

PRESENTACIÓ DE PROPOSTES DE TESI DOCTORAL

CURS ACADÈMIC: 2012-2013 CONVOCATÒRIA GENER

TÍTOL DE LA PROPOSTA DE TESI:

CAPACIDAD PORTANTE DE UNA TÉCNICA HISTÓRICA: LA BÓVEDA TABICADA.
ESTUDIO POR MEDIO DE EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

PROGRAMA DE DOCTORAT (nom):

TECNOLOGIA A L'ARQUITECTURA, L'EDIFICACIÓ Y L'URBANISME

DOCTORAND/A::

David López López

TUTOR/A::

José Luís González Moreno-Navarro

DIRECTOR/A DE LA TESI:

José Luís González Moreno-Navarro

DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ÍNDICE

1. Resumen del proyecto	2
2. "Abstract"	2
3. Objetivos	3
4. Antecedentes y estado del arte	3
4.1. Primeros ensayos.	3
4.2. La Teoría de la Cohesión de Rafael Guastavino (sXIX)	3
4.3. Teorías estructurales a partir de Guastavino.	4
4.4. Teorías estructurales hoy.	6
5. Metodología	8
5.1. Variables de cálculo	9
5.2. Modelos de cálculo	10
6. Viabilidad	12
7. Plan de trabajo y estimación de calendario	13
8. Bibliografía	15
9. Publicaciones y ponencias propias realizadas en este campo	17

1. Resumen del proyecto

Aunque el interés en la bóveda tabicada está creciendo en todo el mundo, tanto en el ámbito académico como en el profesional, quedan muchas incógnitas por resolver en cuanto a su comportamiento estructural. A pesar de la gran cantidad de publicaciones escritas sobre este tema, sigue abierto hoy un debate académico sobre el método de análisis de estas construcciones para su evaluación estructural.

La investigación que se presenta a continuación, plantea el análisis de seis bóvedas de ladrillo hueco simple. Cada bóveda tiene una variable incorporada en su altura (de 20 a 30 cm), en el número de capas (2 o 3) y en la existencia o no de lengüetas rigidizadoras. Las bóvedas serán evaluadas por métodos de equilibrio (análisis gráfico y cinemático) y por el Método de los Elementos Finitos (análisis lineal y no lineal y con macro- y micro-elementos), utilizando cargas uniformes y asimétricas. Al mismo tiempo, las seis bóvedas se construirán para llevar a cabo pruebas de carga sobre ellas. El material empleado se estudiará en el Laboratorio de Materiales para recoger los datos de sus características físicas y mecánicas, e introducirlo así en los modelos de cálculo. La construcción de las bóvedas, con el conocimiento exacto de su geometría, las condiciones de contorno y el material, permite que los modelos virtuales sean muy fieles a la realidad, lo que rara vez ocurre cuando nos enfrentamos a la restauración de bóvedas.

La comparación de los resultados se ha hecho con dos objetivos:

- 1- Evaluar la idoneidad de los métodos analíticos utilizados. Para comprobar su precisión en la predicción del comportamiento real de las bóvedas y revelar la información que cada uno ofrece.
- 2- Evaluar la contribución de las variables seleccionadas para la estabilidad de la bóveda.

2. Abstract

Although the interest in tile vaulting is growing worldwide both in the academic and professional field, there are not few unknowns that remain unresolved regarding their structural behavior. Despite the publications concerning this issue, there is still an open debate in the academic domain about the treatment of these vaults in their structural assessment and the decision of the structural analysis method.

My research presents the analysis of six tile barrel vaults. Each vault has a variable incorporated -height (20-30 cm), number of layers (2-3) or existence of buttressing walls- or a combination of variables, which make it different. The vaults are assessed by equilibrium methods and finite element method, using uniform and asymmetric loads. At the same time, the six vaults are built to perform load tests on them and the material is studied in the laboratory to collect the data of its physical and mechanical features to be introduced in the calculation models. The construction of the vaults with the exact knowledge of its geometry, boundary conditions and material allows virtual models to be remarkably true to life, which rarely happens when we face the restoration of these vaults.

