, con su libro *Bóvedas Tabicadas. Cálculos y ejemplos resueltos* es facilitar la labor del ingeniero o arquitecto que se enfrenta al cálculo de una bóveda tabicada. Para lo cual recopila los métodos de cálculo propuestos hasta el momento y elabora unas tablas de aplicación «con el fin de proporcionar al técnico análogas facilidades a las que se encuentra en las tablas de Winkler y las de Ritter para el calculo de vigas continuas» (Pereda 1951, 6)

La tabla 3 (ver figura 7.62 arriba) explica como dibujar lo que Pereda llama la fibra media del arco para una determinada carga. El nombre es un poco confuso porque no se refiere a la geometría del arco, sino al funicular de las cargas que pasa por algunos puntos determinados del arco (arranques y claves, por ejemplo).

Las cargas para las que calcula la posición de la fibra media son siempre repartidas, uniformes o de valor creciente hacia los arranques.⁴¹

Las siguientes tablas (4 a 9, ver una de ellas, la 4 en concreto, en figura 7.62 abajo) ofrecen el valor de las reacciones y los momentos en 10 secciones intermedias del arco para distintas cargas posibles: repartida y uniforme en todo el arco, repartida y uniforme en la mitad del arco, carga parabólica, carga parabólica en la mitad del arco, fuerzas normales al arco e incrementos de temperatura. Son las cargas que considera usuales en una bóveda de cubierta: uso, nieve, viento y variaciones térmicas.

Para obtener los valores con los que confecciona las tablas, realiza el cálculo elástico de un arco biarticulado. Un problema básico en este tipo de análisis es la determinación de un posible coeficiente de elasticidad, en un conjunto heterogéneo de ladrillos y mortero. Pereda defiende la adherencia perfecta de ladrillos y mortero que permite «aplicarle el coeficiente de elasticidad del menor de los dos materiales» (Pereda 1951, 31), y hace referencia a la situación parecida en el hormigón armado, a pesar de lo cual se le aplica un coeficiente E conjunto.

⁴¹ La manera de obtener el funicular inicial se parece a la que propone Gaudí y describe Bergós (1953, 256), ver más adelante en este mismo capítulo: es aquel que tiene la misma longitud que la línea media del arco. Pereda propone adaptar la forma del arco a este funicular «ideal» y Gaudí, según describe Bergós, convertir el funicular en la línea media del arco deseado mediante la introducción de fuerzas virtuales

ORDENADAS DE LA FIBRA MEDIA DEL ARCO

		Ordenadas para un coeficiente de la fibra media γ									
		0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	De la clave y	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		0,0100	0,0098	0,0097	0,0095	0,0094	0,0093	0,0089	0,0087	0,0084	0,0082
		0,0400	0,0394	0,0388	0,0382	0,0377	0,0371	0,0359	0,0348	0,0338	0,0329
		0,0900	0,0887	0,0874	0,0862	0,0850	0,0839	0,0812	0,0789	0,0768	0,0748
		0,1600	0,1578	0,1557	0,1537	0,1518	0,1499	0,1457	0,1418	0,1382	0,1350
		0,2500	0,2469	0,2440	0,2412	0,2385	0,2360	0,2300	0,2245	0,2195	0,2150
		0,3600	0,3562	0,3526	0,3492	0,3459	0,3427	0,3352	0,3285	0,3223	0,3166
		0,4900	0,4859	0,4820	0,4773	0,4747	0,4714	0,4631	0,4557	0,4489	0,4426
		0,6400	0,6362	0,6326	0,6292	0,6258	0,6226	0,6151	0,6082	0,6018	0,5959
		0,8100	0,8075	0,8051	0,8027	0,8005	0,7983	0,7933	0,7886	0,7842	0,7802
		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	De los arranques y ₁	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
		0,9900	0,9902	0,9903	0,9905	0,9906	0,9907	0,9911	0,9913	0,9916	0,9918
		0,9600	0,9606	0,9612	0,9618	0,9623	0,9629	0,9641	0,9652	0,9662	0,9671
		0,9100	0,9113	0,9126	0,9138	0,9150	0,9161	0,9188	0,9211	0,9232	0,9252
		0,8400	0,8422	0,8443	0,8463	0,8482	0,8501	0,8543	0,8582	0,8618	0,8650
		0,7500	0,7531	0,7560	0,7588	0,7615	0,7640	0,7700	0,7755	0,7805	0,7850
		0,6400	0,6438	0,6474	0,6508	0,6541	0,6573	0,6647	0,6715	0,6777	0,6834
		0,5100	0,5141	0,5180	0,5227	0,5253	0,5286	0,5349	0,5443	0,5511	0,5574
		0,3600	0,3638	0,3674	0,3708	0,3742	0,3774	0,3849	0,3918	0,3982	0,4041
		0,1900	0,1925	0,1949	0,1973	0,1995	0,2017	0,2067	0,2114	0,2158	0,2198
		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 3

REACCION Y MOMENTOS PARA UNA CARGA UNIFORMEMENTE REPARTIDA

		Para un coeficiente γ										Multipli- cador
Valores estáticos		0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
Re- spon- ses	Horizontal	0,125000	0,124708	0,124427	0,124162	0,123904	0,123656	0,122976	0,122459	0,122037	0,121663	$\frac{8l}{15}$
	Vertical	0,50										$\frac{8l}{15}$
Momentos en las secciones	9	—0,000256	—0,000501	—0,000747	—0,000969	—0,001191	—0,001669	—0,002138	—0,002585	—0,002991		$\frac{8l^2}{30}$
	8	—0,000368	—0,000714	—0,001039	—0,001365	—0,001668	—0,002333	—0,002979	—0,003595	—0,004164		
	7	—0,000362	—0,000703	—0,001149	—0,001337	—0,001614	—0,002276	—0,002904	—0,003504	—0,004065		
	6	—0,000287	—0,000554	—0,000805	—0,001045	—0,001279	—0,001742	—0,002231	—0,002704	—0,003144		
	5	—0,000167	—0,000317	—0,000464	—0,000603	—0,000723	—0,000941	—0,001220	—0,001500	—0,001755		
	4	—0,000029	—0,000054	—0,000078	—0,000095	—0,000120	—0,000058	—0,000094	—0,000171	—0,000238		
	3	+0,000104	+0,000198	+0,000291	+0,000378	+0,000469	+0,000760	+0,000953	+0,001086	+0,001188		
	2	+0,000206	+0,000401	+0,000581	+0,000767	+0,000932	+0,001440	+0,001803	+0,002088	+0,002340		
	1	+0,000265	+0,000530	+0,000768	+0,001010	+0,001244	+0,001869	+0,002356	+0,002738	+0,003085		
	0	+0,000292	+0,000573	+0,000838	+0,001096	+0,001344	+0,002024	+0,002541	+0,002963	+0,003337		

Tabla 4

Figura 7.62. Arriba, Tabla 3, que indica las coordenadas (para 10 secciones en un semiarco) de la línea media del arco para responder a una carga repartida. El coeficiente γ representa la variabilidad de la carga: para $\gamma=0$ es uniforme, valores crecientes indican que la carga crece hacia los apoyos (Pereda 1951, 45); Abajo, Tabla 4, que expresa las reacciones en los apoyos y el momento en esas 10 secciones para una carga uniforme repartida; la primera columna es 0 porque para ese valor la línea media es la de una carga repartida, de manera que no habrá momentos. (Pereda 1951, 62).

Como valores independientes de los materiales, cita los experimentos de la Comisión de Ingenieros y Arquitectos de Austria:

Para el mortero: 320000 kg/cm² a compresión y 306000 kg/cm² a tracción

Para el ladrillo: 140000 kg/cm^2 para compresión y tracción.

Y, por las consideraciones anteriores, toma el valor mínimo de 140000 kg/cm^2 para el conjunto.

A continuación expone algunos ejemplos de aplicación de sus tablas de los que se puede deducir el proceso de cálculo a partir de ellas. Empieza con unas consideraciones sorprendentes a la vista del tipo de cálculo que propone:

El primer problema que se presenta es el espesor que se ha de dar a la bóveda.

Para ello, ha de tenerse muy en cuenta que ninguna de sus secciones se debe procurar que trabajen a flexión (...) a pesar de lo que indica Marvá: que “en las bóvedas de ladrillo unidos con mortero de cemento, como la resistencia a la extensión puede alcanzar valores no despreciables, no es condición precisa que el polígono de presiones esté contenido en el tercio medio del espesor de la bóveda, sino que puede estar fuera de este tercio medio, y aun de la bóveda misma, como en los arcos metálicos (...) (página 796)

A pesar de ello, es conveniente huir de la flexión

Para construir un arco de 20 m de luz y 3,60 de flecha, y 20 cm de espesor (uno de los ejemplos): obtiene la fibra media del arco (funicular de peso propia más sobrecargas).

El arco tendrá como eje este funicular (ver figura 7.63) , no una directriz circular.

Pereda explica como construir la cimbra para el mismo a partir de las ordenadas de la línea media, descontando 10 cm (el semiespesor de la bóveda).⁴²

Empleando el resto de tablas (4 a 9) obtiene las reacciones en los apoyos así los normales y los momentos en las 10 secciones del arco para las diversas cargas posibles: sólo peso propio, sobrecarga en la mitad del arco, viento, nieve, incrementos de temperatura. Con todos estos valores, propone una serie de combinaciones de carga, que le llevan a unos valores de normales máximos y mínimos (R) y momentos (M) máximos positivos y negativos en cada sección del arco.

⁴² En bóvedas tabicadas no es tan relevante como en las de cantería que el perfil sea circular, ya que las piezas que la componen (ladrillos) no se tallan en ningún caso. Construida una ligera cimbra (cercha o forma) a partir de las abcisas y ordenadas que se indican, el proceso constructivo es idéntico.

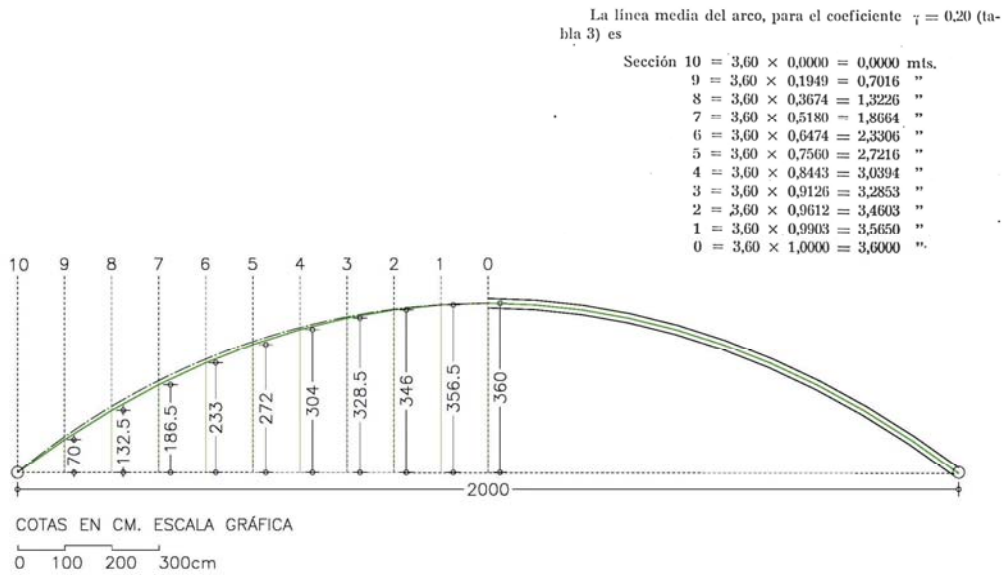


Figura 7.63. Proceso de diseño para un arco de 20 m de luz y 3,60 m de flecha. Arriba, valores de las ordenadas para dibujar la fibra media del arco (es el funicular de las cargas usuales: peso propio y sobrecarga), extraído de una de sus tablas (Pereda 1951, 85). En la mitad izquierda del arco, trazado de esta fibra media a partir de las ordenadas, línea en verde. Nótese la pequeña diferencia que hay con el eje de un arco circular (en línea de trazo y punto). En la mitad derecha del arco perfil del mismo, de espesor 20 cm, dibujado a partir de la fibra media

Dividiendo M entre R , obtiene excentricidades máximas positivas y negativas, ver figura 7.64 derecha. A partir de ellas, se pueden dibujar 2 líneas de empuje límites (superior e inferior), ver figura 7.64 izquierda.

Estas resultantes obran con relación a los momentos, con una excentricidad del centro de gravedad, o sea, de la línea media del arco de

$$e_2 = \frac{M_2}{R_2} = \frac{194}{7642} = 2,5 \text{ centímetros}$$

$$e_3 = \frac{351}{7366} = 4,8 \text{ centímetros}$$

$$e_1 = \frac{474}{7121} = 6,7 \text{ centímetros}$$

$$e_4 = \frac{598}{6614} = 9,0 \text{ centímetros}$$

$$e_5 = \frac{647}{6740} = 9,6 \text{ centímetros}$$

$$e_6 = \frac{645}{6892} = 9,4 \text{ centímetros}$$

$$e_8 = \frac{470}{7262} = 6,5 \text{ centímetros}$$

$$e_9 = \frac{277}{7479} = 3,7 \text{ centímetros}$$

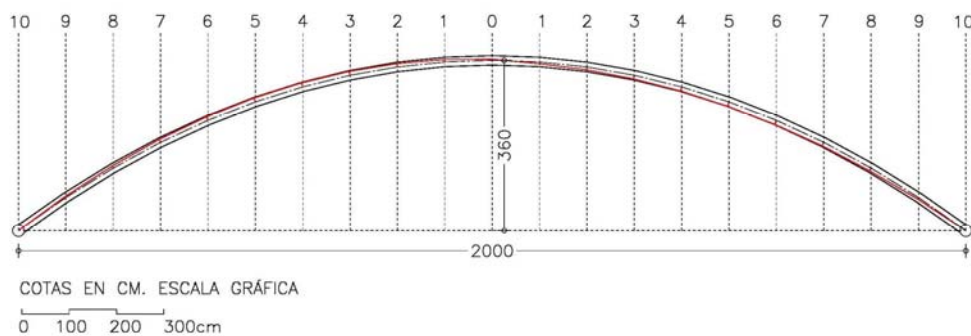


Figura 7.64. Arriba, obtención de excentricidades para la combinación de hipótesis más desfavorable, dividiendo en momento entre la resultante de fuerzas en cada sección de arco (Pereda 1951, 96-97). Abajo, dibujo de la línea de empujes elástica a partir de estos valores de excentricidad, con un máximo en la sección 5 de la mitad derecha.

Concluye así «Como vemos por la excentricidad de las fuerzas, ninguna de las secciones trabaja a flexión, y únicamente en la sección 5 a la derecha coincide la excentricidad con la arista de la bóveda»

Y obtiene las tensiones en las secciones del arco consideradas (de 9 a 0 por la izquierda y otra vez hasta 9 por la derecha), con la fórmula de la flexión compuesta en distribución elástica.

Con las excentricidades que obtiene Pereda, aunque la línea de empujes está contenida en el espesor del arco, se sale del tercio central, de manera que todas las secciones del arco tienen zonas traccionadas, ver figura 7.65. En algunos casos, con valores bastante elevados: en la sección 5 de la derecha, se alcanza la máxima tensión de tracción, con 6,33 kg/cm² (0,63 N/mm²)

$T = \frac{R}{S} \pm \frac{Mv}{I}$ (M en kilogramos-centímetros) hallaremos el trabajo en las distintas secciones.

$$T_9 = \frac{7642}{2000} \pm \frac{19400}{6666} = 3,82 \pm 2,91 = + 6,73; - 0,91$$

$$T_8 = \frac{6738}{2000} \pm \frac{59600}{6666} = 3,36 \pm 8,94 = + 12,30; - 5,58$$

$$T_0 = \frac{6351}{2000} \pm \frac{15400}{6666} = 3,17 \pm 2,31 = + 5,48; - 0,86$$

$$T_5 = \frac{6740}{2000} \pm \frac{64700}{6666} = 3,37 \pm 9,70 = + 13,07; - 6,33$$

$$T_6 = \frac{6892}{2000} \pm \frac{64500}{6666} = 3,44 \pm 9,67 = + 13,11; - 6,23$$

$$T_9 = \frac{7479}{2000} \pm \frac{27700}{6666} = 3,73 \pm 4,15 = + 7,88; - 0,42$$

Figura 7.65. Tensiones en las secciones de los distintos puntos del arco (Pereda 1951, 98-99)

Aunque Pereda no cita ensayos ni valores de resistencia de una fábrica de ladrillo y mortero de cemento, sí ofrece tensiones de trabajo de estos materiales,

Para el ladrillo cita el Pliego de Condiciones de la Edificación de 1948: 85 kg/cm² a compresión y 85 kg/cm² a tracción (valores de rotura). Para llegar a valores de trabajo, emplea un coeficiente de 4 en compresión: 21,25 kg/cm² (2,12 N/mm²) y de entre 5 y 6 en tracción: 1,40-1,70 kg/cm² (0,14-0,17 N/mm²)

Para el mortero de cemento hace referencia a una tabla de Marvá con valores de resistencia de distintos cementos fabricados en España; los valores son bastante dispares: entre 150 y 395 kg/cm² para compresión y entre 11 y 22 para tracción (valores de rotura). Toma un valor medio y aplica un coeficiente de 10 para llegar a un valor de trabajo : 25 kg/cm² (2,5 N/mm²) a compresión y 1,10-1,70 kg/cm² a tracción (0,11-0,17 N/mm²).

Luego el cálculo que propone Pereda ofrece tensiones en las secciones que superan con creces la resistencia a tracción que él mismo cita (6,33 kg/cm² frente a 1,40-1,70 kg/cm²), a pesar de lo cual termina su ejemplo con la siguiente frase:

Estas son las fatigas que tiene el material en su intradós y trasdós, que son muy inferiores al establecido en el pliego de condiciones de la Edificación actualmente en vigor, fatigas que no son permanentes, y sólo se presentarán cuando coincidan todas las sobrecargas, viento fuerte, etc., que hemos supuesto para el cálculo de la misma

Es verdad que el valor de rotura a tracción indicado en el pliego que cita (8,5 kg/cm² para el ladrillo y 11-22 kg/cm² para el mortero) no se supera en ningún punto del arco que estudia, aunque sí las tensiones de trabajo.

Validez del análisis de Pereda.

A pesar de realizar laboriosos análisis elásticos mediante integrales para todas las cargas posibles de un arco y sus combinaciones, el proceso que explica Pereda no está muy lejos de las propuestas de equilibrio de autores anteriores (ver apartado 7.3 de esta tesis): obtiene la forma del arco como el funicular de las cargas principales y a partir de esa forma, demuestra su estabilidad comprobando que las líneas de empujes (obtenidas como el cociente de M/N obtenidos de esos análisis elásticos) de todas las posibles combinaciones de cargas están contenidos en el espesor de la bóveda.

Asumiendo el tipo de análisis que propone Pereda, demostrar la validez del arco porque no hay secciones flexionadas no tiene mucho sentido: si hay flexión es porque la línea de empujes se sale del arco y esto sólo implicaría tracciones algo mayores que las que cita (que por otra parte ya son superiores a los valores de trabajo indicados).

Para que no haya tracciones en ninguna sección de arco es necesario que la línea de empujes esté contenida en el tercio central del arco, lo cual no se cumple en su ejemplo. ¿Porqué es importante que la línea de empujes esté contenida en el arco? porque el problema no es de resistencia, sino de estabilidad: un arco es estable cuando puede dibujarse una línea de empujes en su espesor, una cualquiera, como ha demostrado Jacques Heyman en su desarrollo del Análisis Límite aplicado a fábricas (Heyman 1982, 1995). La línea de empujes correspondiente a la solución elástica, que obtiene Pereda, es una de las soluciones posibles, y como está contenida en el espesor del arco, este será seguro.

Respecto a la resistencia a tracción del material, lo que ocurre cuando la línea de empujes se sale del tercio central es que el arco de fábrica se agrieta, y trabaja (a compresión) una zona menor del arco (Heyman 1982, ver figura 7.66). Por eso el arco es válido aunque aparentemente se superen las tensiones de trabajo del material, ya que esas tensiones en realidad no llegarán a producirse.

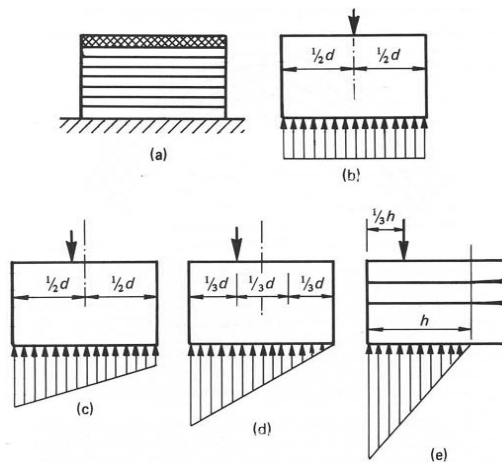


Figura 7.66. Comportamiento de un arco de fábrica cuando la línea de empujes sale del tercio central (Heyman 1892, 23)

7.5.3.h. Juan Bergós

Juan Bergós ya ha sido citado en el apartado 7.4. de este mismo capítulo. Es escritor de numerosos textos acerca de aspectos constructivos y estructurales de bóvedas tabicadas, además de realizar una extensa campaña de ensayos, ensayos realizados durante 40 años en el laboratorio de la Universidad Industrial de Barcelona, como

prácticas de las asignaturas que impartía Bergós en esa universidad. Estos ensayos se describen con detalle en el capítulo 8 de esta tesis.

Bergós, como tantos autores, defiende de forma teórica la aplicación de la teoría elástica a las bóvedas tabicadas:

Dada la elasticidad notable que poseen los arcos y bóvedas tabicados, se aplican a todos ellos las fórmulas de flexión de vigas curvas (...) suponiéndolas articuladas, o a lo más semiempotradas, por sus extremos (Bergós 1953, 414)

Pero llegados a la práctica, obtiene los esfuerzos en las bóvedas mediante análisis de equilibrio, como el de la cúpula tabicada según la teoría de la membrana que se describe en el apartado 7.4 o los casos que se estudian a continuación

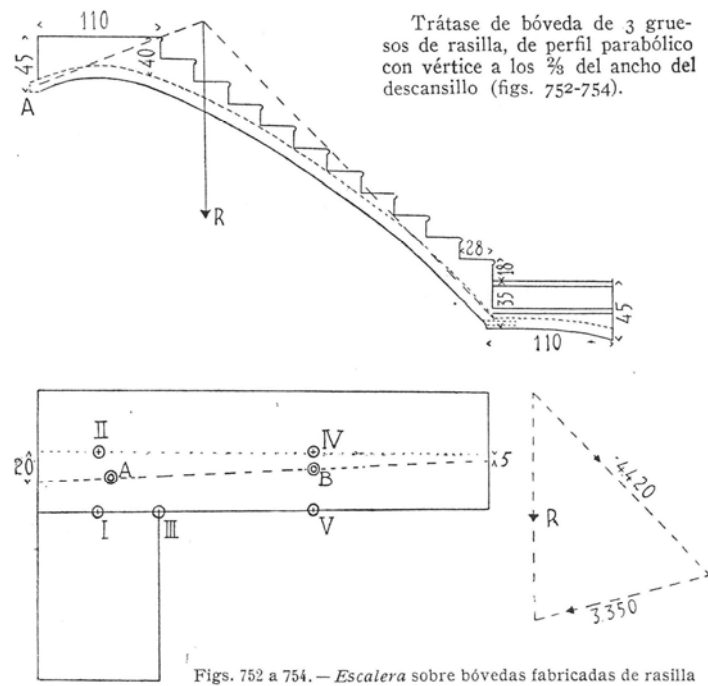
A pesar de ello, se incluye a Bergós en este apartado por que sistemáticamente comprueba las bóvedas empleando un enfoque de resistencia y asumiendo una distribución de tensiones elástica en el estudio de las secciones de arcos y bóvedas.

El primer ejemplo de esto es el análisis de una escalera tabicada (ver figura 7.67), que aparece en su libro *Construcciones urbanas y rurales* (1945) junto con el análisis de una cúpula tabicada.

Bergós obtiene de una manera muy sencilla el empuje que deben resistir los apoyos: calcula la resultante de las cargas y obtiene los empujes en los apoyos suponiendo que la dirección de las reacciones es tangente a la bóveda en los extremos. La línea de empujes sólo la dibuja sobre la planta de la escalera, no sobre su sección.

Con el valor de las reacciones y las dimensiones de la bóveda: 9 cm de espesor (tres gruesos de rasilla) y 110 cm de ancho, obtiene las tensiones sobre los apoyos.

Como la línea de empujes llega descentrada a ambos apoyos (5 cm en un lado y 20 en otro), aplica la fórmula de tensiones en compresión descentrada y obtiene un máximo de 6,6 kg/cm² (0,66 N/mm²) en compresión, valor que estima podrán resistir las rasillas. El análisis de Bergós está planteado desde el enfoque de la resistencia: no dibuja la línea de empujes en el interior de la escalera para comprobar si la fábrica está trabajando a compresión. Y suponiendo que está comprimida siempre, hace la comprobación de resistencia de las rasillas dentro del marco elástico.



$$\begin{aligned} \text{Arranque superior } E &= 3.350 \text{ kgs; } f = \frac{3.350}{110 \times 9} \left(1 + \frac{6 \times 20}{110} \right) = 6,6 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Id. inferior } E_1 &= 4.420 \text{ » } f_1 = \frac{4.420}{110 \times 9} \left(1 + \frac{6 \times 5}{100} \right) = 5,72 \text{ »} \end{aligned}$$

Figura 7.67. Análisis de equilibrio para comprobar la estabilidad para una bóveda de escalera tabicada (Bergós 1945, 417)

En 1953 Bergós escribe otro libro, *Materiales y elementos de construcción, estudio experimental*. Es fundamentalmente una recopilación de ensayos, aunque también hay algunas consideraciones acerca del cálculo de bóvedas tabicadas. Acerca de este tema, cita los estudios de tres autores: Guastavino, Gaudí y Terradas.

De Guastavino cita nuevamente los datos de resistencia obtenidos en los ensayos realizados en Nueva York en 1887, y publicados en su libro de 1893 (ver figura 7.68). Con estos valores trabajará para el estudio de las secciones de arcos y bóvedas.

Compresión, al año	232	kg/cm ²	Compresión	1
Compresión, a los 5 días.	145	»	Extensión	1/7
Extensión	20	»	Cortadura	1/24
Cortadura	6	»	Desgarramiento (yeso)	1/16
Desgarramiento, con cemento Portland . .	9	»	Desgarramiento (Portland)	1/73
Desgarramiento, con yeso plafón	2	»		

Figura 7.68. A la izquierda, valores de resistencia a rotura obtenidos por Guastavino y citados por Bergós. A la derecha, relación entre ellos tomando el de compresión como base (Bergós 1953, 415)

Acerca de los métodos de cálculo que emplea Guastavino, cita el desarrollado en su libro a partir de la fórmula del arco parabólico, en el que Guastavino también emplea, aparentemente, un enfoque de resistencia:

Guastavino se contenta con determinar la sección S de las bóvedas tabicadas, con la fórmula de los arcos circulares rebajados (...) aumentando el espesor en los arranques en relación con el valor de la resultante inclinada de los mismos (Bergós 1953, 255).

Sobre Gaudí, explica las consideraciones teóricas que tiene en cuenta en el diseño de sus bóvedas tabicadas:

Nuestro original arquitecto no admitía la intervención de la elasticidad en el cálculo de arcos y bóvedas tabicados; enfocaba éstos no como vigas o placas curvas sino como arcos pétreos (Bergós 1953, 255).

El proceso de cálculo que cita es muy similar al descrito por Pereda (1951) que se estudia más arriba: se dibuja el funicular de las cargas usuales (peso propio y sobrecargas) con la misma longitud del arco a construir; se introducen una serie de «fuerzas virtuales» que convierten este funicular en la línea media del arco. Se miden las tracciones que estas fuerzas virtuales causan en el arco y si el material puede resistirlas, se da por bien trazado.

Bergós presenta un ejemplo de cálculo, siguiendo este método, de una bóveda tabicada, la de la iglesia parroquial de San Agustín en Barcelona, de 1728. Es de perfil semicircular y está construida con cuatro hojas de ladrillo recibidas con yeso. Los riñones se macizan hasta $\frac{1}{3}$ de la altura, y se cita la existencia de lunetos, aunque se analiza un tramo entre ellos sin tenerlos en cuenta en el cálculo. Bergós dibuja el antifuncular del peso propio (una catenaria con la misma longitud que el arco estudiado) e introduce fuerzas auxiliares hasta conseguir que coincida con la línea media de la bóveda, ver figura 7.69.

Para obtener el valor de las fuerzas auxiliares, hace lo siguiente:

-Dibuja un polígono de fuerzas que corresponde al funicular elegido (con la misma longitud que la línea media del arco). Para este dibujo, divide la mitad de la bóveda en 7 partes (ver II en figura 7.69)

-Modifica el polígono de fuerzas para que los radios polares coincidan con las tangentes a la línea media del arco en el centro de gravedad de cada una de las 7 partes; para lo que añade las fuerzas virtuales, que son perpendiculares a las tangentes en los puntos 1 a 7 (ver I en figura 7.69). Desde el 1 hasta el 4 son hacia afuera, creando compresiones en la sección. Desde el 5 hasta el 7 son hacia abajo, creando tracciones en la sección. El valor de estas fuerzas virtuales F_1 hasta F_7 se mide a escala sobre el polígono funicular modificado, ver II en figura 7.69.

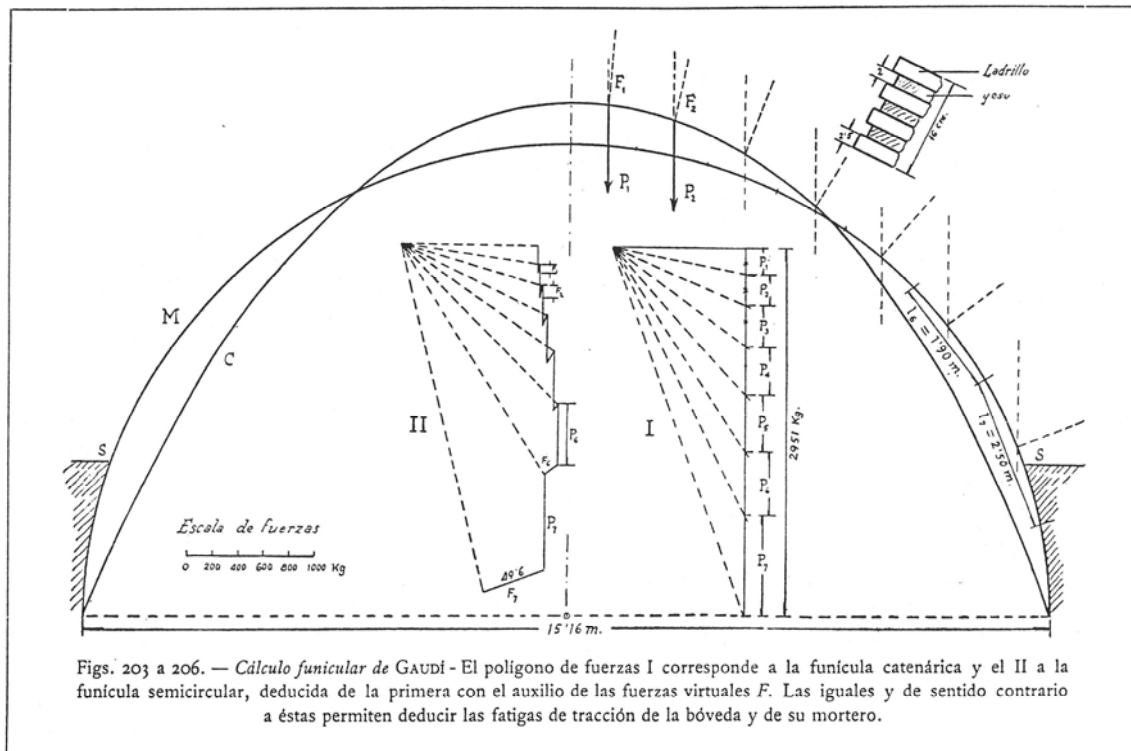


Figura 7.69. Análisis de una bóveda tabicada empleando el método propuesto por Gaudí (Bergós 1953, 256)

Para convertir las fuerzas virtuales en tracciones y compresiones en la sección, emplea el mismo método que se utilizaba en los análisis de membrana de una esfera para pasar de empujes radiales a fuerzas según los paralelos:

$$T = \frac{F \cdot R}{L}$$

Siendo F la fuerza radial (en este caso la fuerza virtual perpendicular a la tangente a la parte de bóveda considerada, 1 hasta 7); R el radio de la bóveda y L la longitud de la parte de bóveda considerada.

Bergós particulariza el proceso para las secciones de bóveda 6 y 7 ya que en ellas se producen las mayores tracciones:

$$T_6 = \frac{F_6 \cdot R}{L_6} = \frac{124 \text{ kg} \cdot 758 \text{ cm}}{190 \text{ cm}} = 444 \text{ kg} \quad (4,44 \text{ kN})$$

$$T_7 = \frac{F_7 \cdot R}{L_7} = \frac{496 \text{ kg} \cdot 758 \text{ cm}}{250 \text{ cm}} = 1344 \text{ kg} \quad (13,44 \text{ kN})$$

Las tracciones en la sección pueden obtenerse también gráficamente como se indica en la figura 7.70

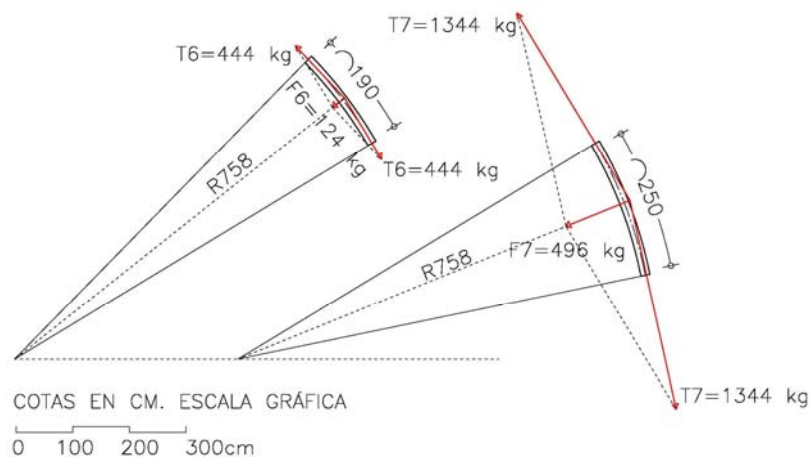


Figura 7.70. Construcción gráfica para obtener las tracciones en las secciones 6 y 7 a partir de las fuerzas virtuales F6 y F7.

Pero estas secciones, además de la tracción, están comprimidas. El valor de las compresiones puede medirse directamente en los radios vectores del polígono de fuerzas modificado (ver II en figura 7.68): C₆ es 2112 kg y C₇ es 2852 kg.

Y por fin, con los valores de tracciones y compresiones en las dos secciones críticas:

-sección 6: T₆= 444 kg y C₆ =2112 kg (21,12 kN)

-sección 7: T₇= 1394 kg y C₇ =2852 kg (28,52 kN)

A partir de estos valores de C y T, supone una distribución triangular de tensiones pero teniendo en cuenta que la resistencia a tracción es 1/8 de la resistencia a

compresión.⁴³ Las tensiones máximas están en la sección 7; obtiene 17,2 kg/cm² (1,72 N/mm²) en compresión y 2 kg/cm² (0,2 N/mm²) en tracción.

Como la tensión máxima de compresión es menor que la considerada admisible, la da por válida, ver figura 7.71

Es decir que la bóveda tiene un coeficiente de seguridad de

$$\frac{115}{17,2} = 5,5,$$

completamente aceptable; en realidad todavía es mayor, pues estando macizadas las enjutas hasta el nivel S — S, deberían tomarse r_6 y t_6 en lugar de r_7 y t_7 .

Figura 7.71. Procedimiento de comprobación de la bóveda, a partir de la máxima tensión de compresión (Bergós 1953, 259).

Sin hacer lo mismo con las tensiones de tracción que tanto se ha molestado en obtener, a pesar de disponer al menos de un valor de comparación, el obtenido por Guastavino en los ensayos de 1887, ver figura 7.68. Tampoco explica de donde obtiene la tensión de rotura a compresión (115 kg/cm², 11,5 N/mm²), aunque es de suponer que de alguno de los numerosos ensayos que realiza en los laboratorios de la Escuela del Trabajo.

Validez del análisis de Bergós

El análisis de Bergós es muy discutible, ya que parte de un funicular determinado, el que tiene igual longitud que la línea media del arco. Este funicular en concreto no está contenido en el espesor de la bóveda, y es necesaria la intervención de las fuerzas virtuales para que lo esté, incluso hasta hacerlo coincidir con la línea media del arco.

Podemos repetir el análisis con la misma geometría y cargas aplicando el Teorema de la Seguridad del Análisis Límite: si es posible encontrar una línea de empujes contenida en el espesor de la bóveda, será segura. En la figura 7.72 se sobreponen al perfil de la bóveda que dibuja Bergós dos líneas de empujes:

⁴³ Esta relación de 1 a 8 no indica de donde la toma, aunque tiene relación con el 1 a 7 que extrae de los ensayos de Guastavino, ver figura 7.68.

- en verde la que puede dibujarse a partir del polígono de fuerzas I de Bergós: es casi coincidente con la catenaria que dibuja sobre el arco, que tiene la propiedad de tener igual longitud que la línea media del arco
- en rojo una línea cualquiera, que prácticamente está contenida en el espesor de la fábrica: bóveda y relleno. Esta línea se sale ligeramente de la fábrica a partir de la sección 7; pero si contamos con la existencia de los lunetos que cita Bergós, que según Fray Lorenzo (1639) tienen la misma función rigidizadora que las lengüetas, la estabilidad de la bóveda está asegurada.⁴⁴

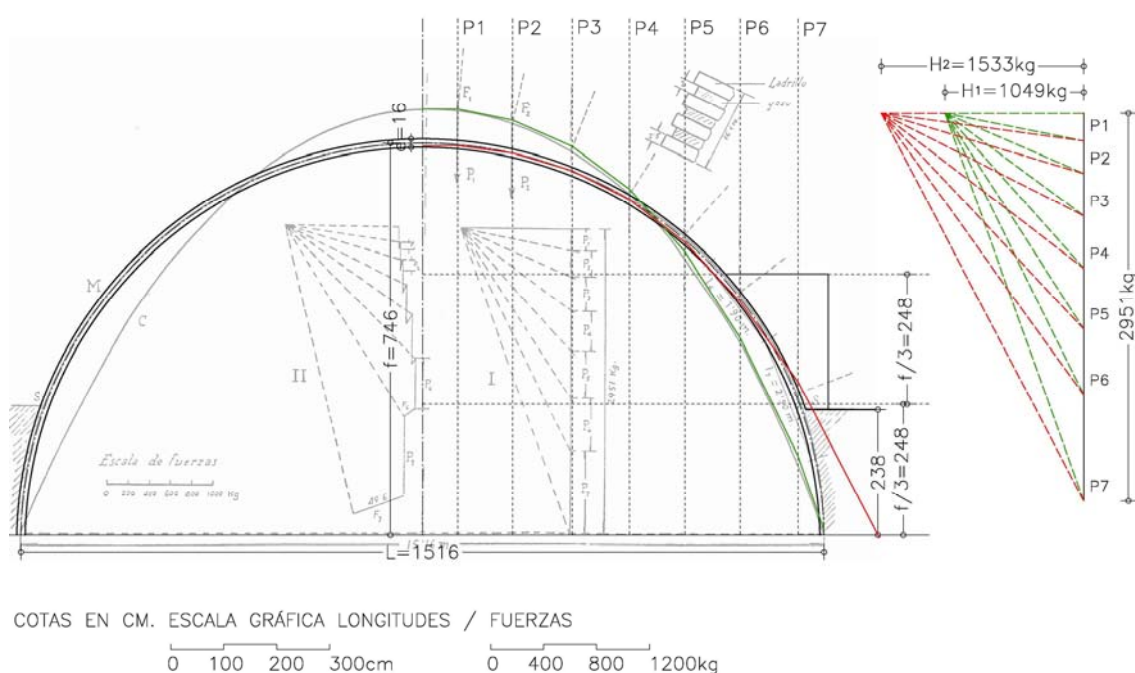


Figura 7.72. Sobre la bóveda que analiza Bergós se dibujan dos líneas de empuje: en verde la dibujada por el mismo, que se sale de la bóveda. En rojo una más tendida, contenida en su espesor. A la derecha, los polígonos de fuerzas correspondientes de ambas líneas de empuje.

La línea de empujes roja es más tendida que la propuesta por Bergós y por eso produce un empuje mayor (1533 kg frente a 1049, ver polígonos de fuerzas en la figura 7.67). Quizá a eso se refiere cuando termina su análisis así: «Este procedimiento gráfico nos

⁴⁴ Sobre el tamaño de los lunetos no se da ninguna indicación. Dado que los rellenos son prácticamente los «canónicos», de $1/3$ de la flecha del arco, se han dibujado unos lunetos que lleguen hasta $1/3$ más, a modo de lengüetas. Pero no es necesaria esta altura, ya que la línea de empujes se sale muy ligeramente de la bóveda.

da una reducción de empuje de 400 kg. (25%) respecto a la bóveda equilibrada construida a rosca en lugar de tabicada» (Bergós 1953, 259)

7.6. Análisis de bóvedas tabicadas

A lo largo de este capítulo se estudian las distintas maneras de abordar el análisis de una bóveda tabicada, intentando comprobar la validez de todas ellas con el desarrollo de la teoría de estructuras y las herramientas de que disponemos en la actualidad.

Hasta 1800 el cálculo se abordaba mediante reglas de proporción, como el resto de las estructuras de fábrica. Los dos autores estudiados: Fray Lorenzo (1639) y Renart (ca. 1810) ofrecen proporciones muy distintas, que llevan a un menor grosor de muro en el caso de Renart. Pero esta diferencia, como se demuestra en el apartado 7.1, se debe a una diferente situación, uso y geometría de las bóvedas construidas por uno y por otro. Las reglas proporcionales nunca son válidas en abstracto, para un edificio genérico, sino aplicadas a una situación concreta.

Al menos desde 1865 se aplican a las bóvedas tabicadas de las recientes teorías de Méry y Moseley, comprobando la estabilidad mediante el dibujo de una línea de empujes en el interior de la fábrica: situada en el tercio central (Méry) o la que provoca el empuje mínimo (Moseley, Scheffler). Desde ese momento y hasta que dejan de construirse en la segunda mitad del siglo XX, el análisis de arcos y bóvedas tabicadas de geometría sencilla (bóvedas cilíndricas) se aborda en la práctica dibujando una línea de empujes en el interior del arco. Así lo hacen los Guastavino (padre e hijo) en todos sus proyectos en Estados Unidos (ver figuras 7.13, 7.14 y 7.15) y arquitectos españoles de la primera mitad del siglo XX, desde Jerónimo Martorell (1910) hasta Luis Moya (1947). Es frecuente la idea de que esta línea de empujes, en lugar de estar contenida en el arco, debe dibujarse en su tercio central, para evitar la aparición de tracciones en la fábrica. En Heyman (1982) se desmonta esta idea (ver figura 7.66), pero atenerse a ella en el diseño del arco no implica que el resultado esté mal, sino que tendrá un mayor coeficiente de seguridad geométrico.

La particularidad de las bóvedas tabicadas frente a otras estructuras de fábrica es que son muy delgadas, lo que hace más difícil dibujar una línea de empujes en su interior. Para solucionar el problema se emplean métodos diversos, que muchos autores explicitan en sus textos:

El primero es construir bóvedas de sección circular muy rebajada, de manera que el perfil del arco es muy similar a una parábola (Moya 1947, ver figura 7.19). En Heyman (1977) se indican los espesores límite para arcos de perfil circular sometidos a su peso propio, que disminuyen exponencialmente con el ángulo de apertura.

En la figura 7.73 se obtienen, a partir de la curva deducida en Heyman (1977) los espesores mínimos de bóveda sometidas a peso propio (u otras cargas repartidas sobre la superficie de la bóveda) para las relaciones flecha/luz habituales en las bóvedas tabicadas (1/10, 1/8 y 1/6):

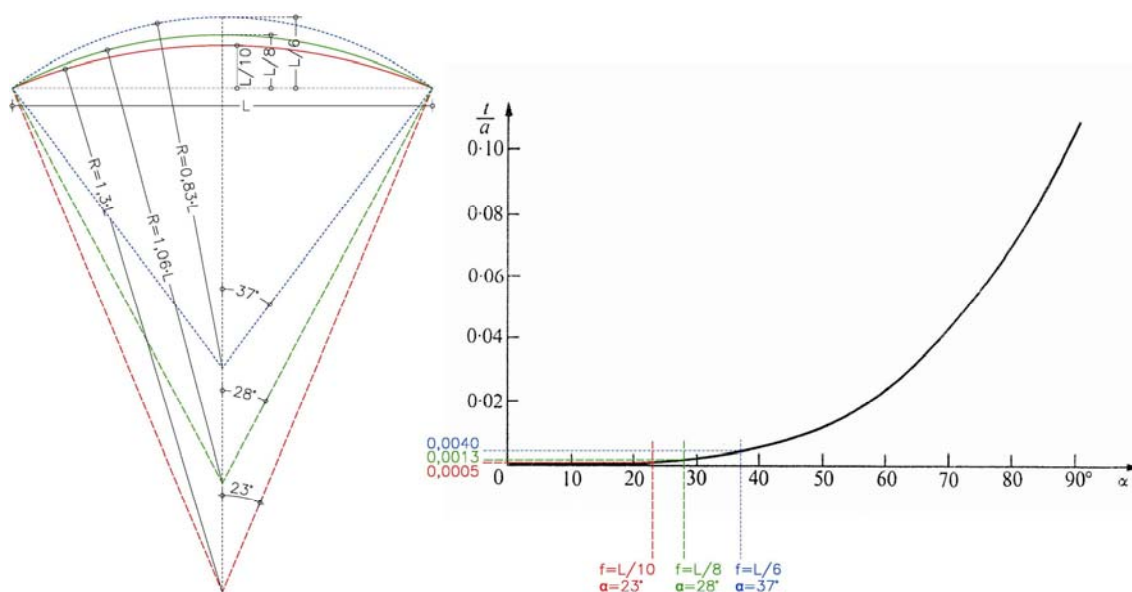


Figura 7.73. A la izquierda, relaciones flecha/luz habituales en arcos y bóvedas tabicadas, indicando sobre ellas el ángulo de apertura y el radio en función de L . A la derecha, espesores mínimos necesarios para estas bóvedas, expresados como el cociente t/a (espesor/radio), marcados sobre la curva deducida por Heyman (1977, 80)

-para flecha 1/10 de la luz, el cociente espesor/radio es 0,0005: una bóveda de 10 m de luz ($R=13$ m) y flecha 1 m tiene un espesor límite de 6,5 mm.

-para flecha 1/8 de la luz, el cociente espesor/radio es 0,0013: una bóveda de 10 m de luz ($R=10,6$ m) y flecha 1,25 m tiene un espesor límite de 13,7 mm.

-para flecha $1/6$ de la luz, el cociente espesor/radio es 0,004: una bóveda de 10 m de luz ($R=8,3$ m) y flecha 1,67 m tiene un espesor límite de 33 mm.

El espesor constructivo mínimo de una bóveda tabicada (6-8 cm si es de dos hojas) supera con creces estos espesores mínimos, con coeficientes de seguridad geométricos superiores a 2.

Otro aspecto fundamental es rellenar senos hasta $1/3$ de la altura de la bóveda y construcción de tabiquillos, costillas o lengüetas hasta $1/3$ más (Fray Lorenzo 1639 y todos los autores a partir de él). El relleno aumenta el área de la fábrica y las lengüetas rigidizan el conjunto; son fundamentales para hacer frente a las cargas asimétricas o móviles (ver figura 7.11), que no podrían ser resistidas de otra manera, debido al escaso espesor y peso propio de las bóvedas tabicadas: las líneas de empujes de las sobrecargas modifican mucho las debidas al bajo peso propio.

Las bóvedas de geometría compleja (de arista, baídas) y las cúpulas se han analizado siguiendo métodos de equilibrio.

En las primeras se emplea el método de los cortes, dividiendo las bóvedas en rebanadas que van apoyando unas en otras. Así analiza la compañía Guastavino la bóveda de arista del Army War College (ver figura 7.26); en España, es la manera en que Bosch Reitz analiza sus bóvedas baídas (ver figura 7.28)

Para las cúpulas, desde los primeros años del siglo XX se emplea el análisis de membrana, empleando los procedimientos gráficos que desarrolla Dunn (1904, 1908). Las cúpulas tabicadas pueden ser aún más esbeltas, ya que a los mecanismos indicados para arcos y bóvedas (perfil rebajado, relleno de senos y construcción de lengüetas) se añade la colaboración de fuerzas en el sentido de los paralelos.

En concreto, para cúpulas esféricas, un análisis de membrana (fuerzas contenidas en la superficie media) soluciona el equilibrio sólo con compresiones (según los paralelos y los meridianos) hasta un ángulo de apertura de 52° . Esto permite una disminución todavía mayor de los espesores límite para cúpulas, aspecto que también se desarrolla en Heyman (1977), ver figura 7.74.

Para las relaciones flecha luz estudiadas en arcos y bóvedas: $f/L=1/10$, $1/8$ y $1/6$ (ver figura 7.74), el espesor límite es 0, dado que el ángulo de apertura es menor de 52° en

los tres casos.⁴⁵ Incluso una cúpula semiesférica tiene un cociente espesor/radio relativamente bajo, de 0,042: una cúpula de 10 metros de luz y 5 de flecha ($R=5$ m) tiene un espesor límite de 21 cm.

A partir de los 52° , aparecerán tracciones según los paralelos si queremos que las fuerzas sigan contenidas en la superficie media o no aparecerán si la cúpula deja de ser esférica y adapta su forma a la línea de empujes según los meridianos; o si sigue siendo esférica pero tiene el suficiente espesor para alojar esta línea de empujes.

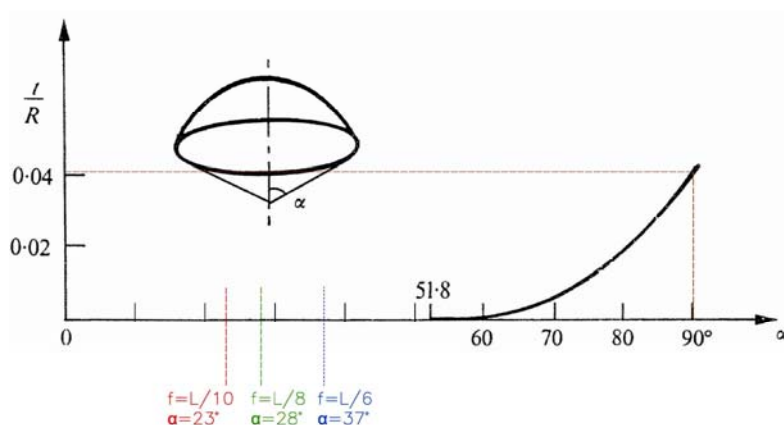


Figura 7.74. Espesores mínimos necesarios para cúpulas esféricas sometidas a peso propio, expresados como el cociente t/a (espesor/radio), marcados sobre la curva deducida por Heyman (1977, 111)

Los Guastavino (padre e hijo) son los grandes maestros de la construcción de cúpulas tabicadas, que calculan siguiendo una análisis de membrana y aplicando todos los mecanismos descritos más arriba (ver figuras 7.39 a 7.44): sus cúpulas son tan esbeltas porque: son rebajadas (de manera que su espesor límite es muy pequeño) o están armadas según los paralelos en la parte inferior o sólo tienen forma esférica en la zona superior, adaptando su forma a la línea de empujes según los meridianos en esta misma zona. Por ejemplo, la cúpula del Girard Trust Building (ver figura 7.44) es esférica sólo hasta un ángulo de 70° . La relación espesor/radio tiene un límite de 0,0054 (ver curva en figura 7.74); con un radio de 14,5 m, el espesor límite es 7,8 cm. Sobre el dibujo, figura 7.44, se miden unos 10 cm de espesor para la cúpula.

⁴⁵ Asumiendo, en el marco del Análisis Límite, que las fábricas tienen resistencia infinita a compresión.

A partir de 1900, todos los autores citan, para bien o para mal, el análisis elástico cuando escriben acerca de la manera de calcular una bóveda tabicadas. Es el mismo momento en que comienza a aplicarse el cálculo elástico a cualquier arco de fábrica. Además, las bóvedas tabicadas arrastran el mito del monolitismo, la construcción cohesiva y la resistencia a tracción si están recibidas con cemento, que hace que incluso algunos autores que no son partidarios de analizar así las bóvedas de piedra, si lo vean adecuado para las tabicadas:

De calcular esta bóveda como las articuladas, sujetándola á la curva de presiones de la bóveda dovelada, nace un error, que es suponer que sólo trabajan á la compresión, y no es así, puesto que trabajan también a la tensión, siendo cual lámina metálica sujeta á la flexión (Bayó 1910, 165)

Todos, salvo Luis Moya (1947) que se decanta claramente por un análisis de equilibrio, tienen una posición ambigua con respecto al análisis elástico, que resulta difícil de aplicar con las herramientas de principios del siglo XX pero es la modernidad, frente a la «vieja teoría» (Goday 1934) que representan las líneas de empujes.

Algunos autores, como Martorell (1910) o Bosch (1949) citan el análisis elástico pero en los ejemplos de aplicación proponen un análisis de equilibrio como método aproximado, suficientemente seguro y de más fácil aplicación.

Otros, como Cardellach (1910) o Goday (1934) defienden el análisis elástico, pero sus artículos son tan teóricos que no se explica en ellos como se aplica a este tipo de bóvedas.

Y el último grupo, formado por Guastavino (1893), Bayó (1919), Terradas (ca. 1919) y bastante más tarde, Pereda (1951) buscan realmente la manera de explicar el comportamiento de las bóvedas tabicadas realizando un análisis elástico con las herramientas del momento. Bergós (1953) realiza un análisis de equilibrio pero forzando una línea de empujes que se sale de la bóveda.

En todos los casos se ha estudiado la validez del análisis elástico realizado por los autores y de las tensiones, de compresión y de tracción, que el análisis implica en el material utilizado, encontrando numerosas contradicciones.

En análisis que encarga Guastavino a Gaetano Lanza y publica en su libro de 1893 se realiza sobre un arco circular de perfil muy rebajado. Tanto, que la línea de empujes

que se deriva del análisis elástico está contenida en el espesor del mismo, siendo por tanto una solución válida desde el punto de vista del Análisis Límite. Por otro lado, es casi coincidente con la línea derivada de suponer el empuje de un arco parabólico (ver todas las soluciones en figura 7.48). Este empuje ($E=ql^2/8f$) es sólo un 1% superior al que obtiene el profesor Lanza.

Jaime Bayó propone un curioso planteamiento gráfico para obtener una línea de empujes *verdadera*, derivada de un análisis elástico. Como el arco no es tan rebajado como el de Guastavino, esta línea de empujes se sale del arco y le lleva a tensiones de tracción inaceptables en el ladrillo; para justificarlo manipula los datos de resistencia de trabajo. Por otro lado, repitiendo el análisis con un programa actual, el momento máximo es el doble del que obtiene Bayó, lo que daría tensiones todavía más altas (ver figura 7.54). Sin embargo, si repetimos el análisis buscando una línea de empujes cualquiera, encontramos una más tendida que sí está contenida en el espesor del arco; nuevamente es el Teorema de la Seguridad dentro del Análisis Límite el que explica la estabilidad del arco propuesto por Bayó.

Del análisis que propone Pereda se puede decir lo mismo que del de Guastavino: como el diseño previo del arco se hace a partir del funicular del peso propio y las principales sobrecargas, las cargas variables no sacan la línea de empujes elástica del espesor de la fábrica, así que sería una solución válida dentro del Análisis Límite. Pero la línea de empujes, aunque no se sale, toca el borde del arco en algunos puntos. Y, como aplica la distribución de tensiones triangular elástica, esto le lleva a tensiones de trabajo en tracción superiores a los límites que el mismo indica. Otra vez la explicación es el Análisis Límite: la bóveda se agrietará y dejará de trabajar, en lugar de traccionarse, en los puntos en que la línea de empujes se salga del tercio central del arco, como se explica en Heyman (1982), ver figura 7.66.

Bergós propone un análisis que no es elástico pero que le lleva igualmente a una línea de empujes fuera del espesor del arco. Al comprobar las tensiones en la fábrica se encuentra, como Bayó y Pereda, con tensiones de tracción muy elevadas. Bergós no intenta explicar esto, comprobando la fábrica sólo a compresión. Pero, como en el análisis de Bayó, podemos buscar (y encontramos) una línea de empujes contenida en el espesor del arco con sus riñones rellenos, ver figura 7.72.

Por otra parte, lo usual desde finales del siglo XIX es que las bóvedas tabicadas estén atirantadas.⁴⁶ Los autores que realizan un análisis elástico suponen el arco biarticulado, de manera que sus apoyos están fijos. En esas condiciones obtienen los empujes y los diagramas de M y N coherentes con ellos. Pero el valor de empujes, momentos y normales es muy variable con las condiciones de apoyo: si el arco está atirantado los apoyos no son fijos, sino que se abrirán ligeramente en la medida en que el tirante se alargue al entrar en carga.

Para valorar cuanto puede afectar esta diferencia, se ha estudiado un ejemplo de Luis Muncunill, una fábrica de electricidad construida en Tarrasa en 1904. Se elige este edificio porque viene perfectamente descrito, con dimensiones y composición de bóveda y tirante, en Martorell (1910). Además, es de simple curvatura, con lo que su comportamiento se acerca al de una rebanada de arco, ver figura 7.75.



FÁBRICA DE ELECTRICIDAD EN TARRASA.—Arquitecto: D. LUIS MONCUNILL (Fig. 5.)

Bóveda.—Generación cilíndrica. Luz, 7'50 á 8 metros; longitud, 30 metros. Doble bóveda: superior de cuatro gruesos rasilla (10 cm.), inferior de un grueso rasilla y otro ladrillo delgado (6 cm.) Flecha 1/8 de la luz

Tirantes.—Hierros de 35 milímetros diámetro, separados 2 metros (Martorell 1910, 125-26)

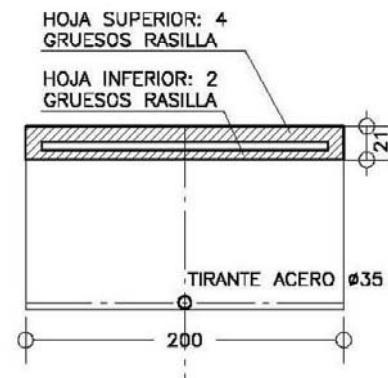


Figura 7.75. Imagen (a la izquierda) y descripción (arriba, a la derecha) de la Fábrica de Electricidad en Tarrasa (Martorell 1910, 125-26). Abajo a la derecha, modelo de cálculo elegido en función de esta descripción.

⁴⁶ A este respecto es muy relevante el artículo de Martorell (1910) que se ha citado y estudiado anteriormente en esta tesis. En Pereda (1951) no se habla de atirantamientos en la parte teórica del libro; pero en los ejemplos finales hay uno en concreto titulado «Bóveda sin tirantes», dejando claro así que el resto sí los tienen.

Se analiza, con un programa informático actual (SAP 2000 V.14) una rebanada de arco de 2,00 metros de ancho, con una sección hueca de acero de 21 cm de espesor (hoja inferior de 10 cm+hueco de 5 cm+hoja superior de 10 cm). En la figura 7.76 se describen los dos análisis: a la izquierda, el arco biarticulado; a la derecha, el arco atirantado con un redondo de 35 mm. Como módulo de elasticidad de la fábrica se han tomado los 140.000 kg/cm² (14.000 N/mm²) que propone Pereda; del acero, se ha tomado el valor actual (200.000 N/mm²), a la vista de tablas de la época que ofrecen valores parecidos.

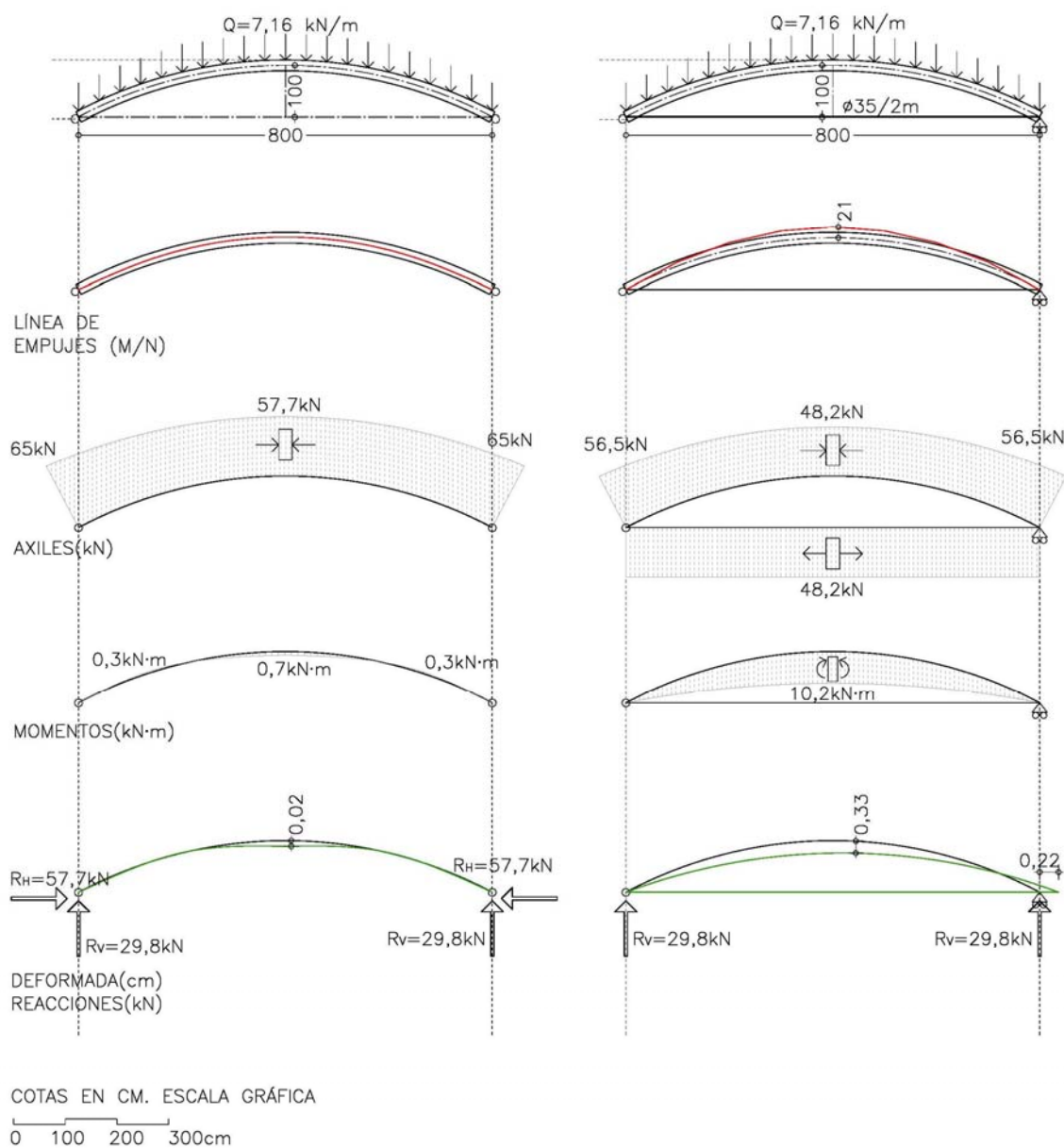


Figura 7.76. Análisis elástico de las bóvedas cilíndricas en la cubierta de una fábrica de electricidad en Tarrasa (Luis Muncunill, 19049. A la izquierda, suponiendo el arco biarticulado. A la derecha, atirantado con un redondo de 35 mm.

Como se ve en la comparativa de análisis, los valores son muy diferentes. Atirantar la bóveda con un redondo de 35 mm supone una apertura de los de sólo 2,2 m. Pero ese pequeño movimiento del apoyo multiplica el momento en la clave por 15 y hace que la línea de empujes (obtenida como M/N) se salga del espesor de la bóveda, a pesar de ser bastante gruesa (21 cm) por tener doble hoja.⁴⁷

Si, siguiendo el enfoque de la resistencia, comprobamos las tensiones en la bóveda, con las propiedades mecánicas (A , W) de la sección de la bóveda, nos encontramos con valores de tracción elevados, por encima de las resistencias de trabajo que admiten los autores de la época.⁴⁸

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{48200 \text{ N}}{320.000 \text{ mm}^2} + \frac{10,22 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}}{14,51 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 0,15 \pm 0,70 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 0,85 \text{ (C)} / -0,55 \text{ (T)} \text{ N/mm}^2$$

¿Por qué son entonces estables estas bóvedas atirantadas, y además no están agrietadas?

Aquí tiene importancia que las bóvedas tabicadas se construyeran sin cimbra, o con una ligera forma móvil que no impide el movimiento de la bóveda a la vez que avanza la construcción. El tirante entra en carga y se alarga cuando los materiales de unión (yeso, cemento) ya han endurecido lo suficiente para que los ladrillos no se caigan pero todavía no han fraguado por completo. Y como no hay cimbra debajo que impida el movimiento de la bóveda, se abrirá ligeramente adaptándose al alargamiento del tirante. Por fin, cuando termina la construcción, el tirante ha alargado una buena parte

⁴⁷ Por otra parte, el tirante está sobredimensionado: con el valor de N que debe soportar (48 kN) la sección de acero de 35 mm está trabajando a 50,1 N/mm². El propio Martorell en su artículo recomienda tensiones de trabajo del acero de 10 kg/mm² (100 N/mm²); si se hubiera dimensionado el tirante estrictamente, los movimientos serían mayores y la línea de empujes se alejaría aún más de la línea media del arco

⁴⁸ Alrededor de 0,2 N/mm² (Godoy 1934, Pereda 1951). Aunque los autores no explicitan como llegan a estos valores, coinciden con aplicar un coeficiente de seguridad de 10 al valor de 1,98 N/mm² (rotura) que obtiene Guastavino en sus ensayos de 1887.

del total y la bóveda acaba funcionando como si fuera biarticulada, con apoyos fijos. Así que el análisis más real de la bóveda de la Fábrica de Electricidad (y de otras muchas similares) es el que se dibuja a la izquierda de la figura 7.76, con la línea de empujes contenida en el espesor de la fábrica.

Esa línea de empujes corresponde a un análisis elástico, pero da un resultado válido dentro del marco del Análisis Límite (porque el arco estudiado es muy rebajado). En otros casos (Bayó, Bergós) no es así, pero entonces puede buscarse (y se encuentra) una línea de empujes cualquiera que sí esté contenida en la fábrica.

En la actualidad, no tenemos las mismas limitaciones que los autores que aquí se describen, todos ellos del siglos XIX y la primera mitad del XX: disponemos de potentes ordenadores y programas de análisis cada vez más desarrollados, que permiten realizar complejos análisis basados en la teoría elástica de geometrías complejas. Desde 1970 se desarrollan programas basados en el Método de los Elementos Finitos, con variaciones cada vez más aproximadas al comportamiento de los materiales: distintas resistencias a tracción y a compresión, módulo de elasticidad variable, etc. Pero la pregunta es ¿son necesarios? En todos los ejemplos anteriores hemos visto que sencillos análisis de equilibrio, en los que no intervienen datos acerca de la composición interna del material ni de sus condiciones de apoyos, son suficientes para explicar la estabilidad de todas las bóvedas y cúpulas tabicadas estudiadas.

Es cierto que para geometrías complejas incluso los análisis de equilibrio pueden ser tediosos. En ese sentido es interesante la línea de investigación que sigue el MIT, a cargo de John Ochsendorf, que ha desarrollado programas de análisis tridimensionales que buscan líneas de empujes contenidas en el espesor del material para cualquier superficie.⁴⁹

⁴⁹ Las más interesantes son la aplicación TNA (Thrust Network Analysis), desarrollada por Philippe Block y John Ochsendorf, que permite el análisis de cualquier superficie buscando una solución con las fuerzas sólo de compresión y contenidas en la superficie; también, aunque es más específico, la propuesta de Wanda Lau para analizar cúpulas delgadas, lo que llama «Modified Thrust Line Analysis»: partiendo de un análisis de membrana, libera las fuerzas de la superficie media, poniendo como condición que estén contenidas en la fábrica y empleando las fuerzas según los paralelos sólo cuando son de compresión

Más información sobre ambos en la web: <http://web.mit.edu/masonry/>

Estos programas de análisis resultan vitales para proyectar nuevas bóvedas, con una forma cualquiera. Y es un camino muy interesante para «revitalizar» la construcción de fábrica planteando para ella herramientas similares a las que existen para otras estructuras, de manera que resulte más sencillo para cualquier proyectista acercarse a ellas. Una de las razones por las que se dejaron de construir bóvedas tabicadas fue por parecer estructuras «imposibles de calcular» (Rosell 1987)

Pero la arquitectura histórica no suele presentar formas caprichosas: las limitaciones en el proceso constructivo hacen que la mayoría de los arcos, bóvedas y cúpulas tengan sección circular, más o menos rebajada, con uno o varios centros. Y para analizar este tipo de estructuras, ya sean de ladrillo tabicado, de rosca o de piedra, no suele hacer falta ninguna herramienta más compleja que las que se han explicado en los apartados 7.3 y 7.4 de este capítulo: búsqueda de una línea de empujes contenida en el espesor de la fábrica, esto es, una solución en equilibrio con las cargas exteriores y en la que el material (en este caso, la fábrica de ladrillo tabicado) está trabajando sólo a compresión. Este método puede emplearse en un plano (arcos, bóvedas de simple curvatura), en varios sobrepuestos (método de los cortes, en bóvedas de arista, crucería) o en el espacio (análisis de membrana y modificaciones del mismo, ver nota 48)

No es posible desligar el análisis estructural de la composición constructiva de la bóveda: que existan o no rellenos, que haya lengüetas, que la bóveda tenga lunetos, etc., es tan importante en el modelo de cálculo elegido como el espesor de bóveda, muros de apoyo o atirantamientos. Lo mismo ocurre con el proceso constructivo: existencia o no de cimbras, momento en que se aplican las cargas, etc.

CAPÍTULO 8.

ENSAYOS EN ESTRUCTURAS TABICADAS: LA NECESIDAD DE VALIDAR EL SISTEMA

Los primeros ensayos documentados sobre bóvedas tabicadas son del final del s. XVIII, y se hacen cada vez más numerosos a lo largo del siglo XIX y los inicios del XX.

De manera general, 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.

Y más específico de las bóvedas tabicadas:

-Como se estudia en el capítulo 6, en los últimos años del s. XVIII y durante el siglo XIX experimentan un importante desarrollo, ligado a la aparición de nuevos tipos constructivos, especialmente fábricas para las nuevas industrias. Los edificios fabriles tienen unos condicionantes muy rígidos de tamaño y forma, además de graves problemas de incendios por la combustibilidad de máquinas y materiales almacenados.

-Durante el siglo XIX se extiende el uso del cemento como aglomerante. Como se ha estudiado en el capítulo 5, la aparición de este nuevo material fue decisiva en el desarrollo de la bóveda tabicada: frente al yeso utilizado hasta ese momento, el cemento rápido también se endurece en poco tiempo pero no se altera con la humedad ni aumenta de volumen al fraguar. Además, el cemento presenta en los ensayos cierta resistencia a tracción, o «cohesión», y esto reavivó un debate latente desde mitad del siglo XVIII, acerca del comportamiento «monolítico» de estas bóvedas, entendiendo que por este monolitismo no se transmiten empujes a los apoyos.

Este es el contexto histórico en el que se realizan los ensayos que aquí se estudian, buscando, por un lado, una teoría que respalde la práctica que llevaba siglos construyéndose y por otro, la validez del modelo monolítico explicado más arriba.

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

En los primeros ensayos, todavía realizados con yeso como aglomerante, el monolitismo se atribuye a perfecta unión entre los ladrillos y el yeso, afirmando que si empujan sobre los muros es porque el yeso expande al fraguar y mueve los apoyos y que si se toman precauciones para evitar esto, no empujan en absoluto.¹

Más adelante, en los ensayos se emplea cemento, romano o lento tipo Pórtland, como aglomerante. Entonces el monolitismo se atribuye a la resistencia a tracción de este nuevo material.

8.1 Primeros ensayos no científicos

Los primeros «ensayos» sobre bóvedas tabicadas se realizan en Francia en los últimos años del siglo XVIII. La construcción tabicada, tradicional en el sur de Francia (en el Rosellón principalmente) está extendiéndose por el resto del país por el interés de algunas personas concretas: el duque de Belle Isle , el conde d’Espie y posteriormente Laugier y los tratadistas Patté y Rondelet. Cuando el sistema tabicado llega al norte de Francia, donde no es conocido, suscita muchas dudas por la esbeltez de bóvedas y muros en las que apoyan. En ese contexto se realizan algunos ensayos de carga y otras pruebas. No son sistemáticos ni se obtienen de ellos resultados científicos o medibles porque no es lo que se busca, ya que el objetivo es publicitar y dar confianza a un sistema constructivo nuevo. Algunos se realizan delante de «autoridades»,

¹ El asunto de la expansión que sufren el yeso al fraguar y su influencia sobre incremento del empuje de las bóvedas tabicadas es recurrente desde finales del s. XVIII. En Blondel y Patté (1771-77) se afirma que es la única razón de que empujen “6º De pendre des précautions contre l’action du plâtre (...) : alors la voûte PQ ne feroit exactement que l’office du couvercle d’un pot, & la poussée contre ses murs T, ne feroit pas plus considérable que celle d’un plancher ordinaire” (Blondel y Patté 1771-77, 6: 119)

normalmente miembros de las Academias de Arquitectura, y su aprobación es muy importante para la expansión del sistema tabicado en Francia.²

8.1.1. Los experimentos del conde d'Espie

En el libro del conde d'Espie, publicado en Francia en 1754, se recogen algunas pruebas sobre bóvedas tabicadas. No pueden llamarse ensayos por su falta de rigor, más bien son «experimentos». Buscan demostrar dos ventajas que Espie afirma que tienen las bóvedas tabicadas sobre otras: la falta de empujes y la posibilidad de abrir huecos o quitar líneas de apoyo sin provocar un derrumbe.

Estos experimentos se describen en el capítulo 7. Uno de ellos, realizado por el propio Espie, se describe con datos más concretos: construye una bóveda sobre planta cuadrada, de 4,5 *toises* (8,77 m) de lado, ver figura 8.1.³

La bóveda es de perfil imperial y sobre su flecha no se indica nada, pero podemos suponer $L/6$.⁴ Tampoco sabemos cual es el espesor, he supuesto un mínimo de 6 cm (dos hojas de ladrillo de 1 pulgada (2,54 cm) y una capa de cemento intermedia de 1 cm); es probable que el espesor sea mayor. La bóveda se carga con un total de 43750 libras (214 kN) de peso, se descarga a los dos días y no sufre ningún problema.

² Más datos sobre la expansión del sistema tabicado en Francia y sobre la presentación de memorias a la Academia en el capítulo 3 de esta misma tesis.

³ Para convertir las medidas al SI, se han tomado los valores del *système du Roi de France*. Las medidas de longitud se basan en el *toise du Châtelet*, adoptado en Francia a partir de 1668: 1 *toise*=6 pies= 194,9 cm; 1 pie=32,484 cm; 1 pulgada=12 pies=2,707 cm. Medidas de peso: 1 libra=489,5 gr. 1 millier=1000 libras=489,5 kg. (fr.wikipedia.org). Sotomayor, en su traducción del libro de Espie de 1776 afirma que utiliza un pie de rey menor, equivalente a 18/16 pies castellanos (18/16x27,87 cm=31,35 cm) y con esta equivalencia traduce a medidas castellanas. Pero el valor de 31,35 no corresponde en ningún caso al pie de rey, sino al pie carolingio, que no estaba en vigor en Francia en el siglo XVIII.

⁴ Lo que Espie llama «bóveda imperial», como ya se ha citado, es una bóveda de doble curvatura y perfil aproximadamente elíptico. La relación flecha-luz más usual es $1/6$, con un perfil muy similar a una elipse con una relación $1/3$ entre ejes menor y mayor. Pero por la dificultad de replantear elipses, los autores que las citan dibujan bóvedas formadas por arcos de círculo con varios centros, de perfil más parecido a los carpaneles.

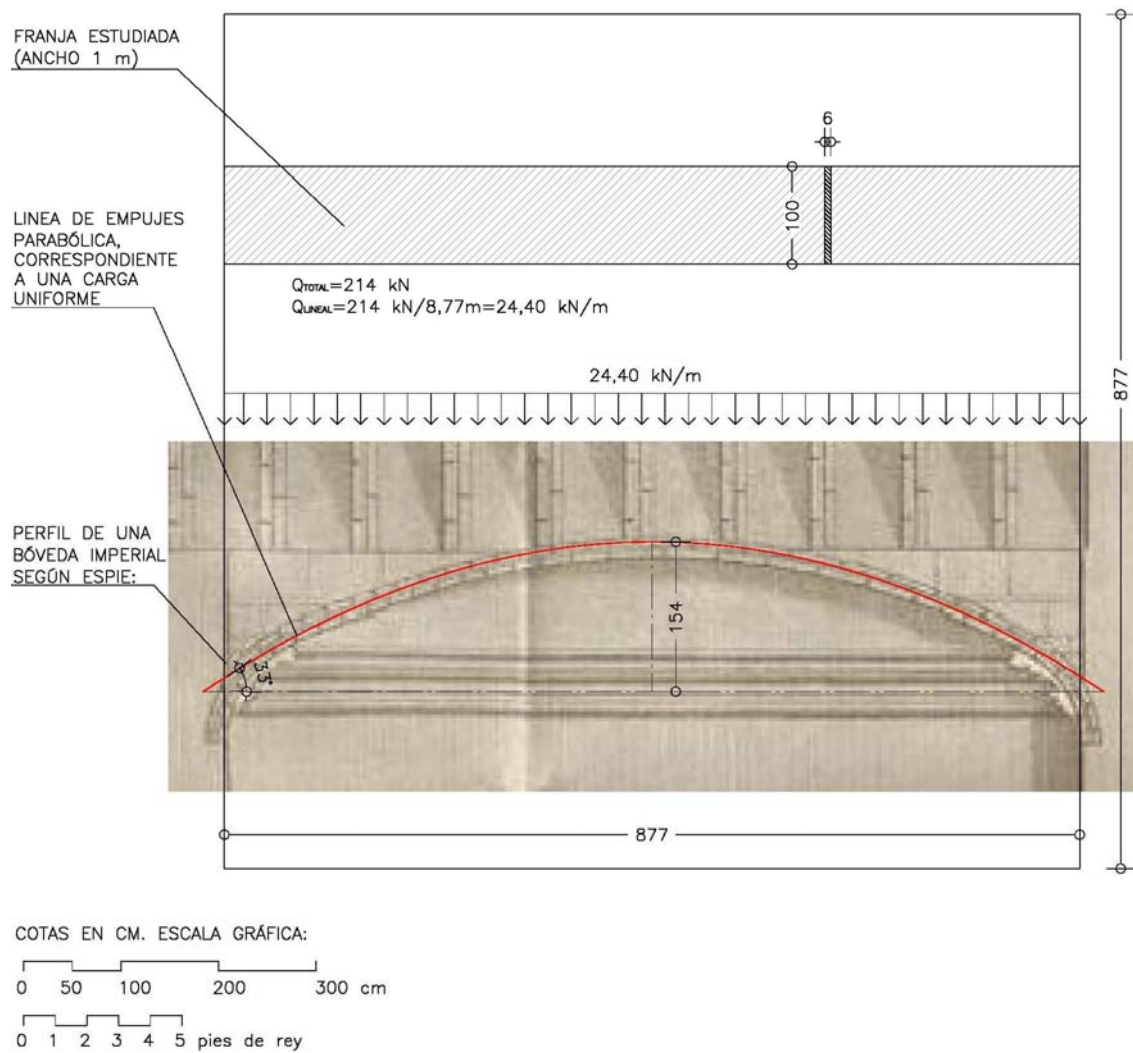


Figura 8.1. Análisis de equilibrio de la bóveda ensayada por Espie en su libro. Se toman las dimensiones en planta que se indican en el texto de Espie y la sección que se dibuja en la lámina 2: un arco de carpanel de flecha $1/6$ de la luz.

8.1.1.a. Análisis del experimento

Las secciones de la bóveda que dibuja Espie en la lámina 2 de su libro no son elipses, sino arcos de varios centros (ver figura 8.2). En concreto, la sección transversal que se ha tomado como base para realizar el análisis de la figura 8.1. es prácticamente un arco de círculo rebajado, con relación flecha/luz $1/6$.⁵

⁵ Cuando Sotomayor traduce el libro de Espie al castellano, también redibuja las figuras y convierte el perfil circular rebajado en un arco de varios centros, con la zona central casi plana y los laterales muy curvados, más parecido así al perfil elíptico que describe (pero no dibuja) Espie. Si se realiza un análisis similar al de la figura 8.1 sobre la figura dibujada por Sotomayor, la línea de empujes se sale de la bóveda en los riñones.

Considerando que la carga es repartida y uniforme, se puede asimilar la línea de empujes a una parábola, que se dibuja en rojo sobre el espesor de la bóveda que dibuja Espie. Como las curvas son muy parecidas, la línea de empujes está contenida en la fábrica.

Si la línea de empujes sí está contenida en el interior de la fábrica, la bóveda no tiene ningún problema. La carga que aplica Espie es relativamente baja y causa unas tensiones muy pequeñas en la fábrica.

Estudiando una franja de 1 m de ancho, y suponiendo una línea de empujes parabólica, obtenemos el empuje y el normal máximo (ver geometría y cargas en la figura 8.1)

$$E = \frac{q \cdot L^2}{8F} = \frac{24,40 \text{ kN/m} \cdot 8,77^2 \text{ m}^2}{8 \cdot 1,54 \text{ m}} = 152,33 \text{ kN}$$

$$N_{MAX} = \frac{E}{\cos 33} = \frac{160 \text{ kN}}{0,84} = 181,34 \text{ kN}$$

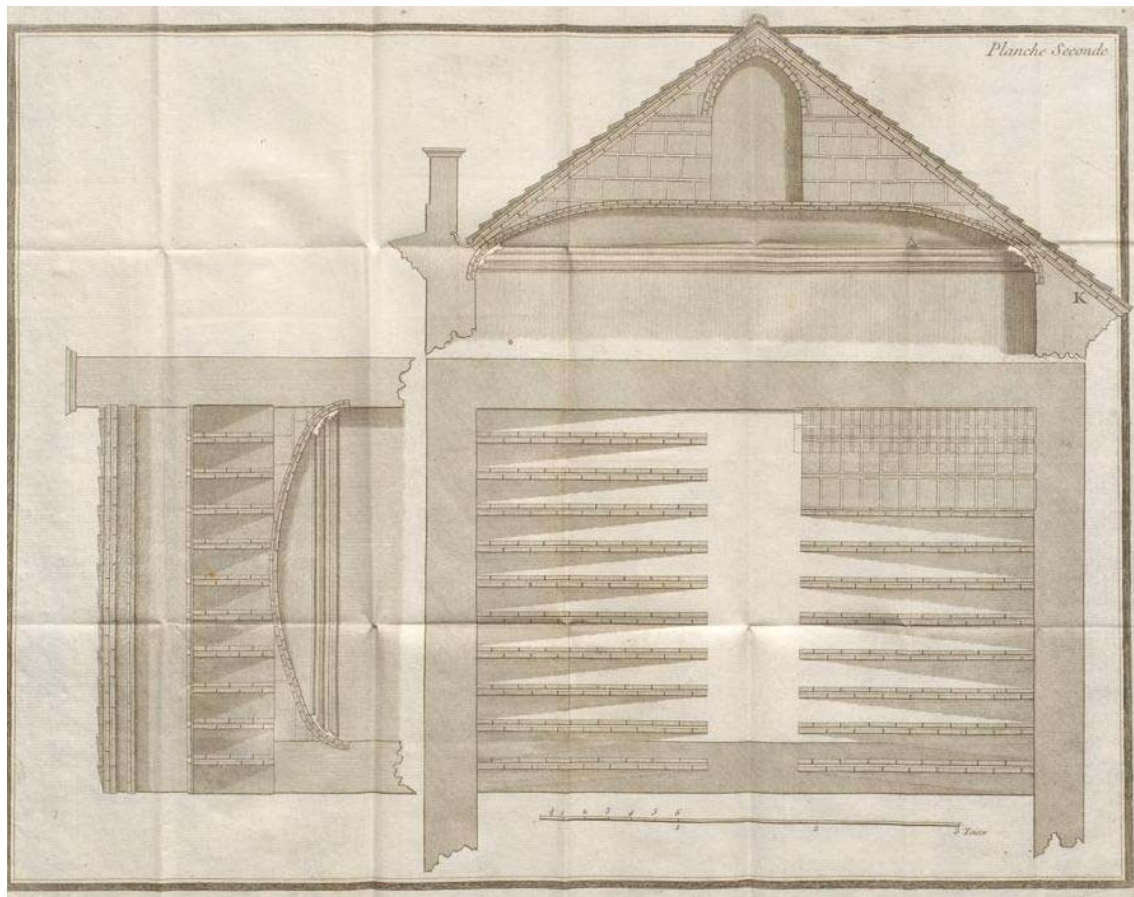
Con una sección resistente de 100x60 cm, las tensiones en la fábrica son:

$$\sigma_{MAX} = \frac{N_{MAX}}{A} = \frac{181.340 \text{ N}}{1000 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm}} = 3,02 \text{ N/mm}^2$$

Esta tensión es inferior a la de rotura por compresión de una fábrica tabicada, así como a la de los materiales que la componen (ladrillos, yeso).⁶

⁶ Es difícil ajustar datos acerca de la tensión de rotura de una fábrica tabicada, al estar formada por dos materiales distintos: ladrillos y mortero de cemento, cal o yeso. Como resistencia a compresión de los ladrillos se puede tomar una media de 15 N/mm², y este valor no ha variado mucho en el tiempo (Huerta 2004, 17). Los morteros tienen resistencias diversas, según si el conglomerante es cal o cemento, la dosificación, etc. En Claudel y Laroque (1870, 161), encontramos valores de 2-5 N/mm² para morteros de cal aérea, 15 N/mm² para morteros de cal hidráulica y cemento romano y 5 N/mm² para el yeso.

Distintos autores ensayan probetas de fábrica tabicada en los últimos años del s. XIX y en el s. XX: Guastavino, en 1893, obtiene una tensión media de rotura de 14,21 N/mm² (Guastavino 1893, 59). Bergós, en 1965, rompe probetas cúbicas a una media más elevada, de 21,5 N/mm² (Bergós 1965, 29). En ambos casos el aglomerante es cemento Portland.



8.2. Lámina segunda del tratado de Espie. En ella dibuja una bóveda imperial de relación flecha-luz 1/6, como la ensayada. Además dibuja lengüetas prácticamente hasta la clave de la bóveda

8.1.2. Ensayo en las bóvedas del Palais Bourbon, hacia 1764

Este ensayo se describe en el *Cours de Architecture* de Blondel y Pattié. El Palais Bourbon, en París, comienza a construirse en 1722; en 1764 pasa a manos del Prince de Condé, que lo amplía (Bannister 1968, 168). Dentro de esa ampliación se construyen las bóvedas tabicadas que se describen en el artículo 5 del *Cours...* de Blondel y Pattié. Como paso previo, se construye una bóveda en un antiguo pabellón, y sobre ella se realiza este sencillo ensayo de carga, al que asisten miembros de la Academia Francesa de Ciencias.

Así describen Blondel y Pattié la bóveda ensayada:

Avant d'entreprendre la construction de la premiere espece de voute, on en fit un essai dans la salle d'un ancien pavillon du Palais-Bourbon. Cette salle avoit 19 pieds en quarré; deux de les murs oppossés avoient chacun 21 pouces d'épaisseur, & les deux autres

chacun 27 pouces. On donna à cette voûte deux pieds&demi de montée (Blondel y Patté 1771-77, vol.6, 110)

Se toma como base la geometría de la figura 8.3, que es la «premiere espece de voute» que se cita más arriba. Es un arco de círculo muy rebajado: «La forme de ces voûtes n'est point en impériale, mais présente un arc de cercle» (Blondel y Patté 1771-77, vol.6, 107), con las dimensiones que se indican: 19 pies (6,17 m) en planta y 2,5 pies (81,2 cm) de flecha. La relación flecha-luz es 1/7,6. Los muros laterales tienen 21 y 27 pulgadas (57 y 73 cm).⁷ Se colocan dos tirantes de hierro atando los muros más delgados, pero no los gruesos, que además soportan el peso de 40 pies (13 m) de muro por encima. El espesor de la bóveda en la clave es de 5,5 pulgadas (15 cm).

Una vez que estuvo construida la bóveda, se va cargando poco a poco con 3 pies (97 cm) de arena, bien repartida por el trasdós, que resistieron sin deformar.

El ensayo realizado convence a los miembros de la Academia: «Plusieurs Membres de l'Académie-Royale des Sciences, & de celle d'Architecture, qui avoient été invités pour présider à cet essai, remarquerent que cette voûte ne dut son salut qu'aux deux tirants» (Blondel y Patté 1771-77, vol.6, 110)

8.1.2.a. Análisis del ensayo

La carga total sobre la bóveda son 636,35 kN.⁸ Estudiando una franja de 1 m de ancho, y suponiendo una línea de empujes parabólica, obtenemos el empuje y el normal máximo (ver geometría y cargas en la figura 8.4, izq.)

$$E = \frac{q \cdot L^2}{8F} = \frac{103,14 \text{ kN/m} \cdot 6,17^2 \text{ m}^2}{8 \cdot 0,81 \text{ m}} = 605,93 \text{ kN}$$

⁷ Al igual que en análisis del ensayo de Espie, para convertir las medidas al SI, se han tomado los valores del *systeme du Roi de France*. Ver nota 3 de este capítulo.

⁸ En Blondel y Patté (1771-77) se indica textualmente «ce qui fit un poid d'environ de 130 milliers», es decir 130.000 libras, 636,35 kN. Este valor de carga total es coherente con una altura de 3 pies (0,97 m) de arena: equivale a un peso específico de 17,15 kN/m³.

$$N_{MAX} = \frac{E}{\cos 28} = \frac{605,93 \text{ kN}}{0,88} = 688,56 \text{ kN}$$

Con una sección resistente de 100x15 cm, las tensiones en la fábrica son:

$$\sigma_{MAX} = \frac{N_{MAX}}{A} = \frac{688.560 \text{ N}}{1000 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm}} = 4,59 \text{ N/mm}^2$$

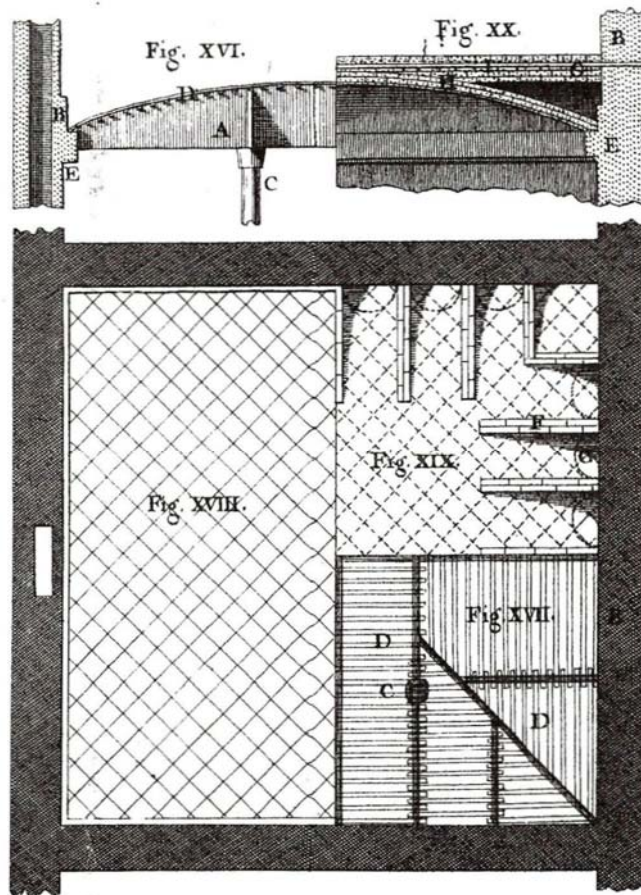


Figura 8.3: Bóvedas construidas en el Palais Bourbon. Sobre una única planta y sección se dibujan cuatro momentos del proceso constructivo: la Fig. XVI en sección y la XVII en planta explican el cimbrado; en la Fig. XVIII se dibuja el aparejo de ladrillos, de 8 pulgadas (21,6 cm) en cuadrado y colocados en diagonal; en las Fig. XIX en planta y XX en sección se dibujan las lengüetas, cada 1 metro aproximadamente, sobre ellas se construyen pequeñas bóvedas de cañón (G), también tabicadas.

La bóveda previa que se ensaya debió ser similar a esta. (Blondel y Patté 1771-77, Pl. LXXXXVII)

Como en el ensayo anterior, esta tensión es muy inferior a la de rotura por compresión de una fábrica tabicada.

En esta bóveda, como en la anterior, es posible dibujar una línea de empujes en el espesor de la fábrica (ver figura 8.4. izq.).

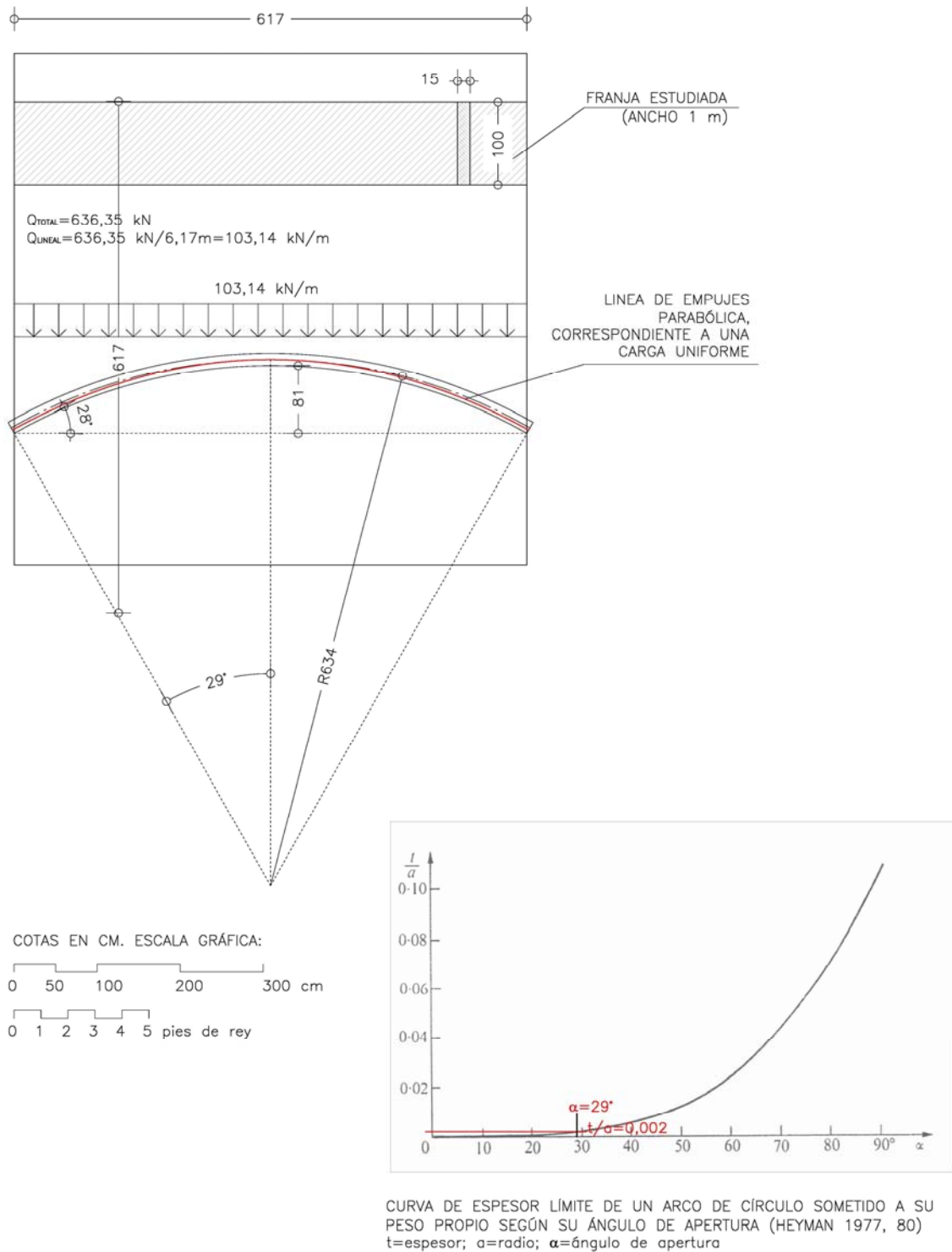


Figura 8.4. A la izquierda, análisis de equilibrio de la bóveda del Palais Bourbon. Se toman las dimensiones en planta y la flecha que se indican en el texto de Blondel y Patté y una sección en arco de círculo según la figura 8.2. A la derecha, espesor límite de una bóveda con las dimensiones de la ensayada, sobre tabla en Heyman (1977, 80)

La sección, en arco de círculo muy rebajado, tiene una sección muy parecida a una parábola,⁹ por eso es estable aún siendo muy esbelta. Comparando el espesor de la bóveda (15 cm) con el espesor límite de un arco de círculo en relación a su apertura (Heyman 1977): la bóveda ensayada tiene un ángulo de apertura de 29°; el espesor límite es alrededor de $t/r=0,002$: para $r=6,34$ m es 1,3 cm, luego la bóveda, construida con 15 cm de espesor tiene un coeficiente de seguridad geométrico superior a 10 (ver figura 8.4. der.)

El problema son las cargas asimétricas, Blondel y Patté son conscientes de ello y así lo indican al final de la descripción del ensayo:

S'il nous étoit permis de faire quelques observations sur cette expérience, il nous seroit aisé de prouver qu'elle étoit illusoire & non admissible en pareil cas. Le viai moyen d'éprouver cette voûte, eût été sans doute de la charger, comme elle devoit l'être ordinairement, c'est-à-dire, inégalement (Blondel y Patté 1771-77, vol.6, 110)

Pero para solucionar este problema, las bóvedas que se construyen en realidad en el Palais Bourbon tienen lengüetas (ver Fig. XIX en figura 8.3), capaces de resistir una carga puntual en cualquier punto de la bóveda (Guastavino 1893, 63).

Otro problema sería el contrarresto, ya que la bóveda es muy tendida, dando lugar a un empuje muy elevado. En la bóveda ensayada, los muros más delgados están atirantados; los más gruesos no, confiando la estabilidad a su espesor y al peso que tienen por encima. Para comprobar la estabilidad de los muros faltan datos en la descripción del ensayo: altura y peso específico del muro, si hay más forjados por encima, etc. En cualquier caso, en las bóvedas que se construyeron después del ensayo los muros más gruesos también están atirantados (ver Fig. XX en figura 8.3).

⁹ La línea de empujes parabólica (en rojo en la figura 8.4 izq) es casi coincidente con la línea media del arco (en negro, trazo y punto en la figura 8.4 izq). Esto es válido para cualquier bóveda con forma de arco de círculo muy rebajado y a lo largo del capítulo veremos que es la explicación de muchas de las extraordinarias cargas repartidas que soportan las bóvedas y arcos ensayados.

8.1.3. Otros ensayos ante la Academia de Arquitectura

En el contexto de dar confianza al sistema tabicado, desconocido en Francia en el s. XVIII, es muy importante la aprobación por parte de las distintas academias de Arquitectura francesas.

Empezando por Espie, que en su libro de 1754 reproduce íntegro el informe escrito por cinco miembros de la Academia de Arquitectura de Toulouse, que visitan su casa en 1753, ver capítulo 3 de esta tesis.

Parece que Espie también realizó un ensayo de carga en una bóveda sobre la lavandería de la Escuela Militar. Al ensayo acudió el arquitecto del rey Ange-Jacques Gabriel, así que se enmarca dentro de los ensayos para dar confianza al sistema tabicado en Francia. Los muros se abrieron y las bóvedas cayeron (Bannister 1968, 166). Las referencias a este ensayo se encuentran en Blondel y Patté (1771-77, vol.6, 116) y son recogidas después por Bannister (1968, 166), pero Espie lo cita muy de pasada en su texto, achacando el problema a una mala ejecución:

On me dira cependant qu'il y a eu des Voutes plates qui sont tombées en differents endroits; j'en conviendrai, & je répondrai qu'elles avoient été faites par de mauvais Ouvriers qui avoient mal exécuté les regles de leur construction, ou qui y avoient employé de mauvais materiaux (Espie 1754, 56)

Blondel y Patté, donde se cita con más detalle el ensayo fallido, atribuyen el problema a la expansión del yeso cuando fragua:

Cet Auteur [por el conde d'Espie] fut chargé de faire des voûtes plates, selon sa méthode, au bâtiment de la Buanderie de l'Ecole Royale Militaire, & que, pour n'avoir pas fait d'attention á leur poussée suivant son système, elles écartèrent les murs, & tomberent immédiatement après leur exécution. On n'avoit cependant rien negligé de la part de la qualité des matériaux (...) Ce furent uniquement les effects du plâtre, contre lesquels on avoit negligé de se précautionner, & c'est á cette cause qu'on doit attribuer le peu de succès de la plupart des ouvrages qui ont été faits en ce genre á Paris" (Blondel y Patté 1771-77, vol.6: 116)

En ninguno de los textos estudiados sobre este asunto (Espie 1754, Blondel y Patté 1771-77, Bannister 1968) se ofrecen datos concretos sobre el ensayo: dimensiones de la bóveda, carga aplicada, espesor de muros, etc.

8.2. Ensayos en Francia durante el siglo XIX

Después de un periodo de introducción y cierta desconfianza en el siglo XVIII, durante el siglo XIX se construyeron muchas bóvedas tabicadas en Francia, como se desprende de numerosos comentarios a lo largo de los textos estudiados.¹⁰ Los usos principales parecen ser cubiertas de depósitos de agua y fábricas textiles.

Los primeros ensayos que se estudian, tanto el recogido en Blondel y Patté (1771-77) como los realizados por el Capitán de Ingenieros d'Olivier en 1837, utilizan todavía el yeso como aglomerante. En los siguientes ya se emplea cemento, normalmente de fraguado rápido.¹¹

8.2.1. D'Olivier, 1837

D' Olivier era un militar, capitán del cuerpo de Ingenieros. Detalla sus ensayos en un artículo, «Relatif á la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi de recherches expérimentales sur la poussée de ces sortes de voûtes» publicado en *Annales de Points et Chaussées* en 1837.

El artículo está dividido en dos capítulos. En el primero «Considérations sur les voûtes en briques posées de plat, et détails concernant leur exécution» ofrece unas consideraciones generales sobre las bóvedas tabicadas, comenzando así:

J'ai fait construire une grande quantité de voûtes en briques posées de plat et reliées avec du plâtre; les observations que j'ai recueillies feront le sujet de ce chapitre.

¹⁰ «Les voûtes les plus en usage aujourd'hui, sont celles en briques et ciment romain ou plâtre» (Lagarde 1849, 97); «L'usage des briques pour la construction des voûtes d'une grande portée et d'une très-faible épaisseur est devenu très-fréquent, depuis qu'on possède les mortiers de ciment romain pour en effectuer la liaison» (Claudel, Laroque 1870, 470). En Claudel y Laroque (1870, 473-474) se describen numerosas obras realizadas con bóvedas tabicadas, algunas de ellas construidas por los autores. Un resumen de estas obras se puede consultar en el apartado 6.2.3 de esta tesis.

¹¹ En el ensayo realizado por Laroque se emplea cemento de Vassy, que es del tipo romano (de fraguado rápido). Fontaine emplea cemento de Claire-Fontaine para la bóveda que fabrica con mortero, sin especificar si es de fraguado rápido o lento. Ambos de Vassy y de Pouilly (también de fraguado rápido) para las bóvedas de ladrillo y destacan que utilizan estos cementos por su buena calidad.