The comparison of the results is made with two objectives:

- 1- To assess the suitability of the analytical methods used. To check its accuracy in predicting the real behavior of the vaults and to reveal the information that each provides.
- 2- To evaluate the contribution of the selected variables to the stability of the vault. The introduction of these variables keeping the other parameters constant, allows the comparison of results with the corresponding knowledge of the contribution of the parameter that has been varied.

3. Objetivos.

Esta investigación, pretende cuantificar el aporte de resistencia y/o equilibrio de los elementos que determinan la capacidad portante de la bóveda tabicada como son su forma, su espesor (número de capas) y la existencia de lengüetas rigidizadoras.

Se persigue al mismo tiempo la extracción de conclusiones en cuanto a la idoneidad de cada método de cálculo por medio de la comparación de los mismos y la experimentación con las bóvedas construidas previamente analizadas.

4. Antecedentes y estado del arte

Aunque no podamos determinar los orígenes de la bóveda a ciencia cierta (la hipótesis más extendida sitúa su origen en las construcciones romanas¹), sí podemos asegurar que se realizan bóvedas tabicadas portantes a partir de 1400². Sin embargo, hasta el siglo XVII no aparece el primer tratado, de **Fray Lorenzo de San Nicolás**, y hay que esperar al siglo XIX para encontrar los primeros ensayos.

4.1. Primeros ensayos

Durante el siglo XIX se realizaron ensayos en Francia tratando de determinar el empuje y la resistencia de las bóvedas tabicadas: De Olivier³ y Fontaine⁴ enseguida consideran que las bóvedas empujan, contrariamente a lo que afirmaba d’Espie en su tratado, el cual sirvió de referencia a otros, tanto el de **Laugier**⁵ como el de **Patte**⁶, y luego **Choisy**⁷ y **Rondelet**⁸, quienes siguieron, durante todo el siglo de tratados franceses (s.XVIII), la teoría comenzada por d’Espie: **monolitismo y ausencia de empujes**. Observamos pues que en Francia la obra de Fray Lorenzo (que aseguraba que sí existía empuje en las bóvedas tabicadas, aunque era menor que el de otras bóvedas) tuvo una influencia nula seguramente.

Uno de los ensayos descritos por Fontaine es sobre tres bóvedas de 4 metros de luz y 0,40 metros de altura, entre perfiles I de hierro forjado de 47 cm de canto y una luz de 6,15 m, cubriendo una superficie total de 72 m². El ensayo se hizo hasta la rotura, produciéndose para una sobrecarga de 1.250 kg/m².

4.2. La Teoría de la Cohesión de Rafael Guastavino (sXIX)

Guastavino formula una teoría basada en sus conocimientos sobre resistencia de materiales y estabilidad. Influenciado por los tratados franceses de Patte o de Rondelet parte de la base que las bóvedas **eran monolíticas y no provocaban empujes**. Este era el marco de pensamiento aceptado en España hasta mediados del siglo XIX. Sin embargo, es curioso observar que las construcciones de la época llevaban estribos o tirantes.

¹ Choisy, A. (1873) *L’art de bâtir des romains*. Traducción (1999). Madrid: El arte de construir de los romanos.

² González Moreno-Navarro, J.L. La bóveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial

³ D’Olivier (1837) *Relatif à la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi de recherches expérimentales sur la poussée de ces sortes des voûtes*. *Annales des Ponts et Chaussées, 1er série: 292-309, Pl. 129*.

⁴ Fontaine, H. (1865) *Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques*. *Nouvelles Annales de la Construction, 11: 149-159*.

⁵ Laugier, M. *Essai sur l’Architecture*, París, 1753

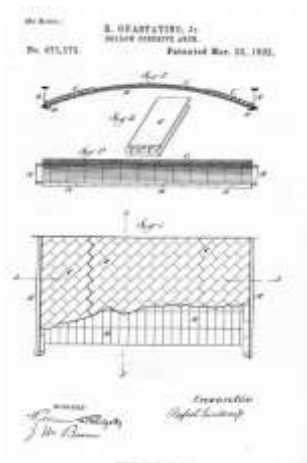
⁶ Blondel, J.F. (1771-77) *Cours d’Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte*. Paris: Chez la Veuve Desaint.

⁷ Choisy, A. (1873) *L’art de bâtir des romains*. Traducción (1999). Madrid: El arte de construir de los romanos.