Ces sortes de constructions réclament une attention toute particulière de la part des constructeurs, en ce sens qu'elles sont très-bonnes quand elles sont faites avec les précautions convenables, et très-mauvaises lorsqu'on en a négligé quelques-unes (d'Olivier 1837, 292)

Siguen unas detalladas observaciones sobre la calidad de los materiales a emplear y sobre el proceso de ejecución, al que d'Olivier da una especial importancia en las bóvedas tabicadas, como se desprende del texto anterior. Muchas de estas recomendaciones son similares a las que encontramos en Espie (1754) y Blondel (1771). D'Olivier insiste mucho en solucionar el problema de la expansión del yeso al fraguar, un tema que preocupaba especialmente en Francia como ya se ha citado más arriba, y para ello diseña unos ladrillos especiales que llama «a crochet», con resaltes enlazados, y que, según sus experimentos, absorben esta expansión entre los resaltes

L'expérience a confirmé ce raisonnement. Dans la construction des voûtes que j'ai fait exécuter, j'ai eu soin, pour les premières construites, de les laisser ouvertes à la clef; elles ont demeuré quatre jours en cet état, et il ne s'est pas manifesté le moindre allongement (d'Olivier 1837, 294-295)

Con estos ladrillos Olivier detalla la forma de construir una bóveda tabicada (ver figura 8.5).

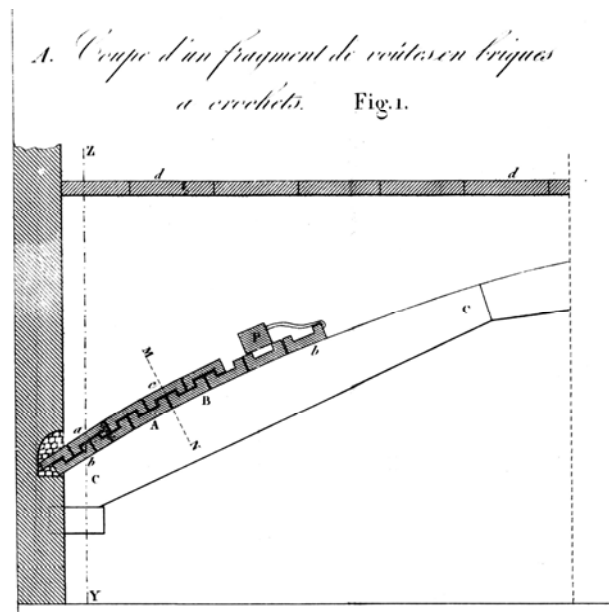


Figura 8.5. Dibujo descriptivo de la forma de construir una bóveda tabicada con ladrillos «a crochet» (D'Olivier 1837, Pl. 129, Fig. 1)

Se abre una roza en el muro para recibir los ladrillos, se van colocando alternos primero la fila inferior (*b*) y luego la superior (*a*), comenzando esta última por un ladrillo cortado. Las cimbras ligeras (C) se colocan cada dos metros y se tienden hilos entre ellas para controlar bien la forma de la bóveda. El bloque de piedra o yeso P sirve para apretar el ladrillo recién puesto contra el anterior hasta el fraguado del yeso.

8.2.1.a. Descripción del ensayo de Olivier

El segundo capítulo, «Recherches expérimentales sur la pousée des voûtes de briques posées de plat» es en el que describe los ensayos. Es interesante la razón que confiesa d'Olivier para llevarlos a cabo:

Je me suis assuré d'abord que la voûte a une pousée, résultat qui n'est pas sans importance, vu que l'on a souvent dit et imprimé que ces sortes de voûtes n'avaient pas plus de pousée qu'une tuile creuse posée sur une table, ou qu'un couvercle de chaudière, ce qui est une erreur qui a occasionné l'écroulement de plus d'un édifice, et qu'il importe de réfuter (d'Olivier 1837, 304)

Como se ve, el mito del monolitismo que escribe d'Espie (1754) y expanden en Francia Blondel y Patté (1771-1777) y Rondelet (1802) no es compartido por todos los que tratan las bóvedas tabicadas, y especialmente por aquellos que, como d'Olivier, además las construyen.

Los realiza sobre una bóveda de dos hojas (construida con los ladrillos especiales que describe en el primer capítulo, recibidos con yeso). La bóveda tiene un desarrollo de 5,05 m, 4,89 m de luz, 29 cm de longitud, una flecha de 47 cm, y un espesor total de 8 cm, ver figura 8.6.

El sistema de apoyos se construye de manera que pueden dejarse fijos o permitirles un movimiento horizontal. Durante la construcción de la bóveda se dejan fijos. Al descimbrar, se les permite moverse, colocando dos dinamómetros intermedios en cada lado que suministran una fuerza conocida. Si el empuje de la bóveda es superior a la fuerza de los dinamómetros, los apoyos se moverán.

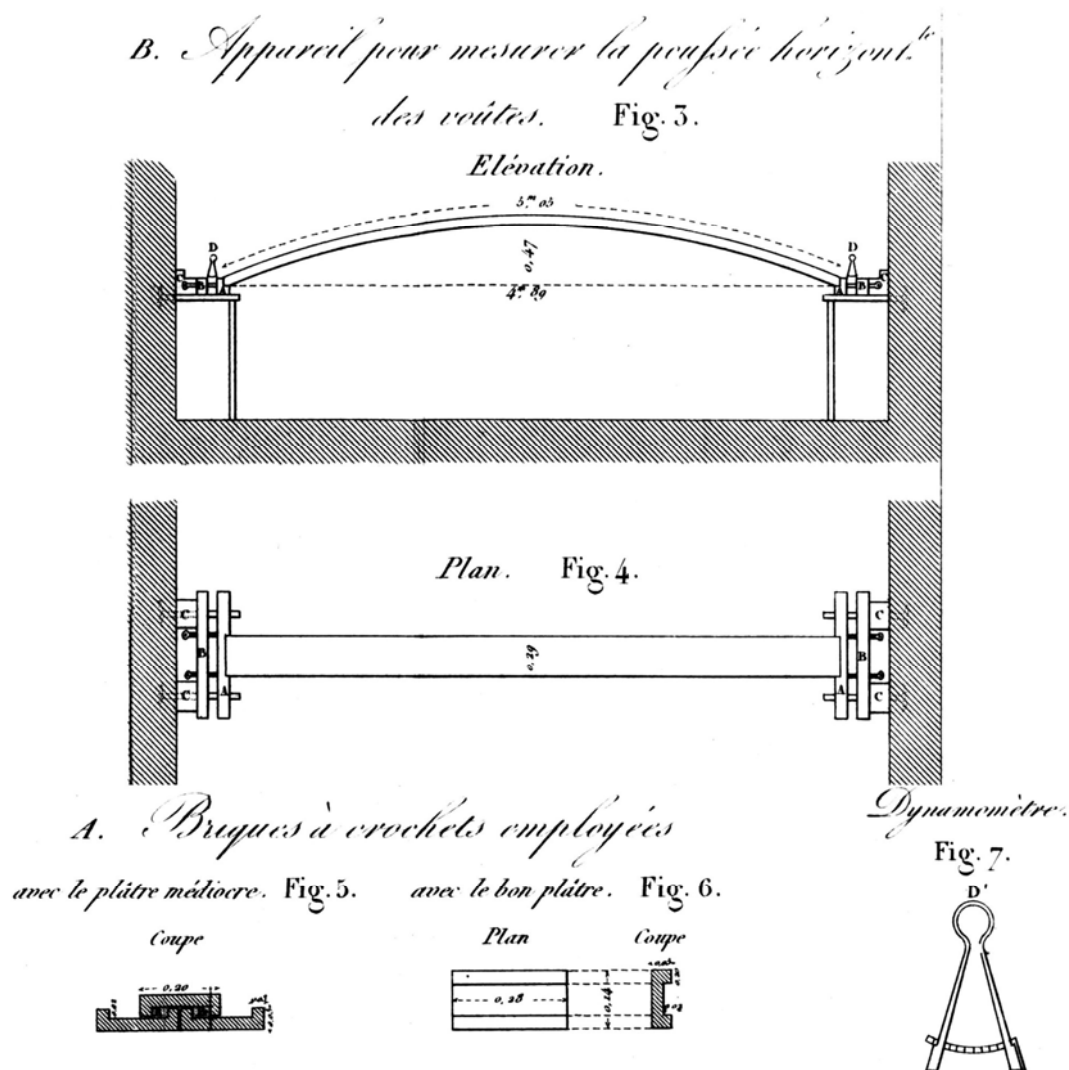


Figura 8.6: Arriba, planta y alzado de la bóveda que se ensaya (D'Olivier 1837, Pl. 129, Fig. 3, y 4); Abajo, detalle del dinamómetro y de los ladrillos empleados (Fig. 5, 6 y 7)

El ensayo consiste en ir reduciendo poco a poco la fuerza de los dinamómetros hasta que la bóveda comienza a moverse. Se empieza colocando dos dinamómetros en cada apoyo, ejerciendo cada uno una fuerza de 55 kg (110 kg en cada apoyo y 220 kg en total entre los cuatro)¹², se dejan libres los apoyos, permitiendo su movimiento horizontal y la bóveda se mantiene intacta. Se reduce a 50 kg con el mismo resultado. Cuando la

¹² La forma en que Olivier ofrece los datos es un poco confusa: a lo largo del ensayo describe la fuerza total que se suministra a la bóveda (sumando la de los cuatro dinamómetros, dos a cada lado del apoyo). Para obtener el empuje, hay que dividir por dos este valor, operación que Olivier sólo hace al final de su artículo, a la vez que lo divide por la longitud de bóveda ensayada para generalizarlo en un valor por metro lineal.

fuerza baja a 45 kg, los apoyos se mueven un poco, la clave se agrieta y baja 2 cm. Se produce un nuevo equilibrio con los dinamómetros marcando 55 kg.

Se continúa el ensayo sobre una nueva bóveda, para no acumular problemas sobre la anterior. Se colocan los dinamómetros ejerciendo una fuerza de 40 kg en cada uno y se dejan libres los apoyos. Los apoyos se separan y la bóveda se cae.

D'Olivier describe el proceso de rotura de la bóveda, mediante la formación de cinco articulaciones: en la clave y en dos puntos situados a 65 cm a cada lado de la clave, por el extradós, y en los arranques, por el intradós, de manera que rompe en cuatro fragmentos. En el momento que precede a la rotura, la clave ha bajado 21 cm y los dinamómetros marcan una fuerza conjunta de 345 kg (86,25 kg cada dinamómetro y 172,5 kg en cada apoyo)

Concluye d'Olivier que si cada apoyo es capaz de suministrar una fuerza de 100 kg, la bóveda estará en equilibrio. Generaliza el dato dividiendo este valor entre los 29 cm de longitud de la bóveda ensayada, obteniendo un empuje de 345 kg/m en cada apoyo.

A partir de este dato, calcula el espesor de un muro haciendo un sencillo equilibrio de momentos sobre la arista exterior del muro, ver figura 8.7.

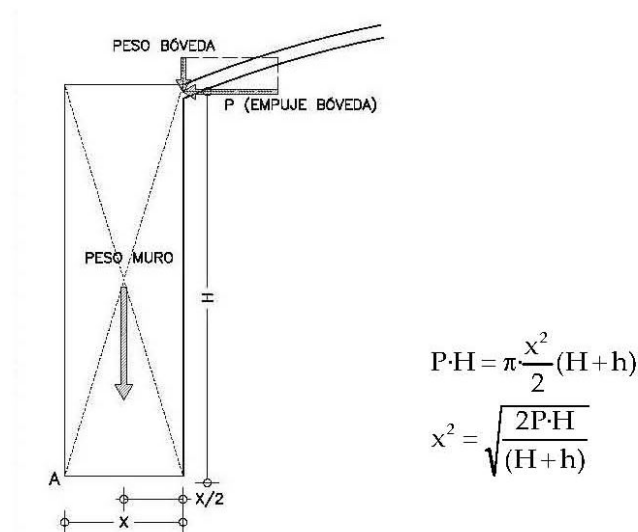


Figura 8.7: Dibujo (a la izquierda) y ecuación de equilibrio (a la derecha) empleada por Olivier para obtener el espesor de un muro conocido el empuje que le transmite una bóveda y su punto de aplicación. (D'Olivier 1837, 307)

Para el empuje medido en los ensayos (345 Kg/m) y un muro de 5 m de altura total, con el arranque de la bóveda a 4 m y peso específico 2200 kg/m³, se obtiene un espesor de

muro de 0,50 m. D'Olivier apunta que para estos cálculos sólo se ha tenido en cuenta el peso propio de las bóvedas (cuando lo habitual es que los riñones estén rellenos y que haya un pavimento).

Lo que no indica d'Olivier es que este espesor de muro se obtiene del resultado de un único ensayo y que además no se ha aplicado ningún coeficiente de seguridad en el cálculo. El espesor de muro obtenido (1/10 de la luz de la bóveda) es mucho menor de lo que se construye habitualmente y de lo que recomiendan los tratadistas que hablan sobre este tema.¹³

D'Olivier repite después el ensayo dejando fijo uno de los apoyos y permitiendo el movimiento del otro. Sobre este segundo ensayo se extiende mucho menos, comentando únicamente el proceso de rotura: se forman tres articulaciones, en el intradós en los arranques y en el extradós en un punto situado a 65 cm de la clave hacia el apoyo fijo, rompiéndose la bóveda sólo en dos fragmentos.

8.2.1.b. Análisis del ensayo de d'Olivier

El artículo termina con la descripción del ensayo. No hay un análisis de los resultados obtenidos, tampoco se relacionan con la teoría de bóvedas, que en 1837 había alcanzado cierto desarrollo.¹⁴ D'Olivier concluye que con los datos obtenidos conocemos el empuje de bóvedas análogas, las más corrientes en la práctica. Y que para obtener el empuje de bóvedas con otra forma o dimensiones, se puede realizar un ensayo similar.

¹³ Fray Lorenzo de San Nicolás recomienda un espesor de muro de $L/5$ para soportar el empuje de bóvedas tabicadas. Incluso para muros que no deben soportar ningún empuje (testeros de iglesias o muros que soportan un forjado de madera) recomienda un espesor de $L/8$, mayor del $L/10$ obtenido por Olivier con su cálculo (San Nicolas, 1639, 31-31v).

¹⁴ Antes de 1837 varios autores (Couplet, Danizy, Coulomb, Audoy) han explicado el proceso de rotura de bóvedas mediante formación de articulaciones que describe d'Olivier en su artículo. Pero al parecer, es el primero en intentar medir experimentalmente el empuje de una bóveda, en lugar de obtenerlo de manera analítica. Leonardo da Vinci, en el Códice de Madrid, dibuja unos mecanismos destinados a medir el empuje de bóvedas, aunque no hay constancia de que lo hiciera (Zammatio 1981)

Telles sont les expériences auxquelles je me suis livré, elles donneront une appréciation assez exacte de la poussée de ces sortes de voûtes pour les cas peu différents de celui que j'ai soumis mes essais, et qui se présentent fréquemment dans la pratique.

En outre, lorsque l'on aura à construire des voûtes de formes et dimensions différentes de celles qui précèdent, on pourra facilement, et à très-peu de frais, faire un essai qui donnera la mesure précise de la pousée de la voûte projetée. (d'Olivier 1837, 309)

Aplicando un análisis de equilibrio a la bóveda ensayada:

Sobre la geometría original de la bóveda (ver figura 8.8), con el empuje que Olivier propone como «de equilibrio», es decir, 100 kg (1 kN) en cada apoyo, se obtiene una línea de empujes fuera de la bóveda. Haciendo pasar la línea por los apoyos articulados, la máxima separación con la línea media del arco está en la clave, y es de 56,5 cm. Entonces, la bóveda soporta un momento flector de $1 \text{ kN} \times 0,565 \text{ m} = 0,565 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Suponiendo una distribución elástica, triangular, de tensiones y con una sección resistente de $290 \times 80 \text{ mm}$:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{565.000 \text{ N}\cdot\text{mm}}{309333 \text{ mm}^3} = 1,83 \text{ N/mm}^2$$

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6} = \frac{290 \text{ mm} \cdot 80^2 \text{ mm}^2}{6} = 309333 \text{ mm}^3$$

La tensión máxima de tracción de $1,83 \text{ N/mm}^2$ es similar a la obtenida en ensayos similares sobre probetas.¹⁵

También puede dibujarse una línea de empujes dentro de la bóveda, pero el empuje mínimo es $1,95 \text{ kN}$, casi el doble del que mide Olivier.

¹⁵ La resistencia a tracción de las fábricas depende mucho de la adherencia entre las piezas y el mortero. Este valor es especialmente elevado entre ladrillos y yeso. Guastavino, en ensayos posteriores, obtiene unas resistencias similares de rotura a tracción, de 2 N/mm^2 (Huerta 2004).

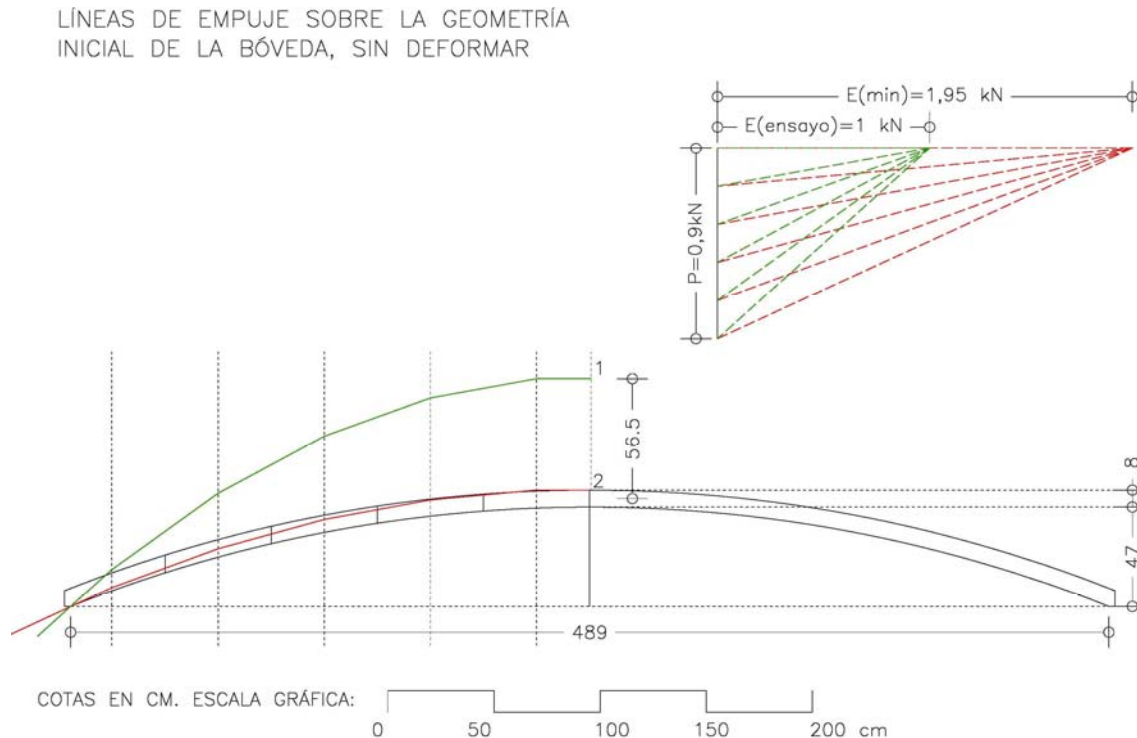


Figura 8.8: Sección de la bóveda ensayada, con la geometría original sin deformar. Sobre ella se dibujan las siguientes líneas de empujes:¹⁶

1(línea verde): considerando un empuje de 100 kg (1 kN), el que propone Olivier como «de equilibrio»

2 (línea roja): línea de empuje mínimo contenida en la bóveda. Corresponde a un empuje de 1,95 kN

Sobre la geometría deformada de la bóveda, en el instante previo a la rotura, puede hacerse un análisis similar. Sabiendo que en ese momento la clave ha bajado 21 cm, podemos dibujar la nueva posición de la bóveda.¹⁷ Este pronunciado descenso de la clave lleva a una apertura de apoyos de sólo 3,12 cm, debido a su pequeña flecha (ver figura 8.9)

¹⁶ Para dibujar las líneas de empuje, se ha considerado un peso de 0,9 kN para cada mitad de la bóveda ensayada. Este dato no lo indica Olivier en su artículo, aparece en referencias posteriores a él (Lagarde 1849 y Claudel, Laroque 1850). Equivale a un peso específico de 15,30 kN/m³.

¹⁷ Para dibujar esta nueva geometría trazamos una línea que une articulaciones las de la clave y de uno de los arranques. Esta línea gira, pero no cambia de longitud en la deformación de la bóveda, de manera que conocido el descenso en la clave podemos saber también la apertura de los apoyos (Huerta y Lopez 1997)

Cuando la bóveda se agrieta, la línea de empujes debe pasar por las articulaciones formadas: por el extradós de la clave y por el intradós en los arranques, situación que corresponde a la línea de empuje mínimo, que sobre la geometría deformada son 3,23 kN, otra vez casi el doble de lo que Olivier mide en su ensayo.

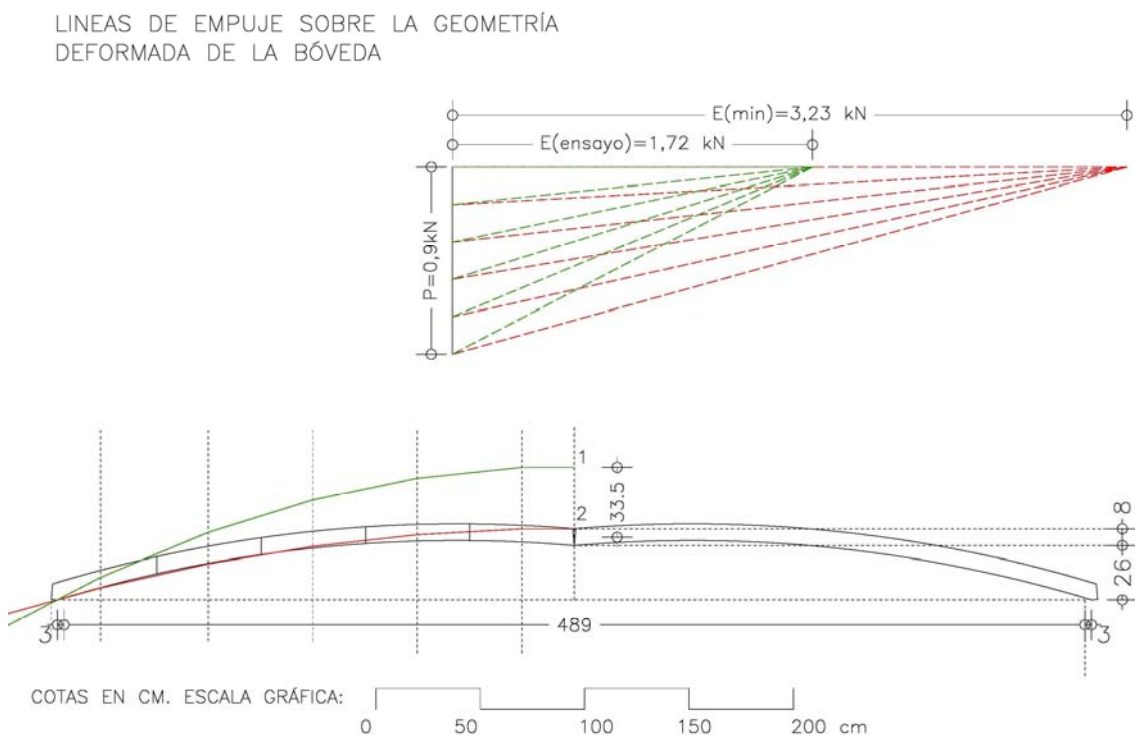


Figura 8.9: Sección de la bóveda ensayada, con la geometría deformada. Sobre ella se dibujan las siguientes líneas de empujes:

- 1(línea verde): considerando un empuje de 175,5 kg (1,72 kN), el que mide Olivier en el instante previo a la rotura.
- 2 (línea roja): línea de empuje mínimo contenida en la bóveda. Corresponde a un empuje de 3,23 kN.

Una explicación de esta diferencia puede ser una mala ejecución del sistema de apoyos, de manera que no fueran deslizantes perfectos. D'Olivier dibuja y describe cuidadosamente los apoyos en su artículo (ver figura. 8.9). El deslizamiento se produce entre las vigas A y las barras de hierro enjabonadas E. La madera puede absorber el jabón y también abrirse ligeramente al ser un material más blando que el hierro. Todo esto puede oponer cierta resistencia al deslizamiento, y debido a la forma en que la bóveda apoya en la viga A, si el apoyo no desliza correctamente, tampoco permite el giro libre. Entonces en los apoyos se genera una pequeña fuerza horizontal y un pequeño momento. Lo primero reduce el empuje y lo segundo permite que la línea de

empujes no pase exactamente por el apoyo, ambas cosas acercarán el valor teórico obtenido mediante análisis de equilibrio al valor medido por Olivier en su ensayo

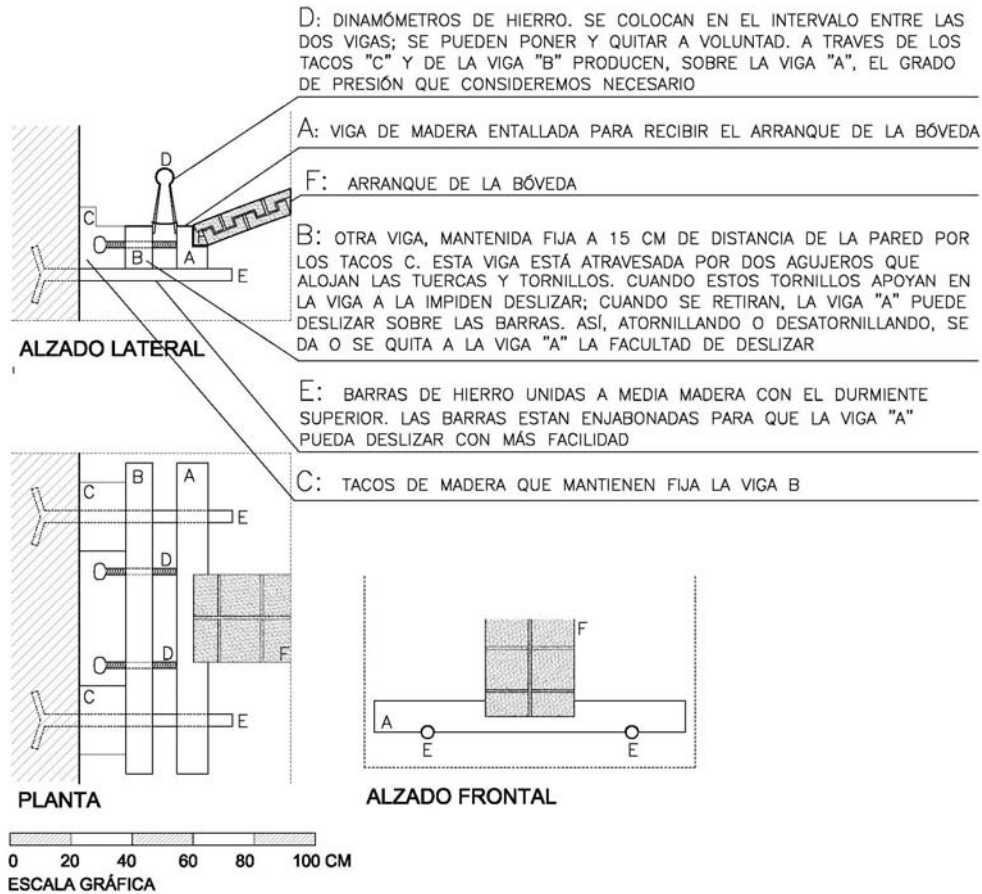


Figura 8.10: Dibujo y descripción del sistema de apoyo de la bóveda ensayada por Olivier.

Tampoco queda claro en el artículo de que manera se miden los empujes. El dinamómetro empleado parece de los llamados *à ressort*, que puede traducirse como «de muelle», comunes en los tratados de máquinas de la época (ver figura. 8.11). Estos dinamómetros establecen una relación entre la distancia que separa los dos brazos y la fuerza necesaria para llegar a esta separación, medida en una escala circular graduada entre los dos brazos¹⁸

¹⁸ Ver Hachette (1819, 31) y Odriozola (1839, 49)

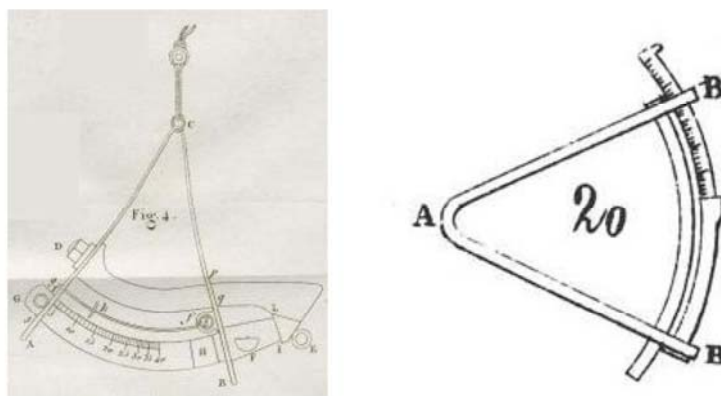


Figura 8.11: Dinamómetros similares a los empleados por d'Olivier, tal y como se describen en tratados de máquinas de la época. A la izquierda, Hachette 1819, 1^o Chapitre, Pl. 2, Fig 4; A la derecha, Odriozola 1839, Lam. 20, Fig. 1.

La forma de hacer que los dinamómetros ejerzan una fuerza concreta es fijando una distancia entre los dos brazos del mismo. En el ensayo esto fija una distancia entre las vigas A y B (ver figura 8.10), menor cuanto mayor es la fuerza proporcionada por el dinamómetro. En la última fase del ensayo, se fija una distancia en cada dinamómetro que corresponde con una fuerza de 40 kg. Se dejan libres los apoyos de la bóveda, a través de los tornillos que unen las vigas A y B. Entonces la bóveda comienza a abrirse, cerrando los brazos del dinamómetro hasta que rompe, momento en que la distancia entre brazos se corresponde con una fuerza de 86,25 kg

¿Por qué no se queda en equilibrio cuando pasa por las posiciones de los anteriores ensayos, fuerza de 50, 55 kg? La descripción del ensayo no ofrece esta explicación y tampoco nos habla de la rapidez con que se desploma la bóveda y en que momento se mide el empuje de 172,5 kg en cada apoyo. Dado que el cambio en la geometría de la bóveda afecta notablemente a los empujes (ver figuras 8.8 y 8.9), otra explicación es que esa medición se hiciera en un punto intermedio de la deformación de la misma, cuando la línea de empuje mínimo (pasando por la extradós de la clave y el intradós de los apoyos) se acerca más al valor medido por d'Olivier en el ensayo.

D'Olivier sólo publica este ensayo,¹⁹ aplicado a una bóveda de tamaño y forma concretos. Sin embargo, sus resultados tuvieron bastante repercusión. En un breve

¹⁹ Lo más probable es que d'Olivier realizara un único ensayo. Al final de su artículo, especifica que quien necesite construir bóvedas de diferente forma, puede hacer un ensayo similar.

manual de construcción (Lagarde 1849) encontramos una tabla con los empujes y el ancho que debe darse a los apoyos de distintas bóvedas de ladrillo de 8 y 12 cm de espesor, ver figura 8.12.

(201.) VOUTES DE 0m,08 D'ÉPAISSEUR.

Diamètre des voutes.	PLEIN CINTRE.		Surbaissées aux $\frac{2}{5}$.		Surbaissées au $\frac{1}{5}$.		Surbaissées au $\frac{1}{5}$.	
	Poussée par mètre.cour.	Épaisseur des piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.
2m	148 k. (1)	0m,26	206 kil.	0m,31	270 kil.	0m,53	282 kil.	0m,56
3	222	0 52	309	0 57	403	0 43	423	0 44
4	296	0 57	412	0 43	540	0 51	564	0 51
5	370	0 41	515	0 48	673	0 56	706	0 57
6	444	0 45	618	0 53	809	0 61	847	0 63
7	518	0 48	721	0 58	944	0 66	988	0 67
8	592	0 51	824	0 62	1079	0 69	1129	0 71
9	666	0 55	927	0 65	1214	0 74	1270	0 76
10	740	0 58	1030	0 68	1349	0 78	1411	0 80
11	814	0 61	1133	0 71	1484	0 83	1532	0 85
12	888	0 64	1236	0 75	1619	0 86	1693	0 89
13	962	0 66	1339	0 78	1754	0 90	1834	0 92
14	1036	0 68	1442	0 81	1889	0 93	1973	0 94
15	1110	0 70	1545	0 84	2024	0 96	2117	0 97
16	1184	0 72	1648	0 87	2158	0 98	2258	1 00

(1) Les quantités indiquées dans ce tableau et dans le suivant représentent la poussée totale de la voute, c'est-à-dire la somme de la poussée sur chaque piédroit, ou la valeur de 2 P.

(202.) VOUTES DE 0m,12 D'ÉPAISSEUR.

Diamètre des voutes.	PLEIN CINTRE.		Surbaissées aux $\frac{2}{5}$.		Surbaissées au $\frac{1}{5}$.		Surbaissées au $\frac{1}{5}$.	
	Poussée par mètre.cour.	Épaisseur des piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.	Poussée par m.cour.	Épaisseur d. piédroits.
2m	222 kil.	0m,52	509 kil.	0m,57	403 kil.	0m,45	423 kil.	0m,44
3	353	0 53	463	0 46	607	0 53	635	0 53
4	444	0 45	618	0 53	810	0 61	846	0 63
5	555	0 51	772	0 59	1012	0 67	1059	0 69
6	666	0 55	927	0 65	1215	0 74	1270	0 76
7	777	0 59	1081	0 70	1416	0 80	1482	0 83
8	888	0 64	1236	0 75	1618	0 86	1694	0 89
9	999	0 67	1390	0 80	1821	0 91	1903	0 93
10	1110	0 70	1545	0 84	2023	0 96	2117	0 97
11	1221	0 75	1700	0 89	2226	0 99	2328	1 03
12	1332	0 78	1854	0 92	2428	1 03	2540	1 08
13	1443	0 81	2008	0 95	2631	1 09	2751	1 12
14	1554	0 84	2163	0 98	2835	1 13	2965	1 16
15	1665	0 87	2317	1 02	3036	1 18	3176	1 20
16	1776	0 91	2472	1 05	3237	1 22	3387	1 23

Figura 8.12: Tablas (Lagarde 1849, 100) deducidas a partir del ensayo de Olivier. La primera es para bóvedas de 8 cm de espesor y la segunda para bóvedas de 12 cm de espesor.

Posteriormente Lagarde indicará «M. d'Olivier n'a pas fait d'expériences sur des voutes plus épaisses ni d'un plus grand diamètre» (Lagarde 1849, 98)

Esta tabla, según indica el autor, se ha deducido del ensayo de Olivier y de las fórmulas dadas por Rondelet

C'est d'après cette dernière formula, et en combinant les données de Rondelet avec celles de M. D'Olivier, que nous avons établi le tableau ci-après, qui indique la poussée des voutes par metre courant et l'épaisseur á donner aux piédroit pour faire équilibre (Lagarde 1849, 99)

Lagarde parte del valor que Olivier considera «de equilibrio», 345 kg/m (aunque en su tabla, como indica debajo, la columna *Poussée* es la suma sobre los dos apoyos, es decir 690 kg/m para la bóveda ensayada por Olivier: 8 cm de espesor, relación flecha-luz 1/10²⁰ y 4,89 m de luz). Con este dato, obtiene el resto de los empujes para otras bóvedas con la misma relación flecha-luz pero distinto espesor o distinta luz de manera proporcional, que son todos los valores de la octava columna de ambas tablas: *Surbaissées 1/5; Poussée par m. cour.*

Y conocidos los empujes, obtiene el espesor necesario para los apoyos haciendo un equilibrio de momentos sobre la arista exterior del mismo (punto A, ver figura 8.7), supuesto un peso específico del muro de 2200 kg/m³ (22 kN/m³). Esta es la misma operación que hace Olivier en su artículo (ver figura 8.7), pero Lagarde no considera más fuerzas verticales que el peso de muro por debajo del arranque de la bóveda, con lo que la fórmula para obtener el espesor del muro es:

$$x = \sqrt{\frac{2P}{d}}$$

Siendo P el empuje sobre cada apoyo y d el peso específico del muro

Para obtener los espesores de muro para bóvedas con distinta relación flecha-luz, Lagarde emplea unos coeficientes extraídos de una construcción gráfica del conocido tratado de Rondelet (1ª ed. 1802): considerando 1 el ancho del muro de una bóveda de medio punto, esta construcción nos da un valor de 1,18 para una bóveda con relación flecha-luz 1/3, 1,35 para una relación 1/6 y 1,39 para una relación 1/10 (ver figura 8.13).

²⁰ En la tabla de Lagarde se expresa la relación entre la semi-luz de la bóveda y la flecha (*plein cintre*, *surbaissées 2/3, 1/3 y 1/5*) equivalente a: bóvedas de medio punto, bóvedas con relación flecha luz 1/3, 1/6 y 1/10.

A partir de esta última, que es la relación de la bóveda ensayada por Olivier, obtiene el resto.

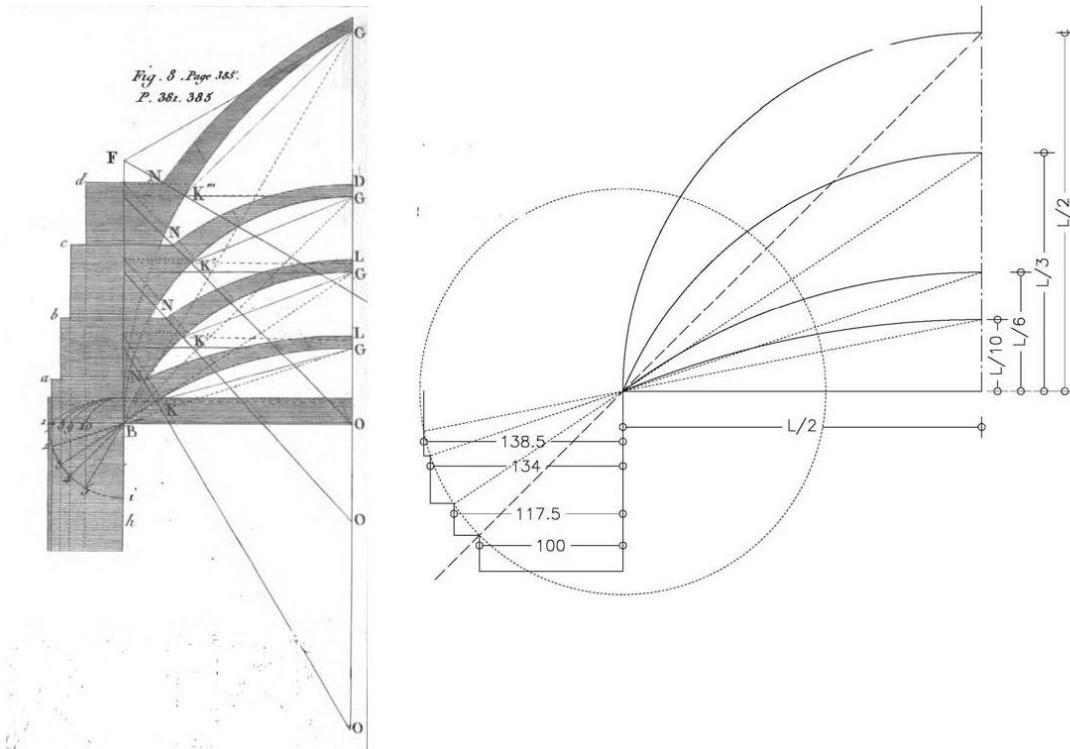


Figura 8.13: A la izquierda, construcción gráfica (Rondelet 1802, Figura 8, Lámina 85) de la que Lagarde los espesores de muro para bóvedas de medio punto y con relación flecha-luz 1/3 y 1/6 a partir del espesor del muro de la bóveda con relación flecha-luz 1/10. A la derecha, redibujo y detalle de la construcción gráfica acotando los valores obtenidos.

Una vez obtenido de esta manera el espesor necesario de un muro, aplica al revés la fórmula anterior para obtener el empuje de la bóveda que necesita este muro.

$$P = \frac{x^2}{2} \cdot d$$

Como P es función de x^2 , Lagarde obtiene unos nuevos coeficientes de relación entre el empuje de bóvedas de distinta geometría, que son los anteriores al cuadrado: 1,39 ($1,18^2$) para relación flecha-luz 1/3, 1,82 ($1,35^2$) para 1/6, 1,93 ($1,39^2$) para 1/10.

Así pues, Lagarde extrae una extensa tabla válida para cualquier tipo de bóveda tabicada, con distinta geometría y espesor, de los resultados de un único ensayo realizado por Olivier. Los espesores de muro obtenidos de esta manera, que parten del propuesto por Olivier, son muy inseguros, ya que el equilibrio realizado es estricto.

Aunque es cierto que la fórmula de Lagarde desprecia el peso de la bóveda y del muro por encima, si lo hay. Si lo tenemos en cuenta, añadimos un pequeño coeficiente de seguridad. En cualquier caso, independientemente de los tratados, en la práctica nunca se construyeron muros tan esbeltos para soportar bóvedas tabicadas, a menos que estuvieran atirantados.

En las numerosas ediciones del conocido tratado de Claudel y Laroque²¹ también se reproduce el ensayo de d'Olivier, dentro de un apartado dedicado a *Voûtes légères en briques et en poteries*. Se indica el valor del empuje obtenido en el ensayo, resaltando el tipo de ladrillo empleado y sus ventajas frente al hinchamiento del yeso al fraguar.

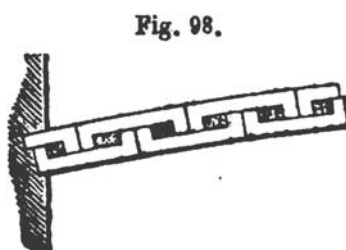


Figura 8.14: Dibujo de una bóveda tabicada fabricada con los ladrillos "a crochet" de d'Olivier (Claudel y Laroque 1870, 470).

Claudel y Laroque también reproducen la tabla que Lagarde extrae del ensayo de d'Olivier (ver figura 8.15). La reproducción ofrece los mismos valores que la de Lagarde, aunque cambia la forma de nombrar las bóvedas expresando ahora la relación flecha-luz (*plein cintre*, *surbaissées 1/3*, *1/5* y *1/10*). Pero la tabla es incoherente porque se confunde el empuje total sobre la bóveda con el empuje sobre un único apoyo²², lo que duplica su valor, aunque manteniendo los espesores de muros que obtiene Lagarde.

²¹ El libro de Claudel y Laroque *Pratique de L'art de Construire* tuvo varias ediciones, la primera de ellas en 1850. Claudel era ingeniero civil y profesor de mecánica, mientras que Laroque era constructor y colaborador en la dirección de la fábrica de cementos Gariel, de Vassy, lo que explica su preferencia por este cemento.

²² En la reproducción de la tabla que aparece en Claudel, Laroque (1870) se ha suprimido la nota en la Lagarde indica que la columna *Poussée* se refiere al empuje total de la bóveda, sobre los dos apoyos.

VOÛTES DE 0 ^m ,08 D'ÉPAISSEUR.								
Ouvrière des voûtes.	PLEIN CINTRE.		SURBAISSÉES AU 1/3.		SURBAISSÉES AU 1/6.		SURBAISSÉES AU 1/10.	
	Poussée.	Épaisseur des pieds-dr.	Poussée.	Épaisseur des pieds-dr.	Poussée.	Épaisseur des pieds-dr.	Poussée.	Épaisseur des pieds-dr.
	m.	k.	m.	k.	m.	k.	m.	k.
2	148	0,26	206	0,31	270	0,35	282	0,36
3	222	0,32	309	0,37	405	0,43	423	0,44
4	296	0,37	412	0,43	540	0,51	564	0,51
5	370	0,41	515	0,48	675	0,56	706	0,57
6	444	0,45	618	0,53	809	0,61	847	0,63
7	518	0,48	721	0,58	944	0,66	988	0,67
8	592	0,51	824	0,62	1 079	0,69	1 129	0,71
9	666	0,55	927	0,65	1 214	0,74	1 270	0,76
10	740	0,58	1 030	0,68	1 349	0,78	1 411	0,80
11	814	0,61	1 133	0,71	1 484	0,83	1 552	0,85
12	888	0,64	1 236	0,75	1 619	0,86	1 693	0,89
13	962	0,66	1 339	0,78	1 754	0,90	1 834	0,92
14	1 036	0,68	1 442	0,81	1 889	0,93	1 975	0,94
15	1 110	0,70	1 545	0,84	2 024	0,96	2 117	0,97
16	1 184	0,72	1 648	0,87	2 158	0,98	2 258	1,00

VOÛTES DE 0 ^m ,12 D'ÉPAISSEUR.								
2	222	0,32	309	0,37	405	0,43	423	0,44
3	333	0,38	463	0,46	607	0,53	635	0,55
4	444	0,45	618	0,53	810	0,61	846	0,63
5	555	0,51	772	0,59	1 012	0,67	1 059	0,69
6	666	0,55	927	0,65	1 213	0,74	1 270	0,76
7	777	0,59	1 081	0,70	1 416	0,80	1 482	0,83
8	888	0,64	1 236	0,75	1 618	0,86	1 694	0,89
9	999	0,67	1 390	0,80	1 821	0,91	1 905	0,93
10	1 110	0,70	1 545	0,84	2 023	0,96	2 117	0,97
11	1 221	0,75	1 700	0,89	2 226	0,99	2 328	1,03
12	1 332	0,78	1 854	0,92	2 428	1,05	2 540	1,08
13	1 443	0,81	2 008	0,95	2 631	1,09	2 751	1,12
14	1 554	0,84	2 163	0,98	2 833	1,13	2 963	1,16
15	1 665	0,87	2 317	1,02	3 036	1,18	3 176	1,20
16	1 776	0,91	2 472	1,05	3 237	1,22	3 387	1,25

Figura 8.15: Reproducción de la tabla de Lagarde en Claudel, Laroque (1870, 472). Se ha suprimido la nota indicando que la columna Poussée se refiere al empuje conjunto sobre los dos apoyos de la bóveda, pero manteniendo el espesor de los muros.

8.2.2. Laroque, 1859

En Claudel y Laroque (1870), además de la referencia al ensayo de Olivier, se describen unos ensayos sobre bóvedas tabicadas realizados por el propio Laroque.

La primera referencia a ellos la encontramos en la 2ª edición, publicado en Paris en 1859. Dado que no aparecen en la 1ª edición es razonable fechar los ensayos entre 1850 y 1859.

Además, en el texto se indica “Dans ce tableau, la poussée est donnée par mètre courant sur chaque pied-droit”

El ensayo se realiza apoyando una bóveda tabicada de 5 m de cuerda, 1 m de longitud, 50 cm de flecha y 7 cm de espesor sobre los grandes pilares de un viejo edificio, el lazareto de Marsella. La bóveda está formada por dos hojas de ladrillo de 3 cm de espesor, unidos por cemento de Vassy.

Construida la bóveda, se va cargando de manera uniforme, soportando hasta 45000 kg (9000 kg/m², 90 kN/m²) sin movimiento visible. La rotura se produce bajo una carga de 55000 kg (11000 kg/m², 110 kN/m²), que atribuyen a un movimiento de los apoyos de 7 mm.

Este ensayo, similar al descrito por Blondel y Patté (1771-77) que se recoge en el apartado 8.1.2 pero con cargas mucho más elevadas, parece destinado a demostrar que este tipo de bóvedas soportan enormes cargas siempre que los apoyos no se muevan:

Nul doute que la charge de rupture eût encore été plus considérable, si la forte poussée sur les points d'appui n'avait fait reculer de 0,007 m dans l'intérieur d'un pilier l'une des pierres formant sommier (Claudel y Laroque 1870, 474)

Considerando una carga uniforme, la línea de empujes es una parábola, que tiene una forma muy similar a la geometría de la bóveda ensayada, un arco de círculo rebajado, con una relación flecha-luz de 1/10. Por tanto, la línea de empujes estará contenida en la bóveda, que romperá cuando se supere la tensión de rotura a compresión del material.²³

Estudiando una franja de un metro de ancho, bajo la carga de rotura de 11000 kg/m² (110 kN/m²) y con una línea de empujes parabólica, el empuje es:

$$Q_{LINEAL} = 110 \text{ kN/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 110 \text{ kN/m}$$

$$E = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot F} = \frac{110 \text{ kN/m} \cdot 5^2 \text{ m}^2}{8 \times 0,5 \text{ m}} = 660 \text{ kN/m}$$

Con este empuje y considerando una sección resistente de 1000x70 mm, la fábrica soporta una compresión de 9,5 N/mm², un valor muy elevado, cercano a la rotura (ver

²³ Un arco de círculo con una relación flecha-luz de 1/10 equivale a un ángulo de apertura de 23°. El espesor límite de un arco de estas características es prácticamente 0 (ver figura 8.4, derecha)

nota 5 de este capítulo) En esta situación, un pequeño movimiento de los apoyos (como el de 7 mm que describe el ensayo) puede fracturar la fábrica.

8.2.3. Fontaine, 1865

Fontaine era ingeniero y realiza unos ensayos con el objeto de encontrar las cargas máximas que puede asumir una bóveda de una geometría muy determinada, para construir posteriormente con ese tipo una gran superficie de forjado.²⁴ Realiza los ensayos sobre cuatro bóvedas de distintos materiales:

- tabicadas, de dos hojas, con bloques de cemento y ladrillo cerámico.
- de rosca, de una sola hoja de ladrillos huecos.
- de hormigón.

El objetivo final parece ser comparar todos estos sistemas constructivos y elegir el más adecuado para la construcción de un gran edificio industrial.

Publica sus resultados en un artículo, «Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques», publicado en *Nouvelles Annales de la Construction* en 1865.

A diferencia de d'Olivier, comienza su artículo con una breve descripción de estado de la teoría de bóvedas en el momento en que realiza sus ensayos, ver capítulo 7 de esta tesis. Aunque posteriormente aplica la teoría a las bóvedas ensayadas, indica que no tiene claro si es válida, dado, por un lado, que apoyan en vigas metálicas flexibles y por otro, que los materiales empleados presentan una fuerte cohesión, de manera que la bóveda puede ser considerada como un monolito.

²⁴ Fontaine cita dos veces a lo largo de su texto la razón para llevar a cabo su ensayo: «Chargé de faire une étude qui devait servir de base à l'établissement de 72,000 metres carrés de planchers»(Fontaine 1865, 149); «Les 72,000 metres carrés de planchers que nous construisons sont formés d'une succession de voûtes plates de 4 mètres de portée reposants sur des poutres flexibles. On comprend, d'après cela, l'intérêt considérable qui s'attachait à cet essai» (Fontaine 1865, 152)

8.2.3.a. Descripción de los ensayos

El primer ensayo lo realiza sobre una bóveda aislada de 3,75 m de luz , 0,355 m de flecha y 0,10 m de espesor (ver figura 8.16 abajo), formada 2 hojas de bloques de cemento de 25 mm de espesor, recibidos con el mortero de cemento. Los riñones se rellenan con cemento pobre,²⁵ aligerados como se ve en la figura 8.16. La bóveda se carga uniformemente con 2700 kg/m², al cabo de seis días se mide la deformación en la clave, que es de 3 mm. La carga se deja un mes colocada sin que aumenten las deformaciones ni aparezca ninguna grieta. Por el contrario, la bóveda se rompe bajo una carga muy pequeña (100 kg/m²) cuando se tira sobre ella un peso de 200 kg desde 2 m de altura.

Fontaine aplica a la bóveda del primer ensayo, bajo la carga de 2700 kg/m², la *teoría de Méry*, obteniendo un empuje de 12000 kg y también el principio de mínima resistencia de Scheffler, obteniendo así un empuje mínimo de 7000 kg.²⁶ A partir de este dato invalida la *teoría de Méry* para estas bóvedas ya que el empuje de 12000 kg obtenido lleva a tensiones excesivas en el material, de 27 kg/cm².²⁷

La conclusión que se extrae de este ensayo es que una bóveda como esta puede soportar con seguridad 1000 kg/m², pero aguanta mal las vibraciones.

²⁵ La composición del mortero de los bloques y de las juntas es: 2 partes de cemento de Pouilly por cinco partes de arena. Para los riñones se emplea una parte de cemento y cinco de arena. El cemento de Pouilly era de fraguado rápido, del tipo romano y fabricado en Francia (Claudel y Laroque 1870, 108)

²⁶ Lo que Fontaine llama teoría de Méry consiste en hacer pasar la línea de empujes por el tercio central del arco. Así, y siguiendo la ley de Navier que relaciona tensiones y deformaciones, que él llama ley del trapecio, no aparecen tracciones en ningún punto de la bóveda. Si aplicamos el principio de mínima resistencia de Scheffler, la línea de empujes puede pasar por el extrados en la clave y por el intrados en los apoyos resultando así un empuje menor.

²⁷ Fontaine se refiere a una tensión de compresión, y afirma en su artículo haber ensayado previamente los bloques de cemento, que rompieron a 20 kg/cm². Aunque esto puede ser cierto, los bloques de cemento suelen tener resistencias a compresión bastante más elevadas. En Claudel y Laroque (1870, 177) aparecen valores medios de rotura a compresión de 150 kg/cm² para probetas con cemento de Vassy, del mismo tipo romano que el de Pouilly que emplea Fontaine.

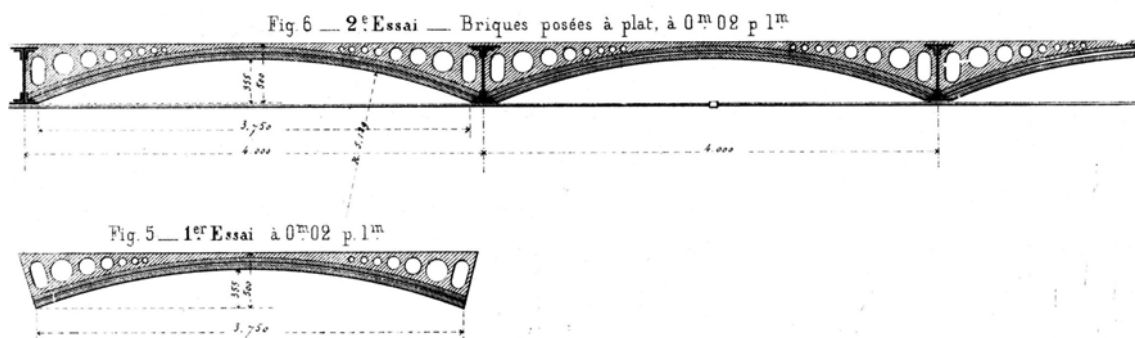


Figura 8.16: Dibujo de las bóvedas sobre las que Fontaine realiza su 1º, abajo y 2º ensayo, arriba. (Fontaine 1865, Pl 4, fig 5-6)

El segundo ensayo se realiza sobre una conjunto de tres bóvedas sucesivas (ver figura 8.16 arriba), apoyadas en vigas metálicas separadas 4 metros entre si, con la misma geometría de la bóveda aislada del primer ensayo, pero utilizando esta vez ladrillos de Borgoña²⁸ en lugar de bloques de cemento. El relleno se ejecuta igual, sólo que empleando cemento de Vassy, similar al del Pouilly del primer ensayo. Las bóvedas laterales están atirantadas, y la central no. Fontaine busca conocer el efecto que provocan las dos bóvedas laterales muy cargadas contra la bóveda central descargada y, en concreto, saber si es necesario atirantar las bóvedas, ya que la supresión de los tirantes supone un importante ahorro de material:

Si l'effort de soulèvement exercé contre la voûte du milieu n'en déterminait pas la rupture lorsque la charge des autres voûtes ayant atteint le double des plus grandes surcharges, il était inutile de mettre des tirants entre les poutres (Fontaine 1865, 152)

Previamente ensaya las vigas metálicas solas (ver figura 8.17 der.), cargándolas con un peso similar al de las bóvedas y midiendo sus deformaciones (ver figura 8.17 izq.), que luego compara con las mismas al ser cargadas con las bóvedas.

²⁸ El ladrillo de Borgoña era de uso habitual en París, y de tamaño 22x11x5 cm, menor que otros también utilizados en Francia (Claudel y Laroque 1870)

CHARGE		FLÈCHE AU MILIEU.			TRAVAIL du fer par millimèt. carré.	OBSERVATIONS.
totale.	par mètre de longueur	Poutre faible. A.	Poutre forte. B.	calculée.		
kil.	kil.	m.	m.	m.	kil.	
9,785	625	0.0025	0.0005	0.0024	2.00	Les deux poutres avaient 7 ^m .50 de portée.
15,160	1,010	0.0035	0.0010	0.0038	3.03	
23,000	1,533	0.0060	0.0025	0.0058	4.60	
31,385	2,092	0.0090	0.0060	0.0079	6.28	
39,770	2,651	0.0120	0.0070	0.0100	7.95	Les poutres passèrent la nuit sous cette charge. Le lendemain la flèche de la poutre A n'avait pas augmenté; celle de la poutre B était devenue de 0 ^m .008. Charge représentant la surcharge normale de 500 kilos, par mètre carré.
46,382	3,032	0.0130	0.0090	0.0117	9.28	
54,982	3,665	0.0170	0.0110	0.0138	11.00	
66,000	4,400	0.0200	0.0145	0.0166	13.20	
76,320	5,088	0.0220	0.0180	0.0190	15.26	Charge représentant la surcharge de 1,000 kilos, par mètre carré.
85,138	5,676	0.0210	0.0200	0.0215	17.00	
95,458	6,364	0.0300	0.0225	0.0240	19.10	
105,778	7,052	0.0325	0.0260	0.0266	21.00	
105,778	7,052	0.0340	0.0270	"	"	Après une nuit sous charge.
105,778	7,052	0.0340	0.0270	"	"	Après deux jours et demi sous charge.

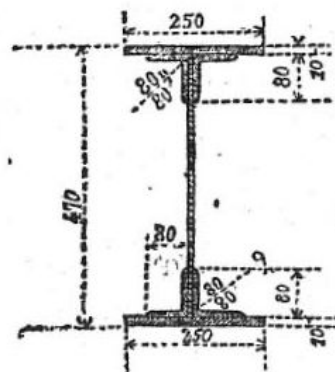


Figura 8.17. Izquierda: tabla con las deformaciones de las vigas metálicas cargadas antes de construir las bóvedas sobre ellas. Se indica la fila que corresponde con una sobrecarga de 500 kg/m² (la que se espera en el edificio) y la que corresponde con una sobrecarga de 1000 kg/m² (el doble de la esperada); Derecha: descripción de la viga metálica.

Se construyen las bóvedas y se van cargando progresivamente la dos laterales, de manera uniforme, dejando descargada la central. Se miden las deformaciones en las vigas para una sobrecarga en las bóvedas laterales de 500 y luego de 1000 kg/m², encontrando los siguientes valores:

Con sobrecarga de 500 kg/m²:

- las vigas laterales soportan 1800 kg/m y deforman 1,5 mm.
- las vigas centrales soportan 2500 kg/m y deforman menos de 1 mm.

Con sobrecarga de 1000 kg/m²:

- las vigas laterales soportan 2800 kg/m y deforman entre 6 y 7 mm
- las vigas centrales soportan 3500 kg/m y deforman 2,3 mm.

Estas deformaciones son mucho menores de las medidas sobre la viga sin bóveda por encima (ver tabla en figura 8.17 izq.), además de ser menores en la viga central, que soporta más carga. Fontaine atribuye esta diferencia al efecto rigidizador de las propias bóvedas y de las lengüetas sobre ellas de manera que las vigas trabajan como una pieza

empotrada en los extremos.²⁹ Se sigue aumentando la carga hasta llegar a 1250 kg/m², momento en el que comienza a agrietarse la bóveda central, abriéndose una grieta longitudinal en la clave y otras en zig-zag en los riñones. La bóveda central se levanta 2,4 cm. Esta carga se mantiene constante durante una noche y poco a poco la bóveda central se sigue levantando, las laterales van bajando y al final, las bóvedas laterales se caen, rompiendo en su caída los atirantamientos, que se parten en más de 10 fragmentos, y produciendo unas deformaciones muy elevadas en las vigas de apoyo. A pesar de todos estos movimientos, la bóveda central se mantiene en pie, siendo necesarios grandes esfuerzos para demolerla. La conclusión que extrae de este ensayo es que este sistema de bóvedas, formada por dos hojas superpuestas, no resiste bien el efecto de un gran empuje contra los apoyos.³⁰

Al hilo de este segundo ensayo, Fontaine cita el realizado por Laroque sobre los pilares de lazareto de Marsella (ver apartado 8.2.2). No sé si por un error de transcripción o para que el dato coincida con los obtenidos por él, la carga de rotura que obtiene Laroque (11000 kg/m²) se cita dividida por 10 (1100 kg/m²)

Realiza un tercer ensayo construyendo sobre el mismo sistema de apoyos que para el segundo unas bóvedas de igual geometría, pero realizadas con una única hoja de ladrillo hueco,³¹ de espesor total 11 cm. Los ladrillos se reciben con mortero de cal y los riñones se rellenan con pequeñas piezas cerámicas huecas y un mortero pobre de cal y cascotes. Esta vez carga las tres bóvedas con 1000 kg/m², observando que se mantienen

²⁹ Fontaine encuentra una relación de 1/5 entre las deformaciones de la viga con y sin bóveda por encima. 1 a 5 es la relación de deformaciones entre una viga apoyada y una empotrada en los extremos, para la misma carga y luz. Pero esta relación no es muy exacta y sólo se cumple en algunos casos. La diferencia en las deformaciones también puede estar causada por que, al descender la zona central de las vigas, se forman líneas de empuje en diagonal, hacia las zonas rígidas alrededor de los pilares. Guastavino fue consciente de este efecto, y así lo constató en su libro (Guastavino 1893, 84)

³⁰ Con este comentario se refiere a que la rotura de la bóvedas puede producirse por separación de las hojas además de por la rotura del material en sí.

³¹ Los ladrillos huecos, de tipo de nuestras rasillas, empiezan a fabricarse en este momento con la aparición de nuevas maquinarias. En Claudel y Laroque (1870, 75) se describe el método de fabricación, como algo novedoso y cada vez más utilizado.

en buen estado. Entonces van pasando carga de la bóveda central a las laterales, hasta que la central se queda sólo con una carga de 100 kg/m^2 (de manera que las dos laterales cargan con 1450 kg/m^2). En ese momento se reproducen los fenómenos del ensayo anterior, sólo que en este caso las tres bóvedas caen a la vez, presentando los materiales una cohesión mucho menor, que Fontaine atribuye al uso del mortero de cal.

De este ensayo deduce definitivamente la necesidad de atirantar las todas bóvedas, ya que, al igual que en el segundo ensayo, las bóvedas se caen al ser cargadas desigualmente si la bóveda central no está atirantada, aunque las laterales sí lo estén. Fontaine también destaca las ventajas de este sistema de construir bóvedas (una sola hoja de ladrillo hueco) frente al anterior (dos hojas de ladrillo colocado de plano)

Cet essay nous fixe d'une manière définitive sur la nécessité d'entretoiser les poutres. Tout en conservant dans notre étude les briques creuses, nous ayons indiqué que les joints seraient faits en bon ciment de Portland et les reins en béton maigre de meulière de Gif concassée (Fontaine 1865, 155)

Por último, realiza un ensayo sobre una bóveda de hormigón, empleando cemento de Claire-Fontaine³², de manera que sea un «véritable monolithe» (Fontaine 1865, 155) aunque les encuentra como inconveniente frente a las otras su elevado peso. La composición del hormigón es de 1 parte de cemento, 1,5 de arena, 1 parte de gravilla y 4 de grava gruesa.

Construye igualmente 3 bóvedas con una relación flecha-luz similar aunque de tamaño mucho menor (80 cm entre apoyos, 7,2 cm de flecha y 2,8 cm de espesor), ya que considera que, dada la homogeneidad del material, los resultados son extrapolables. Carga sólo las bóvedas laterales, hasta llegar a un valor que sería equivalente a 2050 kg/m^2 sobre una bóveda de las dimensiones ensayadas anteriormente,³³ encontrando que se mantiene en pie sin fisuras aparentes y que la clave desciende 2 mm. Para demoler la bóveda es necesario, igual que en el primer ensayo, someterla a impactos

³² Es un tipo de cemento francés que Fontaine considera el mejor de los que conoce, aunque no he encontrado referencias a él en tratados franceses de la época.

³³ Fontaine no explica como hace esta equivalencia, ni cual es el valor real de la carga en este 4º ensayo

sucesivos de un peso de 15 kg. Por tanto, esta es la bóveda que más resiste de todas las ensayadas, y Fontaine afirma que serían las elegidas si no fuera por su gran peso propio.

Fontaine dedica el resto de su artículo, bajo el epígrafe *Courbes de pression*, a obtener los empujes que una carga de 1000 kg/m² causa sobre los apoyos, ver apartado 7.1.2 de esta tesis.

A diferencia de d'Olivier, no obtiene ningún dato acerca del tipo o tamaño de los apoyos a partir del valor de los empujes obtenidos, aunque finaliza el artículo especificando que continuará próximamente.

Dans une prochaine note, nous discuterons les épures au point de vue de la résistance des matériaux, et nous ferons connaître des documents nouveaux sur la répartition des pressions (Fontaine 1865, 159).

En cualquier caso, dado que va a construir un edificio con bóvedas similares a las ensayadas, que soportará unas sobrecargas máximas de 500 kg/m² y que en general aplica un coeficiente de seguridad de 2, parece que con esta última parte del artículo está buscando el empuje que provocarán estas bóvedas.

8.2.3.b. Análisis del ensayo

Fontaine persigue un objetivo práctico y concreto: buscar el sistema constructivo más adecuado para un edificio industrial de gran tamaño, formado por series de bóvedas contiguas de 3,75 metros de luz y 0,355 m de flecha.³⁴ Sabe que las sobrecargas serán grandes y que pueden estar desigualmente repartidas.

Las conclusiones finales del propio Fontaine son muy explicativas sobre lo que busca. Aplicando un coeficiente de seguridad mínimo de 2 sobre las cargas de rotura obtenidas enuncia que:

- Una bóveda aislada de 4 metros de luz, 1/10 de flecha y 10 cm de espesor podrá ser cargada con 1000 kg/m²

³⁴ Las dimensiones son las habituales en los edificios industriales de la época, en Francia, en Inglaterra y dentro de España, en Cataluña (ver capítulo 6 de esta tesis)

- En una serie de bóvedas contiguas, será necesario el uso de tirantes siempre que las cargas sean superiores a 500 kg/m² (empleando dos hojas de ladrillos colocados de plano, con espesor total 10 cm) a 750 kg/m² (empleando una única hoja de ladrillos huecos de 11 cm de espesor) y a 1000 kg/m² (empleando hormigón fabricado con cemento de Claire-Fontaine).

La parte final del artículo parece encaminada a dimensionar correctamente los apoyos de estas bóvedas, bien sean muros o pilares metálicos, a partir del empuje mínimo obtenido en distintas situaciones de carga. Pero no llega a concretar este asunto, dejándolo para un artículo posterior que ya no escribe.³⁵

8.2.4. *Collard, 1893*

Collard es ingeniero de caminos y realiza un sencillo ensayo de carga dentro de los trabajos de construcción de un depósito de agua cubierto con bóveda tabicada, en la villa de Beaune.³⁶ Las bóvedas son un arco de círculo de 4 metros de abertura y 0,60m de flecha, formadas por dos hojas de ladrillo, recibidos con cemento. Los riñones están rellenos hasta la mitad de la altura.

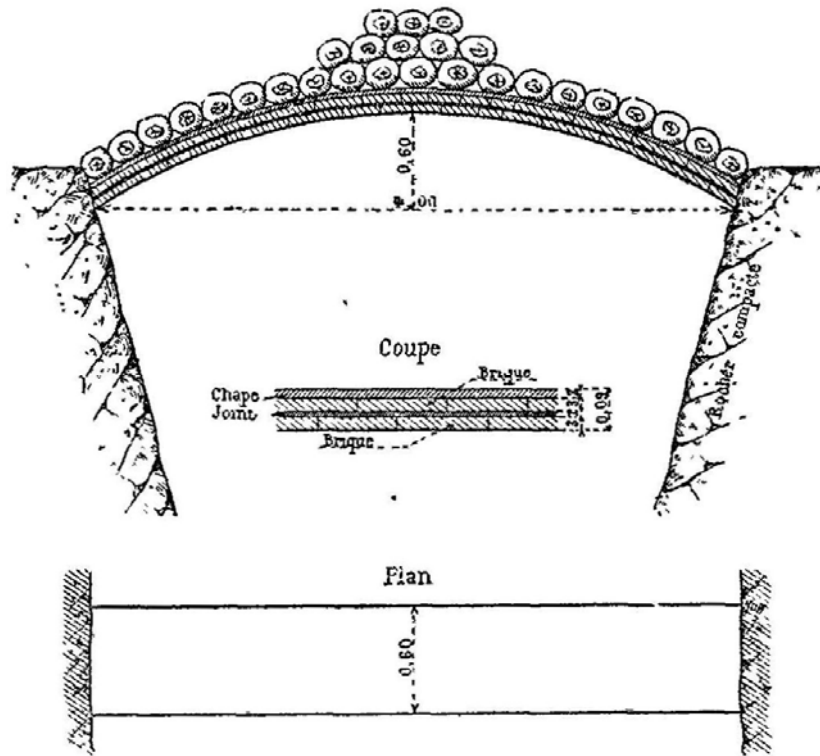
El ensayo se realiza sobre una bóveda con la misma geometría y forma de construir, salvo el relleno de los riñones. Se construye sobre una trinchera excavada en roca, de manera que los apoyos son muy rígidos. Los ladrillos son de Borgoña, de 3 cm de espesor, y se reciben con cemento Pórtland artificial. El espesor total de la bóveda son 9 cm. ver figura 8.18.

A la bóveda se le aplica una carga total de 10000 kg. Según la figura que acompaña al artículo, parece que se coloca desigualmente, agrupando algunos sacos en el centro. Pero el texto indica lo contrario: «Avec une charge de 10^T, soit environ 4.000 kilogrammes par mètre carré» (Collard 1893, 875). Bajo la carga aplicada, que se mantiene durante 18 horas, la bóveda se mantiene intacta, sin fisuras ni deformaciones.

³⁵ Al menos, yo no lo he encontrado.

³⁶ El uso de bóvedas tabicadas para cubrir depósitos de agua es común en Francia durante el siglo XIX. En Claudel y Laroque (1870, 473-74) encontramos referencias a otros muchos cubiertos así: Béziers y Adge (Hérault), Passy, Gentilly y otros (Paris), Montrouge.

Y aunque quieren continuar el ensayo hasta la ruptura, no es posible ya que «nous n'avions plus de sacs de chaux ou de ciment à notre disposition, et que le rangement des sacs au sommet de la pile devenait assez dangereux pour les ouvriers» (Collard 1893, 876).



8.18. Bóveda ensayada por Collard para la construcción de un depósito de agua (Collard 1893, 875)

El autor de ensayo concluye que estas bóvedas son mucho más resistentes de lo que se cree: «L'arc constituait un monolithe dont la résistance a dépassé nos previsions» (Collard 1893, 875) y que pueden emplearse en usos diferentes a la cobertura de depósitos siempre que los apoyos sean suficientemente resistentes, como ocurre en el caso del ensayo.

8.2.4.a. Análisis del ensayo

Es muy similar a algunos de los anteriores: una bóveda en arco de círculo muy rebajado, cargada de manera simétrica. La línea de empujes, parabólica, cabe dentro de la fábrica por su similitud con un círculo para pequeños ángulos de abertura: el de esta

bóveda (luz 4,00 m, flecha 60 cm) es 33° , ver figura 8.20. El espesor es 9 cm y el radio del círculo 3,64 m. Luego la relación e/r es 0,025, muy por encima del valor límite, del orden de 0,005 (Heyman 1977, 80). Dado que además, esta bóveda apoya «sur les parois inébranlables d'une tranchée dans le rocher» (Collard 1893, 874), la única manera de que falle es conseguir la rotura por compresión de los ladrillos.

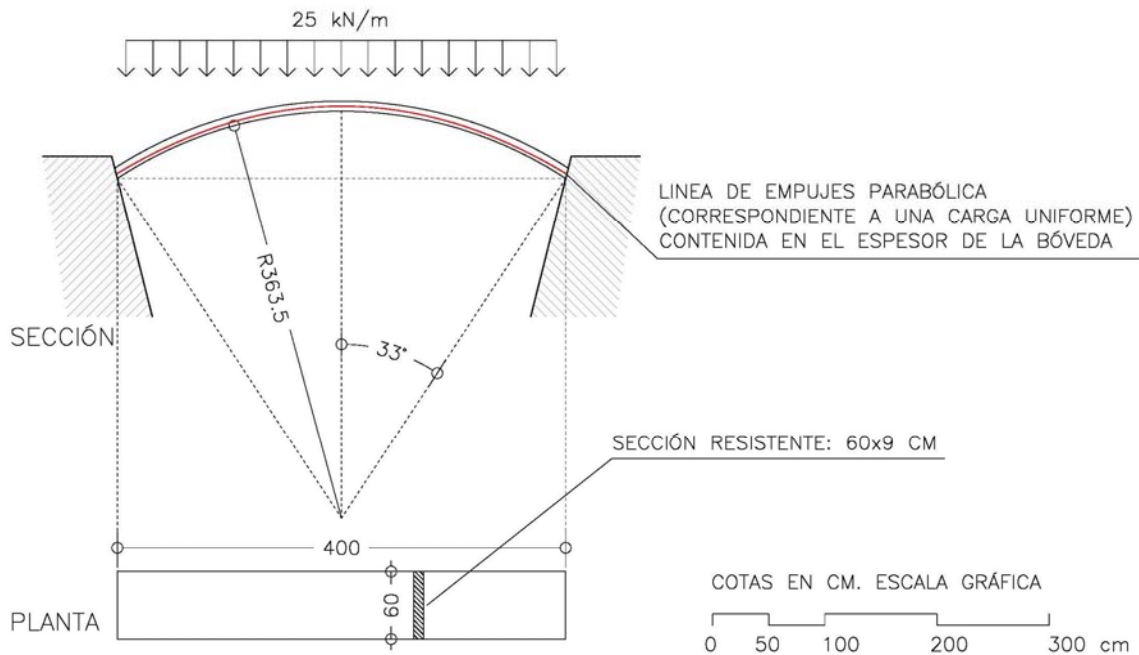


Figura 8.20. Geometría y línea de empujes de la bóveda ensayada por Collard en 1893.

Partiendo de una carga total aplicada sobre la bóveda de 10000 kg (100 kN), como se indica en el ensayo, distribuida de manera uniforme:

$$Q_{TOTAL} = 100 \text{ kN}$$

$$A_{BÓVEDA} = 4,00 \text{ m} \times 0,60 \text{ m} = 2,40 \text{ m}^2$$

$$q_{LINEAL} = \frac{10000 \text{ kN}}{4,00 \text{ m}} = 25 \text{ kN/m}$$

El empuje causado por esta carga, con línea de empujes parabólica, es:

$$E = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot F} = \frac{25 \text{ kN/m} \times 4,00^2 \text{ m}}{8 \times 0,60 \text{ m}} = 83,33 \text{ kN}$$

Con este empuje y considerando una sección resistente de 600x90 cm, la fábrica soporta una compresión de 1,54 N/mm², un valor muy por debajo de la rotura.

$$A_{RESISTENTE} = 600 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} = 54000 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{83330 \text{ N}}{54000 \text{ mm}^2} = 1,54 \text{ N/mm}^2$$

Un valor de nuevo muy alejado de las tensiones de rotura de ladrillos y morteros. Para llegar a este valor de rotura necesitaríamos seis veces más carga, alrededor de 60.000 kg. En sacos de cemento, y considerando un peso específico aparente de 1100 kg/m³,³⁷ necesitamos una altura de ¡23 metros! sobre la bóveda para que llegue a romper. Así que parece razonable que Collard no tuviera a mano suficientes sacos de cemento para romper la bóveda, y que le pareciera peligroso para los obreros llegar hasta el final. Guastavino, unos años después, hizo ensayos espectaculares apilando sacos de cemento sobre bóvedas tabicadas (ver apartado 8.4.4 de esta misma tesis)

8.3. Ensayos en Inglaterra

Las bóvedas tabicadas llegan a Inglaterra por influencia francesa. En 1756, se publica una traducción inglesa de Espie (1754) a cargo de Louis Dutens. Al parecer, bajo la influencia directa de esta traducción se construye Fonthill, el primer edificio con bóvedas *á la Rousillon* de Inglaterra.³⁸ En la arquitectura industrial se establece un tipo de forjado incombustible con bóvedas de ladrillo atirantadas. Para reducir el peso de las bóvedas se utilizan a veces piezas cerámicas huecas. Aunque no hay evidencias de que se construyeran con ladrillo tabicado, es bastante probable que así fuera (ver apartado 6.2.3. de esta tesis).

Los ensayos se realizan en un contexto similar a los franceses: desconocimiento del sistema constructivo y una nueva mentalidad que exige evidencias científicas. Dado

³⁷ Este dato, obtenido en la página web de CEMEX, corresponde a un cemento actual. Además, el peso específico aparente del cemento depende mucho de su compactación en el almacenaje. Este es pues, un número verdaderamente gordo.

³⁸ Para un estudio completo sobre la expansión de las bóvedas tabicadas desde el Rosellón francés a Inglaterra, ver Bannister (1968)

que en Inglaterra eran más habituales las bóvedas de rosca,³⁹ hay más ensayos sobre estas bóvedas que sobre tabicadas; también se hacen ensayos similares sobre bóvedas de rosca y tabicadas.

8.3.1. Cubitt, 1841

Thomas Cubitt (1788-1855) fue un importante constructor inglés. Fundó una compañía constructora que se mantuvo hasta finales del s. XX. Desarrolló numerosos proyectos desde 1815, principalmente edificios de vivienda colectiva en el centro de Londres: Pimlico, Belgravia, Bloomsbury.⁴⁰ También intervino en el palacio de Buckingham, adaptándolo para la reina Victoria y su familia.⁴¹

En 1841 publica en la revista de la *Institution of Civil Engineering (ICE)*, de la que era miembro, los resultados de un ensayo de carga sobre arcos de ladrillo, en un artículo titulado «Experiments on the strength of Brick and Tile Arches»

Comienza su artículo dejando ver que era un constructor experimentado, y que había empleado bóvedas como las que ensaya en sus construcciones:

In the course of his extensive building engagements, the author had occasion to construct some fire-proof floors; he therefore wished to ascertain how the greatest amount of strength could be attained, with a due regard to the space occupied, and the cost of the structure (Cubitt 1841, 136)

³⁹ De este tipo es el que realiza Brunel en 1834 y recoge el tratadista español Espinosa (1859, 286).

⁴⁰ Los datos biográficos de Thomas Cubitt se han obtenido de la web (en.wikipedia.org). En la página se cita el libro *Holland&Hannen and Cubitts-The inception and development of a great building firm* (1920) como fuente. La firma Holland&Hannen and Cubitts se fundó en Londres en 1883 englobando a la creada por Thomas Cubitt 70 años atrás y siguió en pie hasta 1976.

⁴¹ Thomas Cubitt era el constructor favorito de la reina Victoria, que incluso escribió una carta en su muerte (Halliday 2011).

El ensayo se realiza sobre dos arcos de iguales dimensiones⁴²: 15 ft. y 9 in. (480 cm) de luz y 2 ft. (61 cm) de flecha, de manera que la relación flecha-luz es 1/7,7.

-Uno de ellos se construye con una hoja de ladrillos de canto, recibidos con cemento, con un espesor de medio ladrillo. La longitud de este arco es 2 ft. (61 cm).

-El segundo arco se construye con 4 hojas de rasilla, también recibidas con cemento. El espesor es 4,25 in. (10,8 cm) y la longitud de este arco es 2 ft. y 4 in. (71 cm).

El trasdós de los arcos se rellena hasta la altura de la clave con cascotes recibidos con cemento. Se van cargando poco a poco los dos arcos, con una fila de ladrillos colocados linealmente en el centro de los dos arcos, aumentando la carga durante 75 días desde 12,75 cwt. (6,48 kN) hasta 160 cwt. (81,28 kN). A los 75 días, y bajo la carga máxima, los dos arcos rompen:

-el de ladrillo de canto porque los apoyos se abren

-el de rasillas se rompe bajo la carga

El autor concluye del ensayo que:

And although, from the circumstance of there having been no tie bars across the arches, the experiments cannot be considered satisfactory, they are valuable, as supplying data hitherto rarely recorded (Cubitt 1841, 136)

8.3.1.a. *Análisis del ensayo*

De la última frase puede deducirse que no se habían hecho muchos ensayos similares al que aquí se describe, al menos con anterioridad a su publicación, en 1841.

Como en ensayos anteriores, dada la forma del arco, muy rebajado y con relleno hasta alcanzar la clave, es muy fácil dibujar dentro de la fábrica (arco o relleno, que dada su composición funcionará de forma similar) una línea de empujes para cualquier carga,⁴³ ya sea repartida o puntual. La carga para la que rompe la bóveda produce unas tensiones muy bajas en el material (alrededor de 1,2 N/mm²), similares a las que otros

⁴² Para convertir las medidas al SI se han empleado las equivalencias del sistema *Imperial units*, empleado en Inglaterra desde 1824 : Longitud: 1 in=2,54 cm; 1 ft=12 in=30,48 cm; Peso: 1 lb=0,453 kg; 1 cwt (hundredweight)=112 lb=50,8 kg.

⁴³ Guastavino fue consciente de este hecho y así lo publica en su libro (Guastavino 1893, 63)

autores afirman que bóvedas parecidas resisten. Una explicación podría estar en los apoyos, que no se detallan en este ensayo.

Pero más interesante que esto resulta que un constructor tan importante con Thomas Cubitt se molestara en ensayar bóvedas tabicadas y que afirme que las ha utilizado en sus proyectos. Dentro de la preocupación por los forjados incombustibles, las bóvedas de ladrillo atirantadas fueron una solución habitual en la arquitectura industrial en Inglaterra y Francia durante el siglo XIX. Del ensayo de Cubitt se deduce que la solución saltó a la arquitectura residencial, con soluciones y tamaños similares: bóvedas circulares, atirantadas, muy rebajadas y con luces alrededor de 4,00 m. Y que además de las bóvedas de rosca de ladrillo también se utilizaban las tabicadas.

8.4. Ensayos realizados por Guastavino en Estados Unidos

Al llegar Rafael Guastavino a los Estados Unidos se encontró con un contexto constructivo muy diferente al que había dejado en España. Aunque existía una preocupación por conseguir sistemas constructivos resistentes al fuego, la construcción con bóvedas tabicadas era desconocida y era necesario probar su validez. Los materiales necesarios (ladrillos y cemento) no eran los mismos que en Cataluña, no había mano de obra especializada, etc.

I had not been here long before I recognized the necessity of studying American methods, materials and facilities. To this work I devoted five years. It was absolutely essential that I should be posted, particularly in the matter of the timber arches: First, because cement is the essential part; second, because of the position of the arches, as failure on their part must endanger the lives of workmen (...)

On the other hand, the manufacture of tile here was almost an impossibility; because, if it was accomplished by hand-work it would be very dear, and if by machinery, the probabilities were that it would come out too heavy and useless (Guastavino 1893, 17-18)

Guastavino dedica muchos esfuerzos en sus primeros años en América a publicitar y dar garantías al sistema constructivo tabicado, para lo cual escribió dos libros (Guastavino 1893 y 1904), varios artículos en revistas, patentó diversos elementos y emprendió una amplia campaña de ensayos, tanto sobre probetas como sobre bóvedas completas.

No hay ningún registro de que Guastavino usara posteriormente los datos obtenidos en los ensayos para el proyecto de sus bóvedas: los ensayos sobre probetas consiguen datos de resistencia (a compresión, tracción, flexión o cortante) y Guastavino nunca usó la resistencia como dato para sus proyectos; los ensayos sobre bóvedas completas tienen un carácter publicitario y de ellos no se extraen datos científicos.

Se estudian a continuación todos los ensayos llevados a cabo por los Guastavino en Estados Unidos, desde finales del s. XIX hasta bien avanzado el XX.

8.4.1. Ensayos sobre probetas, 1887

Estos primeros ensayos se describen en Guastavino (1893). Forman parte de la exhaustiva campaña publicitaria que Guastavino desarrolla en sus primeros años en Estados Unidos para dar a conocer el sistema de construcción tabicada.

The publication of some artistic works in illustrated papers were received with appreciation, and some successful competitions for semipublic buildings in New York put me in position to begin, with some authority, a series of test and experiments with imported tiles (Guastavino 1893, 19)

Se realizan a lo largo del año 1887⁴⁴ en el Departamento de Ensayos y Experimentos de la Fairbanks Scale Company. Son ensayos sobre probetas de ladrillo y mortero de cemento y su objetivo es dar unos valores de resistencia a compresión, tracción, flexión y cortante que puedan aplicarse en el cálculo de bóvedas formadas por estos materiales.

8.4.1.a. Ensayos de compresión

A compresión realiza cuatro ensayos y, aunque no se adjunta ningún dibujo de la probeta, es de suponer que sería la misma que para tracción (ver figura 8.20, izq.)

⁴⁴ En este momento los edificios construidos por Guastavino en Estados Unidos son todavía escasos. Hasta 1889 no fundará su empresa *Guastavino Fireproof Construction Company* y empezará a construir extensamente, empezando por la Biblioteca Pública de Boston.

El valor medio de estos cuatro ensayos es el indicado abajo, 2060 lbs./sq. in (14,21 N/mm²) como resistencia a los cinco días. Hay una en la que indica la resistencia un año después de ser construida, obteniendo un valor de 3290 lbs./sq. in (22,68 N/mm²).⁴⁵

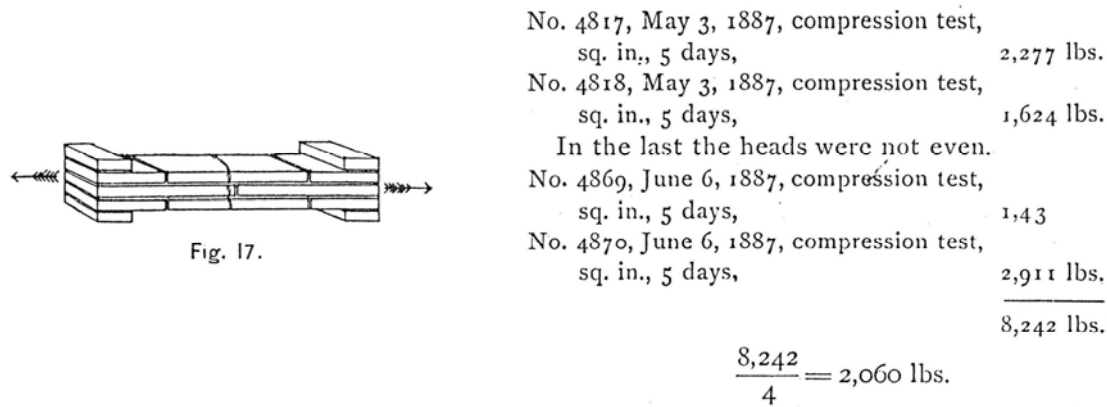


Figura 8.20: A la izquierda, probeta para realizar ensayos de tracción y probablemente también de compresión (Guastavino 1893, 54); A la derecha, tabla con los resultados obtenidos (Guastavino 1893, 59)

8.4.1.b. Ensayo de flexión

Se realiza un único ensayo de flexión, sobre la probeta de la figura. 8.21 izq., obteniendo un valor de 90 lbs./sq. in (0,62 N/mm²)

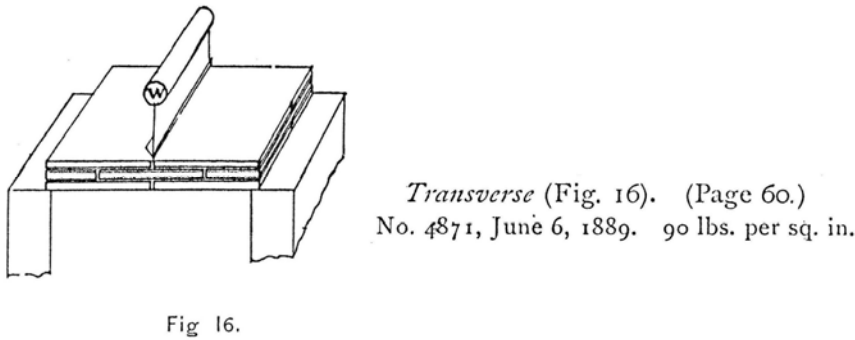


Figura 8.21: A la izquierda, probeta para realizar ensayos de flexión (Guastavino 1893, 60); A la derecha, tabla con los resultados obtenidos (Guastavino 1893, 58).

⁴⁵ En todos los ensayos de Guastavino en Estados Unidos, las unidades de medida son el pie y la pulgada, y las cargas se expresan en libras. Para su conversión al SI, se ha empleado el sistema *US customary units* (muy similar al sistema *Imperial Units* inglés) es el que se utilizaba en Estados Unidos en el momento de los ensayos: Longitud: 1 in=2,54 cm; 1 ft=12 in=30,48 cm; 1 lb=453,6 gr=4,54 N.

8.4.1.c. Ensayo de tracción

Igualmente se recoge uno sólo, sobre la probeta de la figura 8.22 izq. El valor obtenido es 287 lbs./sq. in (1,98 N/mm²)

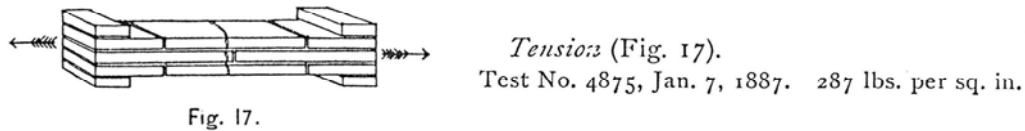


Figura 8.22: A la izquierda, probeta para realizar ensayos de tracción (Guastavino 1893, 54); A la derecha, tabla con los resultados obtenidos (Guastavino 1893, 58)

8.4.1.d. Ensayo de cortante

Para cortante se obtienen dos valores, uno de ellos en una probeta de ladrillos y cemento Pórtland y la otra con cemento y yeso de París. El valor obtenido es mucho más elevado utilizando cemento. Es interesante que en este ensayo se muestre esta distinción y en el resto no. La probeta ensayada, en ambos casos, se muestra en la figura 8.23 izq. Los valores que obtiene son 123,7 lbs./sq. in (0,85 N/mm²) empleando cemento Pórtland y 34 lbs./sq. in (0,23 N/mm²) empleando yeso

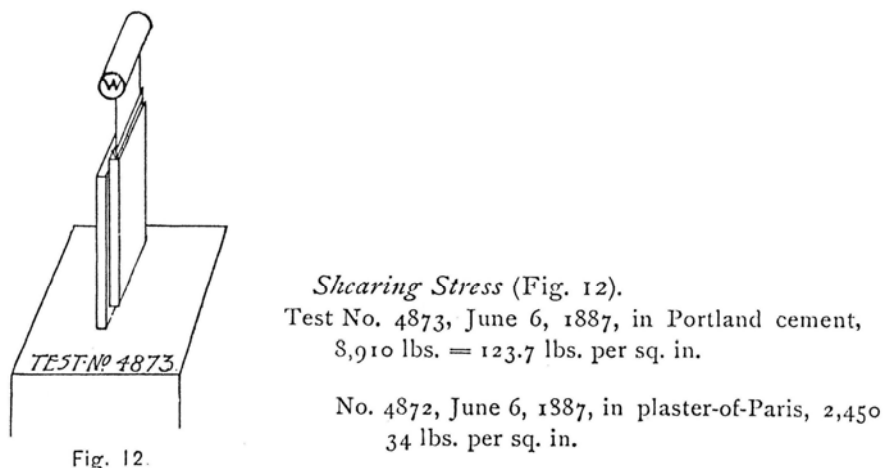


Figura 8.23: A la izquierda, probeta para realizar ensayos de cortante (Guastavino 1893, 50); A la derecha, tabla con los resultados obtenidos (Guastavino 1893, 58-59)

8.4.1.e. Análisis de los ensayos

En Guastavino (1893), el autor hace un uso teórico de estos valores para obtener el espesor de bóvedas y cúpulas tabicadas. A pesar de haber ensayado la resistencia a tracción, flexión y cortante, Guastavino sólo utiliza el valor medio obtenido para compresión (14,21 N/mm²), ver apartado 7.2.3 de esta tesis.

8.4.2. Máquina para ensayar arcos de ladrillo, 1890

Dentro del Archivo Guastavino/Collins,⁴⁶ se conserva el dibujo de una máquina para ensayar arcos completos de ladrillo (figura 8.25). El dibujo es de 1890. No hay datos de que se usara efectivamente en un ensayo posterior, aunque la forma de repartir las cargas es similar a la que se emplea en unos ensayos muy posteriores, de 1935.

El tamaño y dimensiones de la bóveda que se ensaya: luz 12 ft.=366 cm, arco circular con relación flecha-luz 1/10 es muy habitual en las obras de Guastavino.

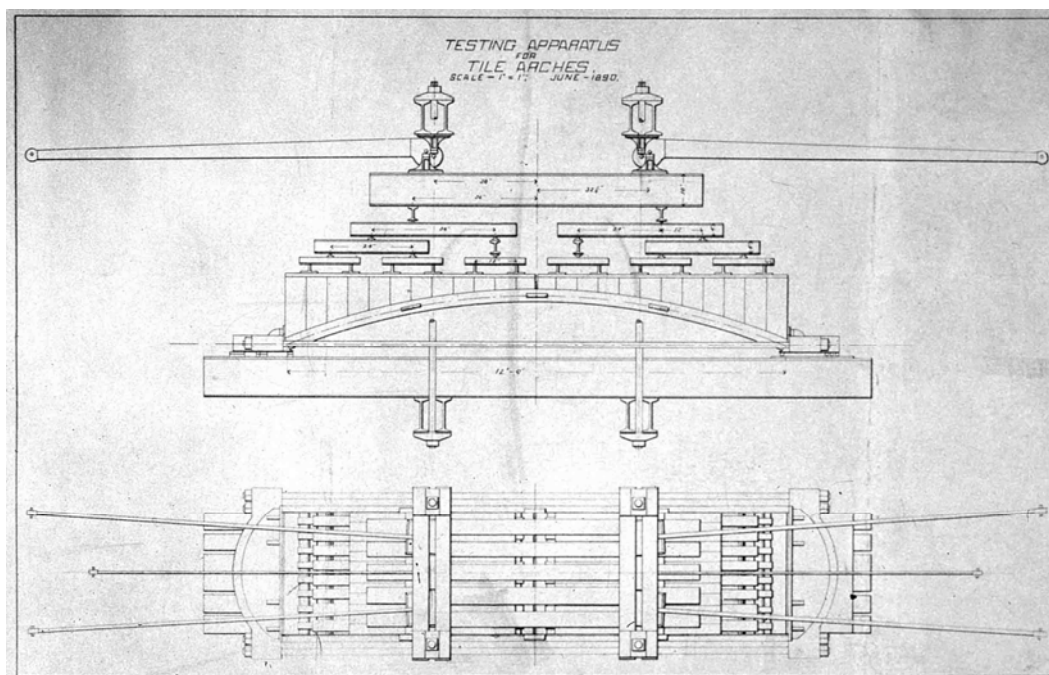


Figura 8.24: Máquina para ensayar arcos de ladrillo, 1890 (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

⁴⁶ Al cierre de la Guastavino Company, el profesor Collins rescató la documentación de la empresa y la incorporó al Archivo Catalán de Arte y Arquitectura, en la Universidad de Columbia. Actualmente se conserva en la colección «The Guastavino Fireproof Construction Company/ George Collins architectural record and drawings, Department of Drawings&Archives, Avery Architectural & Fine Arts Library, Columbia University».

Si se hiciera un ensayo con esta máquina, dada la forma de aplicar la carga, muy repartida, y el tirante que ata los apoyos, sería difícil conseguir la rotura de la bóveda, como se ha visto en ejemplos anteriores. En ese aspecto, la máquina parece preparada para llevar a cabo ensayos del tipo publicitario más que los que buscan realmente datos acerca del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas.

8.4.3. Ensayos de resistencia a carga y fuego, 1897.

Una de las ventajas de la construcción tabicada es su carácter incombustible. Guastavino publicitó mucho este tema, ya que era un factor importante en América, un país de tradición carpintera y en el que eran frecuentes los incendios, el más devastador de todos destruyó Chicago en 1871, unos años antes de la llegada de Guastavino a Estados Unidos.

En 1897 lleva a cabo una serie de ensayos sobre una bóveda completa de 11 x 14 pies (3,35 x 4,27 m), que se construyó en un solar vacío de la ciudad de Nueva York, en la esquina de la Avenida A con la calle 68. El ensayo se realiza con la presencia del *New York Department of Buildings*, que envía un detallado informe sobre él a Rafael Guastavino. Este informe, junto con una serie de 5 fotografías tomadas durante el ensayo y 3 planos previos para poder construir la bóveda, se conservan en el Archivo Guastavino. Además, se publicó un resumen de los resultados obtenidos en la revista *The American Architect and Building News* (1897, 45). En los diez años que han pasado desde los anteriores ensayos, de 1887, Guastavino ya ha fundado su empresa y está construyendo importantes edificios,⁴⁷ lo que se aprecia en el cambio de escala de este ensayo respecto al anterior.

El inicio del informe es un detallado proceso de construcción de la bóveda que se ensayará posteriormente. Es interesante porque parece razonable que esta fuera la manera en que Guastavino construía sus bóvedas, dado que el tipo descrito era muy habitual (ver figura 8.25).

⁴⁷ En 1889 se funda la Guastavino Fireproof Construction Company, a raíz del éxito obtenido en la construcción de la Biblioteca Pública de Boston. En 1897 había construido importantes edificios como en Estados Unidos

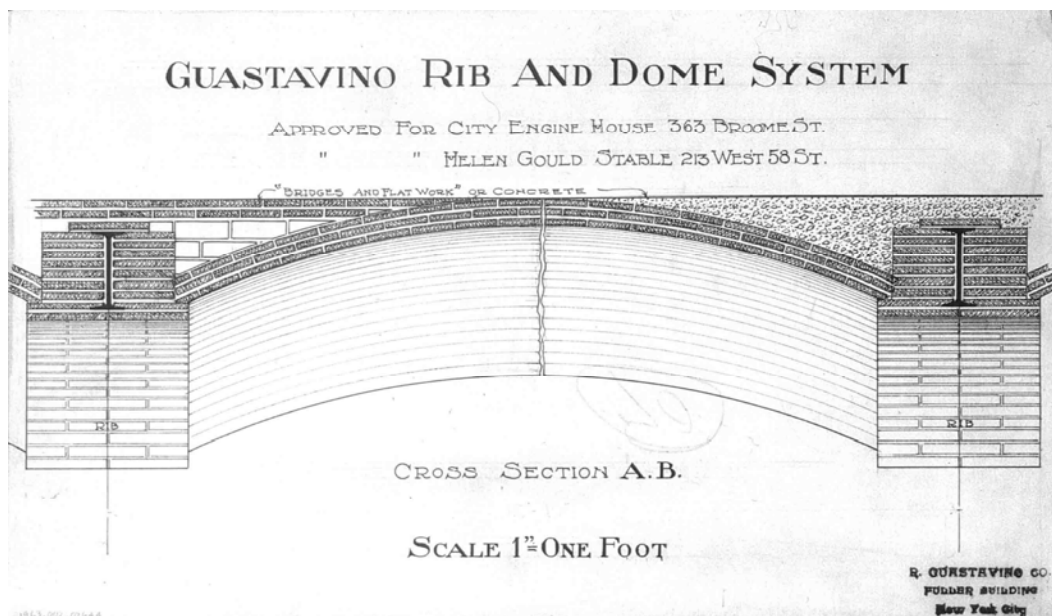


Figura 8.25: Dibujo publicitario de la *Guastavino Fireproof Construction Company* mostrando la forma de construir sus bóvedas. Esta bóveda es muy parecida a la que se construye para el ensayo, incluso la doble manera de llegar al pavimento superior: con un macizo de hormigón ligero -a la derecha- o con un entramado de tabiques de ladrillo -a la izquierda. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

8.4.3.a. Descripción de la bóveda ensayada

El forjado ensayado tiene unas dimensiones de 11 x 14 pies (3,35 x 4,27 m), apoyado en una pequeña cornisa de 6 pulgadas (15 cm) sobre paredes laterales de 10 pies (3,05 m)

El espacio entre paredes es de 12 x 15 pies (3,66 x 4,57 m). En cada esquina se deja un triángulo abierto que servirá de chimenea. Este triángulo pasa a sección cuadrada manteniendo el área inicial y luego se cierra con ladrillo. Encima de los muros se construye un marco de vigas en I de 15 pulgadas (38 cm) reforzado en las esquinas con vigas menores, de 7 pulgadas (18 cm), atornilladas a las primeras (ver figura 8.26)

La línea de arranques de la bóveda es un octógono, formado por las cuatro paredes perimetrales y cuatro arcos contruidos sobre las vigas de 7 pulgadas que forman las diagonales del marco metálico, ver figura 8.27. El primer ladrillo de la bóveda se colocó en ménsula introduciéndolo en la parte superior de la pared de ladrillo.

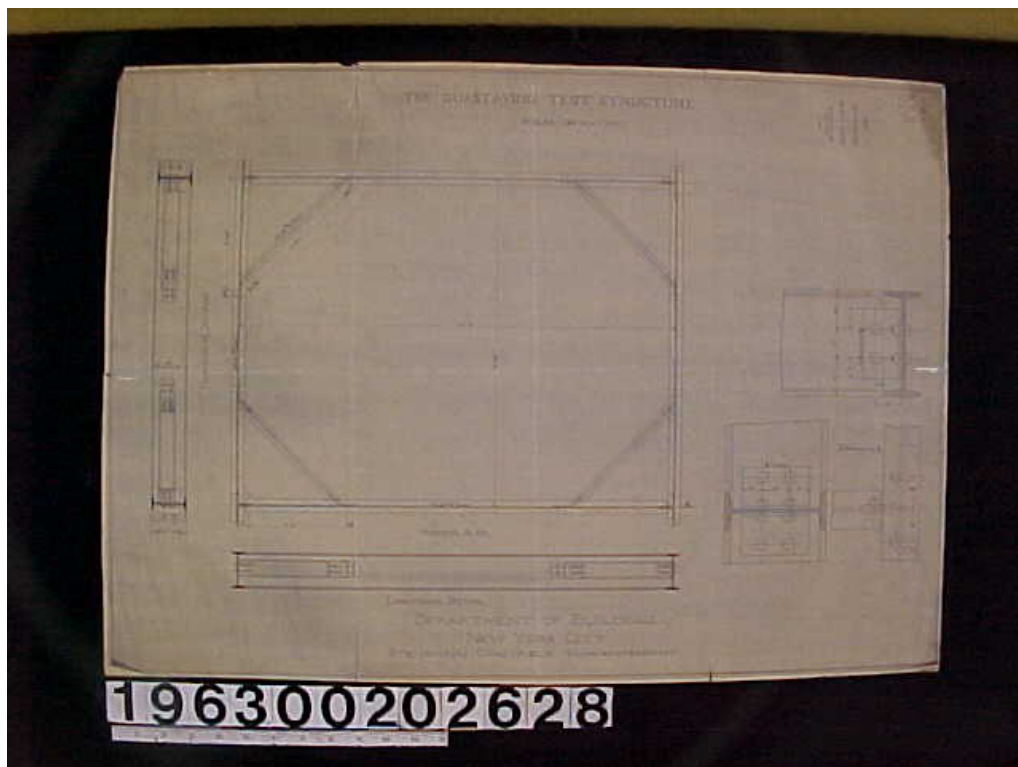


Figura 8.26: Marco de hierro que se construye en la parte superior de las paredes para recoger el empuje de la bóveda. En el informe del ensayo, *Drawing n° 72* (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

La bóveda para el ensayo se construye con tres capas de ladrillos recibidos con mortero de cemento. Los ladrillos tienen un espesor de 0,75 a 1 pulgada (1,9 a 2,54 cm), 6 pulgadas (15 cm) de ancho y 12, 15 ó 18 pulgadas (30, 38 ó 46 cm) de largo.