⁸ Rondelet, Jean (1802) *Traité théorique et pratique de l’art de bâtir*. Paris: Chez Firmin Didot.

En 1878 patentó en España, su sistema⁹ para exportarlo tres años después a Estados Unidos.

Rafael Guastavino era consciente del problema que supondría convencer a los arquitectos americanos de las bondades del sistema y realizó ensayos complementarios a los cálculos. Los primeros ensayos se hicieron en 1887 sobre probetas. Con posterioridad, llevó a cabo ensayos de carga y de resistencia al fuego, para demostrar la invulnerabilidad de dicha construcción.



Patent U.S. Any de concession: 1892 Numero de patent: # 471,173 for Hollow Cohesive Arch

En 1908 murió Rafael Guastavino Moreno y tomó el relevo en la empresa su hijo, Rafael Guastavino Expósito (1973-50) en la que se mantuvo al mando hasta 1942. Éste, además de incorporar propiedades acústicas a las construcciones, estudió la parte estructural de las bóvedas, donde aplicó el análisis de membranas. En las bóvedas habría dos zonas críticas: los óculos cuando hay linterna y la base. Guastavino con un sencillo método de cálculo -la estática gráfica-, utilizaba las fórmulas de Rankine. Propuso una formulación sencilla para el análisis de membrana de las cúpulas de revolución. El método permitía de forma sencilla determinar las zonas de tracción y en consecuencia colocar refuerzos metálicos: Método gráfico de membrana de Eddy.¹⁰

4.3. Teorías Estructurales a partir de Guastavino

Especialistas en España

A principios del siglo XX en España, el cálculo y la construcción de las bóvedas se basaron en los criterios derivados de los tratados y experimentos Franceses de la *Ecole Supérieure des Ingénieurs de Ponts et Chaussées* de París, cuyos resultados y reflexiones fueron publicados en la Enciclopedia de Barré, muy difundido entre los arquitectos españoles.¹¹

Otro gran referente fue Rafael Guastavino. Sus textos tuvieron gran difusión en España y en el extranjero, y fue también una referencia para el análisis del comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. A finales del siglo XIX el análisis elástico ya se consideraba el mejor enfoque para los arcos de fábrica. El carácter de la fábrica, heterogéneo y discontinuo, la dificultad para obtener constantes elásticas, los desplazamientos durante la ejecución, los agrietamientos, etc., eran obvios, y algunos ingenieros eran conscientes de la dificultad en la utilización de la elástica para el cálculo de la fábrica,

⁹ Guastavino Moreno, Rafael (1878) *Privilegio de invención nº 5.902 "Sistema de construcción de techos abovedados de inter estribos y descarga"* 10/07/1878, (Archivo Histórico, Oficina Española de Patentes y Marcas).

¹⁰ Dunn, William. *The Principles of Dome Construction, Part I*. The Architectural Review 23 (January 1908)1:63-73

¹¹ Gemma Muñoz Soria. *Historia de la vinculación entre el diseño y estructura en las estructuras cerámicas de principios de siglo XX*

pero las ideas elásticas de continuidad, tensión y resistencia a los momentos flectores, encajaban muy bien con la ideas de monolitismo de Espie o la teoría cohesiva de Guastavino. La única diferencia fundamental era que los arcos elásticos sí producían empujes.

Felix Cardellach, recoge en su libro *Filosofía de las Estructuras* un compendio de métodos de cálculo en España entre finales del siglo XIX y principios del XX. Él asimilaba la bóveda como una estructura aglomerada birresistente y la consideraba un tipo de construcción cohesiva capaz de resistir flexiones.

Uno de los arquitectos más reconocidos e importantes que cita Cardellach fue **Antoni Gaudí** (1852-1926): “[Gaudí] no ha anunciado ni divulgado la nueva ciencia, vive lleno de conocimientos fundamentales y leyes que en vez de perturbar su marcha, le sirven de instrumento y juguete de progreso”¹². Sin embargo, Gaudí no trabajaba solo, junto a él estuvieron grandes técnicos que le ayudaron y calcularon muchas de sus obras. Entre estos técnicos figuran Domènech Estapà, Jaume Bayó i Domènech Sugranyes.