Para construirla, se colocan cimbras ligeras de madera separadas entre si la longitud de un ladrillo. La altura de las cimbras se va incrementando hasta llegar a 17 pulgadas (43 cm), que es la flecha de la bóveda, un poco más de un 10% de la luz mayor.

La primera capa de ladrillos se va colocando una al lado de otra sobre las cimbras, pegándolas con cemento puro para conseguir una junta perfecta. Después de colocar tres filas de ladrillo de la capa inferior, se comienzan las dos capas superiores. Estas se colocan embebidas en mortero de cemento de manera que el espesor de la junta es de media pulgada. Al colocar los ladrillos, se empujan para que queden embebidos en el mortero, repartiéndolos sobre la capa inferior. Antes de colocarse, se mojan cuidadosamente. El cemento empleado era Pórtland, importado de Inglaterra. El mortero estaba compuesto por una parte de cemento y una parte de arena. Los ladrillos se colocan con cuidado de romper las juntas entre capas tanto como sea posible.

Cuando la bóveda estuvo finalizada, se decide construir dos tipos de forjado por encima:

-En la mitad de la bóveda se construyeron unas costillas de ladrillo desde las esquinas hasta el centro de la bóveda, de 2 pulgadas (5 cm) de altura y cuatro tabiques paralelos, también de ladrillo y mortero de cemento. Sobre estos cuatro tabiques se tendieron dos capas horizontales de ladrillo, rompiendo las juntas entre ambas (ver mitad izquierda de las figuras 8.27 y 8.31)

-En la otra mitad se construyeron también las costillas diagonales de 2 pulgadas (5 cm) de altura. Se rellenó el espacio entre costillas con hormigón, formado por 1 parte de cemento Pórtland, dos de arena y 3 de grava. Por encima de esta capa, hasta llegar a la altura requerida para el forjado, se vierte *cinder concrete*⁴⁸, formado por 1 parte de cemento, 1 de arena y 4 de ceniza, en el que se embeben los durmientes del pavimento, de 2 x 4 pulgadas (5 x 10 cm) y separados 20 pulgadas (51 cm) a ejes, ver mitad derecha de la figura 8.27.

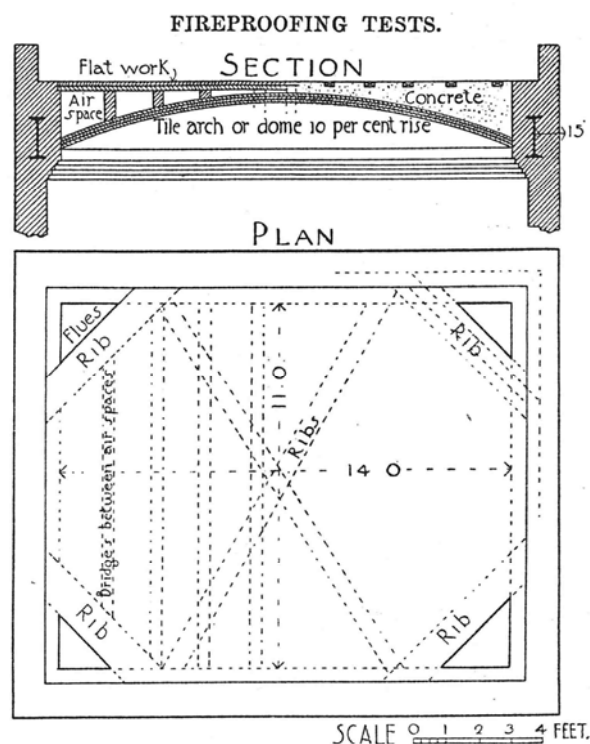


Figura 8.27: Planta y sección de la bóveda con la que se realizaron los ensayos. *The American Architect and Building News* (1897, 45)

⁴⁸ Aunque no se indica en el informe, este hormigón con ceniza debía ser más ligero que el de arena y grava.

También se emplean diferentes tipos de ladrillo en el intradós de la bóveda: corrugados de arcilla roja y de arcilla blanca y vidriados. Las juntas entre ladrillo se repasan cuidadosamente con mortero de cemento y posteriormente se tiende un enlucido de yeso encima de algunas de filas de ladrillos corrugados, dejándose otras a la vista. Las filas de ladrillo vidriado se dejan todas vistas.

La bóveda se terminó de construir el 3 de marzo. La capa de hormigón sobre la mitad de la bóveda se vierte el 9 de marzo. El ensayo comienza el 2 de abril, de manera que los materiales tuvieron casi un mes para endurecerse. No se colocó ningún tejado sobre ella en este tiempo.

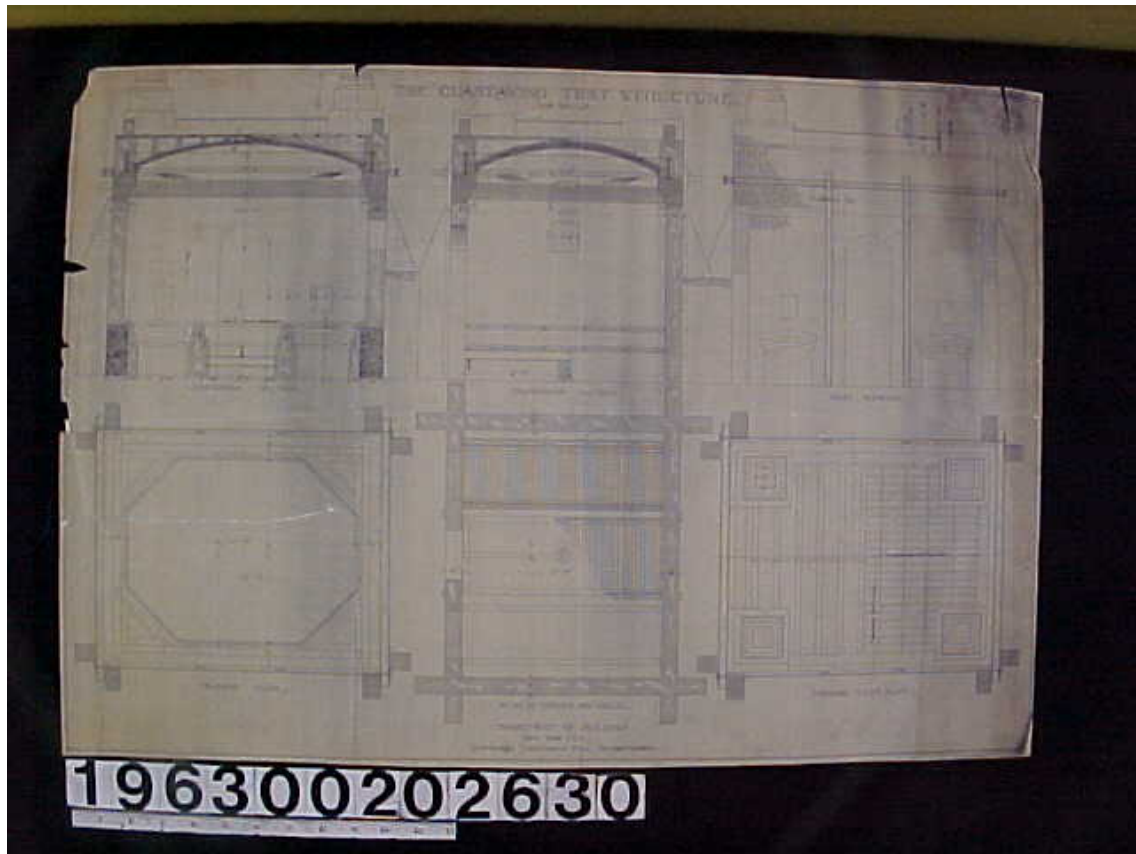


Figura 8.28: Plantas y secciones del proyecto para construir la bóveda. En el informe del ensayo, *Drawing n° 68* (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

8.4.3.b. Desarrollo del ensayo

Se aplicó sobre la totalidad de la superficie de la bóveda una carga uniforme de 150 lbs./sq. in (6,30 KN/m²). La carga estaba formada por una gruesa capa de arena para repartir el peso y lingotes de hierro por encima. El 1 de abril, antes de iniciar el ensayo,

se miden las deformaciones, encontrando que el punto central de la bóveda ha descendido 0,017 pulgadas (0,43 mm) bajo la carga aplicada.

El fuego comienza el 2 de abril, a las 10:18. Se tomó la temperatura a intervalos regulares de tiempo durante el ensayo (en la figura 8.32 se observan los medidores de temperatura, insertados en el horno). Para medir las temperaturas se utiliza un pirómetro neumático Uehling-Steinbart⁴⁹ y también se introducen en el fuego muestras de distintos metales observando en que momento se funden.

Para medir las deformaciones de la bóveda bajo la influencia del fuego, se colocaron 5 escalas metálicas graduadas, 4 en la mitad de cada una de las paredes y la última en el centro de la bóveda. Las cuatro escalas de las paredes laterales se colocan para eliminar en lo posible errores en la medición de la deformación en el centro de la bóveda, derivadas de elevaciones o descensos de las paredes a causa del ensayo (en las figuras 8.30 y 8.34 se observan las escalas graduadas en mitad de las paredes)

Los datos acerca del desarrollo del ensayo se anotan cuidadosamente en una tabla, en la que se marca la hora, la temperatura alcanzado, la deformación del punto central y algunos comentarios. La figura 8.29 es un extracto de esta tabla, referida al comienzo del incendio.

Resumiendo los datos más relevantes de esta tabla:

El fuego se mantuvo durante 5 horas, manteniendo la temperatura alrededor de 2000-2100°F (1100°C) durante 4 horas, con un máximo de 2300°F (1385°C).⁵⁰

El punto central de la bóveda se eleva debido a la dilatación de los materiales de la bóveda. Este ascenso va aumentando de manera gradual, partiendo de que al inicio la este punto ha bajado 0,017 pulgadas (0,43 mm) por efecto de la carga. El incremento es mas rápido al principio: se alcanza una deformación de 0,5 pulgadas (1,27 cm) 30 minutos después de inicio de fuego y con una temperatura de 1600°F (870°C). El

⁴⁹ Los pirómetros neumáticos, inventados en 1893, detectan temperaturas muy elevadas midiendo la presión de los gases de la combustión (Lipták 2003, vol.1, 627). Uehling, Steinbart & Co. era una firma de instrumentos de medición de la época

⁵⁰ En el informe del ensayo, las temperaturas se miden en grados Fahrenheit. Se han convertido a grados Celsius empleando la fórmula habitual: $(F-32)/180=C/100$

máximo total de deformación son 0,71 pulgadas (1,80 cm), cuatro horas después de iniciado el fuego, con una temperatura de 2000°F (1093°C).

Time H. M.	Temperature Deg. F.	Deflections Inches	Remarks.
9:15 A. M.		.017	
10:18			Fire started.
10:25	925		Lead melting.
10:30	1350	.305	Aluminum was melted.
			On account of smoke it was impossible to note the exact time of melting.
10:35	1400		Cracks appearing in west wall. See photo 1262.
10:40	1450		Glass plug nearly all melted.
10:45	1600	.500	
11:00	1850	.535	Water dropping in temperature plug hole, showing that the wall had not been suffi- ciently dried.
			Ceiling in excel- lent condition; dome plaster had fallen on south side.
11:15	1950	.552	
11:23	2000		
11:30	2000	.530	Copper plug re- duced in size. Re- firing south open- ing. Ceiling on the north side of the structure observed to be intact.
11:40	2075		Refiring south open- ing discontinued.
			Copper plug melted.
11:45	2000	.510	Refiring small grate openings.
11:46			

Figura 8.29. Tabla en la que se apuntan los datos acerca del desarrollo del ensayo. De izquierda a derecha: hora, temperatura en °F, deformación en el centro de la bóveda y comentarios. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

Al cabo de las cinco horas, el fuego se apagó aplicando agua a presión al interior durante 15 minutos. En los primeros cinco minutos, el agua se aplicó directamente contra el techo y en los diez restantes, principalmente sobre las paredes. Posteriormente el agua se aplica a la parte superior de la bóveda durante 5 minutos, a baja presión y por último se aplicó de nuevo al interior hasta apagar el fuego por completo.

Una inspección del techo después de cinco horas de ensayo y justo después de que se aplicara el agua, muestra los daños sufridos (ver figura 8.33): el yeso aplicado en una parte de la bóveda ha caído, así como algunos de los ladrillos de la capa inferior (esta caída se produce al apagar el incendio, debido a la brusca contracción de los materiales). Se observa una grieta en una de las vigas que forman las diagonales del marco. Algunos ladrillos se han vidriado y otros están fundidos



Figura 8.30: La bóveda terminada, preparada para recibir el relleno. 3 marzo 1897. En el informe, *photograph n° 1236*. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

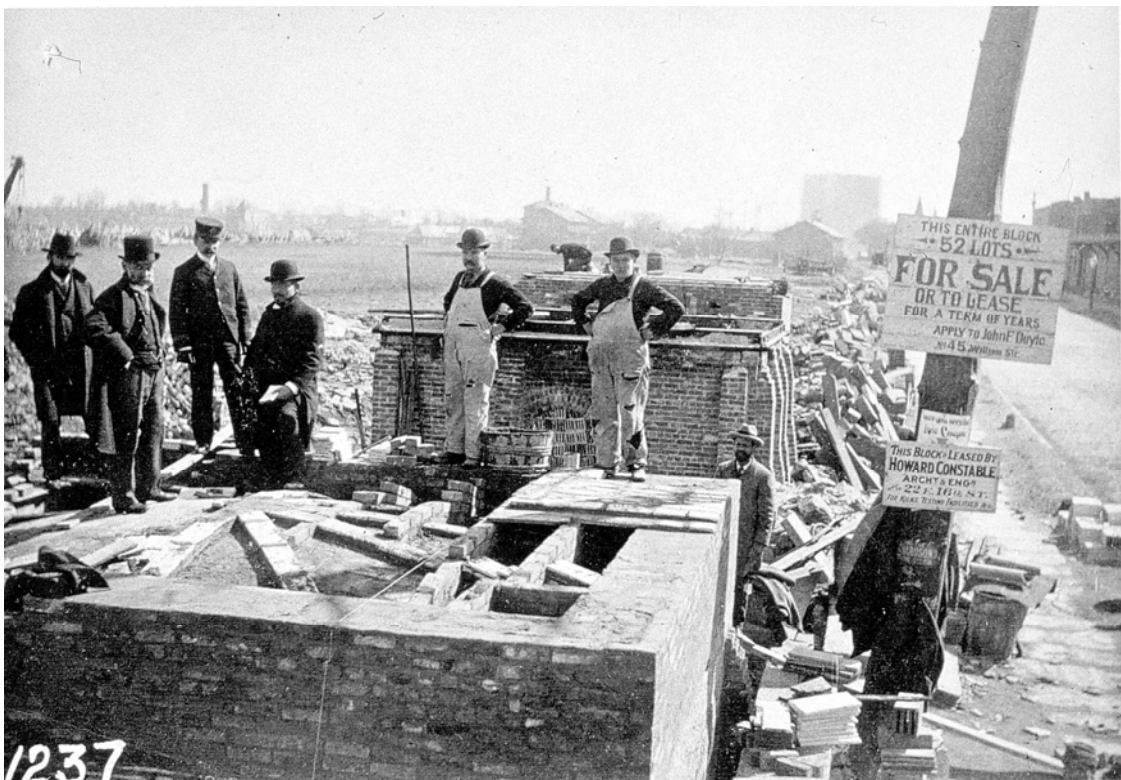


Figura 8.31: Construcción de las costillas entre la bóveda y el nivel del suelo. 4 marzo 1897. En el informe, *photograph n° 1237* (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

El 3 de abril, con la bóveda ya fría y manteniendo la carga de 150 lbs./sq.in. (6,30 KN/m²), el punto central de la bóveda ha recuperado deformación, desde el máximo de

0,71 pulgadas (1,80 cm) hasta 0,22 pulgadas (0,56 cm). Se retira la carga y queda con una deformación de 0,167 pulgadas (0,42 cm). Entonces se coloca sobre la bóveda una carga mucho más elevada, de 600 lbs./sq.in. (25 KN/m²), que se mantiene durante 48 horas. En ese momento se vuelve a medir la deformación del punto central, que es de 0,362 pulgadas (0,91 cm). La figura 8.34 muestra esta segunda carga colocada sobre la bóveda.



Figura 8.32: Paredes norte y este durante el fuego. 2 abril 1897. En el informe, *photograph n° 1262* (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

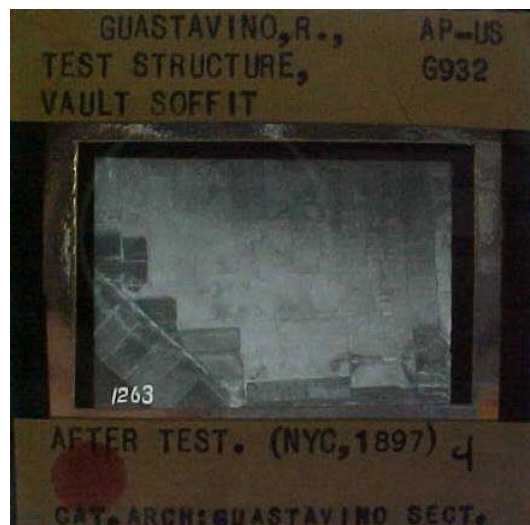


Figura 8.33: Esquina noreste del techo después del fuego. 3 abril 1897. En el informe, *photograph n° 1263*. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)



Figura 8.34: Bóveda cargada con 25 KN/m², después del fuego. 3 abril 1897. En el informe, *photograph n° 1267*. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)

El 15 de abril del mismo año se repitió el ensayo, sometiendo a la bóveda a un nuevo ciclo de las mismas pruebas (carga media-fuego-agua-carga elevada) observando similares efectos y deformaciones.

Al apagar el fuego, aplicando agua sobre el techo, se cayeron los ladrillos de la capa inferior que se habían reparado después del primer ensayo, incluso cayeron algunos de la segunda capa, de manera que en algunas zonas solo quedó en pie una capa de ladrillos, la superior.

Este ensayo se publicó en la revista *The American Architect and Building News*, el 8 de mayo de 1897. El artículo refleja el interés del ensayo por el tamaño de la bóveda y la severidad de las condiciones a la que fue sometida:

Taken it all, this is one of the severest, as well as most interesting fireproof test that have been made. The conditions were wilfully made as unfavorable as possible, through varying both the materials and the method of construction in different parts of the same dome, and yet the test showed that one method was practically as allowable as the other; the temperature reached by the fire and the duration of time during which the maximum temperature was maintained, have rarely been exceeded: the space covered by the span was much larger than usual, and the superimposed load in total bulk, as well as

in rate per superficial foot, was much greater than in the majority of the test, official or private (Fireproofing test 1897, 46)

La descripción del ensayo también cita la facilidad con que una de estas bóvedas pueden repararse, al afectar los daños sólo a la capa inferior y la poca influencia que tuvo el primer ensayo sobre los resultados del segundo, realizado 15 días después:

Further, it was one of the merits of the system that wathever damage might befall the lower course could be expeditiously and cheaply made good, and the conductors of the test were requested to note the time and cost of repairing any damage to the lower course and then to renew the fire test (Fireproofing test 1897, p. 46)

8.4.3.c. Análisis del ensayo

La investigación sobre métodos constructivos incombustibles fue muy importante en Estados Unidos en los últimos años del s. XIX. El objetivo de este ensayo es destacar el buen comportamiento al fuego de las bóvedas tabicadas construidas por Guastavino. Para ello elige un tipo de bóveda habitual: vaída, apoyada sobre cuatro arcos, unos 4 m de luz, flecha 1/10 de la luz; de tres hojas de ladrillo y un repertorio de acabados al interior: ladrillos corrugados vistos y enlucidos, ladrillos vidriados. La carga inicial sobre la bóveda es bastante alta, pero posible. Entonces se somete la bóveda a las condiciones de un gran incendio durante 5 horas. La conclusión es que la bóveda resiste, con unas pequeñas deformaciones que desaparecen en su mayor parte al apagar el fuego y que los únicos daños son el desprendimiento de algunos ladrillos al interior, que pueden reponerse después sin problemas. El segundo ensayo sirve para demostrar que un nuevo incendio tendría las mismas consecuencias que el primero. Ambos ensayos se documentan, se fotografían y se publican en revistas de prestigio. Forman parte de la campaña publicitaria que hizo Guastavino de sus bóvedas en sus primeros años en América.

8.4.4. Ensayos de carga, 1901

La documentación relativa a estos ensayos también está en el Archivo Guastavino de la Universidad de Columbia. Se conserva un informe de 6 páginas del 5 de junio de 1901 y fotos descriptivas.

La carga está aplicada directamente sobre el trasdós de la bóveda. No se indica de que material pero por los pesos que se indica debajo y el tamaño de la carga, podrían ser bloques de piedra.⁵¹



Figura 8.35: Fotografía de una bóveda para ensayar antes de cargarla. Tiene 17 pies (5,20 m) de luz y 4 (1,22 m) de ancho, la fotografía es de agosto 1900. Debajo hay una robusta estructura de madera y acero para resistir los empujes (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

⁵¹ Dividiendo el valor de la carga aplicada entre el volumen aparente de carga en las figuras 8.36 y 8.38, sale un material de densidad aproximada 20 kN/m³, que puede corresponder a bloques de piedra apilados incluyendo los huecos entre ellas.



Figura 8.36: Fotografía de varias bóvedas de distinto tamaño, antes y después de ser cargadas, fotografía de mayo 1901. Descansan en perfiles de acero en doble T fuertemente atirantados. Bajo la bóveda cargada se indica que tiene 6 pies (1,83m) de ancho y que se le ha aplicado una carga de 45000 libras, unos 204,00 kN. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia)



Figura 8.37: Otra bóveda, esta de 12 pies (3,66 m) con una gran carga: 112578 lbs., unos 510,35 kN. No está fechada. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).



Figura 8.38: Fotografía de una bóveda de 10 pies (3,05 m) de luz a la que se le ha aplicado una carga de 112140 libras (508,67 kN). La fecha es el 15 de mayo, probablemente de 1901. El ancho no se indica, pero puede deducirse del nº de lingotes en cada lado: 6 en el largo, 4 en el corto. Entonces el ancho sería 4/6 de 10 pies, unos 6,67 pies (2 m). (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

A pesar de lo espectacular de la foto, es normal que la bóveda tabicada del ensayo no falle bajo la carga aplicada. Como se ha visto en ensayos anteriores, una bóveda en arco de círculo muy rebajado con carga uniforme es casi indestructible: la línea de empujes es una parábola, de perfil prácticamente igual al arco de círculo para relación flecha-luz 1/10 como esta. Los apoyos están atados con unos gruesos tirantes de acero

8.4.5.a. Ensayo de compresión

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión centrada sobre un total de 14 probetas, las doce primeras de dimensiones 12x12 pulgadas (30,5x30,5 cm) y las dos restantes de 12x 15 pulgadas (30,5x38 cm), de espesor variable según el número de hojas de ladrillo: 3 hojas (4 pulgadas, 10 cm), 4 hojas (5,5 pulgadas, 14 cm) ó 5 hojas (7 pulgadas, 18 cm), ver figura 8.39. Se realiza el 5 de mayo de 1927.

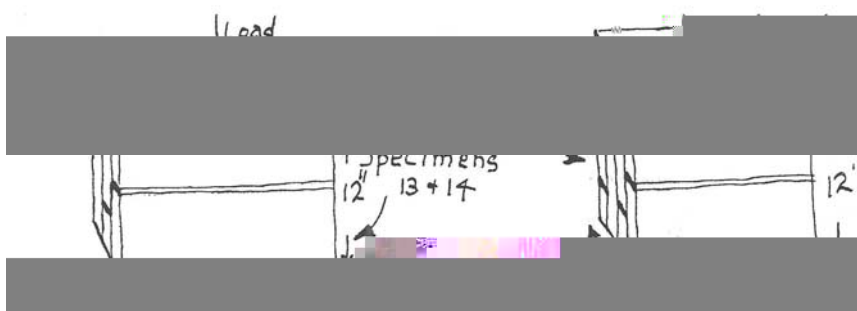


Figura 8.39: Dibujos de las probetas sobre las que se realizan los ensayos de compresión. Las cotas están en pulgadas. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

Se construyen con ladrillos de 1 pulgada (2,5 cm) de espesor, con una capa de mortero entre hoja y hoja de media pulgada (1,2 cm). El mortero está formado por dos partes de arena y una de cemento. En la probeta se emplean dos tipos de ladrillo, uno como acabado (en general *Akoustolith*, aunque hay algunas probetas acabadas en ladrillo corrugado) y el resto de hojas con un ladrillo normal, de dos tipos a los que se refieren como *National* ó *Ohio*.⁵²

En la figura 8.40 se reproduce una tabla con el resultado de los ensayos sobre las 14 probetas. Se resumen a continuación los datos más importantes:

La tensión de rotura está entre 2460 y 5152 lbs./sq.in. (17,3 y 36,3 N/mm²) con un valor medio de 23,8 N/mm². Este valor es bastante superior al obtenido en los ensayos de 1887 (14,21 N/mm²) lo que probablemente se deba a una mejora en la calidad de los materiales (cemento y ladrillos).

TEST		Mortar.		Circ. Sec.		IMATE STRENGTH.		Remarks.
Finish.	bed.	Sand	2 Cement	1	lbs.	1 per in.		
AKOUST	/27	"	"	"	48			Good fracture
"	"	"	"	"	66			Poor bond
"	"	"	"	"	84			Fair
"	"	"	"	"	48			"
"	"	"	"	"	66			Good
"	"	"	"	"	84			Very good
Hard b reg. 6	"	"	"	"	48			"
"	"	"	"	"	66			Poor
"	"	"	"	"	84			Fair
"	"	"	"	"	48			"
"	"	"	"	"	66			"
"	"	"	"	"	84			"
Ohio R	"	"	"	"	54			"
Nation	"	"	"	"	54			"
Rough	"	"	"	"	54			Good
mens made ofessor H								

any, Woburn, Mass.

Figura 8.40: Tabla con los resultados del ensayo de compresión, indicando el nº de probeta, sus dimensiones y composición, así como la carga de rotura, total y repartida. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

El número de capas de ladrillo de la probeta y las dimensiones generales no parecen influir mucho en el resultado final, pero si el tipo de ladrillo, resultando más resistente el tipo *Ohio* (resistencia media 27,4 N/mm²) que el *National* (resistencia media de las probetas 21,1 N/mm²)

8.4.5.b. Ensayo de tracción

Se aplica igualmente una carga centrada de tracción sobre un total de 8 probetas de 30x12,5 pulgadas (76x32 cm) y espesor 5 hojas de ladrillo (7 pulgadas, 18 cm). Al igual que en el ensayo anterior, los ladrillos tienen 15x6x1 pulgadas (38x15x2,5 cm), y las capas de mortero entre ellos un espesor de media pulgada (1,25 cm). El mortero está formado por una parte de cemento y entre 2 y 2,5 partes de arena. En este caso todas las capas de ladrillo de una probeta son del mismo tipo, pero se construyen probetas de los tipos *National* y *Ohio*, al igual que en el ensayo de compresión. Se introduce una barra de hierro en el interior de la probeta, según se indica en la figura 8.41.

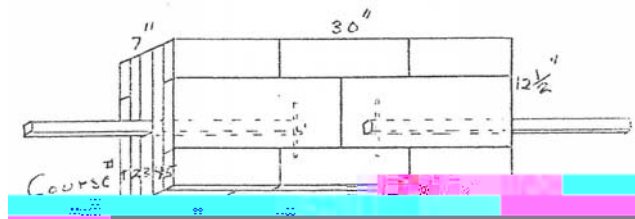


Figura 8.41: Dibujo de las probetas que se ensayan a tracción. Las cotas están en pulgadas. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

En este caso se dan las fuerzas totales a las que se produce la rotura (ver figura 8.42). Dividiendo esta fuerza por el área perpendicular al plano de aplicación de la misma ($32 \times 18 = 576 \text{ cm}^2$), obtenemos tensiones de rotura entre 1,2 y 2,3 N/mm², con una media de 1,97 N/mm². Este resultado es idéntico al obtenido en los ensayos de 1887.

A diferencia del ensayo de compresión, en este de tracción resulta mayor tensión rotura media del ladrillo *National* (2,1 N/mm²) que la del tipo *Ohio* (1,83 N/mm²)

17	2 1/2:1	1/3/28	6/29/28	"	25,750 lbs.
19	2:1	1/20/28	6/29/28	"	27,240 lbs.
21	2:1	1/31/28	6/29/28	"	15,220 lbs.
23	2 1/2:1	3/15/28	6/29/28	Nat'l w/	

Figura 8.42: Tabla con los resultados del ensayo de tracción, indicando el n° de probeta, sus dimensiones y composición, así como la carga de rotura total. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

8.4.5.c. Ensayo de cortante-punzonamiento

Sobre una probeta de 20x20 pulgadas (50x50 cm) y 4 hojas de ladrillo (5,5 pulgadas, 14 cm) de espesor se aplica una carga en el centro, mediante un cilindro de acero de 4 pulgadas (10 cm) de diámetro. La distancia entre apoyos es de 16 pulgadas (41 cm), pero no queda claro en los dibujos si apoya en la cuatro esquinas, o de manera continua en los cuatro lados.

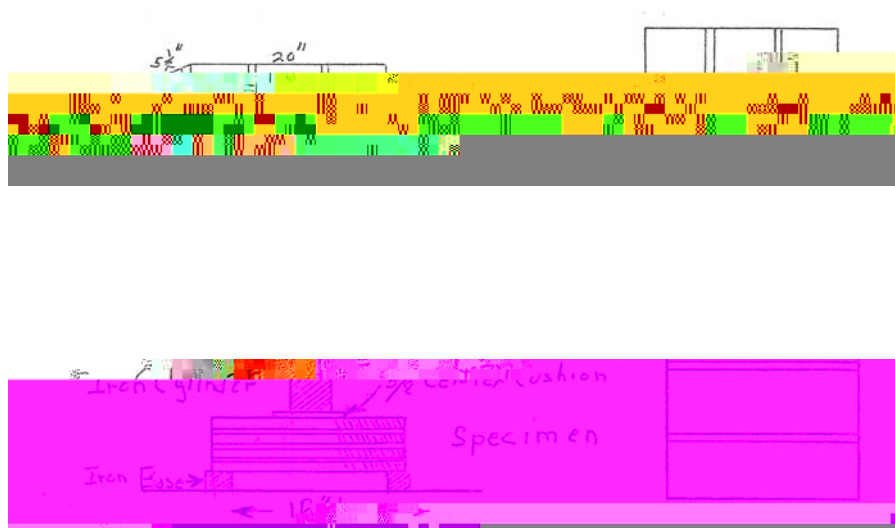


Figura 8.43: Dibujo de la probeta sobre la que se realiza el ensayo de punzonamiento. Las cotas están en pulgadas. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

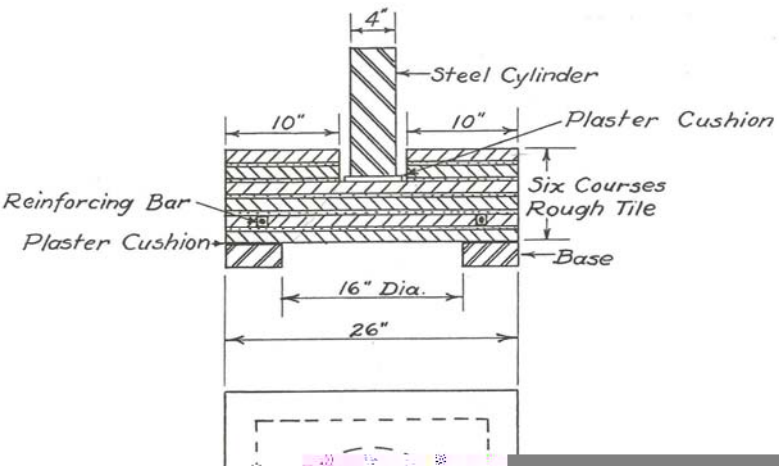


Figura 8.45: Dibujo de la probeta sobre la que se realiza el ensayo de cortante/ punzonamiento. Las cotas están en pulgadas. (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

Los resultados del ensayos recogen el peso y las dimensiones generales de cada probeta, así como la carga para la que empieza a fisurar y la carga para la que rompe: como media 49500 lbs. (22450 kg), ver figura 8.46. Se indica también que, más que una rotura, se produjo un abombamiento dentro del anillo de acero.

OF SLAB	26" X 26" X 8 5/8"	26" X 26" X 8 5/8"	26" X 26" X 8 5/8"
DIMENSIONS OF RECESS	6" octagon, 3" deep	6" octagon, 3" deep	6" octagon, 3" deep
LOAD AT FIRST CRACK (lbs.)	30,000	27,000	32,300
MAXIMUM LOAD (lbs.)	44,400	40,750	51,360

Figura 8.46: Resultados del ensayo de punzonamiento (Archivo Guastavino/Collins. U. Columbia).

8.4.6.b. Ensayos de flexión:

Se realizan 3 ensayos de flexión: el primero el 1 de febrero, el segundo entre el 16 y el 23 de febrero y el último entre el 8 y el 31 de mayo.

En el primer ensayo, del 1 de febrero, se ensaya una probeta rectangular y plana apoyada en sus dos lados menores y cargada con un peso en el centro que una serie de perfiles de acero sucesivos convierten en uniformemente repartida. La forma de cargar las probetas recuerda a la dibujada en la máquina de hacer ensayos de 1890 (ver figura 8. 24), aunque el ensayo no es sobre una bóveda, sino sobre una superficie plana, como una “placa” de ladrillo. Se construyen con ladrillo ordinario, tosco.

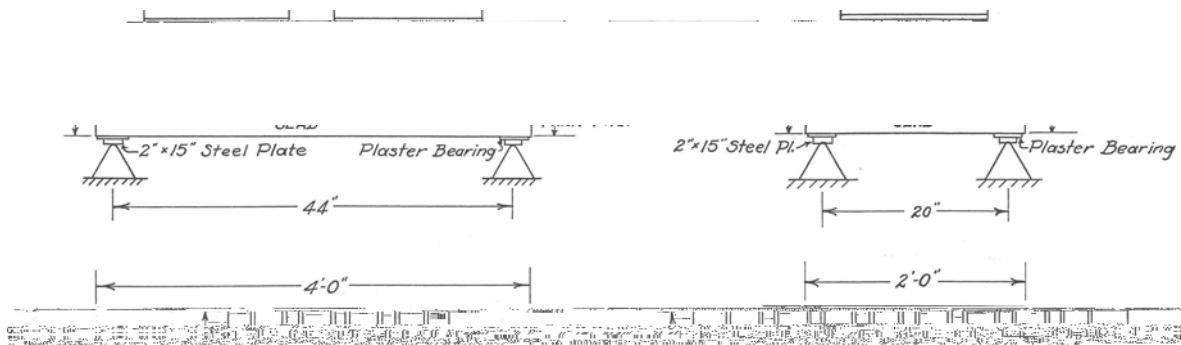


Figura 8.47: Probetas del primer ensayo de flexión, 1 de febrero de 1935. A la izquierda, probeta de 4 pies de luz. A la derecha, probeta de 2 pies de luz (Archivo Guastavino)

Se ensayan dos series de tres probetas, la primera con una distancia entre apoyos de 4 pies (122 cm), ver figura 8.47 izq. y la segunda de 2 pies (51 cm), ver figura 8.47 der. En ambos casos, la probeta está formada por tres hojas de ladrillo, con un espesor total de 10 cm. Las probetas son nombradas como A, B y C. En las dos series, a las probetas A y C se las somete a incrementos sucesivos de carga, se apunta su deformación, después se retira la carga y se apunta la deformación remanente. La probeta B, simplemente se va cargando sucesivamente hasta la rotura, apuntando las deformaciones bajo cada nuevo escalón de carga. Estos escalones son de 250 lbs. (1130 N). Además de las

deformaciones, se apunta también la carga de rotura y la forma en que esta se produce, 1
ver figura 8.48.1

1



Figura 8.48: Tablas con los resultados del primer ensayo de flexión, 1 febrero de 1935. A la izquierda, 1
probeta de 4 pies de luz. A la derecha, probeta de 2 pies de luz (Archivo Guastavino) 1

1

Por último, se dibujan unos 1

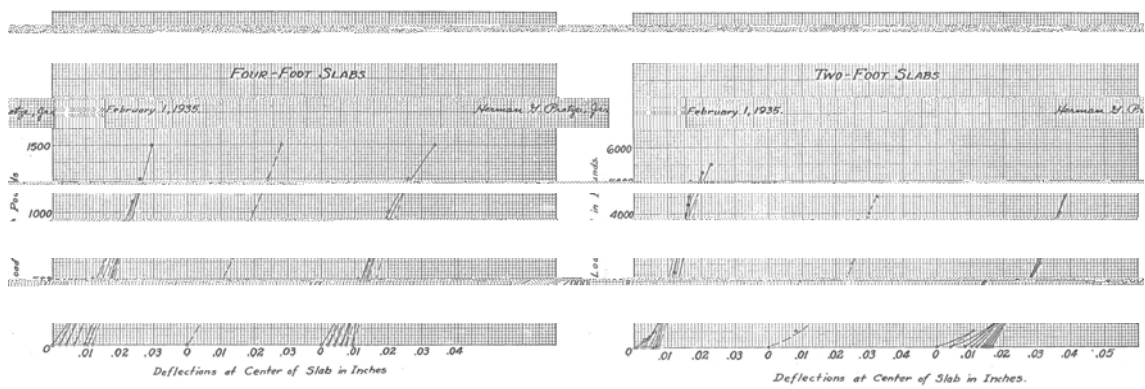


Figura 8.49: Gráficas carga-deformación del primer ensayo de flexión, 1 febrero de 1935. A la izquierda, probeta de 4 pies de luz. A la derecha, probeta de 2 pies de luz (Archivo Guastavino)

El siguiente grupo de ensayos, correspondiente a los días 16, 20 y 23 de febrero del mismo año, son similares. La probeta es menor, tiene 10,25 pulgadas (26 cm), ver figura 8.50 izq. El mecanismo de distribución de carga es el mismo, e igualmente se van aplicando escalones de carga de 100 lbs. (454 N), se mide la deformación, se retira la carga, se mide la deformación remanente y así hasta la rotura. Se ensayan 3 series de 3 probetas. Una serie es de ladrillo ordinario muy cocido (A, B, C), otra de ladrillo ordinario semi-cocido (D, E, F) y otra de Akoustolith (G, H, I) Se apuntan también las cargas de rotura y la forma en que esta se produce, ver figura 8.50 der.

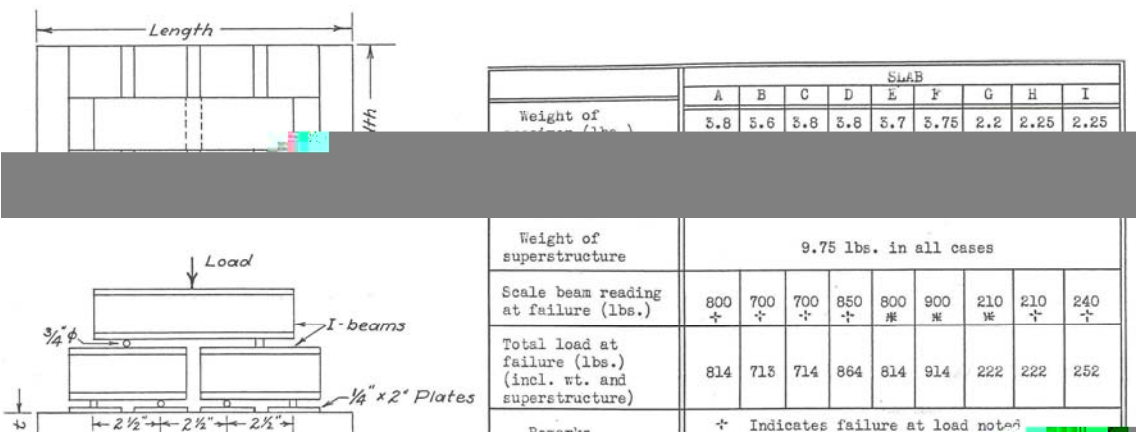


Figura 8.50: A la izquierda, probeta del segundo ensayo de flexión, 16-23 de febrero de 1935. A la derecha, tabla con los resultados. (Archivo Guastavino)

Los diagramas carga-deformación son aproximadamente lineales, las deformaciones en la rotura son también muy pequeñas, y es interesante resaltar que la serie de probetas construidas con Akoustolith rompen mucho antes que las de ladrillo ordinario, más o menos a la cuarta. También es una pieza mucho más ligera que las otras (el peso de las probetas de Akoustolith es el 60% del peso las de ladrillo ordinario) y con menor rigidez, ya que alcanza deformaciones similares en la rotura, bajo una carga del orden del 25% de las probetas de ladrillo ordinario.

Las piezas de Akoustolith se desarrollan, en colaboración con el físico experto en acústica Wallace Sabine, para disminuir la reverberación de las bóvedas de Guastavino. Se utilizaban en la capa interior de las bóvedas. No parece por tanto que la resistencia o rigidez de estas piezas fuera un valor importante en ellas.

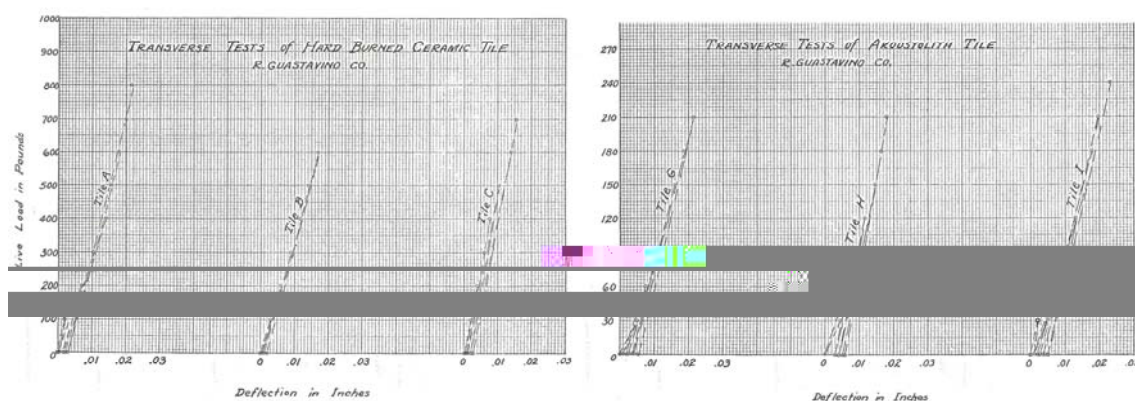


Figura 8.51: Comparación entre gráficas de tensión-deformación de las probetas de ladrillo (a la izquierda) y de Akoustolith (a la derecha) (Archivo Guastavino)

La última serie de ensayos de flexión corresponde a los días 8 y 31 de mayo de 1935. Es similar en todo a la serie de ensayos del 1 de febrero, salvo que utilizan ladrillos más delgados, con lo que el canto de la probeta es menor y también, lógicamente, la carga última de rotura. Las deformaciones en la rotura, sin embargo, son más o menos las mismas.

8.4.6.c. Ensayos de compresión

Se ensayan cinco series de probetas formadas por un único bloque, cuadrado y de lado 5,5 pulgadas (14 cm) con espesor variable en distintas probetas, siempre alrededor de 2

cm. Las dos primeras series son de ladrillo corrugado muy cocido, 5 probetas con los resaltos paralelos a la dirección de la carga y otras 5 probetas con los resaltos perpendiculares. Las dos segundas series son de ladrillo de cocido medio, situando los resaltos también paralelos y perpendiculares a la dirección de la carga. La última serie es con piezas de Akoustolith.

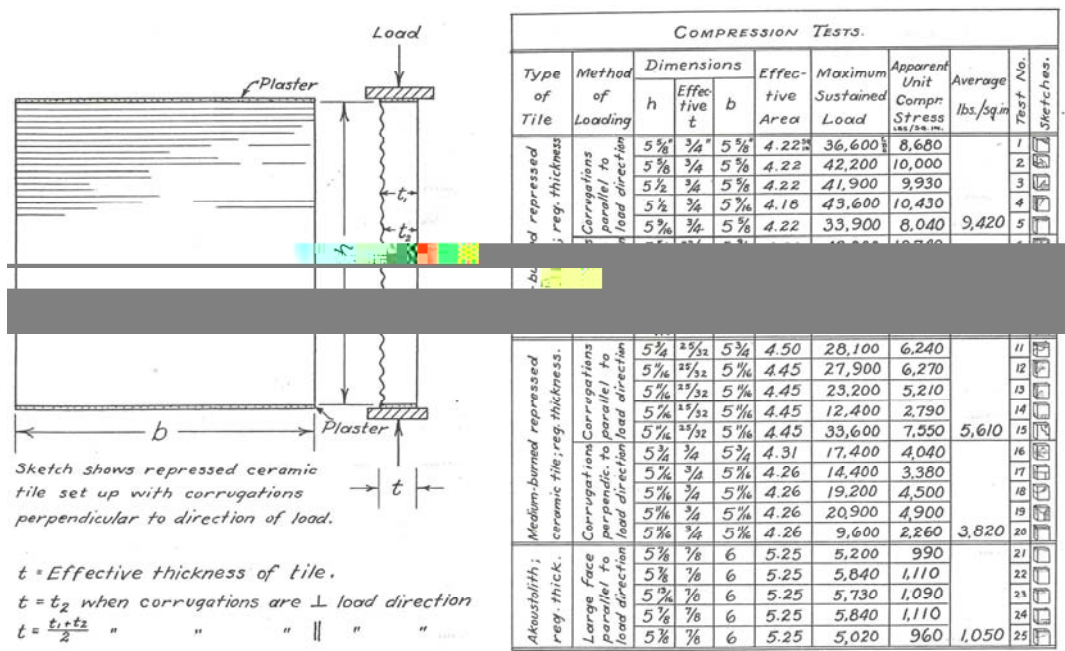


Figura 8.52: A la izquierda, probeta del ensayo de compresión, 15 de febrero de 1935. A la derecha, tabla con los resultados (Archivo Guastavino)

En este caso, las tensiones de rotura mayores son las del ladrillo bien cocido (en los ensayos a flexión este obtenía menor carga de rotura que el de cocido medio), con unos valores de 66 N/mm² para los resaltos paralelos a la carga y 56,7 N/mm² en la perpendicular. Los ladrillos de cocido medio obtienen tensiones de rotura entre el 50-60% de estas y por último, la serie de Akoustolith vuelve a obtener tensiones mucho más bajas, 7,4 N/mm².

Es interesante observar que los ensayos de compresión son los únicos en los que además de una carga de rotura, esta se convierte en tensión de trabajo, dividiendo la carga máxima entre el área perpendicular a la dirección de aplicación de ésta. En los ensayos de flexión y cortante, sólo se da el valor de la carga de rotura, salvo en los ensayos de 1887, donde Guastavino da un valor de tensión de rotura sin especificar cómo llega a él.

8.5. Ensayos en España

En España, los ensayos sobre bóvedas tabicadas son escasos y mas tardíos que en otros países. Las razones son:

- En España las bóvedas tabicadas eran un método de construcción habitual, documentado desde al menos el s. XIV y recogido en todos los tratados de arquitectura y construcción que se publican desde Fray Lorenzo (1639). A diferencia de Francia e Inglaterra, no es necesario dar a conocer ningún sistema nuevo.
- A España tarda más tiempo en llegar la mentalidad ilustrada que requiere demostraciones científicas. Hasta los últimos años del siglo XIX o incluso los primeros del XX no encontramos esta mentalidad en los tratados españoles. Este es también el momento de los primeros ensayos.

8.5.1. Ensayos de los ingenieros militares 1891-1892

Se estudian aquí dos ensayos, en los que a las bóvedas se les da un uso diferente: muros de contención para depósitos de agua. El autor es el capitán de ingenieros Luis Monravá, y se realizan en la comandancia de Barcelona, publicándose en dos números (II y VIII) del Memorial de Ingenieros de 1892.

El contexto de estos ensayos es el del monolitismo si las bóvedas tabicadas están recibidas con cemento, lo que les permite resistir flexiones y emplearlas en lugares nuevos, como estos muros de depósitos.

Grande es la resistencia de las bóvedas tabicadas construidas con morteros de cemento, resistencia que no encuentra explicación en la teoría de las curvas de presión hipotéticas, y obliga a suponer que el macizo, cual si fuera un monolito, es asimilable a un arco metálico, con suficiente capacidad de resistencia a las extensiones que se desarrollan por efecto de las presiones que actúan en el trasdós. (Resistencia de bóvedas tabicadas, 1892a)

El desarrollo de ambos ensayos es similar: se construye una bóveda tabicada en vertical, formando un tabique curvo, y se va llenando de agua hasta que rompe, tomando nota de la altura de agua y de la forma de rotura.

8.5.1.a. Primer ensayo, 1891

Se realiza sobre un depósito de agua rectangular y de 8 m de lado, que se cierra mediante un tabique curvo de 8,75 m de luz y una altura de 2 m. La forma en planta es un arco muy rebajado, con un radio de 18,75 m y una flecha de 0,50 m (relación flecha-luz= 1/17). Se construye con tres hojas de rasilla de 1,5 cm de espesor, recibidas con mortero de cemento. Se termina con un guarnecido de mortero de cemento 1:3 y un tendido de cemento puro, con un espesor final de 8 cm. El cemento utilizado es de San Juan de las Abadesas⁵³ de tipo lento y de baja calidad: «El mortero se fabricó con un volumen de agua y dos de cemento, á causa de las muchas impurezas que éste contenía» (Resistencia de bóvedas tabicadas, 1892a, 54). A finales del s. XIX, momento en que se realizan estos ensayos, todavía no existían cementos artificiales de buena calidad y composición constante en España, ver capítulo 5 de esta tesis.

El tabique estaba empotrado 6 cm en el suelo.⁵⁴ Durante el secado aparece una pequeña grieta vertical en el centro. Una vez seco el tabique, se empieza a llenar de agua. Cuando alcanza 1,75 m, se abre una grieta horizontal a 80 cm del suelo, por la que se escapa el agua. Se va rellenando el depósito y poco a poco cesan los escapes. Se va aumentando la altura de agua hasta alcanzar los 2 m del muro, que se mantiene durante 40 días, sin que haya ningún problema en él.

⁵³ En la zona de Ripoll y San Juan de las Abadesas se establecieron en la segunda mitad del siglo XIX numerosos fabricantes de cemento natural, obtenido por calcinación de piedras calizo-arcillosas del Pirineo. Ver capítulo 5 de esta tesis.

⁵⁴ En la descripción del 1º ensayo no se hace referencia al empotramiento del tabique. Pero al describir el 2º ensayo, se indica que «los tabiques estaban también empotrados unos 0,06 cm en la solera del depósito» (Resistencia de Bóvedas Tabicadas 1892b, 252). El *también* parece hacer referencia al tabique del 1º ensayo.

Análisis del ensayo

El análisis más sencillo de plantear es dividir la bóveda en rebanadas horizontales y estudiar una de ellas, despreciando el comportamiento bidireccional que puede derivarse del empotramiento en el suelo.⁵⁵

La línea de empujes de una carga perpendicular a la superficie sobre la que incide, como el empuje del agua, es un arco de círculo. Esta es precisamente la forma de la bóveda, de manera que es perfectamente posible dibujar una línea de empujes dentro de su espesor, que coincidirá además con su superficie media. Así que no es necesario que la fábrica resista tracciones para aguantar el empuje del agua, y las compresiones producidas son menores que las de rotura:

Estudiando el arco más solicitado, que es el inferior: con una altura de 2 m de agua soporta una carga de 20 kN/m. Dibujando la línea de empujes, obtenemos que la fábrica está sometida a una fuerza de compresión de 375 kN/m (ver figura 8.53). Considerando el espesor que indica el ensayo (8 cm) y 1 metro de profundidad (área resistente 100x8 cm),⁵⁶ se produce una tensión de compresión de 4,7 N/mm², que puede ser perfectamente resistida por una fábrica de ladrillo.⁵⁷

Así que es razonable que la bóveda se mantenga en pie los 40 días que pasa con 2 metros de agua en su trasdós. Pero el autor del artículo opina que la resistencia se debe al cemento: «Con cemento más puro (...) hubiera resistido, sin duda, presiones mucho más considerables, no obstante la pequeñísima relación entre la flecha y la luz» (Resistencia de bóvedas tabicadas 1892a, 55)

⁵⁵ Podría también plantearse un análisis de membrana (con superficie cilíndrica y carga perpendicular a la superficie) encontrando que no hay tracciones según los meridianos en ningún punto (Pflüger, 1965)

⁵⁶ El empuje de agua es creciente con la profundidad. Sólo la sección inferior de la bóveda está sometida a una carga de 20 kN/m; la resultante sobre el último metro serían 15 kN/m, pero escogiendo secciones menores cada vez sería mayor, hasta llegar al límite de 20 kN/m bajo el que se estudia la bóveda.

⁵⁷ Según los ensayos de Guastavino, coetáneos con estos, la rotura a compresión de una bóveda tabicada se produce a 14,2 N/mm².

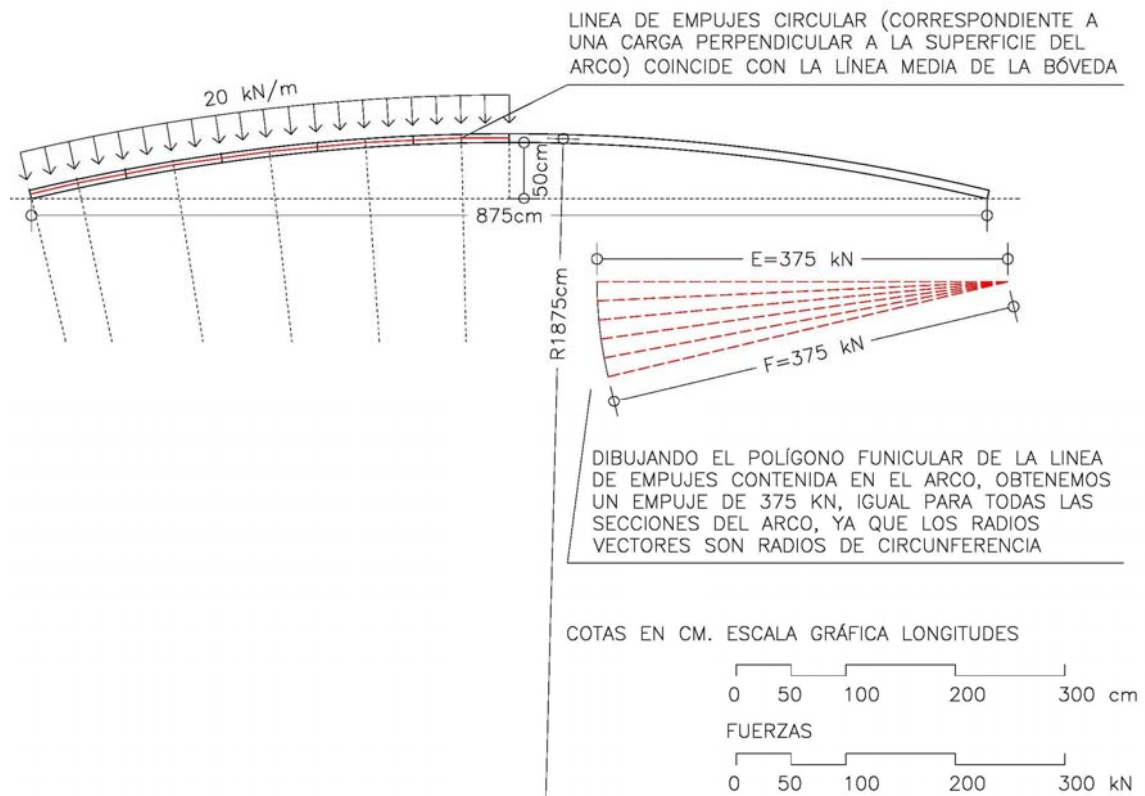


Figura 8.53: Línea de empujes en la bóveda ensayada, para la carga máxima de agua de 20 kN/m, perpendicular al trasdós de la bóveda.

8.5.1.b. Segundo ensayo, 1892

Se realiza sobre el mismo depósito que el primero. Se construyen en él tres tabiques (ver figura 8.54), con los mismos materiales que para el primer ensayo.

-Uno en forma de

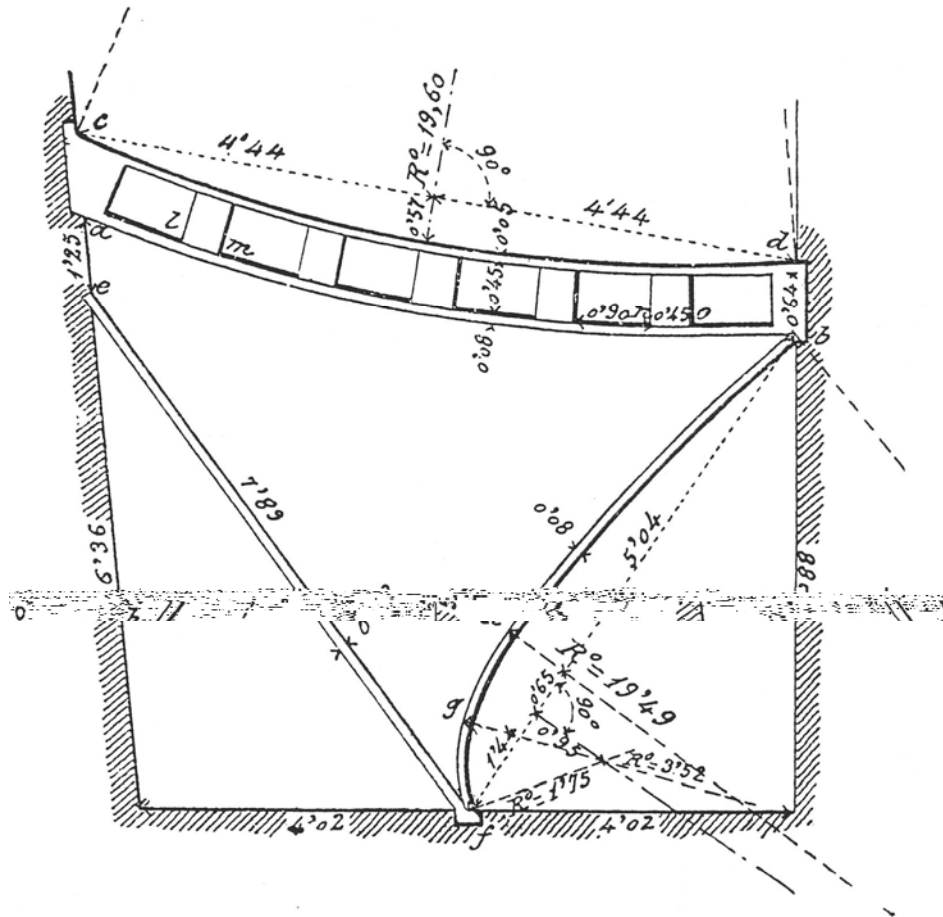


Figura 8.54: Planta del depósito en que se realizan los experimentos españoles de 1892, con los tabiques curvos de cierre. Aunque no se dibuja el tabique del primer ensayo (en 1891), se realiza sobre el mismo (Resistencia de bóvedas tabicadas 1892b, 252).

Se empieza el ensayo llenando de agua el triangulo detrás del tabique recto *ef*. Cuando el agua alcanza una altura de 1,40 m, se abre una grieta vertical a unos 60 cm de *e* y el tabique se rompe, «quedando solamente en los empotramientos unos 0,30 m cortados verticalmente como con una sierra» (Resistencia de bóvedas tabicadas 1892b, 253)

Al romperse el tabique ef , el agua llena el espacio abf . Se va echando más agua, hasta alcanzar una altura de 2,50 m. Para esta altura de agua comienza a agrietarse el tabique:

se abrió una grieta horizontal en la unión de la hilada inferior con la siguiente, hacia el punto *h* (...) se inició otra en diagonal ascendente por la parte *hb* (...) en la mismo punto se vió otra vertical que determinó la ruina del tabique, quedando los empotramientos en la forma descrita en la experiencia anterior (Resistencia de bóvedas tabicadas 1892b, 253)

Al romperse este nuevo tabique, el agua rellena todo el trasdós del muro doble *abcd*. Se sigue añadiendo agua, hasta llegar a 3,62 m de altura. Se deja el agua un mes en el depósito, sin que el muro rompa.

Análisis del ensayo

Dentro del tabique curvo con forma de bóveda de escalera y para las cargas aplicadas (empuje de agua, altura 2,00 m) la línea de empujes es un arco de círculo y es imposible dibujarla dentro de la bóveda. En la figura 8.58 se dibuja una línea de empujes posible, la menos separada de la línea media de la bóveda. La fábrica está entonces traccionada, con unas tensiones muy elevadas:

$$F_{max}=206 \text{ kN}$$

$$\text{Separación máxima}=26 \text{ cm}$$

$$M=206 \text{ kN} \cdot 0,26 \text{ m}= 53,56 \text{ KN}\cdot\text{m}$$

Con un espesor de bóveda de 8 cm, considerando el metro inferior de bóveda y una distribución triangular de tensiones:

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6} = \frac{1000 \cdot 80^2}{6} = 1067 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{53,56 \cdot 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}}{1067 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} = 50,19 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Esta tensión no puede ser resistida por la fábrica de ladrillo que describe el ensayo. Para explicar el comportamiento de la bóveda tendríamos que recurrir a un análisis bidireccional y a la influencia del empotramiento en el suelo y en los muros laterales. La forma de las grietas previas a la rotura descritas en el ensayo también parece indicar un comportamiento en dos direcciones.

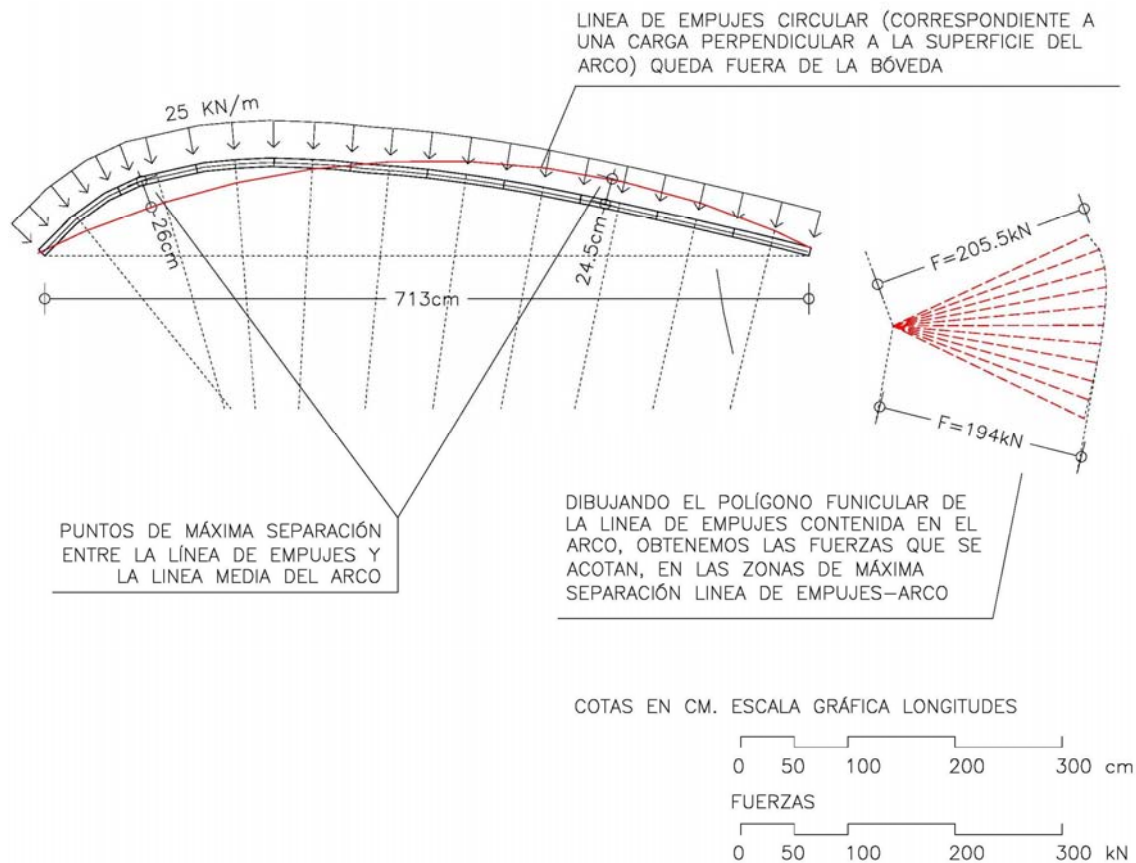


Figura 8.55: Línea de empujes en la bóveda *fb* ensayada, para la carga máxima de agua de 25 kN/m, perpendicular a la bóveda en todos sus puntos

Algo similar ocurre con el tabique recto: dada su forma, debe resistir flexiones y en consecuencia tracciones para resistir el empuje del agua. Bajo las cargas aplicadas (empuje de agua, altura 1,40 m) y despreciando los empotramientos en muro y suelo:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{14 \text{ kN/m} \cdot 7,89^2}{8} = 108,94 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Este momento puede repartirse y disminuir teniendo en cuenta los empotramientos en el suelo y en los muros laterales (la forma de rotura indica que al menos en los laterales se produce), pero en cualquier caso produce tensiones muy elevadas para ser asumidas por una fábrica de ladrillo, al menos como en el caso anterior o incluso mayores.

El último tabique, doble, es el más resistente. Como su planta es en arco de círculo, las conclusiones del primer ensayo son válidas también para éste: la línea de empujes tiene forma de arco de círculo, y por tanto es muy fácil dibujarla en el espesor del tabique, incluso sin el doblado, ver figura 8.56. La fuerza de compresión que debe soportar la

bóveda es de 615 kN/m, considerando la sección resistente de los tabiques de (unos 100x13 cm) la tensión del material es la misma del primer ensayo, 4,7 N/mm².

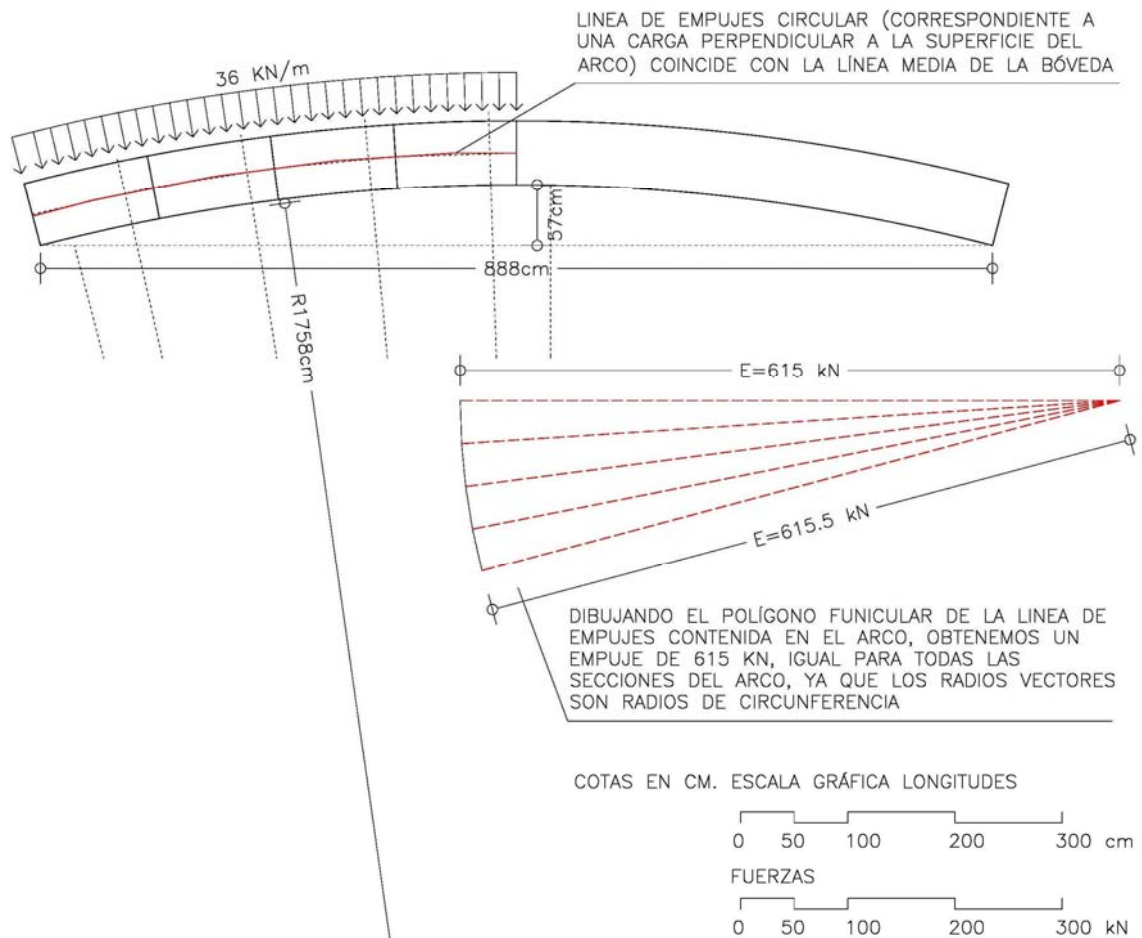


Figura 8.56: Línea de empujes en la bóveda *abcd* ensayada, para la carga máxima de agua de 36,20 kN/m, perpendicular a la bóveda en todos sus puntos

Como conclusión final de estos dos ensayos, conviene resaltar que los dos muros cuya forma es un arco de círculo, en los que puede dibujarse una línea de empujes contenida no tienen la forma adecuada (el tabique recto y la bóveda en forma de bóveda de escalera) si rompen en el desarrollo del ensayo.

8.5.2. Ensayos en Ger y Lóbez 1898.

En el tratado de Ger y Lóbez, escrito en 1898, encontramos la referencia a unos ensayos sobre bóvedas tabicadas, realizados también por ingenieros militares de Barcelona.

Se ensayan bóvedas de 4 m. de luz y 0,50 m de flecha construidas de dos maneras:

- tabicadas, de 13 cm de espesor total, recibidas con cemento y con lengüetas superiores cada 30 cm. Sobre las lengüetas se tienden dos hojas de ladrillo formando un nivel horizontal

- de rosca de ladrillo, de 15 cm. de espesor.

El texto de Ger y Lóbez sólo indica que las primeras son más resistentes. Pero no dice como se ensayan, bajo que carga rompen ni como están construidas las de rosca por encima.

También se describe un ensayo sobre bovedillas tabicadas, de 1 metro y 60 cm de luz. Las primeras rompen bajo una carga de 1555 kg/m² (15,55 kN/m²) y las segundas aguantan hasta 1600 sin ni siquiera agrietarse.

8.5.2.a. Análisis del ensayo

No pueden extraerse muchas conclusiones. Destacar que los tipos que se ensayan son similares a los de muchos otros ensayos, prueba de que eran los que se construían; que Ger y Lóbez, siguiendo la costumbre de la época, aplica un coeficiente de seguridad de 10 : «se pusieron cargas (...) de 1555 kilogramos por metro cuadrado, produciéndose la rotura, de modo que pueden cargarse con seguridad con 155 kilogramos» (Ger y Lóbez 1898,) y que los autores del ensayo (ingenieros militares de Barcelona) tenían interés en destacar el mejor comportamiento de una estructura tabicada sobre una de rosca.

8.5.3. Ensayos de Juan Bergós

Juan Bergós (Lérida 1894-Barcelona 1974) fue arquitecto, amigo y biógrafo de Gaudí y profesor de varias escuelas técnicas de Barcelona.⁵⁸ Dentro de su actividad como profesor, realiza numerosos ensayos de materiales diversos, que recoge en dos libros:

- El primero está escrito en 1953: *Materiales y elementos de construcción, estudio experimental*. Es una recopilación de ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Industrial de Barcelona, como prácticas de las asignatura que impartía

⁵⁸ Joan Bergos dedica su libro de 1953 a la memoria de Antoni Gaudí. En la dedicatoria afirma que fue Gaudí el «que inició al autor en los estudios experimentales» (Bergos 1953)

Bergós en esa universidad. Hay ensayos de todo tipo de materiales de construcción y parece que durante un tiempo largo, ya que el libro está escrito en 1953 y en el prólogo, Bergós indica que dispone del laboratorio desde 1919.

-En 1965, Bergós escribe el libro *Tabicados huecos*. En él hace un estudio experimental completo de distintos elementos contruidos con ladrillo tabicado: tabiques y arcos de distintas formas. El objetivo es sentar las bases para terminar la Sagrada Familia de Barcelona con esta técnica, que Gaudí había dejado inacabada a su muerte.

8.5.3.a. Ensayos en 1953

Dentro de la completa campaña de ensayos recogida en *Materiales y elementos de construcción, estudio experimental* hay dos capítulos dedicados a las bóvedas tabicadas:

- En el primero se ensayan bovedillas tabicadas: de 87,5 cm de luz, 18,5 de flecha y 30 cm de ancho. Están apoyadas en dos vigas de hierro y atirantadas. Se construyen varias probetas, de uno o dos gruesos y con los senos macizados o huecos. Se someten a una carga aislada en el centro y se obtiene la carga de rotura y la deformación máxima. A partir de estos datos y con un desarrollo numérico complejo, Bergós llega al valor de la sobrecarga máxima que cada tipo de forjado puede soportar.
- El siguiente capítulo lo dedica a las bóvedas tabicadas. Reproduce al inicio los ensayos de Guastavino y hace un repaso de los ensayos y cálculos de Terradas, ya estudiados en el capítulo 7 de esta tesis.⁵⁹

Por fin, detalla sus propios ensayos de laboratorio: Bergós ensaya dos probetas de idéntica forma, una de dos y otra de tres gruesos de rasilla, ver figura 8.57. Se sometieron a una carga puntual centrada de valor creciente, midiendo los descensos de la clave y los movimientos de los apoyos. La probeta de tres gruesos estaba apoyada sobre unos tacos de madera que fueron desplazándose en horizontal al incrementarse la carga; esto le pareció un fallo a Bergós, de manera que la siguiente probeta la apoya

⁵⁹ Terradas intenta demostrar la influencia del pandeo en las estructuras tabicadas, sin conseguirlo. A Bergós este asunto también le parece importante, como se ve en el desarrollo de sus propios ensayos, especialmente en los publicados en 1965.

en perfiles en L metálicos inamovibles. A partir de los datos medidos, dibuja un diagrama carga-deformación y obtiene el valor de los esfuerzos en la bóveda

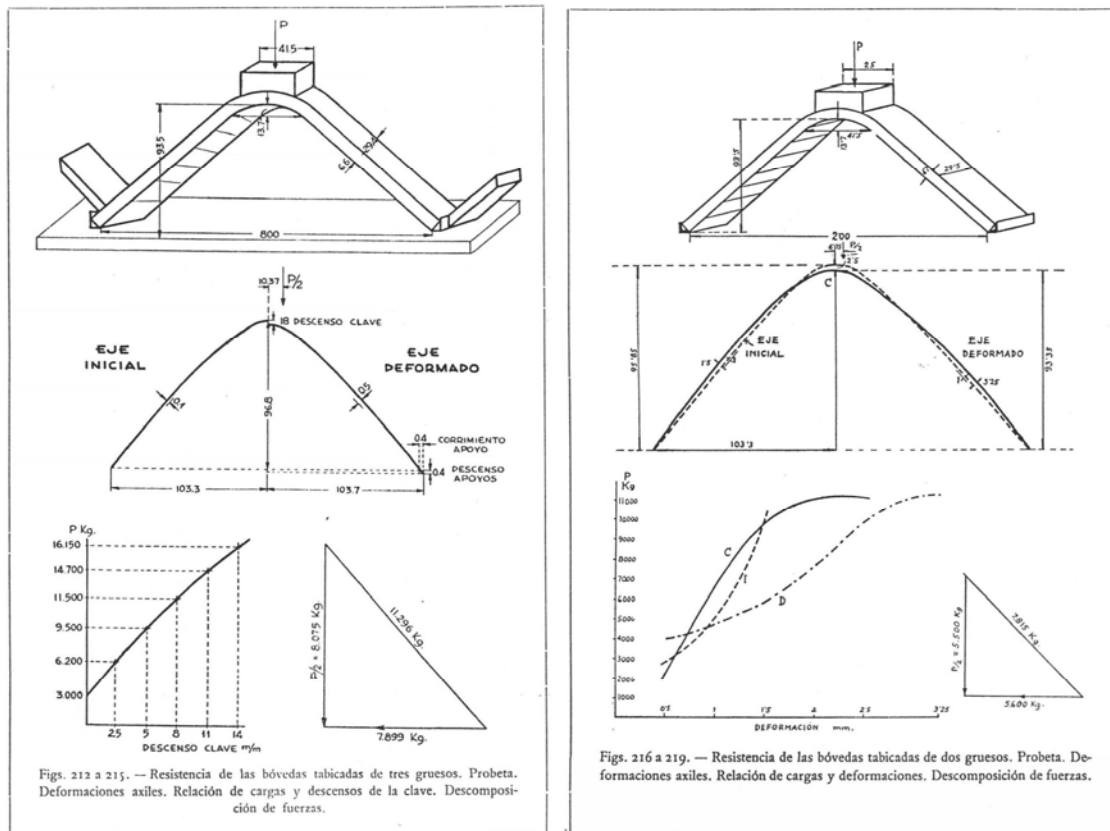


Figura 8.57: Probetas ensayadas por Bergós y datos que obtiene del ensayo (Bergós 1953, 264 y 266)

Análisis del ensayo

Bergós elige una probeta de la forma adecuada: para carga puntual estará trabajando a compresión, y así obtiene las tensiones en la fábrica, con un pequeño momento derivado de la posible excentricidad del esfuerzo normal dentro de la sección. También tiene en cuenta el efecto del pandeo, que puede ser importante en estructuras esbeltas. Pero este ensayo ofrece muy pocos datos sobre el comportamiento real de una bóveda tabicada: el problema no es la resistencia a compresión, que en fábrica es más de la necesaria. ¿qué pasa si se mueve la carga, dejando de ser centrada? ¿por qué no se ensayan probetas con formas habituales en bóvedas tabicadas? Al eliminar además la posibilidad de movimiento de los apoyos, como ocurre en la segunda probeta, el ensayo sirve para medir la resistencia máxima a compresión de una fábrica tabicada,

incluyendo aproximadamente el problema del pandeo, pero no nos da datos sobre como se comporta una bóveda.

8.5.3.b. Ensayos en 1965

El libro *Tabicados huecos* comienza con un repaso histórico del uso de las bóvedas tabicadas, principalmente en Cataluña y de las maneras en que los arquitectos y constructores se han enfrentado a su cálculo, extendiéndose en el interés catalán de los primeros años del siglo XX por desarrollar un nuevo método de cálculo para las tabicadas: Gaudí, Domènech y Estapá, Bayó, Terradas. De este estudio, Bergós concluye que:

su rotura [de las bóvedas tabicadas] se produce sistemáticamente por famblaje en los arcos, de perfil mecánico y por flambaje y flexión en los de directriz no mecánica, debido a la exigüidad de espesor de la bóveda (Bergós 1965, 19)

Dado que piensa que el problema es de pandeo, sus ensayos van encaminados a obtener la carga de rotura a compresión de una bóveda, teniendo en cuenta el efecto del pandeo. Para ello ensaya a compresión «tabicados simples» y deduce de ellos la resistencia de las bóvedas.

El método de cálculo (...) se basa en la determinación del tabicado simple (comprimido por testa y de igual espesor) de resistencia al flambaje equivalente al de la bóveda. Como en ésta el factor forma reduce la inestabilidad elástica (...) el flambaje (...) es menor que la del tabicado simple. (...) de los ensayos se deduce fácilmente el coeficiente de reducción para carga repartida (Bergós 1965, 19)

Ensayos de compresión sobre probetas cúbicas

El procedimiento que sigue Bergós es el siguiente: comienza ensayando pequeñas probetas para obtener la resistencia a compresión sin pandeo.

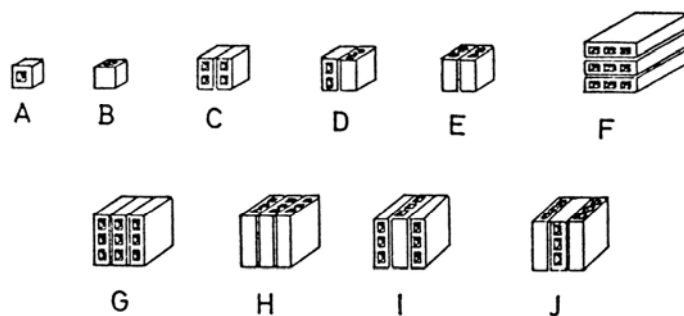


Figura 8.58. Probetas cúbicas ensayadas por Bergós para obtener los valores básicos de resistencia a compresión de tabicados (Bergós 1965, 25)

Ensayar las probetas a compresión centrada, obteniendo las cargas de rotura que se indican en la tabla de la figura 8.59.

N.º gruesos	Tipo de probeta	Sección real cm²	Cargas totales rotura Kg.					
			mortero 1:3		mortero 1:2		mortero 1:3	
			9 días	30 días	30 días	9 días	30 días	30 días
1	Canto	12,6	3.433	—	—	272	—	—
1	Testa	13,2	4.993	—	—	378	—	—
2	Canto	42,6	6.650	9.675	9.912	156	227	232
2	Testa	55,2	8.337	10.425	13.700	151	188	248
2	Testa y canto	45,0	8.587	10.833	11.387	190	246	253
3	Canto	93,6	—	17.800	—	—	190	—
3	Testa	116,7	—	26.225	—	—	224	—
3	1 testa y 2 canto	120,6	15.325	23.933	24.775	127	198	207
2	Piezas enteras canto	120,2	—	24.000	—	—	199	—
2	» » mixtas	138,8	—	34.600	—	—	249	—
3	» » canto	197,5	—	40.250	—	—	203	—
3	» » mixtas	208,8	—	45.400	—	—	217	—

Figura 8.59. Valores de cargas de rotura obtenidos a partir de probetas cúbicas de la figura 8.61 (Bergós 1965, 29)

Con los datos que obtiene deduce valores de tensión admisible para uno y varios gruesos, para distintos aparejos y tipos de mortero y también un coeficiente de seguridad de 8, a partir de la dispersión de valores entre las diversas probetas ensayadas. También mide las deformaciones para obtener un valor del módulo E.

Tabla D
Cargas unitarias admisibles de compresión cúbica en Kg/cm²
Para tabicados

De tres gruesos con cemento fundido, a los 7 días

	Sin armar	Armados
Sardinel mixto (testa axial)	28	69
» testa	30	66
Sardinel mixto (canto axial)	26	58
» canto	20	50

De 1, 2 y 3 gruesos con cemento Portland, a 30 días

	Un grueso		Dos gruesos		Tres gruesos	
	Sin armar	Armado	Sin armar	Armado	Sin armar	Armado
Sardinel mixto	—	—	30	61	26	66
Testa	47	94	25	62	30	74
Canto	34	68	25	56	21	47

Figura 8.60. Valores de cargas unitarias admisibles obtenidos a partir de las probetas cúbicas (Bergós 1965, 31)

Edad días	Tabicados	Tensión de rotura	Tensión admisible
30	Con cemento fundido	196.500	273.000
15	Con cemento fundido	141.000	196.000
8	Con cemento fundido	119.500	166.000
30	Con cemento Portland	155.500	212.500
9	Con cemento Portland	120.000	166.800

Figura 8.61. Valores de módulos de elasticidad obtenidos a partir de las probetas cúbicas (Bergós 1965, 31)

En el texto se dan unos valores de resistencia a tracción y cizalla, pero no se obtienen a través de ensayos, sino en base a «las relaciones experimentales halladas para elementos de ladrillaría maciza de fabricación mecánica, entre las tensiones de compresión cúbica y las de tracción y de cortadura» (Bergós 1965, 33), aunque no se indica de donde salen estas relaciones.

Ensayo de flexión

Después realiza un ensayo de flexión: probetas de distinta luz sometidas a carga puntual centrada. A partir de las cargas de rotura obtiene el momento flector (sumando en producido por el peso propio de la probeta y el de la carga aplicada) y dividiendo por el módulo resistente, las tensiones provocadas en la sección.

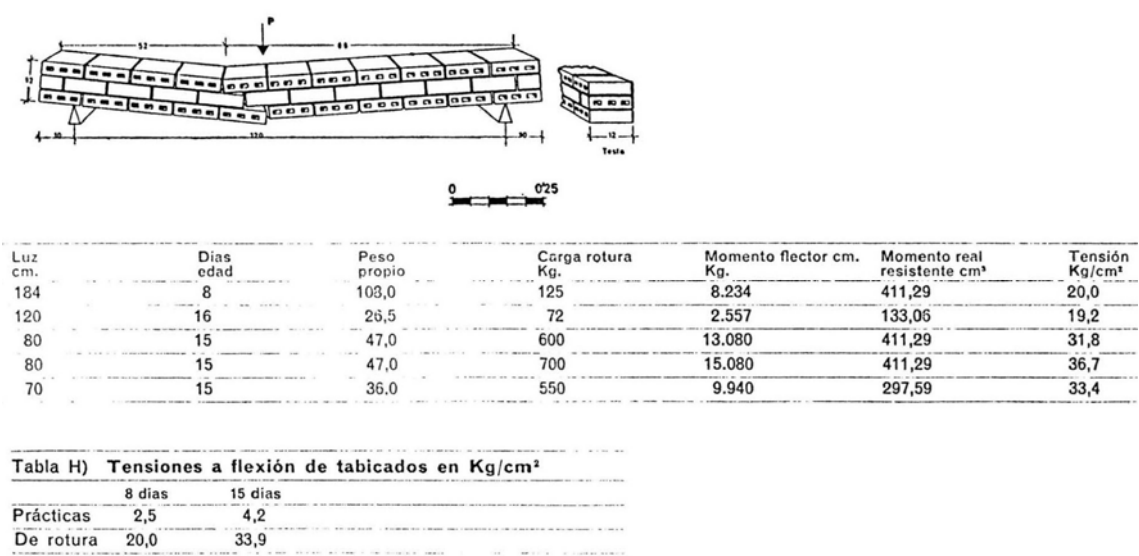


Figura 8.62. Arriba, probeta para ensayo de resistencia a flexión de tabicados rectos, indicando forma de rotura (Bergós 1965, 35). En el centro, tabla con las cargas de rotura del ensayo (Bergós 1965, 33). Abajo, tabla con las flexiones admisibles (Bergós 1965, 34)

Estas tensiones son de rotura, para obtener las admisibles aplica un coeficiente de seguridad de 8 (el que ha obtenido de la dispersión de datos de probetas cúbicas en los ensayos iniciales).

También en las probetas de flexión (figura 8.62 arriba), mide las deformaciones bajo las cargas aplicadas y con esto obtiene un nuevo valor de E, distinto del de compresión, para aplicar en casos de flexión.

Los coeficientes de elasticidad son $\frac{PL^3}{48\psi I}$

$\frac{P}{\psi}$	Carga P Kgs	Deformación ψ micrones	Módulos de elasticidad Coeficientes de elasticidad Kg/cm ²	
			Sección aparente	Sección real
0,357	1	2,8	68.779	92.318
0,344	2	5,8	66.275	88.956
0,333	3	9	64.155	86.112
0,325	4	12,3	62.614	84.043
0,312	5	16	60.110	80.681
0,3	6	20	57.798	77.578
0,304	7	23	58.568	78.612
0,296	8	27	57.027	76.543
0,300	9	30	57.798	77.578
0,23	10	37	44.311	59.476
—	0	2 *	—	—
0,277	15	54	53.366	71.630
0,274	17	62	52.788	70.854
0,275	19	69	52.981	71.113
0,277	20	72	53.366	71.630
—	0	2 *	—	—
0,06	45	750	11.560	15.515
—	0	500 *	—	—
0,072	—	—	—	—

Tabla I
Coeficientes de elasticidad por flexión en Kg/cm²

Tensiones	Coeficientes de elasticidad
Práctica	77,500
De rotura	10.900

Figura 8.63. A la izquierda, tabla con la relación entre deformaciones y cargas de la que se extrae el valor de E. Abajo, resumen con los datos de módulo de elasticidad (Bergós 1965, 36).

Ensayo de compresión sobre tabiques

Continúa ensayando tabiques rectos, de distintos gruesos (1, 2 ó 3 capas de ladrillo) y alturas (desde 12 hasta 184 cm), con carga centrada y descentrada, y lo que llama «tabicados cilíndricos», que son tabiques con una imperfección inicial (flechas de 3, 6 y 9 cm).

Comparando los valores de rotura de las probetas cúbicas y de estas, obtiene unos coeficientes de reducción de la resistencia por pandeo en función de la esbeltez geométrica de la pieza, de la excentricidad de la carga y de la imperfección inicial.

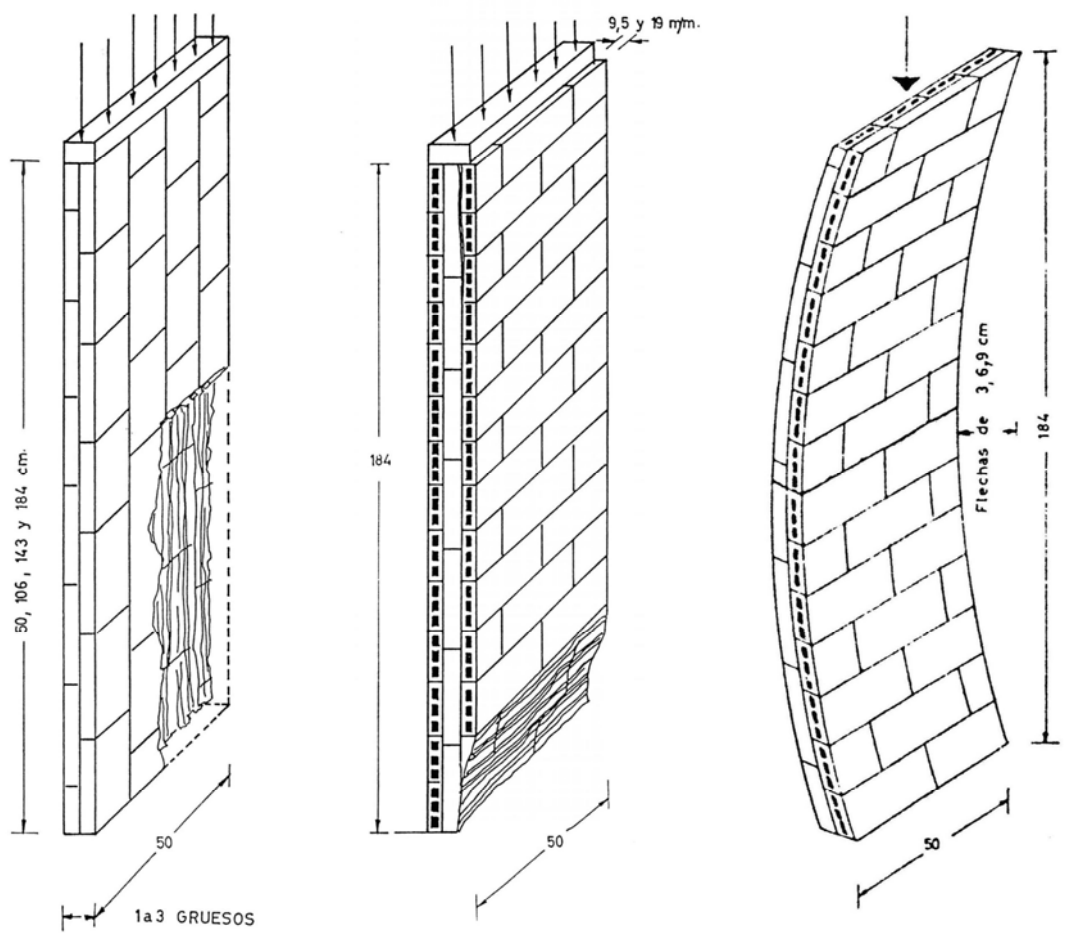


Figura 8.64. Probetas de tabicados rectos ensayadas: a la izquierda a compresión centrada (Bergós 1965, 39); en el centro, compresión excéntrica (Bergós 1965, 43); a la derecha, compresión centrada con una imperfección inicial (Bergós 1965, 45)

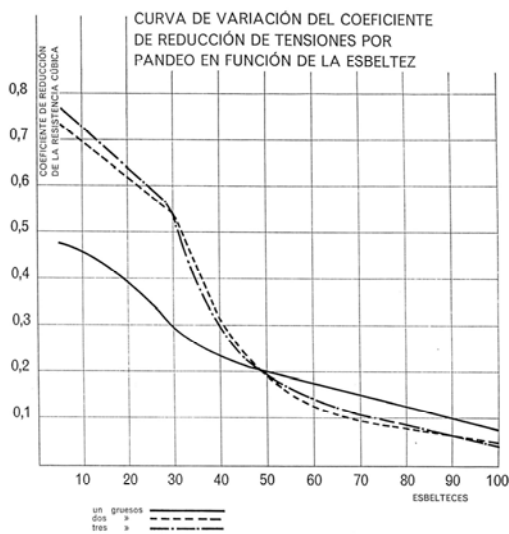


Tabla K
Coeficientes de reducción de resistencia en flexo-presión descentrada

Excentricidades	0	0,083	0,1	0,167	0,20	0,25	0,3	0,33	0,4	0,5
Coef. de carga	1	0,78	0,77	0,68	0,62	0,56	0,49	0,47	0,38	0,27

Tabla M
Coeficientes de reducción de resistencia en tabicados cilíndricos

Excentricidades	0,25	0,41	0,50	0,75	0,78	1,00	1,16	1,25	1,50	1,75	2,00
Coeficiente reducción de carga	0,570	0,361	0,232	0,062	0,042	0,023	0,020	0,018	0,017	0,0165	0,0160

Figura 8.65. A la izquierda, coeficientes reductores obtenidos en función de la esbeltez geométrica (Bergós 1965, 41). A la derecha y arriba, reducción por la excentricidad de la carga (Bergós 1965, 44). A la derecha y abajo, reducción por la imperfección inicial del tabicado recto (Bergós 1965, 46).

Finalmente ensaya arcos de distintas formas y cargas.

Ensayo sobre arcos parabólicos rebajados

La geometría y forma de cargas de los arcos ensayados son las siguientes:

-Arcos parabólicos de flecha 1/5 de la luz, con luces 80, 160 y 320 cm., bajo una carga puntual centrada

-Arco parabólico de flecha 1/5 y luz 16 cm, bajo una carga uniforme

Todos ellos se apoyan en perfiles metálicos en L y están atirantados, de forma que los apoyos inferiores apenas se mueven. Obtiene las cargas de rotura y mide las deformaciones.

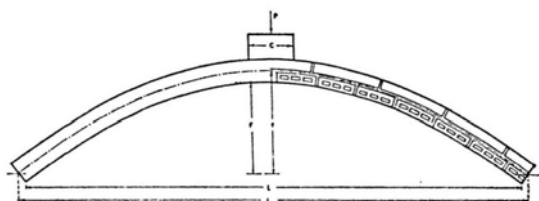
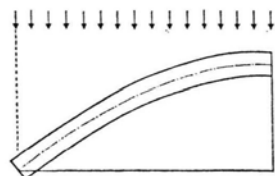


Figura	Luz L cm.	Flecha f cm.	Peso propio Q kg.	Carga rotura P kgs.
67	84,6	17,—	38	6.800
67	164,6	33,—	71	3.400
68	164,6	33,—	71	550
67	324,6	65,—	137	2.200

Figura 8.66. A la izquierda, arco parabólico ensayado por Bergós bajo carga puntual centrada, con tres luces distintas; a la derecha, cargas de rotura obtenidas (Bergós 1965, 46-47).



Luz l eje cm.	Flecha f cm.	Peso propio Q kgs.	Carga rotura P kgs.
171,4	35,9	71	30.000

Figura 8.67. A la izquierda, arco parabólico ensayado por Bergós bajo carga repartida. A la derecha, carga de rotura obtenida. (Bergós 1965, 46-47).

Bergós describe la forma de rotura de los arcos con carga semiconcentrada así:

Se figuran (...) ligeramente en la hoja de intradós de la clave y en la parte de la junta de mortero y se agrietan mucho en el extradós, hasta romperse lateralmente por flexo presión un poco más arriba de la sección de momento máximo, supuesto el arco articulado en sus arranques. Este desplazamiento es debido al encajonamiento de los arranques dentro de los hierros ángulo y a la fricción desarrollada por la reacciones de apoyo (Bergós 1965, 48)

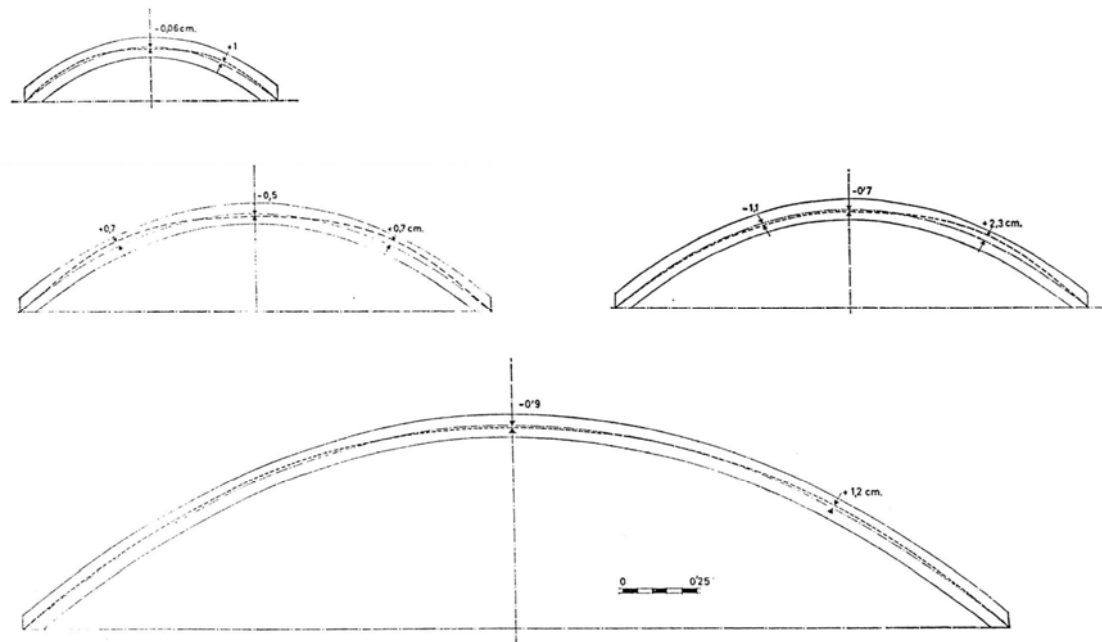


Figura 8.68. Deformaciones medidas en arcos parabólicos con carga semiconcentrada. Arriba, arco de luz 80 cm. En el centro, los dos arcos de luz 160 cm. Debajo, arco de luz 320 cm. Todos presentan deformaciones simétricas salvo el de la derecha de luz 160 cm, en el que un fallo del atirantamiento produjo un movimiento del apoyo derecho de 1,9 cm (Bergós 1965, 47-48)

Ensayo sobre arcos peraltados

Bergós repite el ensayo para arcos peraltados, con la forma mecánica adecuada para resistir la carga semiconcentrada que reciben: una parábola en la zona cargada y dos ramas casi rectas en el resto

Y así describe la rotura de los arcos peraltados:

Las claves se agrietaron poco, mientras en la zona de momento máximo de los segmentos laterales no cargados se dislocaba el arco de un grueso, se figuraba el de dos y se desgajaban las rasillas de la hoja de extradós en el arco de cuatro gruesos (Bergós 1965, 49)

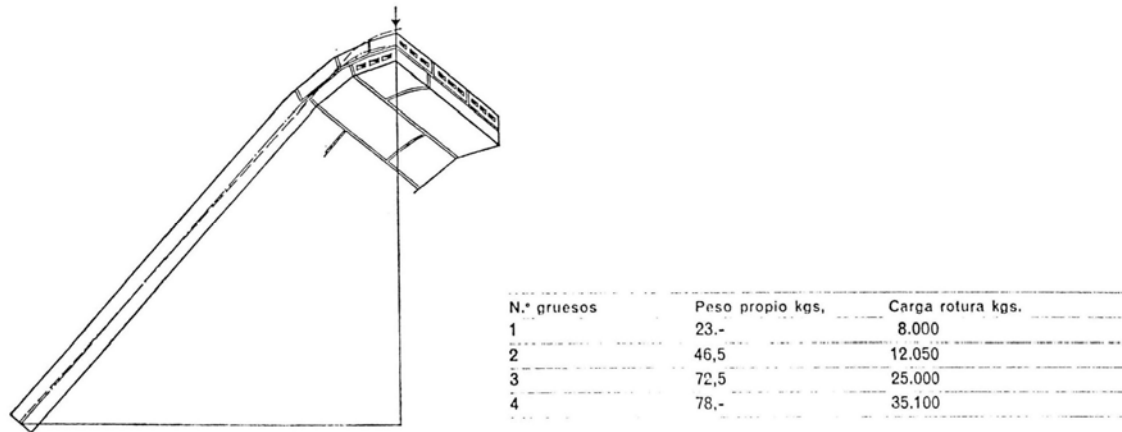


Figura 8.69. Arcos peraltados ensayados por Bergós. Todos tienen 2 metros de luz y 1 metro de flecha. Se construyen de 1, 2, 3 y 4 gruesos. A la izquierda, arco de dos gruesos. A la derecha, tablas con las características mecánicas y las cargas de rotura de los cuatro arcos ensayados (Bergós 1965, 49-50)

Resultados de los ensayos

Después de realizar los ensayos, Bergós pasa a extraer datos de los mismos. Lo que busca son tensiones admisibles para tabicados trabajando a flexión, a compresión simple, excéntrica, etc. En la mayoría de los casos ya ha obtenido datos similares de los ensayos; busca ahora una comprobación teórica. Otras veces utiliza algunos datos de los ensayos para introducir en fórmulas de resistencia de materiales. En general, es una parte muy farragosa y de la que no termina de extraer datos prácticos, en parte por la complejidad de las fórmulas empleadas y en parte por la falta de confianza en algunos de los datos de partida:

La baja resistencia a tracción impide aprovechar a fondo la resistencia a compresión, lo que hace poco exacta la fórmula de resistencia compuesta que se aplica a secciones comprimidas y flexadas (Bergós 1965, 51)

Para los arcos parabólicos con carga semiconcentrada, bajo las cargas de rotura busca un diagrama de momentos elástico, suponiendo un cierto empotramiento en el apoyo. Con este diagrama obtiene las tensiones máximas de tracción y de compresión que soportan los 3 tamaños de arcos ensayados (80, 160 y 320 cm), despreciando el arco intermedio en el que se abrieron los apoyos.