Gaudí consideraba el arco embebido en sus encuentros (triplemente hiperestático) en la directriz a la curva de presiones de las cargas: funiculares y parábolas catenarias. Realizó cálculos para tener en cuenta la resistencia a flexión de arcos de ladrillo plano, sin embargo luego realizaba fundamentalmente catenarias.

Domènech i Estapà (1858-1917) entendía, igual que Guastavino, la bóveda tabicada como una estructura cohesiva. Consideraba la posibilidad de que la línea de empujes saliera de la sección de la bóveda tabicada.

En su tiempo, fue el primero que consideró la resistencia a flexión del material, así, se anulaba el empuje horizontal resistiendo la tensión y el esfuerzo transversal. Domènech, realiza un análisis de la bóveda repartiendo una carga uniforme y concluyendo que la forma parabólica del arco significaría compresión en todos sus puntos. Sin embargo, cuando esto no es así, los materiales que componen la estructura tabicada son capaces de resistir las tracciones creadas.

Jaume Bayó (1873-1961) afirmaba que las bóvedas no sólo trabajaban a compresión sino también a flexión. Así, los esfuerzos no obedecían exactamente al polígono construido. Para su análisis desarrolló la teoría del arco metálico apoyado en articulaciones, así, con pesos elásticos podía determinar las solicitaciones en cualquier sección.

Utilizaba fórmulas con integrales usuales y, después, las explicaba por un procedimiento gráfico, aplicándolo primero en arcos simétricos de espesor constante o variable y luego en arcos asimétricos. También diseñó un esquema de espesores para las bóvedas proporcional a los momentos: resultado del análisis elástico.

Otros especialistas de la época también podemos considerar a Jeroni Martorell, Esteve Terradas, Bassegoda o Luís Moya.

A pesar del auge del análisis elástico, **Jeroni Martorell** (1877-1951), consideraba la estática gráfica como la que daba resultados más aproximados. Aceptaba que existía empuje, pero demostró que la cohesión y la rigidez lo disminuían.

El cálculo de la resistencia a flexión le llevó a la necesidad de realizar ensayos para calcular los coeficientes para saber las flexiones que aguantaba.

Esteve Terradas (1883-1950) aplicó la Teoría de membranas en las superficies de revolución, el problema se hacía isostático y por tanto prescindía de los momentos flectores (se despreciaban frente a

¹² Cardellach 1908. *Filosofía de las Estructuras*

los esfuerzos normales y tangenciales). Analizó el colapso de las bóvedas por sobrecarga (asimétrica o dinámica) y por defecto de ejecución, partiendo del Principio de Kirchhoff. También intentó realizar un análisis elástico de las bóvedas y examinó problemas como el pandeo.

Ya entrado el siglo XX, **Buenaventura Bassegoda** (1896-1987) recogió numerosos ejemplos desde los orígenes. Para el cálculo aplicaba la estática gráfica. Para acabar este ciclo, **Luís Moya** (1904-1990) reconocía la insuficiencia de cálculo debido a la falta de constantes elásticas pero realizaba cálculos de equilibrio con la línea de empujes. En sus realizaciones, aplicaba una capa de hormigón armado para resistir mejor la flexión.

De ésta época también destacaríamos la labor de **Ángel Truñó** que en 1950 escribe uno de los más extensos tratados sobre la bóveda tabicada en el cual estudia exhaustivamente la puesta en obra de dicha técnica.

Otros ejemplos importantes de arquitectos o maestros de obra que utilizaron la bóveda tabicada en sus obras son, entre muchos otros: Francesc D. Molina Casamajó (1812-1867), Elies Rogent Amat (1821 – 1897), Joan Torras Guardiola (1827 –1910), Lluís Domènech i Montaner (1850 – 1923), Antoni Gaudí Cornet (1852-1926), Lluís Muncunill Parellada (1868 –1931), Josep Puig Cadafalch (1867 –1956) o Josep M. Jujol (1879-1949).