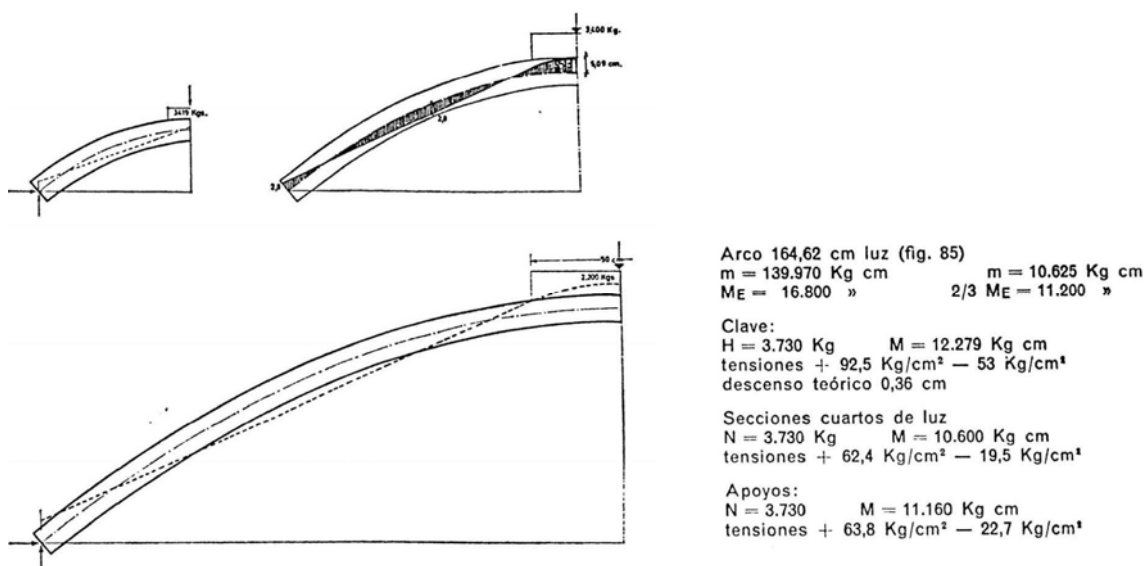


Figura 8.70. A la derecha, diagrama de momentos en los arcos parabólicos ensayados bajo carga semiconcentrada (ver figura 8.66). A la derecha, calculo de los valores numéricos a partir de las cargas de rotura para el arco intermedio, de luz 160 cm (Bergós 1965, 55)

El arco parabólico con carga repartida lo supone directamente trabajando a compresión, como es razonable ya que la línea de empujes está contenida dentro del espesor del arco. Obtiene una tensión de rotura a compresión de 122 Kg/cm^2 y comparando con tensión de rotura similar en las probetas cúbicas y en los tabiques rectos del mismo aparejo, obtiene un coeficiente de 0,667 que sería la mejora que supone la forma de la bóveda sobre la del tabique plano en lo que se refiere al pandeo.

Concluye de todos los datos obtenidos que:

Para tabicados mixtos ejecutados con mortero de cemento fundido a 10 días, las tensiones máximas admisibles son:

Tracción 10 Kg/cm^2

Compresión 20 Kg/cm^2

(Bergós 1965, 58)

Posteriormente repite todos los ensayos armando la fábrica: flexión en tabicados rectos, compresión en tabicados rectos y cilíndricos, arcos. El objeto de esta segunda serie de ensayos es comprobar la mejora en el comportamiento de los elementos tabicados introduciendo armadura. Esta comparativa es muy literal, al menos en el caso de los arcos: comparando la carga de rotura del arco de 160 cm de luz sin armar (3400 kg) con

el armado (7000 kg) deduce que los arcos parabólicos armados resisten 2,06 veces más que los no armados.

Finaliza el libro con unas tablas prácticas, en las que se indica la carga por m² admisible en bóvedas tabicadas de perfil parabólico, con distintas luces y distinta relación flecha/luz para 1, 2 ó 3 gruesos, así como el empuje que producen.

1 Grueso g = 3'2 cm					
l cm	f/l	De canto t = 34 Kg/cm ² S = 206 cm ²		De testa t = 47 Kg/cm ² S = 266 cm ²	
		H Kg	P Kg	H Kg	P Kg
60	1/8	2731	4322	4875	7714
	1/4	2125	6724	3792	12000
	1/2	1247	7891	2225	14084
	1/1	510	6450	910	11515
	3/2	259	4920	462	8781
80	1/8	2544	3057	4540	5457
	1/4	1947	4679	3474	8351
	1/2	1102	5300	1968	9462
	1/1	406	3904	725	6968
	3/2	214	3090	382	5513
100	1/8	2336	2264	4171	4041
	1/4	1768	3426	3156	6116
	1/2	921	3569	1644	6372
	1/1	345	2673	616	4772
	3/2	174	2023	310	3609
120	1/8	2105	1708	3757	3050
	1/4	1535	2492	2741	4449
	1/2	792	2573	1414	4592
	1/1	303	1964	540	3504
	3/2	135	1311	241	2343

Figura 8.71. Tabla desarrollada por Bergós con la carga máxima admisible por m² y el empuje que producen distintas bóvedas tabicadas de un grueso, para distintas luces, relaciones flecha/luz y aparejos. Hay una tabla igual para dos y otra para tres gruesos. (Bergós 1965, 65)

El procedimiento obtenido para hallar estos valores es:

- se obtiene una «fuerza teórica» N, que es el normal máximo que puede asumir la sección de ladrillo:

$N = S \cdot t$, siendo S la sección resistente y t la tensión admisible de compresión. Este dato lo obtiene Bergós de los obtenidos con las probetas cúbicas (ver figura 8.60)

- este normal se reduce por efecto del pandeo:

$$N' = C \cdot N$$

con los coeficientes obtenidos en los ensayos de tabicados rectos (ver figura 8.65), considerando una longitud igual a 0,667 de la real de la bóveda. Este coeficiente lo aplica por ser una bóveda en lugar de un tabique recto, lo que mejora el comportamiento frente al pandeo. El dato lo ha obtenido del análisis posterior de los

ensayos, relacionando las cargas de rotura de un tabique y una bóveda de igual luz y forma de construir.

- con el normal reducido N' puede obtenerse la carga máxima por m^2 (P) y el empuje que produce la bóveda en esta situación de carga máxima (H):

$H=N' \cdot \cos\alpha$, siendo α el ángulo que forma N con la línea de arranque de los arcos

$$P = \frac{2 \cdot N' \cdot \sin\alpha}{l}$$

Siendo l la longitud de la bóveda

8.5.4. Análisis de los ensayos de Bergós:

Los minuciosos, al menos en parte, ensayos de Bergós no están muy bien encaminados. El resultado práctico final son las tablas de cargas máximas en arcos parabólicos sometidos a carga repartida, para aplicarlo en la construcción de las bóvedas de la Sagrada Familia. Para llegar hasta ahí:

-Dedica mucho tiempo, esfuerzos y ensayos a obtener lo menos importante: la resistencia a compresión de probetas cúbicas tabicadas. Para esto, ensaya multitud de probetas, variando el nº de gruesos y el tipo de aparejo y obtiene detalladas tablas de resistencias admisibles a compresión.

-También ensaya numerosos tabiques rectos para medir el efecto del pandeo. Bergós piensa que la rotura de una bóveda tabicada se produce exceso de tensión de compresión, afectada por pandeo. En esto está muy influenciado por los ensayos inconclusos de Terradas y su *libreta de la volta*, que cita en todos sus libros.

-Ensayo 4 arcos parabólicos sometidos a carga puntual, cuatro arcos peraltados y un solo arco parabólico sometido a carga repartida, aunque será este último del que saque conclusiones prácticas. Esto hace que el coeficiente 0,667, con el que reduce la longitud real de una bóveda a efectos de considerar el pandeo, lo obtenga de un solo ensayo, sobre una bóveda de dos gruesos, 160 cm de luz y $f/L=1/5$, que luego extiende a bóvedas de luz variable entre 60 y 900 cm, relación flecha luz entre $1/8$ y $3/2$ y entre 1 y 3 gruesos. Es un dato muy importante en el resultado final para obtenerlo de un único ensayo, teniendo en cuenta que para otras cosas de las que luego no concluye nada (o muy poco) realiza multitud de ensayos

-No estudia algunos datos importantes, como el importante efecto sobre la carga de rotura que tiene un desplazamiento de los apoyos. En dos arcos parabólicos de idéntica geometría: uno de ellos, que tiene los apoyos fijos, rompe bajo una carga de 3400 kg y en el otro, un apoyo se desplaza 1,9 cm y esto basta para que la carga de rotura sea 550 kg, es decir, se ha dividido por 6.

8.6. Ensayos en bóvedas tabicadas

Este capítulo es un estudio de los ensayos de resistencia llevados a cabo en estructuras tabicadas, intentando analizar todos aquellos de los que he encontrado datos numéricos o he podido deducirlos de las imágenes.

Los primeros de los que queda registro se llevan a cabo en Francia en los últimos años del siglo XVIII, en el contexto de validar un sistema de construcción desconocido en el norte del País, y están especialmente orientados a conseguir la aprobación de la construcción tabicada por parte de la Academia de Arquitectura.

A lo largo del siglo XIX se suceden los ensayos en Francia y algo menos en Inglaterra. La mayoría de ellos son ensayos de carga, en los que se busca el valor admisible para una geometría concreta. Se realizan sobre el tipo más habitual: una bóveda de perfil circular muy rebajado, y se carga con un peso muy elevado, pero repartido de manera uniforme. Para esa geometría y esas cargas, siempre es posible dibujar una línea de empujes, parabólica, dentro de la bóveda. La rotura se produce cuando el ladrillo rompe por compresión, bajo cargas sorprendentemente grandes.

El interesante ensayo de Olivier es diferente, ya que el busca medir de manera experimental el empuje que causa una bóveda tabicada, con el objeto explícito de «desmontar» la teoría monolítica extendida por Espie (1754) y Blondel y Patté (1771-77).

Con Rafael Guastavino comienzan los ensayos de resistencia, buscando valores de referencia sobre probetas. Es el que lleva a cabo la serie más completa, a partir de su llegada a Estados Unidos en 1881. La situación es parecida a la que se encuentra en Francia un siglo antes: validar un sistema desconocido. Los ensayos que lleva a cabo en 1887 (ver apartado 8.4.1.), con los que obtiene valores de resistencia a compresión y a tracción de una fábrica tabicada, serán una referencia para muchos autores posteriores,

especialmente aquellos que siguen el enfoque elástico-resistente (ver apartado 7.5 de esta tesis).

En España no se realizan ensayos hasta los últimos años del siglo XIX. Los primeros son de unos ingenieros militares de Barcelona, buscando la altura máxima de agua que puede resistir una bóveda tabicada, con el objeto de emplearlas en muros de contención de agua. Esteban Terradas realiza algunos ensayos en el contexto de la investigación para obtener un método de cálculo válido para estructuras tabicadas (ver apartado 7.5.3.d de esta tesis). Pero es Juan Bergós el que lleva a cabo la mayor cantidad de ensayos en estructuras tabicadas, continuando la línea que inicia Terradas en la que buscan, principalmente, evaluar el efecto del pandeo en estas bóvedas. Dispone de un laboratorio de materiales y dedica cerca de 40 años a este tema, llevando a cabo más de 500 pruebas, como indica en mismo en la introducción de *Tabicados Huecos*. Y aunque el objetivo con el que empieza es abordar la terminación de las bóvedas de la Sagrada Familia y concluye con el valor de las cargas máximas que pueden asumir, es difícil encontrar la relación entre muchos de los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

La mayoría de los ensayos confirman las afirmaciones del capítulo 7: siempre es posible, para las bóvedas tabicadas como para cualquier otra fábrica, encontrar una solución de equilibrio para la que el material sólo trabaje a compresión. Así ocurre en los numerosos ensayos de carga uniforme, por muy grande que sea esta.

Solo en dos ensayos no está tan claro este comportamiento:

- el primero es el ensayo de Olivier, en el que partiendo del empuje que mide no se puede dibujar una línea de empujes en el interior del arco ensayado. La explicación que se da es la dificultad de asegurar un apoyo deslizante como describe Olivier (ver apartado 8.2.1)
- el segundo es uno de los ensayos realizados en España por los ingenieros militares en 1892, en concreto en el que la bóveda tiene la forma habitual de las que se construyen para las escaleras. Aquí la explicación más probable es el comportamiento bidireccional de la estructuras tabicadas.

El tema de los ensayos sobre estructuras tabicadas no está cerrado. Muchos proyectistas, hoy en día, realizan ensayos de carga. A pesar de todas las herramientas de cálculo disponibles este es, a veces, el camino más directo y sencillo, especialmente aplicado a una bóveda en concreto, a la manera de los primeros ensayos franceses.

El profesor José Luis González relata uno de estos ensayos de carga, realizado sobre la escalera tabicada de un edificio de los inicios del siglo XX, que resistió 2500 kg/m² momento en que se paró el ensayo por problemas en los muros de apoyo, ver figura 8.73 izq., así como algunos otros encaminados a obtener las cargas de trabajo de bóvedas tabicadas en edificios en restauración (González, 2004).⁶⁰

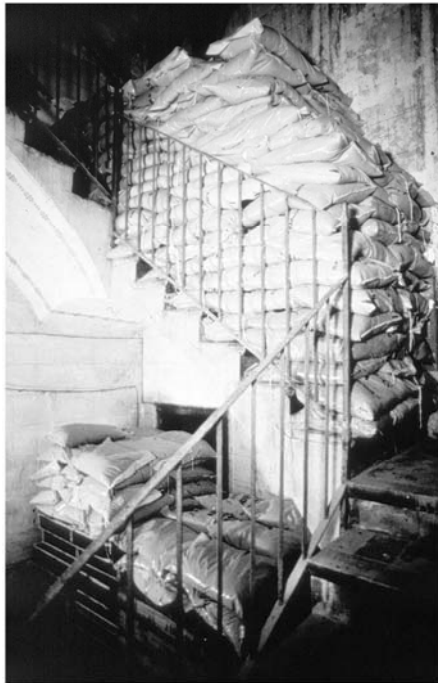


Figura 8.73. A la izquierda, ensayo de carga sobre una escalera (González 2004, xIviii). A la derecha, bóvedas preparadas para ensayos en la Universidad de Gerona (Llorens, Llorens y Chamorro 2012, 357)

⁶⁰ Las escaleras tabicadas siempre han representado un problema de análisis más complejo que otros debido a su forma, creada «a sentimiento» por los albañiles y al desarrollo espacial de las escaleras que van enlazando tramos. En García Arés (2007) se expone una aproximación al comportamiento estructural de una escalera de fábrica helicoidal. En la tesis doctoral de Philippe Block (2009) es uno de los casos que se estudia con su programa TNA, ya citado en el capítulo 7.

Los profesores Miquel Àngel Chamorro, Miquel y Joan Llorens, de la Universidad de Gerona, está llevando a cabo en la actualidad una campaña de ensayos. En Llorens, Llorens y Chamorro (2012) se describen dos de ellos: el primero buscar medir la influencia de los cambios térmicos sobre una bóveda previamente cargada; esta prueba se realiza sobre un edificio construido, el Hospital de Santa Caterina de Gerona. El segundo se realiza en modelos de laboratorio (ver figura 8.73 der.) y busca medir el módulo de Young dinámico, acercándose así al enfoque resistente propuesto por Terradas y Bergós.

CAPÍTULO 9:

CONCLUSIONES

A lo largo de esta tesis se ha estudiado la evolución de la bóveda tabicada en España, desde su aparición en el siglo XIV, con especial atención a su evolución y cambio en el siglo XIX, con el objeto de responder a la pregunta que se plantea en la introducción: ¿Cómo y por qué se transforman las bóvedas tabicadas en España en el siglo XIX?

* La bóveda tabicada aparece en España a finales del siglo XIV en la zona de Levante. El primer uso es como plementería en las bóvedas de crucería góticas, entre nervios de piedra. Se extienden con rapidez por el resto del país y en el siglo XVII son de amplio uso, al menos en Castilla y Andalucía.

* Durante unos 200 años su forma de construcción, que describe perfectamente Fray Lorenzo en 1639, se mantiene en lo fundamental:

- empleo de ladrillos macizos delgados y yeso, único aglomerante de fraguado rápido conocido.
- proceso de construcción sin cimbra o con ayuda de ligeras cerchas o cintreles para controlar la forma, colocación de la primera hoja empleando yeso y doblado sobre ella, bien con yeso o con el llamado «mortero común» (de cal).
- relleno de los riñones hasta un tercio de la altura de la bóveda y construcción de tabiquillos de refuerzo o lengüetas en sitios estratégicos para reforzar el pequeño espesor de las bóvedas, hasta dos tercios de la altura de la bóveda o incluso hasta la clave.

* En la segunda mitad del s. XVIII la construcción tabicada se extiende por Francia desde el Rosellon, donde es un sistema popular; en unos años es aceptado por la Academia de Arquitectura Francesa y publicado en algunos importantes tratados de la época: Blondel y Patté (1771-1777) y Rondelet (1802). Desde Francia, y a través de estos

influyentes tratados, vuelve a España «contaminado» con algunas ideas sin base, las más importantes en el desarrollo posterior son:

- ausencia de empujes debido a su forma de trabajo monolítica, como la couvercle d'un pot de terre.
- influencia de la expansión del yeso al fraguar en el comportamiento estructural, siendo ésta la única razón por la que las bóvedas tabicadas empujan.

* Los primeros «cambios» que se producen en la construcción tabicada, en los primeros años del siglo XIX, son precisamente la llegada a España de estas ideas erróneas. La poderosa influencia cultural francesa hace que todos los autores españoles citen, con mayor o menor convicción y sin demostración científica, las ideas anteriores. Los autores prácticos, que son a la vez constructores (como Renart, que escribe hacia 1810, o Fornés y Gurrea en 1841) demuestran en sus textos una dualidad entre teoría y práctica, entre lo que se escribe y lo que se construye, que es habitual desde que empiezan a desarrollarse las teorías científicas, que durante mucho tiempo son ajenas a la práctica constructiva.

* Por otra parte, hay algunos aspectos de la construcción tabicada tradicional que se mantienen hasta que se abandona su construcción en la primera mitad del siglo XX:

- los procesos de ejecución, en lo que se refiere a las cerchas y cintreles empleados para replantar las bóvedas.
- el relleno de los riñones y sobre todo, la construcción de lengüetas como refuerzo en los laterales o esquinas de las bóvedas.

* El cambio fundamental se produce por la aparición de dos nuevos materiales: el cemento y el hierro.

* El cemento (primero los naturales y luego el artificial, de composición química controlada, tipo Pórtland) fue sustituyendo poco a poco al yeso como aglomerante en la construcción tabicada. El cemento tiene una ventaja real respecto al yeso: no se ve

afectado por la humedad, por lo que pueden construirse bóvedas tabicadas en lugares donde con el yeso no es recomendable, como las cubiertas. Y también una imaginaria pero no menos importante: la confianza ilimitada en el nuevo material, lo que hace que se construyan con él bóvedas más arriesgadas que antes también habrían sido posibles. Además sirve para solucionar la reticencia hacia el uso de bóvedas tabicadas que habían causado las ideas francesas acerca del yeso.

* El empleo del hierro forjado como refuerzo en zunchos intermedios permitió mayor libertad formal; el uso de tirantes posibilitó la construcción de bóvedas sobre delgados muros o sobre pilares de fundición.

* Emerge una nueva construcción tabicada, formada por bóvedas de ladrillo recibidas con cemento y atirantadas donde resulta necesario que encuentra su mejor campo para desarrollarse en la arquitectura industrial catalana desde mediados del s. XIX, que encontrará así un sistema constructivo propio. La fábrica Batlló, que construye Guastavino padre en 1868, es el primer ejemplo.

* La arquitectura industrial, por su carácter práctico, es la causante de otro de los cambios importantes en la construcción tabicada: tanto el aparejo de ladrillo como los atirantamientos metálicos comienzan a dejarse vistos. Unido a la espectacularidad de algunos edificios, la arquitectura industrial será un precedente del Modernismo catalán, donde las bóvedas tabicadas dejaron de ser la solución elegida por razones utilitarias (economía, ligereza) para utilizarse por temas estéticos e ideológicos, alcanzando así una dignidad nueva.

* Hasta mediados del s. XIX las bóvedas tabicadas se «calculan», igual que el resto, empleando reglas proporcionales, que dan un valor para el tamaño del contrarresto en función de la luz que cubre la bóveda. Se encuentran pocas reglas de proporción aplicadas específicamente a bóvedas tabicadas y en esta tesis se estudian dos, demostrando que ambas son válidas, a pesar de su aparente diferencia, porque están aplicadas a diferentes tipos de edificio.

* En la primera mitad del siglo XIX se expone la teoría para el cálculo estático de arcos y bóvedas mediante líneas de empuje. Se aplicará a las bóvedas tabicadas al menos desde 1865, y seguirá empleándose hasta que dejen de construirse. Pero la teoría monolítica vuelve con fuerza con el desarrollo de la teoría elástica, que supone continuidad, isotropía y resistencia a tracción (propiedades que no posee la fábrica tabicada).

* Los autores que escriben acerca de la manera de calcular bóvedas tabicadas expresan un sistema de doble pensamiento, distinto para la teoría y para la práctica, más o menos acusado:

- algunos no son constructores de bóvedas y presentan un desarrollo puramente teórico. Es la línea que comienzan Espie, Blondel y Patté o Sotomayor y continúan los escritos de Cardellach y de Goday, que defienden la posibilidad de aplicar la teoría elástica a las bóvedas tabicadas sin explicar cómo.
- los autores prácticos son mucho más interesantes, y en ellos es donde se refleja perfectamente el doble pensamiento. Es el caso de Guastavino padre, Martorell o Bosch Reitz: en sus escritos citan de manera teórica la teoría elástica, pero llegados a los ejemplos, plantean métodos de equilibrio.
- un último grupo lo forman aquellos que intentan aplicar a fondo el análisis elástico a las bóvedas tabicadas pero, de hecho este cálculo permanece en el terreno de la teoría. El fracaso de Terradas, el mejor ingeniero-matemático de su época en España, en el cálculo de una simple escalera a montacaballo es paradigmático.

* El gran avance en el cálculo de bóvedas tabicadas vino de los análisis gráficos de equilibrio: la «antigua teoría de bóvedas» mediante líneas de empujes para arcos y bóvedas y el análisis de membrana para cúpulas. El enfoque teórico «correcto» del análisis elástico era inaplicable y no explicaba fenómenos evidentes como las grietas o el colapso por formación de mecanismos. El análisis gráfico de equilibrio fue empleado a partir de 1880 por numerosos arquitectos e ingenieros en la verificación de bóvedas. Los planos y dibujos de la compañía Guastavino son muy esclarecedores al respecto,

mostrando que solo necesitaron análisis de equilibrio de arcos, cúpulas y tirantes por métodos gráficos para llevar a cabo su ingente obra. Guastavino hijo, en particular, ideó un método gráfico de proyecto de cúpulas sin tracciones que le permitió cubrir de forma económica y con espesores mínimos luces de hasta 33 m.

* Dentro de la formación de este marco teórico para las bóvedas tabicadas se realizan numerosos ensayos. En Francia y en Inglaterra en la primera mitad del siglo XIX y en Estados Unidos en los últimos años del siglo, los ensayos se realizan para obtener la aprobación de un sistema constructivo nuevo y desconocido. Además de la novedad, el momento en que ocurre exige evidencias científicas.

* Los primeros ensayos fueron destinados a demostrar que las bóvedas tabicadas, en contra de la teoría francesa oficial, sí empujaban. Entonces comienza a emplearse el método de las líneas de empuje para calcular estas fuerzas.

* Los ensayos de más éxito son los de carga. Permitieron calcular los valores máximos que podían soportar tipos concretos. Algunos tenían este objetivo práctico, pero en muchas ocasiones eran de carácter propagandístico. El mejor ejemplo de este último tipo son los que lleva a cabo la compañía Guastavino en 1901.

* Los ensayos de resistencia sobre probetas que lleva a cabo Guastavino padre en 1887 son un referente para muchos autores posteriores. Todos citan la tensión de rotura obtenida tanto a compresión como a tracción, aunque la mayoría de ellos sólo emplean la de compresión para comprobar la fábrica, y utilizando elevadísimos coeficientes de seguridad, ya que es muy difícil agotar el ladrillo por resistencia si la forma de la bóveda es adecuada. La resistencia a tracción obtenida por Guastavino sólo la emplea Jaime Bayó en su análisis elástico.

* Ya en la primera mitad del siglo XX, Bergós continúa esta línea de ensayos de probetas, dentro del enfoque resistente. A pesar de la abundancia de medios y del tiempo dedicado, fracasa en obtener reglas generales, ya que lo que busca, que son

datos de resistencia de bóvedas afectados por el pandeo, no es lo relevante. De nuevo el marco elástico forma una camisa de fuerza que impide identificar los problemas cruciales como la formación de mecanismos de colapso.

En resumen, a lo largo del siglo XIX la técnica tabicada se transformó adaptándose a los nuevos materiales y necesidades y creando una colaboración enormemente fructífera en estructuras mixtas donde la fábrica trabaja a compresión y el hierro a tracción. Guastavino padre vio en esta solución el germen de una nueva arquitectura. En los primeros años del siglo XX se abandona la construcción de bóvedas. Hay muchas razones que lo explican, como el mayor coste de la mano de obra frente a los materiales a la llegada del movimiento moderno, que invalida las formas abovedadas. Debido a esto no se produjo un desarrollo generalizado de esta nueva construcción tabicada, que sin embargo pervivió -de manera minoritaria- en las obras maestras de algunos arquitectos como Guastavino hijo en Estados Unidos o Luis Moya, Ignacio Bosch Reitz o Cesar Martinell en España.

APÉNDICE

APÉNDICE

A continuación se transcribe completo el manuscrito del Comandante Capitán de Ingenieros Ramón Ballesteros *Bóvedas tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas*, escrito en Lérida en 1869, que se conserva en el Archivo Histórico Militar. La transcripción se llevó a cabo por la profesora Gema López Manzanares en el contexto del trabajo de documentación para la exposición *Guastavino Co. (1885-1962): la reinención de la bóveda*. El documento es representativo del momento de cambio en que se encuentra la construcción tabicada en la segunda mitad del XIX y sobre todo, se reproduce aquí porque nunca ha sido publicado completo.

Bóvedas tabicadas y otras aplicadas a construcciones modernas.

Dirección Subinspección de Ingenieros de Cataluña, 1869

Consideraciones generales

Entre las diferentes partes que constituyen un edificio, hay dos, cuáles son los suelos y cubiertas cuya construcción es de la mayor importancia sea perfecta y arreglada teórica y prácticamente a las condiciones a que debe satisfacer, pues es indudable que de aquella depende la mayor o menor duración de los edificios, siendo ésta grande y evitándose las continuas separaciones que de otro modo son indispensables, si se tienen en cuenta aquellas condiciones en cada caso particular, obteniéndose al propio tiempo la mayor economía.

Las bóvedas tabicadas de que vamos a tratar en esta memoria no son más que una clase especial de suelos y cubiertas muy antigua, no sólo en otros países, si que también en el nuestro y muy usada en Cataluña; por lo tanto procuraremos dar a conocer con la brevedad posible el modo de ejecutarlas en general y las modificaciones introducidas en este país, haciendo aquellas observaciones que creamos convenientes en cada caso, según lo que de ellas hemos visto y practicado: hablaremos también de otras clases de bóvedas semejantes a las tabicadas, que se usan en el día, tanto en el Estranjero como en este Principado y las cuales presentan grandes ventajas en sus muchas y diversas aplicaciones.

Bóvedas tabicadas:

Objeto y ventajas de estas bóvedas

En muchos casos es útil y a veces indispensable el suprimir la madera en los edificios y reemplazarla por construcciones de mampostería; se logra este objeto por medio de suelos y cubiertas tabicadas.

Estos suelos de mampostería que se hacen de ladrillos puestos de plano con mortero de yeso, tienen las ventajas de sustituir a la madera una materia más duradera y no espuesta a incendio; de no exigir muro de mayor espesor que el necesario para los suelos ordinarios, de ser muy ligeras y de poder imitar los cielos rasos a causa de la poca montea de que son susceptibles.

Entre todas estas ventajas una de las principales es indudablemente la que hemos indicado, de no ser necesario gran espesor en los muros que deben sostener esta clase de bóvedas, que su equilibrio no depende de la presión y corte de sus dovelas sino de la adherencia del yeso y el ladrillo, hasta el punto de poder ser miradas como una sola pieza, no ejerciendo sobre aquellos empuje ninguno, siendo por otro lado muy duraderas.

En efecto, con estas bóvedas se han hecho numerosas experiencias, ya construyéndolas sobre muros muy viejos, sin que apoyaran más que en tres de éstos, demoliendo y construyendo después el cuarto, sin que la bóveda se moviera: ya ejecutándolas sobre un marco de madera, desmontando después éste, cargando la bóveda de piedras o tirándolas con gran fuerza ; ya cortándolas por sus cuatro lados, escepto los ángulos y cargándolas de un peso considerable sin que experimentasen el menor efecto, sucediendo lo mismo con otras recién concluidas y sin llenar los senos; ya en fin practicando muchos y grandes agujeros en otras recién construidas, marchando por encima de ellas cargándolas, golpeándolas, & sin que todo ello produjera ningún efecto. Todas estas experiencias prueban que estas bóvedas son muy sólidas, que el yeso une con una fuerza admirable a los ladrillos y que una bóveda de esta clase bien construida puede estar perfectamente sostenida por muros de muy poco espesor, aunque aquella sea de bastante diámetro. Por otra parte se sabe que estando el yeso al abrigo de la humedad, se conserva largo tiempo, y por tanto no queda duda ninguna de que las bóvedas construidas con dicho material son de gran duración, siempre que estén debidamente protegidas.

Figura de estas bóvedas

Estas bóvedas pueden ser de diferentes figuras, pero cuando tienen el objeto antes expresado se construyen generalmente de cañón seguido o en rincón de claustro, prefiriéndose éstas últimas como más propias para las habitaciones y por verificarse con más rigor las ventajas manifestadas.

En Barcelona, en que tanto el ladrillo como el yeso son muy buenos, se hace gran uso de esta clase de construcciones y es tanta la práctica de los operarios, que las ejecutan con suma lijereza y prontitud, sin que haya que lamentar nunca el menor accidente; a pesar de hacerlas sumamente rebajadas; y si bien emplean varias figuras, la que más acostumbran darles es la curva en todos sentidos, parecida a una superficie esférica o elipsoidal.

Ejecución de las bóvedas tabicadas

Manifestaremos sucintamente el modo de construir estas bóvedas viendo después el sistema seguido en la Capital de este Distrito.

Los ladrillos se colocan de plano sobre la cercha, bien empapados en agua y llenas sus juntas de yeso, del mismo modo que se hace para los tabiques de panderete: se deja una caja o zarpa en los muros para alojar en ella los arranques. Siendo grande el empuje de estas bóvedas no por su peso, sino por la propiedad que tiene el yeso de aumentar de volumen al solidificarse, se procurará que la zarpa hecha en las paredes tenga una holgura de unos 0,046, llenándola cuando no haya nada que temer con mortero y piedra pequeña y se dejará además sin cerrar la clave hasta pasados algunos días de puestas las últimas hiladas.

Si la bóveda ha de componerse de dos o más capas de ladrillo, se sentarán las correspondientes a la segunda después de haber puesto dos o tres hiladas de la primera capa; se continuará en la misma proporción y se procurará que de una a otra queden los ladrillos a juntas encontradas: antes de sentar la segunda capa se va colocando sobre la primera una tostada de yeso para ligar una con otra. Si la bóveda es de cañón seguido se construirá al mismo tiempo de los dos lados y si es en rincón de claustro se irán sentando los ladrillos por hiladas horizontales en todo el perímetro.

Concluida la bóveda se hace el relleno de los senos con pedazos de ladrillo trabados con yeso hasta el trasdós, o bien con este mismo material primero y después tierra encajonada entre muros de cítara: se procede luego al embaldosado, se revoca el intradós con enlucido de 0,02 de espesor y se pone si se quiere, una comisa del mismo peso.

Para la construcción de estas bóvedas pueden emplearse cimbras movibles de poca anchura, que se hacen resbalar a lo largo de soleras, o una cimbra entera para cada espacio que se debe abovedar. Las primeras presentan varios inconvenientes como son: lo engorroso del movimiento, que ocasiona gran pérdida de tiempo, la dificultad en hacer las uniones cada vez que avanza la cimbra y el asiento desigual que se verifica en los diferentes tramos de bóveda hechos separadamente y el de no ser aplicables más que a las de cañón seguido. Todos éstos son motivos para usar con preferencia las cimbras enteras o completas.

Sin embargo, de que, conforme hemos dicho, esta clase de bóvedas, bien construidas tienen gran solidez, algunas veces se fortifican con tirantes de hierro puestos por encima del trasdós, debajo del embaldosado y empotrados en los muros; pero creemos que esta precaución será necesaria únicamente en las que además de tener mucha luz, tengan que sostener un peso considerable.

Sistema de ejecución en Barcelona

En esta Ciudad el sistema de construcción de estas bóvedas es propiamente, el que acabamos de manifestar; pero conforme hemos indicado, siendo muy buenos los materiales empleados y muy frecuente el uso que se hace de este modo de construir, los albañiles simplifican en gran manera las operaciones como vamos a ver.

Cuando se trata de una bóveda de cañón seguido, en vez de cimbra se emplea únicamente una simple cercha, que se va corriendo a lo largo de reglones o soleras colocadas en los arranques, dejando aquella cada vez que corre en la posición conveniente para formar una nueva hilada.

Para una bóveda esférica o elipsoidal, según sea el espacio que hay que cubrir cuadrado o rectangular, se colocan dos cerchas iguales en cada uno de dos muros paralelos del espacio de que se trate, las cuales marcan la curva sección paralela a dichos muros; a lo largo de ellas se va corriendo otra cercha colocada en un plano perpendicular a las primeras o sea paralelo a los otros dos muros y que tienen la curva sección en este sentido : se principia por uno de los arranques, se continua hacia el centro y cuando falta poco para llegar a él, se empieza por el arranque opuesto, prosiguiendo hasta encontrar se en el centro con la otra parte construida entonces se cierra con la última hilad a o clave.

Con esta construcción se ve desde luego que la figura de las bóvedas no resulta ni esférica ni elipsoidal, pero forma una superficie curva en todos sentido s que presenta buen aspecto y toda solidez deseable, particularmente si se escojen para las cerchas curvas adecuadas al objeto.

También parece que con las cerchas movibles deberían tener lugar los inconvenientes que hemos citado respecto de las cimbras de aquella clase; pero tanto por la bondad del material empleado, cuanto por la gran práctica de los albañiles en este modo de construir aquellos inconvenientes desaparecen o quedan disminuidos en gran manera.

Hemos tenido ocasión de construir esta clase de bóvedas más sencillamente todavía y que pueden aproximarse tanto como se quiera a la figura esférica o elipsoidal. Este método consiste en colocar dos cerchas fijas en los dos planos verticales que pasan por los dos ejes perpendiculares del espacio que se quiere cubrir: hechas las zarpas en los cuatro muros con la correspondiente curvatura, los operarios, sin valerse más que de aquellas o de los arcos sobre que debe descansar la bóveda y de las cerchas expresadas , sitúan los ladrillos en las diferentes hiladas en una posición tal que es la conveniente para formar una sola superficie curva, sin que les resulte ángulo ninguno entrante ni saliente para ello al colocar cada ladrillo deben tener sumo cuidado en darle la inclinación que convenga tanto en un sentido como en otro, para que forme parte de la superficie curva de la bóveda.

El relleno de los senos lo hacen con pedazos de ladrillo y yesones procedentes de derribo; después colocan una capa de tierra y encima el embaldosado: el intradós lo revocan y enlucen con una capa delgada de mezcla fina.

Propiedades de los materiales empleados en estas bóvedas

Los materiales de este país en general son de muy buena calidad. El ladrillo empleado en estas bóvedas es el más delgado que se fabrica y tan bien cocido, que indudablemente es de la mejor que hay en esta clase de material.

Los yesos que se emplean en Barcelona son los de Vellirana, Morgat y Corvera, puestos próximos a la misma siendo el de este último el de mejor calidad. Los hay de color rojizo y ceniciento y tanto unos como otros gozan de todas las propiedades que constituyen los buenos yesos; el inconveniente que generalmente tienen todos ellos de aumentar de volumen al tiempo de fraguar, es tan insignificante en los de que tratamos, que las pocas precauciones que toman los operarios son suficientes para evitar toda clase de accidentes: su adherencia o fuerza de unión con los ladrillos es grande y si bien quizás esta adherencia irá disminuyendo con el tiempo, como sucede con todos los yesos, debemos, sin embargo consignar que habiendo derribado bóvedas construidas con este material que contaban muchísimos años de existencia, hemos observado que aquella fuerza era tan inmensa que se ha tenido que efectuar el derribo a

trozos. Ahora bien, tanto por el excelente material que en esta clase de bóvedas se usa, cuanto por la gran perfección con que los operarios las trabajan, se concibe que a pesar de hacerlas muy rebajadas algunas veces y sumamente ligeras, tengan, sin embargo, mucha resistencia.

Bóvedas antiguas de grandes dimensiones

Hemos tenido ocasión de ver en obras antiguas de la Capital de este Principado una clase de bóvedas tabicadas que cubren grandes espacios y que no dejan de tener sus ventajas. Consisten en una bóveda de cañón seguido que cubre todo el espacio, compuesta de dos capas de ladrillo en la parte superior o sea próximamente $\frac{1}{3}$ de la superficie total, y de tres capas a los lados o los $\frac{2}{3}$ restantes: encima de ella se apoyan otras contrabóvedas perpendiculares a la misma o falsos lunetas compuestos de dos capas de ladrillo y a veces sobre éstos descansan aún otras partes de bóveda de menores dimensiones y en igual sentido que las anteriores.

Este sistema nos parece muy bueno particularmente para bóvedas grandes de poco espesor y mucha monte, pues se evita la gran carga que de otro modo sería necesaria para el relleno de los senos, reduciéndose éste a una cantidad insignificante e indispensable para la nivelación y colocación del embaldosado del piso.

Construcción de bóvedas sin cimbra

Empleando morteros de pronta solidificación tales como el yeso, los cementos C^a y ladrillos se han construido en Francia bóvedas sin hacer uso de cimbras.

Para esto basta construir la bóveda por zonas oblicuas. Se empieza por formar el arco de cabeza empotrando los ladrillos uno sí otro no en el muro testero para que queden a juntas encontradas: después, partiendo de los arranques se colocan los ladrillos que completan por uno y otro lado las zonas oblicuas más próximas a los dos primeros del arco construidos: hechas éstas se forman otras dos zonas oblicuas del mismo modo y así se sigue hasta terminar la bóveda. Al colocar un ladrillo se le mantiene en su sitio durante el poco tiempo necesario para la solidificación del mortero; después su adherencia con aquellos con quienes está en contacto basta para sostenerlo hasta la zona de que forma parte está cerrada por la clave correspondiente.

Si la cabeza de la bóveda no debiese estar adosada a un muro, bastaría establecer una ligera cimbra para construir el arco de cabeza.

Si la bóveda tuviese una gran longitud se podrían establecer sobre cimbras de distancia en distancia, arcos o cadenas, partiendo de los cuales por uno y otro lado se construirían al mismo tiempo las zonas oblicuas, tal como hemos dicho.

Se concibe que con morteros ordinarios como los de cal y arena, este procedimiento permite también aligerar considerablemente las cimbras, puesto que cada zona oblicua está cerrada por su clave, así que está formada.

Este sistema tiene el inconveniente de un aumento en la mano de obra, pero la supresión de las cimbras proporciona en definitiva una reducción notable en el gasto total; sin embargo, siempre que la superficie de intradós deba ser regular; o que sea necesario trabajar con rapidez, deben emplearse cimbras; y probablemente será ventajoso este modo de construir las bóvedas cuando deba atenderse principalmente a la economía.

Cuando las bóvedas son tabicadas, ya hemos dicho que en Barcelona se ejecutan sin necesidad de cimbras y se emplean únicamente simples cerchas, saliendo aquellas perfectamente construidas.

Cubiertas de ladrillo

Las bóvedas tabicadas se emplean también para reemplazar a la madera en la construcción de las cubiertas de los edificios.

Uno de los sistemas que se han usado consiste en hacer descansar sobre una bóveda tabicada una serie de tabiques dobles trabados con yeso y colocados a distancia menor que el largo de un ladrillo, se cubrían los dos inmediatos por ladrillos puestos de plano: estos tabiques se dejaban cortados de manera que formasen la pendiente del tejado y permitían en su medio un paso bastante ancho a lo largo del edificio e inmediatamente debajo de la cumbre: este pasillo se abovedaba y el todo se cubría con tejas trabadas con mortero.

Estas cubiertas tienen el inconveniente del gran peso que debe soportar la bóveda tabicada que las sostiene y además la pérdida total del espacio ocupado por los tabiques; pero es una prueba más de la gran fuerza de las bóvedas tabicadas.

Otro sistema que se ha empleado está reducido a construir una bóveda gótica que forma la pendiente y cuyas partes bajas o próximas a los muros están fortalecidas con macizos de mampostería hechos con mortero, los cuales tienen la pendiente conveniente para verter las aguas en la canal practicada en la comisa: el todo se recubre también con tejas trabadas con mortero.

Con estas cubiertas se han remediado los inconvenientes de las anteriores, pues son infinitamente más ligeras y se puede aprovechar todo el espacio que con aquellas se perdía.

Algunas veces se construyen también en este país cubiertas de esta clase, que se componen de una bóveda tabicada de dos o tres capas de ladrillo, pero haciendo la última con mortero ordinario.

Bóvedas ligeras de ladrillo y cemento

Sus ventajas

El uso de los ladrillos para la construcción de las bóvedas de gran luz y poco espesor se ha hecho muy frecuente, particularmente en Francia desde que se poseen los morteros de cemento romano para efectuar su trabazón. Estos morteros por su propiedad hidráulica, su gran duración y superior cohesión, tienen una ventaja muy notable con respecto al yeso, que pierde su resistencia, se destruye a la humedad y cuyo aumento de volumen al fraguar aumenta considerablemente el empuje de las bóvedas sobre los muros o pies derechos.

Cuando no se empleaba el cemento, la aplicación de las bóvedas delgadas de ladrillo y yeso, se limitaba generalmente a bóvedas interiores perfectamente protegidas por una cubierta, pero en la actualidad la gran adherencia del mortero de cemento permite ejecutar bóvedas tabicadas de espesor de dos o tres capas de ladrillo, las cuales sin fatigar demasiado los muros, reemplazan con ventaja los suelos de madera y aun las cubiertas cubriéndolas con una capa de cemento de 0,03 cm de espesor.

Ejemplos de dovelas constituidas con cemento

Citaremos diversos ejemplos de bóvedas ligeras construidas en Francia y sus posesiones, las cuales demuestran prácticamente las ventajas que acabamos de enunciar.

1º La bóveda que cubre el depósito de agua de Mers-el-Rebir cerca de Orán tienen 25 metros de longitud por 16 metros de anchura media; es en rincón de claustro, su flecha de 1,80 m y está formada de tres capas de ladrillo de 0,035 m y de una capa de cemento de 0,025 m; el todo está cubierto con una capa de hormigón magro de 0,15 m de espesor para preservar la bóveda y su capa de las influencias atmosféricas.

2º Las bóvedas esféricas que cubren los depósitos de agua de las ciudades de Beziers y Agde tienen 13,50 m y 16 m de diámetro en los arranques y 3,50 m y 8 metros de montañas, están formadas de dos capas de ladrillo y de una de mortero de cemento.

3º La bóveda ojiva de la iglesia de Barcelona de 13,50 m de luz, forma dos de dos y tres capas de ladrillo cubierta de una capa de mortero de cemento.

4º El taller de fabricación de cemento en Vassy que tiene 49,35 m de longitud por 18,60 m de anchura se ha cubierto con una bóveda de cañón seguido formada de tres capas de ladrillo de 0,028 m de espesor; su trasdós está cubierto de una capa de cemento sobre la cual se ha colocado una muy gran de tierra formando jardín.

5º Finalmente, los depósitos superiores que la Ciudad de París ha hecho construir para las aguas en Passy están cubiertas por una serie de bóvedas por arista, muy rebajadas, ocupando cada una un espacio cuadrado de 4 metros de lado y descansando sobre pilares cuadrados de ladrillo y cemento de 0,32 m de lado y 4 metros de altura. Estas bóvedas que no tienen más que 0,20 m de flecha y 0,08 m de espesor, comprendida una capa delgada de cemento, están formadas de dos capas de ladrillo delgado. El cemento está cubierto con una capa de mortero del mismo muy negro, cuyo objeto es preservar la construcción de los efectos inmediatos de la atmósfera.

Propiedades y uso del cemento de Cataluña

La piedra que produce el cemento en las inmediaciones de la Villa de Figueras donde éste se fabrica, tiene tal composición que encierra naturalmente y en proporciones convenientes todas las materias necesarias para dar cemento de superior calidad, de manera que la cantidad de arcilla que contienen es la más a propósito al objeto; en efecto, este material es eminentemente hidráulico, de una fuerza de cohesión extraordinaria y fragua con suma rapidez o casi instantáneamente: hay sin embargo, alguna variación en las proporciones de aquellas materias, que hace variar la bondad de las diferentes cementos, pero en general todos ellos son buenos.

Se emplean en obras hidráulicas de importancia destinadas a contener los impetus de las olas del mar o de las corrientes de los ríos, así como en todas las que necesiten fuerte y pronta solidificación, en cuyo caso el cemento se usa puro o sin mezcla alguna de arena, fraguando con gran rapidez, adquiriendo a los tres o cuatro minutos una dureza tal que ya resiste el empuje de las olas y siendo aquella al poco tiempo la misma que el ladrillo o piedra a que se ha adherido.

Emplease también con gran ventaja en obras subterráneas y expuestas a humedades; pero como en tal caso generalmente no se necesita una solidificación tan rápida como en los anteriormente citados, se suele mezclar una tercera parte o una mitad de arena bien limpia, obteniéndose también muy buenos resultados. Igualmente se emplea con muy buen éxito dicho cemento en la

construcción de bóvedas tabicadas de los sótanos de los edificios usándose entonces sin mezcla de arena y de un modo idéntico al yeso.

Si bien no hemos visto en este país ninguna bóveda tabicada construida con el material de que tratamos, que tenga las grandes dimensiones de las antes citadas de Francia, no dudamos, sin embargo, que se podrían ejecutar de la misma manera y que se obtendrán iguales ventajas: aquí el uso del cemento se reduce a lo puramente indispensable, es decir, que se aplica a aquellos trabajos en que por razón de humedades, se necesite pronta solidificación y perfecta impermeabilidad y no sea, por tanto, posible emplear el yeso ni morteros ordinarios: esto naturalmente es debido a la gran diferencia de precios, puesto que el cemento es mucho más caro que estos últimos materiales.

Bóvedas de escaleras

Su construcción en Cataluña

Siendo de una aplicación muy general, tanto en Cataluña como en otras provincias, las escaleras de ladrillo con bóvedas tabicadas del mismo material, explicaremos brevemente el modo de construirlas, particularmente en este país.

Hecho el trazado de los escalones y mesetas en las paredes de la caja de la escalera, se trazan las curvas de las bóvedas de manera que su figura se aproxime lo más posible a la recta que limita los escalones por la parte inferior, para que la escalera sea ligera. Hay varios métodos para este trazado que no describiremos por ser bastante conocidos; pero las más de las veces los albañiles de este país las hacen sin sujetarse a ninguno de ellos; sin embargo, suelen emplear el que vamos a describir.

Se traza un arco de círculo de unos 60° debajo de la meseta del primer tramo, dejando entre uno y otra una distancia algo mayor que la necesaria para el grueso de la bóveda de aquel: el centro está proximamente en la vertical de la meseta y el radio es el más conveniente para que dicho arco se una bien al siguiente, de que vamos a hablar: a continuación se traza otro arco de círculo tangente al anterior y de radio propio para que se aproxime la curva lo más posible a la recta de los escalones y se cumpla la condición antes expresada: las curvas de los demás tramos se trazan lo mismo procurando que por sus extremos inferiores terminen en el arco de enfrente de la bóveda correspondiente a la meseta del tramo anterior.

Concluido el trazado se abren las cajas o zarpas en que deben descansar las bóvedas, siguiendo las referidas curvas. La construcción de aquellas, que generalmente son tabicadas dobles es enteramente igual a la descrita para esta clase de bóvedas; sin embargo, en las de las escaleras hay la circunstancia de tener que unir las de los diferentes tramos: para esto se siguen diversos sistemas, consistiendo el empleado en Barcelona en construir la bóveda completa de un tramo, en apoyar después en la parte superior de su arco de frente las del tramo siguiente y así sucesivamente. Generalmente no se usan como en otras partes, cerchas ni listones, y salen, sin embargo, con toda la perfección y solidez deseables.

Cuando están construidas todas las bóvedas, se hacen los escalones y mesetas con materiales ligeros y las huellas y contrahuellas de ladrillo o baldosa.

Si las bóvedas son para escaleras grandes, se emplean cerchas, corriéndose éstas para la construcción desde la pared hacia el ojo de la escalera, análogamente como se ha dicho para un cañón seguido: en el mismo caso y particularmente cuando los escalones han de ser de sillería, se hacen las bóvedas de mayor espesor.

Generalmente para que tengan más resistencia y con objeto de quitar peso del lado del ojo de la escalera, suele darse a las bóvedas un poco de curvatura en sentido del ancho de aquella; procurando que bajen más del lado opuesto para que apoyen mejor sobre los muros.

En otras provincias en vez de unir las bóvedas del modo que acabamos de manifestar, suelen o formar una superficie curva que una las de los dos tramos contiguos o dejar una arista en la diagonal en que se verifica la unión. Este modo de construir tiene inconvenientes, tanto respecto a dificultad en la ejecución como tocante a la solidez de la obra; así pues, nos parece muy preferible el sistema seguido en Barcelona.

Bóvedas delgadas para suelos incombustibles

Su descripción

La condición de incombustibilidad tan necesaria para las construcciones industriales conduce a hacer aplicación de las bóvedas delgadas de ladrillo y cemento para formar los suelos y las cubiertas de las fábricas, docks, mercados y almacenes, así como de los talleres de tintoreros, C^a en que la humedad destruye muy pronto los suelos o las cubiertas de madera.

Estos últimos años, a imitación de lo que se practica hace mucho tiempo en Inglaterra, los Ingenieros franceses tienen gran tendencia a hacer incombustibles los suelos de los edificios industriales y fábricas de una gran superficie, ejecutándolos de bóvedas delgadas de ladrillo y cemento descansando sobre vigas de hierro forjado, de palastro o de hierro fundido, sostenidas por pilares de ladrillo y por columnas de hierro fundido. Estas bóvedas tienen ordinariamente de 2,75 m a 3 metros, y hasta 3,50 m de luz; son escarzanos con una flecha de 1/10 para los edificios y de 1/3 para los depósitos de mercancías pesadas. Estas proporciones varían según la naturaleza y magnitud de las cargas que hay que sostener y el destino de las construcciones. Muchas veces suelen colocarse en estas bóvedas tirantes de hierro que van de un muro a otro y se oponen completamente al empuje que pueda haber; así como también se hace pasar uno de aquellos por los extremos de las vigas que descansan sobre los muros, a fin de unir entre sí todas las partes de la mampostería. La sección de los tirantes es ordinariamente de 0,015 m a 0,020 de lado para los suelos de las fábricas y de 0,030 a 0,035 para los de los depósitos.

Se da a estas bóvedas, a partir de cada arranque y hasta el tercio del desarrollo de cada semi-bóveda, un espesor de 0,22 m y se reduce éste a 0,11 m para lo restante. Los ladrillos se colocan de canto, llenando perfectamente las juntas con mortero de cemento. Se hace el relleno de los senos con hormigón magro, que se cubre enseguida con una capa de yeso o de cemento, sobre la cual se colocan las baldosas o las tablas que deben formar el piso.

Bóvedas tabicadas sobre vigas de fundición construidas en Cataluña

En composición

También en este país en que la industria está tan desarrollada y en donde por tanto existe un sinnúmero de fábricas, se han buscado los medios de aplicar las bóvedas delgadas a la construcción de suelos incombustibles de gran superficie y sustituirlo a los de madera, en vista de las ventajas que aquellos ofrecen y de las condiciones que dichos edificios exigen.

Generalmente se componen estos suelos de bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso, descansando sobre grandes vigas de hierro fundido, sostenidas por columnas del mismo material; diferenciándose, por tanto, de los franceses anteriormente descritos, en que las bóvedas son tabicadas y en que se emplea el yeso en vez del cemento. Las vigas son rectas por la parte inferior y por la superior tienen la figura del sólido de igual resistencia con una flecha de 0,50 m: su sección es la de doble T siendo su cabeza inferior de mayores dimensiones que la superior, están apoyadas a distancias convenientes con estribos perpendiculares a su longitud que llevan en cada extremo un collar semicircular con dos aletas, que sirve para abrazar las cabezas de las columnas y unirse por medio de las aletas y correspondientes pernos a las vigas contiguas. Las columnas se colocan dividiendo el espacio entre los muros en varias naves, siendo la distancia de una a otra de aquellas de unos 7 metros, que es la longitud de cada viga: estas suelen colocarse a 3,310 m de eje a eje para formar las naves.

Las bóvedas se apoyan en la cabeza o reborde inferior de las vigas, teniendo según lo dicho, una luz algo menor de 3,3 10: se componen de tres capas, la inferior de ladrillo grueso y las dos superiores del mismo delgado. Son escarzanos con una flecha de unos 0,50 m. Se colocan tirantes de hierro de 0,030 m de diámetro que atravesando las vigas y fijándose a ellas, van a embutir en la mampostería de los muros; siendo dos el número de tirantes que atraviesan cada viga.

Para rellenar los senos se hacen unas contrabóvedas de dos capas de ladrillo delgado, aligerándose así la obra, puesto que después no hay más que completar el relleno o acabar de envasar con derribos o yesones, colocándose últimamente las baldosas que han de formar el piso.

Sus ventajas y resultados obtenidos

Estos suelos son preferibles a los de madera por reunir a las condiciones de incombustibilidad, resistencia y estabilidad que son necesarias en estos edificios, la de presentar más larga duración que los de aquel material; en cambio de estas ventajas hay la contra de ser peligroso el empleo de las vigas de hierro fundido y no merecen muchas veces suficiente confianza este material, ya por la desigual contracción al enfriarse, cuando se construye, ya por su naturaleza quebradiza o por las imperfecciones de la masa y facilidad del romperse; sin embargo, estos inconvenientes

se atenúan en gran manera mejorando la clase de fundición, según la práctica que tengan los operarios, y tanto es así que las vigas empleadas en las fábricas de Cataluña han dando en general buenos resultados, debido, sin duda a la buena fundición; así como también a la forma y dimensiones de aquellas que indudablemente son las más apropiadas y necesarias al objeto.

Su aplicación a los edificios militares

Veamos si estas bóvedas tendrían una aplicación útil empleadas como suelos en los edificios militares.

Es indudable que en virtud de las ventajas que ofrecen las vigas de hierro fundido comparadas a las de madera, será siempre preferible un suelo en que dichas piezas sean de aquel material; sin embargo, estas bóvedas sobre vigas de fundición sostenidas por columnas, no nos parecen de gran utilidad para un edificio militar, particularmente para un cuartel por las razones siguientes : 1º los inconvenientes citados de que adolecen las vigas de hierro fundido , que muchas veces son inevitables, exponen al material a accidentes de ruptura, que es más fácil tengan lugar en uno de estos edificios donde a veces se acumula en un punto un gran peso, en una fábrica, en

que generalmente aquel está repartido uniformemente: 2º las precauciones que es necesario tomar contra aquellos accidentes exigen que las secciones transversales de las vigas de hierro fundido sean de gran superficie, lo cual unido a la magnitud de la flecha de las bóvedas, hace que se necesite un gran espesor de piso y que éste sea sumamente pesado. 3º como para un establecimiento fabril se necesitan grandes salas lo más general es tener que ejecutar suelos de grandes dimensiones, tanto en longitud como en anchura y que satisfagan a las condiciones antes expresadas; por lo que nos parece está bien entendida la aplicación de estas bóvedas; pero en un cuartel en que generalmente las crujías, son de mucha longitud a poca anchura, no hay necesidad de explicar aquellas grandes vigas, de construir bóvedas de tanta magnitud, ni de usar columnas: verdad es que podrían colocarse las primeras de un muro al opuesto, ahorrándose las últimas; pero aún así creemos poco conveniente la aplicación de estos suelos y que sería hacer un gasto inútil o por lo menos innecesario. Esto lo decimos con tanto más motivo, por ? al hablar de los suelos de bovedillas, descansando sobre viguetas de hierro forjado, veremos las grandes ventajas que ofrecen por todos conceptos, y por tanto la conveniencia de su aplicación a los cuarteles; sin embargo, lejos de excluir de éstos el hierro fundido, lo creemos muy ventajoso para columnas,

arcos, tornapuntas, curvas para armaduras de cubiertas y demás construcciones en que este material esté sujeto a presiones que es como mejor resiste y empleado así, es indudable que dará gran estabilidad y resistencia a las partes de la obra que se le haga sostener.

Suelos de bovedillas*Sobre viguetas de madera*

Los suelos de bovedillas de ladrillo es obra de las construcciones que se emplean continuamente en este país; haremos por tanto una ligera descripción del modo de ejecutarlas.

Consiste éste en colocar las viguetas del piso a 0,412m una de otra, distancia conveniente para que entre dos contiguas quepan tres ladrillos delgados, formando una ligera curva o arco escarzano; antes de verificar aquella colocación, se labra en ambos lados de cada vigueta y todo lo largo de ella, los encajes en la forma conveniente para hacer descansar en ellos las bovedillas: éstas se componen de dos capas de ladrillo tomado con yeso y en cada una de ellas, así que está en parte construida la primera capa, se empieza a colocar la segunda, echando para ello una

tortada de yeso sobre aquella y poniendo los ladrillos a juntas encontradas. Concluida la bovedilla, se echa en su trasdós, una lechada de yeso para relleno de las juntas: se llenan los pequeños senos que quedan entre las bovedillas y las viguetas con escombros para nivelar el piso y poder proceder a la colocación del embaldosado.

Cuando las viguetas y bovedillas se dejan descubiertas por la parte inferior para que formen el techo de las habitaciones, se labran bien las primeras haciéndoles molduras y las segundas se enlucen para dejar un techo perfectamente concluido, pero en el día la más general es formar los techos con cielos rasos de yeso, en cuyo caso quedando cubiertas las viguetas y bovedillas por aquellos no hay del labrado ni enlucido expresados, clavándose entonces los cañizos de los cielos rasos en las viguetas.

Sobre viguetas de hierro

Hace algunos años está muy en uso en la Ciudad de Barcelona la construcción de suelos de bovedillas sobre viguetas de hierro forjado. Su disposición es igual enteramente a la de que acabamos de tratar, sin más diferencia que las viguetas se colocan a mayor distancia una de otras su forma es de doble T y se construyen de diferentes dimensiones en altura y espesor, según la longitud que deban tener y resistencia que necesiten, colocándolas a la distancia conveniente para satisfacer a las condiciones que exija el peso de que se trata: esta distancia llega muchas veces a ser de 1 metro, en cuyo caso el arco de cada bovedilla está formado de 5 ladrillos delgados, en vez de los 3 que hemos dicho anteriormente las bovedillas descansan en la cabeza inferior de las viguetas. Por lo demás la construcción de aquellas es completamente la misma que antes hemos manifestado.

Cuando se quieren formar los techos con cielos rasos de yeso, se colocan a cierta distancia unas de otras y perpendicularmente a las viguetas unas piezas de madera o listones que encajan perfectamente por sus extremos en la cabeza inferior de aquellas: a estos listones es donde se clavan los cañizos de los cielos rasos.

Sus ventajas y resultados obtenidos

Estos suelos, además de reunir las mismas ventajas que los formados con bóvedas sobre vigas de fundición, sin tener sus inconvenientes, ofrecen otras muchas que los hace muy superiores, tanto a los de bovedillas con viguetas de madera, como también respecto a los que acabamos de citar.

En efecto, los suelos hechos con viguetas de hierro permiten reducir el espesor del piso a una cantidad muchísimo menor que los de madera; presentan más rigidez y más larga duración que éstos, ya por la mayor flexión de aquella, que al cabo de cierto tiempo inutiliza el piso, cuanto por la putrefacción a que están expuestos los empotramientos: finalmente los de hierro son incombustibles; y si bien en obras de gran consideración cuestan algo más que los de madera, en virtud de su mayor duración ofrecen mucha más economía con el tiempo.

Por otra parte, sábase que el hierro forjado resiste mucho a la tensión y es más a propósito que el fundido para mantener grandes cargas y aguantar fuertes percusiones a causa de su ductilidad y estructura fibrosa; así pues es siempre el preferido para resistir como vigas en edificios y demás casos en que debo contrarrestar más esfuerzos de tensión que de compresión.

No es pues extraño, en vista de las ventajosas circunstancias de estos suelos, que en las muchas edificaciones de la Capital de este Principado en que se han empleado, se hayan obtenido los buenos resultados que eran de preveer, por cuya razón se ve que su uso se va extendiendo cada día más, tanto en los edificios particulares, como en los públicos.

Su aplicación a los edificios militares

Vistas las muchas ventajas que en todos conceptos ofrecen estos suelos y su gran superioridad, tanto respecto a los de bovedillas con viguetas de madera, como con relación a los de bóvedas con vigas de hierro fundido, no dudamos en reconocer serían de una muy útil y conveniente aplicación a los cuarteles. Para ello no creemos hubiese que hacer variación ninguna en el modo de ejecutarlos en los demás edificios, dando, por supuesto, a las viguetas las dimensiones necesarias y colocandolas a la distancia que exigiera la resistencia que se desease, sin embargo, sí se consideran convenientes, se podría verificar el asiento de las viguetas en los muros sobre bases de piedra, a fin de repartir la carga más uniformemente, enlazándolas por medio de pernos a aquellos: también podrían emplearse los tirantes, que muchas veces se acostumbra, pero nos

parece que en general no habría necesidad de ellos, pues las bovedillas sujetan el sistema de tal suerte que hacen imposible todo movimiento : finalmente podría adoptarse si se considera preferible el pavimento de madera para obtener mayor resistencia a la percusión que así se reparte en una gran superficie elástica, antes de llegar a la más rígida de hierro y mampostería.

Conclusión

Materia es la de los suelos y cubiertas de los edificios que por su mucha importancia merecen estudiarse con toda detención teórica y prácticamente para llegar a obtener lo que mejores resultados ofrezca y si es posible presente completa seguridad ; pues es indudable que generalmente en todas las construcciones antiguas son las partes de ellas que necesitan continuas reparaciones, las que además del gasto que continuamente exigen exponen a sus habitantes a accidentes desgraciados; mucho más en la actualidad en que por estar ocultas a la vista, a causa de los cielos rasos, sucede muchas veces que su estado de deterioro no se echa de ver, ni se tiene noticia de su inminente ruina, hasta que ésta se ha verificado completamente.

Lérida, 1º de Agosto de 1869

El Comandante Capitán de Ingenieros

Ramón de Ballesteros

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1892. «Resistencia de bóvedas tabicadas», *Memorial del Cuerpo de Ingenieros*, n° 2, pp. 54-55 y n° 8, pp. 251-253
1897. «Fireproofing tests», *The American Architect and Building News*, vol. 56, n° 1115, pp. 45-46
1905. «Two interesting examples of fireproof construction», *The Brickbuilder*, pp. 36
- Abraham, Pol. 1934. *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*. Paris: Vicent, Fréal et Cie.
- Almagro, A. 1981. «La torre de Ambeles». En *Volumen homenaje a Martin Almagro Basch*. Julio-Diciembre 1981, n° 66. Teruel: Instituto de Estudios Turolenses
- _____. 1986. «El yeso, material mudejar». En *Actas del III Simposio Internacional de Mudejarismo*: 453-457 (separata). Teruel: Instituto de Estudios Turolenses.
- _____. 1991. «La torre de Romilla. Una torre nazarí en la vega de Granada». *Al Qantara* vol XII, Fasc. 1: 225-250.
- _____. 2001. «Un aspecto constructivo de las bóvedas en Al-Andalus». *Al Qantara* (22): 147-170.
- _____. 2012. «Bóvedas tabicadas en la Cartuja de Granada: el final de un proceso evolutivo». *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Almagro, A. y Arce, I. 1996. «El alcazar omeya de Amman, crisol de técnicas constructivas». En *Actas del I Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, edited by A. de las Casas, Huerta, Santiago y Rabasa, Enrique. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Araguas, P. 1986. «L'église de San Martin de Belchite». *Mélanges de la Casa de Velázquez* 22:85-109.
- _____. 1987. «Architecture de brique et architecture mudéjar». *Mélanges de la Casa de Velázquez* 23:173-200.

BIBLIOGRAFÍA

- _____. 1998. «L'Acte de naissance de la "boveda tabicada", ou, le certificat de naturalisation de la "voûte catalane"». *Société Française d'Archéologie*:129-136.
- _____. 1999. «Voûte a la rousillon». *Butlletí de la Reial Academia Catalana de Belles Arts Sant Jordi* 13:173-185.
- _____. 2003. *Brique et architecture dans l' Espagne Médiévale (XII-XV siècle)*. Madrid: Casa de Velazquez.
- Audoy. 1820. Mémoire sur la poussée des voûtes en berceau. *Mémorial de l'Officier du Génie*. n1 4: pp. 1-96, láms.I-VI.
- Bails, B. 1796. *Elementos de Matemáticas*. Tomo IX. Parte I. *Que trata de la arquitectura civil*. Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra. Facs. ed. Murcia: C.O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1983.
- _____. 1802. *Diccionario de Arquitectura Civil. Obra Póstuma de Don Benito Bails*. Madrid: Imprenta de la viuda de Ibarra, 1802. (Edición facs. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias Fecha de pub: 1973)
- Ballesteros, R. *Bóvedas tabicadas y otras, aplicadas a construcciones modernas*. Manuscrito inédito. Lérida, 1869.
- Ballonga y Fernandez 2011. *La farga catalana*. Tarrasa: Publicaciones del MNACTEC
- Bannister, T.C. 1950. «The first iron frame building». *The architectural review*, April 1950: 231-246.
- _____. 1968. «The Roussillon vault. The apotheosis of a 'Folk' construction». *Journal of the Society of Architectural Historians*, 27 (3):163-175.
- Bares, M. y Nobile, M. «Volte tabicadas nelle grande isole del Mediterraneo: Sicilia e Sardegna (XV-XVIII secolo)» *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Barlow, William Henry. 1846. On the Existence (practically) of the line of equal Horizontal Thrust in Arches, and the mode of determining it by Geometrical Construction. *Minutes and Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 5: pp. 162-182.
- Bassegoda i Amigó, J. 1936. *Últimes evolucions de la volta ogival*. Barcelona: Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi.

- Bassegoda Musté, B. 1947. La bóveda catalana. Boletín de Información de la Dirección General de Arquitectura 2 (2):15-16.
- _____. 1952. *Bóvedas tabicadas*. Madrid: C.S.I.C.
- Bassegoda Nonell, J. 1978. *La cerámica popular en la arquitectura gótica*. Barcelona: Eds. del Nuevo Arte Thor.
- Bayó, Jaime. 1910. La bóveda tabicada. Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña. : pp.157-84
- Benavente, P. M.. 1763. [traducción de P.C.] *Elementos de toda la Architectura Civil, con las más singulares observaciones de los modernos. los quales aumentados por el mismo, da traducidos al castellano el P. Miguel Benavente, Maestro Mathematico en el mismo Colegio*. Madrid: Joachim Ibarra.
- Bergós Massó, J. 1936. *Formulario técnico de construcciones*. Barcelona: Bosch.
- _____. 1945. Construcciones urbanas y rurales: Composición de viviendas, alojamientos para animales, almacenes y tiendas, construcción, redacción de proyectos. Barcelona: Bosch.
- _____. 1953. *Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental*. Barcelona: Bosch. .
- _____. 1965 (s.a. en el original). *Tabicados huecos. Bases para las dimensiones de las bóvedas y cubiertas del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia*. Barcelona: Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña y Baleares.
- Besenval, R. 1984. *Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien*. Paris: Editions Recherche sur les Civilisations.
- Block, P. 2004 *Thust Network Analysis*. Ph. Thesis presentada en el departamento de Arquitectura del M.I.T.
- Blondel, J.F y Patté, P. 1771-1777. *Cours d'Architectue, ou traité de la décoration, distribution et construction des botiments...continué par M. Patte*. Paris: Chez la Veuve Desaint.
- Boistard, L.C. 1810. Expériences sur la stabilité des voûtes. *Recueil de divers mémoires extraits de la bibliothèque impériale des ponts et chaussées a l'usage de MM. les*

BIBLIOGRAFÍA

- ingénieurs*. editado por P. Lesage. Paris: Chez Firmin Didot: Vol.2, pp. 171-217, lám. XI-XVI.X-0262
- Borras Gualis, G. 1985. *Arte mudejar aragonés*. Zaragoza: Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Zaragoza, Aragón y Rioja.
- Bosch Reitg, Ignacio. 1949. La bóveda vaida tabicada. *Revista Nacional de Arquitectura*. : pp.185-99.
- Brizguz y Bru, A. G. 1738. *Escuela de Arquitectura Civil, en que se contienen los ordenes de Arquitectura, la distribución de los planos de templo y casas, y el conocimiento de lo materiales*. Valencia: Oficina de Joseph de Orga. Edición fasc. Zaragoza: Colección Arquitecturas de los Precursores, COA de Aragón, 1992.
- Burgos, A. 2009a. *Los orígenes del hormigón armado en España*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Burgos, A. 2009b. *La antigua industria del cemento industrial en Martos*.
- Cabrera, A., Sala, M. y Jordi, C. 2005. *Les voltes de quatre punts. Estudi constructiu i estructural de les cases barates*. Gerona: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, Universidad y Diputación de Gerona.
- Campbell, J. 2004. *Ladrillo : historia universal*. Ed. Blume.
- Cardellach, Félix. 1910. *Filosofía de las Estructuras. Filiación racional de las formas resistentes empleadas en la ingeniería y en la arquitectura histórica y moderna*. Barcelona: Librería de Agustín Bosch.
- Casals, A. et al. 2012. «Las razones del uso masivo de la bóveda tabicada en el Hospital de Sant Pau de Barcelona: una hipótesis para el debate» En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Chamorro, M.A., Llorens J. y Llorens. M. 2012. «Ignasi Bosch Reitg (1910-1985): una patente para construir bóvedas tabicadas» En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Choisy, A. 1873. *L'art de bâtir chez les romains*. Paris: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et Cie.

- _____. 1883. *L'art de bâtir chez les byzantins*. Paris: Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques, 1883
- _____. 1997. *El arte de construir en Bizancio*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- _____. 1999. *El arte de construir en Roma*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Claudel, J. and Laroque, L. [1850] 1870. *Pratique de L'art de Construire*, 4^e ed. Paris: Dunod Ed.
- Collard, 1893. L'essai d'une voûte en briques. *Annales des Ponts et Chaussées*, n^o 42: 874-876
- Collins, G. R. 1968. «The transfer of thin masonry vaulting from Spain to America». *Journal of the Society of Architectural Historians* 27:176-201.
- Conejo, A. 2012. «Volta de rajola, volta de maó de plà o volta catalana: reflexiones en torno a las bóvedas tabicadas en Cataluña durante los siglos del gótico». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Coppet Berg, L. 1889. *Safe Building. A treatise*. Boston: Ticknor and Company.
- Corredor, J. y Montaner, J.M. 1984. *Arquitectura Industrial en Cataluña, del 1732 al 1929*. Barcelona: Caja de Cataluña
- Coulomb, C. A. 1773. Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par Divers Savants et lus dans ses Assemblées (Paris)*. Vol. 7: pp. 343-382
- Couplet, P. 1729. De la poussée des voûtes. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*. : pp. 79-117, lám. 4-7.
- Couplet, P. 1730. Seconde partie de l'examen de la poussée des voûtes. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences Paris*. : pp. 117-141, lám. 6-7.
- Cristini, V. 2008. «Estudio de las fábricas de ladrillo en Valencia: análisis mensiocronológico y técnicas de acabado (s. XVII-XVIII)». *Arqueología de la arquitectura*, n^o 5, enero-diciembre 2008: 243-252

BIBLIOGRAFÍA

- _____. 2009. «Rajoles valencianes: Características de fábricas tradicionales en ladrillo» En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Valencia. eds. Huerta, S., Marín, R., Soler, V., Zaragoza, A. Madrid: Instituto Juan de Herrera 2009.
- Cubbit T. 1841. «Experiments on the strength of brick and tile arches». *Minutes of Proce.* p 136. ICE
- Danyzy, A. A. H. 1732. Extrait du mémoire de M. Danyzy, sur la Poussée des Voûtes. *Assemblée publique de la Société des sciences de Montpellier*. [7]: pp. 3-15.
- D'Olivier, A. 1837. «Relatif à la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi du recherches expérimentales sur la poussée decs sortes des voûtes», *Annales des Ponts et Chaussées*, 1^o serie, 1^o sem., pp. 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*. : pp. 37-48
- Dunn, W. 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): pp. 401-412, 25 figs.X-0568
- _____. 1908. The Principles of Dome Construction. *Architectural Review*. Vol. 23: pp. 63-73; 108-112.X-0116
- Eddy, Henry T. 1878. *Researches in Graphical Statics*. New York: Van Nostrand. V-06
- E.U.I.E.A. *Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo-americana*. Espasa. Barcelona, s.f.
- Espie, F.-F., comte d'. 1754. *Maniere de rendre toutes sortes d'edifices incombustibles, ou traie sur la construction des voltes, faites avec des briques el du platre, dites voutes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briquette*. Paris: Vve. Duchesne.
- Espinosa, P.C. 1859. *Manual de Construcciones de Albañilería, por Don P.C. Espinosa*. Madrid: Imprenta a cargo de Severiano Baz. Facs. Madrid: Real Academia Española, Consejo General de la Arquitectura Técnica de España, 1991.
- Feliu Torras, A. 2011 (ed). *La Barcelona del ferro. A proposit de Joan Torras Guardiola*. Barcelona.
- Fernandez, M. 2006. *La fábrica de ciment Asland*. Publicaciones del MNACTEC

- Folguera, F. *La volta de mahó de plá*. Manuscrito inédito (ca. 1915). Barcelona.
- Fontaine, M.H. 1865. «Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques», *Nouvelles Annales de la Construction*, vol. 11, pp. 149-159, lám. 45
- Fornés y Gurrea, M. 1841. *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Imprenta del Cabrerizo. Facs. ed. Valencia: Librería Paris-Valencia, 1993.
- _____. 1846. *Album de proyectos originales de arquitectura, acompañado de lecciones explicativas*. Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo. Facs. ed. Madrid: Ediciones Poniente, 1982.
- Frattaruolo, M. R. 2000. «Las bóvedas in folio: tradición y continuidad» en *Actas del 3º Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Sevilla. eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
- Galarza, M. 2009. «La restauracion barroca de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. La bóveda tabicada que soporta los frescos de Palomino». En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Valencia. eds. Huerta, S., Marín, R., Soler, V., Zaragoza, A. Madrid: Instituto Juan de Herrera 2009.
- Gárate, I. 1999. *Artes de los yesos: yeserías y estucos*. Madrid: Munilla-Leria.
- García Berruguilla, J. 1747. *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría...* Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados. Facs. ed. Murcia: C.O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1979.
- García-Gutierrez Mosteiro 1992. «La obra arquitectónica de Juan Bautista Lázaro». *Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando*. Nº 74: 446-4453 (separata)
- _____. 1996. «El sistema de bóvedas tabicadas en Madrid: de Juan Bautista Lázaro (1849-1919) a Luis Moya (1904-1990) ». En *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid: eds. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU.
- García Pérez, J. 1996-97. *Arquitectura Industrial en Alcoy en el siglo XIX*. *Ars Longa: Cuadernos de Arte* (7-8):125-136.
- _____. 2001. *Arquitectura Industrial en Alcoy: siglo XIX*. Alicante: Instituto alicantino de cultura Juan Gil-Albert.

BIBLIOGRAFÍA

- Gauthey, E. M. 1771. *Mémoire sur l'application des principes de la Méchanique à la construction des voûtes et des domes, dans lequel on examine le Problème proposé par M. Patte, relativement à la construction de la Coupole de l'Eglise Saint-Genenieve de Paris*. Dijon: Louis Nicolas Frantin.
- Ger y Lóbez, F. 1869. *Manual de Construcción Civil*. Badajoz: Imp. José Santamaría.
- Gerstner, F. J. von. 1831-34. *Handbuch der Mechanik*. Prag: Spurny
- Gil Saura, Y. 2012. «A uso y costumbre de buen oficial: sobre la construcción y ruina de bóvedas tabicadas en la Valencia de los siglos XVII y XVIII». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Goday, J. 1934. *Estudi històric i mètodes de càlcul de les voltes de maó de pla*. Barcelona: Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi.
- Gómez Ferrer, M. 2003. «Bóvedas tabicadas en Valencia en los siglos XIV a XVI». En *Una arquitectura gótica mediterranea*. eds. Mira, E. Y Zaragoza, A. vol. 2: 135-156
- _____. 2009 «Intervenciones de reconstrucción y restauración en El Palacio Real de Valencia durante el siglo XV». En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Valencia. eds. Huerta, S., Marín, R., Soler, V., Zaragoza, A. Madrid: Instituto Juan de Herrera 2009.
- _____. 2012. «Las bóvedas tabicadas en la arquitectura valenciana». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- González Moreno-Navarro, J. L. 1993. *El legado oculto de Vitrubio*. Madrid: Alianza Editorial.
- González Moreno-Navarro, J. L. 2004. «La bóveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial» en *Construcción de bóvedas tabicadas*. Truñó. A. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- González Moreno-Navarro, J. L. et al. 2011. «Los sistemas de estribado de las bóvedas tabicadas del hospital de Sant Pau Barcelona: tirantes, zunchos y pórticos» en *Actas del VII Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Santiago de Compostela, 26-29 octubre 2011*. Huerta, S. et al (eds). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

- Guastavino, R. 1893. *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timbrel vault*. Boston: Ticknor and Company.
- Guastavino, R. 2006 . *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Huerta S. (ed). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Gumà y Esteve, R. 1996. *Origen i evolució de les tipologies edificatòries i característiques constructives dels edificis de la indústria tèxtil a catalunya (període 1818-1925)*. Tesis Doctoral presentada en el Dpto. de Construccions Arquitectòniques. ETSAB. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hereu Payet, P. *L'Arquitectura d'Elias Rogent: catàleg exposició*. Barcelona: Colegi Oficial d'Arquitectes de Catalunya, 1986.
- Heyman, J. 1977. *Equilibrium of shell structures*. Oxford. Oxford University Press
- _____. 1982. *The Masonry Arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- _____. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Colección de ensayos. Huerta, S. (ed). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- _____. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- _____. 2009. «The establishment of plastic design in the U.K.» *Proceedings of ICE. Engineering History and Heritage* nº 162, feb. 2009, pp. 7-11.
- Huerta 1996. «La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico». *Obra Pública. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*.
- _____. 2001(ed) *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU
- _____. 2001b. La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico, con particular atención a la contribución de los Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*, ed. S. Huerta. 87-112. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU
- _____. 2003. «The mechanics of timbrel vaults: a historical outline». *Essays in the History of Mechanics*. A. Becchi, M. Corradi, F. Focé y O. Pedemonte Eds. Basel: Birkhäuser: pp. 89-133.

BIBLIOGRAFÍA

- _____. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- _____. 2008. «The Analysis of Masonry Architecture: A Historical Approach:» *Architectura Science Review*, vol. 51.4, pp. 297-328.
- _____. 2012. «Análisis estructural de bóvedas tabicadas: la cúpula interior de la Basílica de la Virgen de los Desamparados en Valencia». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia
- Huerta, S. y López G. 1997 «Stability and consolidation of an ashlar barrel vault with great deformations: the church of Guimarei». *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings*. ed. por S. Sánchez-Beitia y C. A. Brebbia. Southampton: Computational Mechanics Publications: pp. 587-96.
- Huerta S., López G. y Redondo E., 2001. «Bibliografía sobre Guastavino y la construcción tabicada». En *Las bóvedas de Guastavino en América*, ed. S. Huerta. 371-393. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU
- Ibañez, J. 2005. *Arquitectura aragonesa del siglo XVI : propuestas de renovación en tiempos de Hernando de Aragón (1539-1575)*. Zaragoza: Institución Fernando el Católico.
- _____. 2012. «De la crucería al cortado: importación, implantación y desarrollo de las bóvedas tabicadas en Aragón y su decoración a lo largo de los siglos XVI y XVII». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ibañez Gómez, M., Santana Ezkerra, A., Zabala LLanos, M. 1988. *Arqueología Industrial en Vizcaya*. 1ª ed. Bilbao: Universidad de Deusto-DEIKER.
- Iñiguez Almech, F. 2002. *Arquitectura Aragonesa: compilación de artículos*. Zaragoza: Institución Fernando el Católico.
- Jenkin, H.C. Fleeming. 1876. Bridges. *Encyclopaedia Britannica*. 9th edition, Edinburgh: Adam and Charles Black: Vol. 2, pp. 284-341
- Kranzberg y Pursell 1981. *Historia de la Tecnología en Occidente hasta 1900*. Barcelona: Gustavo Gili.

- Lagarde, L. *Nouveau manuel complet du constructeur en général et des agents-voyers*. Paris: Roret, 1849
- Lau, Wanda. 2006. *Equilibrium analysis of masonry domes*. Ms. Thesis. Dep. Architecture. MIT
- Laugier, M.A. 1753. *Essai sur l'architecture*. Paris.
- Laugier, M. A. 1755. *Essai sur l'architecture. Nouvelle edition, revue, corrigée et augmenté*. Paris.
- La Hire, P. 1695. *Traité de mécanique, ou l'on explique tout ce qui est nécessaire dans la pratique des Arts, et les propriétés des corps pesants lesquelles ont eu plus grand usage dans la Physique*. Paris: Imprimerie Royal.
- La Hire, P. 1702. Remarques sur la forme de quelques arcs dont on se sert en architecture. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*. : pp. 94-97, 2 figs.
- Lau, W. 2004. *Equilibrium analysis of Masonry domes*. Ms. Thesis presentada en el departamento de Arquitectura del M.I.T.
- Lemmonier, H. 1915-1920 *Procès-verbaux de l'Académie royale d'architecture, 1671-1793, publiés pour la Société de l'art français*. Tome VI: 1744-58. Paris: E. Champion.
- Leonardo da Vinci. 1493. Tratado de Estática y Mechanica. En italiano, Escrito en el año 1493 como se ve a la buelta del folio 1E. Contiene 191 folios y está al revés. Ms. *Biblioteca Nacional, Madrid*. : Ed. fás. Madrid: Taurus y McGraw-Hill, 1974.
- Llorens. M., Llorens J. y Chamorro, M.A. 2012. «El análisis experimental aplicado a bóvedas tabicadas» En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mariategui, E. 1876. *Glosario de algunos Antiguos Vocablos de Arquitectura y de sus Artes Auxiliares. Por el Coronel de ejercito Don Eduardo Mariategui*. Madrid: Imprenta de Memorial de Ingenieros.
- Marías, F. 1991. «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI». *Les chantiers de la Renaissance*. J. Guillaume (ed.). París: Picard: pp. 71-83.

BIBLIOGRAFÍA

- _____. 1883-86. *La arquitectura del Renacimiento en Toledo (1541-1631)*. Toledo: Instituto Provincial de Investigaciones y Estudios Toledanos.
- _____. 2007. *El Hospital Tavera de Toledo*. Madrid: Fundación Casa Ducal de Medinaceli
- Marcos y Bausá, R. 1879. *Manual del Albañil*. Tercera edición. Madrid: Dirección y Administración, 1879. Facs. Valladolid: Editorial Maxtor, 2003.
- Marín, R. 2012. «Abovedamientos tabicados en las transformaciones interiores de las iglesias valencianas de finales del XVIII». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martín, A. 2003. *Evolución de la tipología estructural en la arquitectura industrial asturiana*. Tesis Doctoral presentada en el departamento de Construcción e Ingeniería de fabricación. Universidad de Oviedo
- Martín Jiménez, C. 2009. «La cúpula tabicada de San Juan de la Penitencia». En *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Valencia 21-24 octubre 2009*. Huerta, S. et al (eds). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Martín Jiménez, C. y García Muñoz, J. 2012 «La construcción tabicada hoy». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragoza, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martorell, J. 1910. Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana moderna. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*. : pp. 119-146
- Marv y Mayer, J. 1888. *Mecánica aplicada a las construcciones*. Madrid: Imprenta y Litografía de Julián Palacios.
- Matallana, M. 1848. *Vocabulario de Arquitectura Civil*. Madrid: Imprenta de Don Francisco Rodríguez.
- Méry, E. 1840. Mémoire sur l'equilibre des votes en berceau. *Annales des Ponts et Chaussées*. : pp. 50-70, planches 133-134
- Miranda et al. 1986. «Rafael Guastavino y la construcción cohesiva». *Quaderns*, n 171, pp. 78-84.

- Mochi G. 2001. «Elementos para una historia de la construcción tabicada». En *Las bóvedas de Guastavino en América*, ed. S. Huerta. 113-146. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Moseley, H. 1833. On a new principle in statics, called the principle of least pressure. *Philosophical Magazine*. Vol. 3: pp. 285-288.
- Moya Blanco, L. 1947. *Bóvedas Tabicadas*. Madrid: Ministerio de la Gobernación. Dirección General de Arquitectura
- Música, S. 1918. *Geografía General del País Vasco-Navarro. Provincia de Guipuzcoa*. Barcelona.
- Muller, J. 1699-1784. *Tratado de fortificación a Arte de construir los edificios militares y civiles, escrito en inglés por Juan Muller; traducido en castellano..* Barcelona: Thomas Piferrer.
- Nacente, F. 1890. *El constructor moderno, Tratado Teórico y Práctico de Arquitectura y Albañilería*. Barcelona: Ignacio Monrós y Compañía. Texto y 244 láminas.
- Nadal, J. 1975. *El fracaso de la Revolución industrial en España*. Edited by J. Fontana. 1ª ed, *Ariel Historia*. Barcelona: Ariel.
- Nadal, J. y Carreras, A. 1990. *Pautas regionales de la industrialización española*. Edited by J. y. T. Nadal, Jaume. 1ª ed, *Ariel Historia, sección Historia Económica*. Barcelona: Ariel.
- Navascués Palacio, P. 2007. *Arquitectura e ingeniería del hierro en España*. Madrid: Ediciones el Viso.
- Newby, F. 2001. *Early Reinforced Concrete*. Vol. 11, *Studies in the History of Civil Engineering*. Brown, J. (ed). Aldershot-Hampshire: Ashgate.
- Ochsendorf, J. 2010. *Guastavino vaulting. The art of structural tile*. New York: Princenton Architectural Press.
- Ortiz y Sanz, J. 1787. *Los Diez Libros de Arquitectura de M. Vitruvio Polión. Traducidos del latín, y comentados por Don Joseph Ortíz y Sanz*. Madrid: Imprenta Real, 1787. Facs. Barcelona: Serie Arte y Arquitectura, Editorial Alta Fulla, 1987.
- Palomar Collado, P. *La industria del cemento en España*. 1940.

BIBLIOGRAFÍA

- Pardo, M. 1885. *Materiales de Construcción*, por D. Manuel Pardo, ingeniero jefe de caminos, canales y puertos y profesor de la escuela. Texto. Madrid: Imprenta y fundición de Manuel Tello, impresor de cámara de S. M., 1885. Texto y Atlas de 28 láminas.
- Paredes Guillén, V. 1883. *Construcción sin cimbra de las bóvedas de ladrillo con toda clase de morteros*. Ms. Archivo Histórico Provincial de Cáceres.
- Pereda Bacigalupi, A. 1953. *Bóvedas tabicadas. Cálculo y ejemplos resueltos*. Santander: Editorial Cantabria.
- Pflueger, A. 1965. *Estática elemental de cáscaras*. 2a ed. Buenos Aires: EUDEBA Editorial Universitaria.
- Plo y Camín, A. 1767. *El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor, dividido en tres libros...El II (contiene) la práctica de hacer y medir todo género de bóvedas y edificios de arquitectura*. Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar. Facs. ed. Valencia: Librería Paris-Valencia, 1995.
- Poncelet, J.V. 1852. Examen critique et historique des principales théories ou solutions concernant l'équilibre des voûtes. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*. Vol. 35, n1 17: pp. 494-502, 531-540, 577-587.
- Rankine, W. J. M. 1858. *A Manual of Applied Mechanics*. London: Charles Griffin.
- Rebolledo, J. 1875. *Construcción General*, por D. Jose A. Rebolledo, ingeniero jefe y profesor de la Escuela de caminos, canales y puertos, individuo de número de la Sociedad Arqueológica Tarraconense, etc. Madrid: Imprenta y fundición de J. Antonio García. Texto y Atlas de 35 láminas.
- Reese, M. 2008. *Structural Analysis and assesment of Guastavino vaulting*. Ms. Thesis presentada en el departamento de Arquitectura del M.I.T.
- Reese, M. 2011. *Structural Analysis and assesment of Guastavino vaulting*. Villasar de Dalt: Ayuntamiento de Villasar de Dalt.
- Renart, J. 4^o *Quincenario*. Manuscrito inédito, ca. 1810. Barcelona.
- Richardson, M. y Stevens, M.A. (eds), 2001. *John Soane arquitecto: maestro del espacio y de la luz*. Londres: The British Council
- Roca Rosell, A. y Sanchez Ron, J.M. 1990. *Esteban Terradas (1883-1950). Ciencia y técnica en la España contemporánea*. Madrid: INTA, Ediciones del Serbal.

- Rondelet, J. 1802. *Traité Théorique et Pratique de l'Art de Batir*. Paris: Chez L'auteur
- Rosell, J. y Serra I. 1987. «Els estudis d'Esteve Terrades sobre la volta de maó de plà». En *Cinquanta anys de ciència i tècnica a Catalunya*, 23-33. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- Rosell, J. 1996. *La construcció en l'arquitectura de Barcelona a finals del segle XVIII*. Tesis Doctoral presentada en el Departamento de Composició Arquitectónica de la ETSAB.
- _____. 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
- Rosenthal, E. E. 1990. *La catedral de Granada. Un estudio sobre el Renacimiento español*. Granada: Universidad de Granada
- Sanchez Leal, J. y Pizarro Gómez, F.J. 2004. *El tratado de bóvedas sin cimbra de Vicente Paredes Guillen*. Badajoz: Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y uso de arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i. Fasc. Madrid: Albatros Ediciones, 1989.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1663. *Arte y uso de arquitectura. Segunda parte*. Madrid: s.i. Fasc. Madrid: Albatros Ediciones, 1989.
- Santacreu Soler, J. M. 1991. El Patrimonio arqueológico industrial de Alcoy. *Historia de la Provincia de Alicante. Separata II*:509-534.
- Sebastià Esteve, Amparo. «Construcción y buen oficio en la arquitectura religiosa del siglo XVIII: las especificaciones en contratos de obras de las iglesias de la provincia de Castellón». En *Actas del VIII Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Huerta, S. Y López Ulloa, F. (eds). Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2013.
- Serrá, A. y Miquel, M. 2009 «La capilla de San Martín en la Cartuja de Valldecris: Construcción, Devoción y Magnificiencia». *Ars Longa*, nº 18: 65-80
- Skempton, A. W. 2001. «Portland Cements 1843-1887». En *Early Reinforced Concrete*. Newby, F. (ed). Aldershot: Ashgate.
- Skempton, A. W. y Johnson H. R. 1997. «The first iron frames». En *Structural Iron 1750-1850*. Sutherland, J. M. (ed). Aldershot: Ashgate.

BIBLIOGRAFÍA

- Simón Aznar, Vicente. *Historia de la Cartuja de Val de Cristo*. Segorbe: Fundación Bancaja, 1998.
- Smeaton, J. 1791. *Narrative of the Building...of the Eddystone Lighthouse*. London.
- Sobrino Simal, J. 1996. *Arquitectura Industrial en España, 1830-1990*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Sotomayor, J. de. 1776. *Modo de hacer incombustibles los edificios sin aumentar el coste de la construcción. Extractado del que escribió en francés el Conde de Espié*. Madrid: Oficina de Pantaleón Aznar.
- Storz, S. «La tecnica edilizia romana e paleocristiana delle volte e cupole a tubi fittili» en *Lo specchio del cielo*, ed. Claudia Conforti. Milán: Electa, 1997.
- Sugrañes. D. 1916. *Tratado Completo teórico y práctico de Arquitectura y Construcción Modernas*. Barcelona: Marcelino Bordoy. 4. vol, 2 de texto y 2 de láminas.
- Sutherland, R. J. M., ed. 1997. *Structural Iron 1750-1850*. Vol. 9, *Studies in the History of Civil Engineering*, Brown, J. (ed) Aldershot: Ashgate.
- Tarragó, S. (ed.) 1998. *Apuntes del curso "Las grandes bóvedas hispanas"* Madrid: Ministerio de Fomento-CEHOPU-CEDEX.
- _____. 2001. «Las variaciones históricas de la bóveda tabicada». En *Las bóvedas de Guastavino en América*, ed. S. Huerta. 217-240. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU
- Terradas, E. *La llibreta de la volta*. Manuscrito inédito (ca. 1920). Barcelona.
- Thorne, Robert. 2000. *Structural Iron and Steel 1850-1900*. Edited by J. Brown. 1ª ed. 12 vols. Vol. 10, *Studies in the History of Civil Engineering*. Aldershot-Hampshire: Ashgate.
- Tosca, Tomás Vicente. 1727. *Tratado de la Montea y Cortes de Cantería. Segunda Impression. Corregida, y enmendada de muchos yerros de Impresión, y laminas, como lo verá el curioso*. Madrid: Imprenta de Antonio Marín. Fasc. Valencia: Colección Biblioteca Valenciana, Librerías "Paris-Valencia", 1992.
- Truño Rusiñol, Ángel. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004.

- Ungewitter, G. 1890. *Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. III Auflage neu bearbeitet von K. Mohrmann*. 2 vols. Leipzig: T.O. Weigel Nachfolger.
- Valdés, N. 1870. *Manual del Ingeniero y Arquitecto. Resumen de la mayor parte de los conocimientos elementales y de aplicación en las profesiones del ingeniero y arquitecto: comprendiendo multitud de tablas, fórmulas y datos prácticos para toda clase de construcciones, y por separado un atlas de 133 láminas, por el coronel retirado de ingenieros D. Nicolás Valdés, miembro corresponsal de la Academia de Ciencias de Madrid, etc., etc.* Segunda edición. Madrid: Imprenta de Gabriel Alhambra, 1870. Texto y Atlas de 133 láminas.
- Vicat, 1818. *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. Paris: L'imprimerie de P. Didot
- _____. 1840. *Recherches chimiques et pratiques sur les substances calcaires argilifères imparfaitement cuites*. Paris: Imprimerie de Fain et Thunot.
- Vidal y Cabasés, F. 1778. *Conversaciones instructivas en que se trata de fomentar la agricultura por medio de riegos*. Barcelona.
- Vidal Vidal, V. 1988. *Un ensayo tipológico de los edificios fabriles del l'Alcoiá, Arquitectura e Industria*. Valencia: Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports.
- Villanueva, D. 1766. *Colección de Diferentes Papeles Críticos de Arquitectura, remitidos por un professor de este Arte fuera del Reyno, à otro establecido en una de nuestras provincias. Da los a la Luz D. Diego de Villanueva*. Valencia: Impreso por Benito Monfort, 1766. (Edición facs. Valencia: Publicaciones de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Artes Gráficas Soler, 1979.)
- Villanueva, J. 1827. *Arte de Albañilería, o Instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él, en que se trata de las herramientas necesarias al albañil, formación de andamios, y toda clase de fábricas que se puedan ofrecer*. Madrid: Oficina de Don Francisco Martínez Dávila.
- Villanueva, L. y García Santos, A. 2001. *Manual del yeso*. Madrid: CIE
- Winkler, E. 1879 y 1880. Die Lage der Stützlinie im Gewölbe. *Deutsche Bauzeitung*. Vols. 13 y 14: pp. 117-119, 127-128, 130 (1879); 58-60 (1880)
- Wolfe, W.S. 1921. *Graphical analysis: a textbook on graphic statics*. New York: McGraw-Hill
- Zammatio, C., Marinoni A. y Brizio A. M. *Leonardo Scienziato* : Giunti Barbèra.

BIBLIOGRAFÍA

- Zaragozá, A. e Ibañez, J. 2011, «Materiales, técnicas y significados en torno a la arquitectura de la Corona de Aragón en tiempos del Compromiso de Caspe (1410-1412)». *Artigrama*, nº 26, pp. 21-102.
- Zaragozá, A. 2012. «Hacia una historia de las bóvedas tabicadas». En *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragozá, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Zaragozá, A., Soler R., Marín R. (eds) 2012. *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011*. Zaragozá, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

RESUMEN

Las bóvedas tabicadas experimentan una importante evolución, casi una transformación, en España a lo largo del s. XIX. Al inicio, 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.

El texto agrupa 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, como aparecen en España y cual es su desarrollo y distribución territorial hasta finalizar el s. XVIII. En esta parte se ha estudiado:

- la aparición de las bóvedas tabicadas en España, en los últimos años del s. XIV, y como 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.

- la difusión del sistema tabicado en los tratados de arquitectura españoles de los siglos XVII y XVIII: Fray Lorenzo de San Nicolás, Tosca, Briguz y Brú, García Berruguilla, Plo y Camín; también a través de documentos más prácticos: contratos de obra y pleitos.

la expansión de la construcción tabicada por Francia desde España. Como allí es aceptada por académicos y tratadistas; como vuelve a España influenciada por esos tratadistas, los más importantes de la época. Y como los tratadistas españoles reproducen las ideas francesas sobre la construcción tabicada en sus escritos. Este aspecto es importante ya que, a pesar de que la construcción tabicada tenía una tradición mucho mayor aquí, las ideas francesas sobre su comportamiento se imponen a las españolas incluso en España y esto influye en su desarrollo posterior.

La segunda parte indaga en los aspectos constructivos del desarrollo de las bóvedas tabicadas a lo largo del siglo XIX. Dentro de ella se describe:

-como se mantiene la construcción tabicada tradicional se a lo largo del siglo XIX, conviviendo con una línea que avanza en la búsqueda de una nueva forma de construir, separándose cada vez más de la inicial. Para mostrar esta pervivencia, se estudian en esta parte tres documentos que se mueven en la línea tradicional, uno de principio de siglo, otro de los años centrales y otro de final del XIX.

-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.

-la creación de dos tipos arquitectónicos nuevos: los edificios industriales y la vivienda masiva. En ambos tipos tiene aplicación la construcción tabicada. Además, estos nuevos tipos son muy importantes en su evolución, ya que sus condicionantes específicos: rapidez de ejecución en ambos casos y búsqueda de luces cada vez mayores y de estructuras incombustibles en el segundo fuerzan al uso de los nuevos materiales disponibles (cemento, hierro) y al proyecto de nuevas formas y soluciones. En este aspecto me he centrado en Cataluña, la primera región industrializada de España y en la que se aplica la bóveda tabicada a los nuevos tipos, especialmente a la arquitectura industrial.

Y la tercera parte estudia los aspectos estructurales del desarrollo de las bóvedas tabicadas a lo largo del siglo XIX. Se estudia aquí:

-la aplicación a las estructuras tabicadas de las teorías de arcos y bóvedas que se desarrollan desde el siglo XVIII. Las bóvedas tabicadas, cuyas dimensiones se obtenían mediante reglas de proporción, se calculan sucesivamente mediante líneas de empuje, análisis de membrana y también se les intenta aplicar la teoría elástica, sin llegar a conseguir resultados válidos. Siguiendo el marco teórico del moderno análisis límite de fábrica, se concluye que es el más adecuado para estudiar estas bóvedas, como cualquier otras construidas con fábrica.

-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. La razón de estos ensayos es la nueva necesidad, aparecida con la mentalidad científica, de ofrecer garantías técnicas y numéricas sobre los sistemas constructivos y estructurales.

La tesis concluye que las bóvedas tabicadas aparecen en España en el siglo XIV en la zona de Levante; que se extienden por casi todo el territorio siendo un sistema codificado en los últimos años del siglo XVI y que empiezan a ser recogidas en los tratados ya en el siglo XVII; hasta la mitad del siglo XIX la forma en que se construyen y los edificios para los que se utiliza permanecen invariables, sin más novedad que la exportación del sistema constructivo a Francia y la reintroducción en España a través de los influyentes tratados franceses.

En el siglo XIX confluyen varios motivos por los que las bóvedas tabicadas se transforman: la generalización del uso del hierro y el cemento; la construcción de grandes edificios industriales y la aparición de la mentalidad científica, con el desarrollo de la teoría de estructuras. Los nuevos edificios industriales requieren grandes luces y nuevas formas; los nuevos materiales (especialmente el hierro) permiten estos avances. La teoría de estructuras se aplicará a estas nuevas bóvedas; en conjunto con los datos recogidos en los ensayos realizados dará seguridad a arquitectos y constructores para construir mayores tamaños y formas novedosas.

A pesar de esta transformación, la mejor manera de enfrentarse al cálculo de una bóveda tabicada, bien sea para diseñarla en un edificio nuevo como para comprobar su validez en uno ya construido, es englobarla, como cualquier otra fábrica, dentro del análisis límite. Es el método más seguro y a la vez, el más sencillo de todos los disponibles actualmente.

ABSTRACT

Tile vaults had significant development, almost a transformation in Spain along the 19th C. At the beginning, they were a traditional building system and codified for at least three centuries, with limited purposes, shapes and sizes. 100 years later they were used widely in new building types, with innovative construction solutions, much larger sizes and a great formal freedom.

This dissertation investigates the reason for this transformation, from the point of view of the technique and in its consequences, that reach today.

The text is divided in three parts:

The first one, which I have called “traditional tile vault construction” is the starting point. Tile vaults before 19th C are put in context, as they appear in Spain. Also the development and distribution until the end of 18th C. In this part has been studied:

- the first tile vaults in Spain, in the last years of 14th C., and how the system become a construction technique, everytime more frequent, beginning in the territory of the Crown of Aragon (current Valencia, Catalonia and Aragon) and extending from there to Castile and Andalusia.
- The dissemination of the system in the Spanish architectural treatises of the 17th and 18th centuries: Fray Lorenzo de San Nicolás, Tosca, Briguz and Bru, Garcia Berruguilla, Plo and Camin; also through more practical documents: contracts for work and lawsuits.
- The expansion of tile vaults in France from Spain. There, it is accepted by scholars and writers. From France it comes back to Spain, influenced by these writers, the most important of the time. Spanish writers reproduce French ideas about tile vaults in his writings. This is an important subject, because, even though tile vaults had a much older tradition here , French ideas about their behavior prevailed over the Spanish ones, even in Spain, and this will influence their development.

The second part research the constructive aspects of the development of tile vaults

ABSTRACT

during the 19th C. Within it is described :

- how traditional tile vaults are used during the 19th C. At the same time, a new way of building is pursued, moving away of the traditional one. To show this survival, three documents, related to the traditional way, are studied in this part, one of the beginning of the century , another one of the middle and another of late century .
- the appearance of two new materials: cement and iron, which in a few years went to have an accessory use in construction manufactured to a widely use. The combination of these materials with traditional tile vault construction, plaster and brick, will be decisive in its development.
- the creation of two new architectural types: industrial buildings and block of flats. In both types tile vaults can be used. Besides, these new types are very important in its development, as their specific conditions: speed of execution in both cases and use of larger spans and fireproof structures in the second case, force the use of the new available materials (cement, iron) as well as the design of new forms and solutions. At this point I have focused on Catalonia, the first industrialized region of Spain where the tile vault is implemented in these new types, especially industrial architecture.

The third part studies the structural aspects of the development of tile vaults throughout the 19th C. Here is studied:

- the application of the theories of arches and vaults developed during the 18th C. to tile vaults. Tile vaults, whose dimensions were obtained during centuries by proportion rules, are calculated now with the thrust lines and membrane analysis. They even try to apply the Elastic Theory , without actually getting successful results. The modern framework of Limit Analysis of Masonry Structures is the most appropriate way to analyse these vaults, as it is for any masonry building.
- a comprehensive study of the strength tests that are performed on tile vaults during the nineteenth century, and the first half of the twentieth. These tests tried to provide technical and numerical guarantees, due to the new scientific mentality.

The thesis concludes that tile vaults appeared in Spain in the fourteenth century in the Levant, which extend over all Spain, being a codified system in the last years of the 16th

C. It started to be reflected in the treatises in the 17th C. Until the middle of the 19th C. they are built in the same way and in the same buildings. The only novelty is the exportation to France and the reintroduction in Spain through the influential French treatises .

In the nineteenth century confluence of several reasons that transform tile vaults: the widespread use of iron and cement, the construction of large industrial buildings and the emergence of the scientific mind, with the development of the theory of structures. The new industrial buildings require large spans and new forms. New materials (especially iron) allow these progress. The theory of structures will be applied to these new vaults. This theory, and the data collected in tests will give sureness to architects and builders to build bigger sizes and original shapes.

Despite this transformation , the best way to deal with the calculation of a timbre vault, either to design it in a new building or to check the validity of a built one, is within the limit analysis. This is the safest method yet, the simplest of all currently available.