Podemos rescatar también otros ejemplos significativos:

Eladio Dieste incorporó el acero a la construcción de tales bóvedas ampliando sus posibilidades formales. La escuela de Arte de la Habana de los arquitectos **Ricardo Porro, Vittorio Garatti y Roberto Gottardi**. También hay que considerar alguna obra de **Le Corbusier** y del arquitecto catalán exiliado a América del Sur **Antoni Bonet Castellana**.

Por último, me gustaría destacar el trabajo desarrollado por **Joan Bergós** publicado en 1965 en su libro: “Tabicados Huecos. Bases para las dimensiones de las bóvedas y cubiertas del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia”, donde lleva a cabo una interesante investigación con pruebas de carga sobre diferentes arcos, la cual utiliza para el diseño de las distintas estructuras tabicadas en la Sagrada Familia. Aunque la metodología, las herramientas y el objetivo del estudio sean muy diferentes a los de mi tesis doctoral, existen muchas similitudes y puntos en común, por lo que este libro será de gran importancia como precedente. También del mismo autor es el libro “Materiales y elementos de construcción. Estudio Experimental” (1953), cuyo capítulo referido a las bóvedas tabicadas también muestra cálculos y pruebas de carga.

4.4. Teorías Estructurales hoy

Actualmente, la bóveda tabicada tiene la atención de numerosos especialistas repartidos por el mundo (sobretudo Europa y América).

Jacques Heyman, sentó las bases para el análisis límite en 1966, basado en la teoría de la plasticidad aplicable a las estructuras de fábrica. Siguiendo la hipótesis de Heyman, **Santiago Huerta** desde la Escuela de Arquitectura de Madrid afirma que las bóvedas tabicadas tienen poca o nula resistencia a tracción, se agrietan y empujan. No acepta la hipótesis de Guastavino que las consideraba monolíticas y cohesivas, por lo tanto recomienda que se calculen como él considera que hay que calcular cualquier obra de fábrica: por medio del análisis límite. El debate sobre la adecuación de los distintos métodos sigue abierto, y así, Ricardo Gulli, en cambio, reivindica el cálculo por elementos finitos e Ignacio Bosch i Reig defiende el análisis de membrana para cúpulas tabicadas. Propone un sistema para calcular las bóvedas imaginando la formación de nervios virtuales sobre los que se apoyarían a la vez unos arcos elementales producidos por cortes paralelos a los arcos de contornos.

Las aportaciones de Santiago Huerta, tanto con sus escritos como con su editorial, al conocimiento y difusión de la bóveda tabicada son fundamentales. Un magnífico estudio de la historia del análisis estructural de las bóvedas tabicadas es el efectuado por Huerta en su artículo “La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino” (en: “Las bóvedas de Guastavino en América”), el cual me ha sido de gran utilidad y enormemente didáctico.

En Barcelona, **José Luís González**, arquitecto, es uno de los mayores especialistas en bóvedas tabicadas y ha realizado numerosas restauraciones y pruebas de carga sobre las mismas. Además, continuando el trabajo de Bassegoda, ha realizado un estudio exhaustivo de ejemplos construidos desde el siglo XV. Son muchos sus escritos sobre la historia de la construcción, entre los que destaco, por su relevancia en relación a esta tesis, los cuatro citados en la bibliografía, donde defiende la conservación de las bóvedas tabicadas frente a “restauraciones” destructivas y recomienda las pruebas de carga como método más fiable para comprobar su resistencia.

Pere Roca, ingeniero de Barcelona también, experto en el análisis estructural de edificios históricos, recomienda el análisis límite y la macromodelización con el método de los elementos finitos. En las jornadas sobre la bóveda tabicada en la UdG en mayo de 2012 o en sus clases del máster “Structural Analysis of Historical Constructions”, puntualizaba que:

- Habría que hacer una macromodelización precisa de la geometría
- Habría que considerar la no-linealidad del material
- Habría que considerar resistencia a compresión limitada
- Posible consideración de resistencia a tracción no-nula (pero muy limitada)
- Habría que considerar no linealidad geométrica.

Cabe citar en este apartado a Vicente Serrablo, cuya tesis doctoral, codirigida por Pere Roca, presenta una innovación interesante: se trata de la patente de un sistema de montaje industrial de bóvedas tabicadas armadas. Su aportación no representa un avance en el cálculo de estas estructuras ni en su estudio histórico, pero se destaca aquí por su relación con el tema en cuestión y su originalidad.

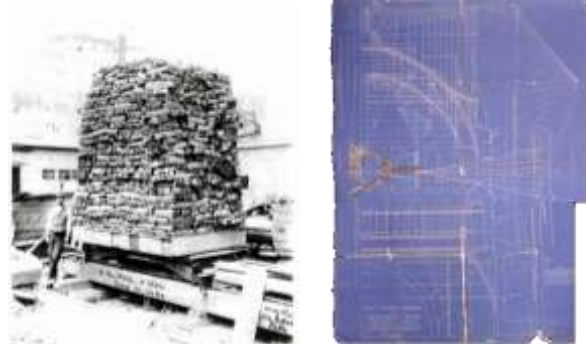
Actualmente, un centro de investigación puntero en el estudio de la bóveda tabicada en general, y más concretamente sobre la obra de Rafael Guastavino, es el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en Boston. **John Ochsendorf**, ingeniero, historiador, y profesor en dicha institución, lidera estas investigaciones. Su última aportación en forma de libro (“Guastavino Vaulting”) es un recorrido por la vida y la obra de la saga Guastavino. Ochsendorf ha colaborado en la construcción de diferentes obras en la que se utilizaron bóvedas tabicadas, y la contribución de los estudiantes o investigadores bajo su tutoría al conocimiento en este campo es más que notable. Dentro de este grupo, cabe mencionar, por su comparación en los métodos de cálculo, la tesina de fin de máster realizada por Megan L. Reese, que ganó el premio que concede la Bienal de Guastavino del Ayuntamiento de Vilassar de Dalt.

Como investigador de importancia, también pupilo de Ochsendorf, encontramos a **Philippe Block**, cuya tesis doctoral en el MIT desarrolla el llamado *Thrust Network Analysis* (TNA), método de análisis de equilibrio en tres dimensiones de estructuras de fábrica, que permite el diseño de formas que trabajen bien a compresión empleando el mínimo material. Este investigador, afincado en Zurich, dirige el “BLOCK Research Group” en la Universidad Politécnica Federal (ETH) de la misma ciudad. En este grupo exploran la técnica tradicional combinada con el software y nuevos materiales low-tech. La bóveda tabicada les ofrece una construcción con poco material que no necesita un encofrado resistente para su construcción (por ejemplo el cartón). Han diseñado también un nuevo software para combinar las ventajas de esta construcción tradicional con una amplia variedad formal.

5. Metodología

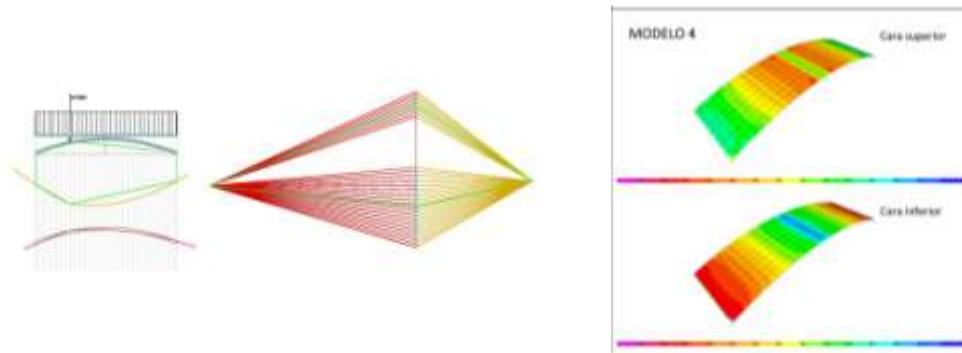
La investigación se abordará desde una triple vertiente: analítica, histórica y experimental.

Históricamente, para conocer las distintas técnicas constructivas y analíticas empleadas a lo largo de la historia y avanzar otro paso en esta técnica centenaria.



Imágenes de la biblioteca Avery de la Universidad de Columbia de Nueva York

Analíticamente, se confeccionan modelos gráficos e informáticos de previsión de rotura de estas bóvedas. Los resultados obtenidos en la experimentación serán contrastados con los arrojados por los modelos teóricos, evaluando así su grado de acierto e idoneidad como procedimientos de cálculo.



Cálculo por estática gráfica y por MEF

Experimentalmente, se construirán las bóvedas y se monitorizarán debidamente para realizar pruebas de carga sobre ellas.



Monitorización y pruebas de carga sobre la bóveda "modelo 4"

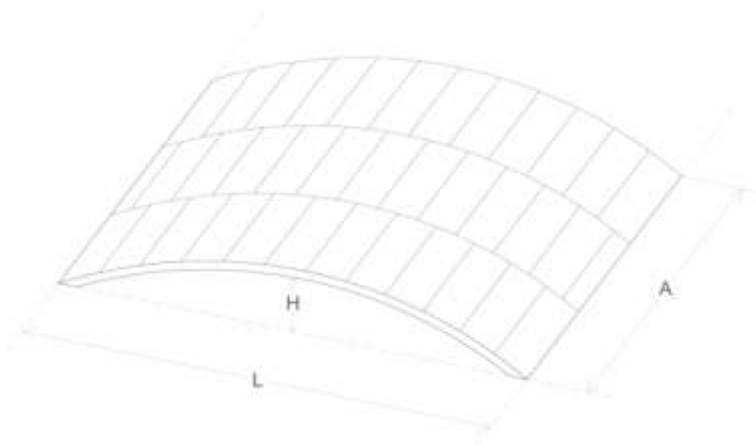
Son diversos los factores que determinan la capacidad portante de las bóvedas tabicadas como son su forma, su luz o su espesor pero también como en toda obra de mampostería, la maestría de la puesta en obra.

Con el fin de cuantificar el aporte de resistencia y/o equilibrio de algunos de dichos elementos, se modelizarán seis bóvedas tabicadas, cada una de las cuales con una variación en lo que sería su construcción, es decir, en su espesor, su altura y la existencia o no de lengüetas rigidizadoras, que nos permita la comparación de resultados para la evaluación de la repercusión de cada elemento en la capacidad portante del conjunto.

Tal y como se muestra en las figuras y la tabla a continuación, tendrán una luz de 3m y un ancho de 1m. Los parámetros susceptibles de variación en su construcción serán: (1) el espesor: 2 o 3 capas; (2) la existencia o no de tabiques rigidizadores y (3) la altura (de 20 a 30 cm). Y las variables de carga serán: (1) cargas excéntricas; (2) cargas uniformes y (3) cargas excéntricas + uniformes.

El objetivo será hacer inferencias sobre el comportamiento estructural de estas obras de fábrica mediante el análisis comparado por los diferentes métodos de cálculo. Así, calibrar las soluciones analíticas y describir la influencia de cada elemento en su resistencia.

Basándose en los resultados de la presente investigación y la literatura disponible sobre éste tema, esta tesina presenta una discusión sobre el comportamiento estructural de estas bóvedas.



Esquema para desarrollar los modelos

5.1. Variables de cálculo

		Especímenes					
		Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04	Modelo 05	Modelo 06
Dimensiones							
	(A) Ancho	100	100	100	100	100	100
	(L) Luz	300	300	300	300	300	300
	(H) Altura	20	20	20	30	30	30

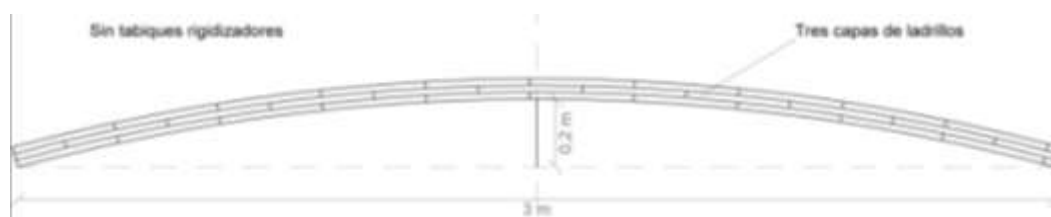
		Especímenes					
		Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04	Modelo 05	Modelo 06
	Pieza	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo
	Material unión	Yeso	Yeso	Yeso	Yeso	Yeso	Yeso
	Aparejo	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas
Capa 2							
	Pieza	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo
	Material unión	Mortero seco	Mortero seco	Mortero seco	Mortero seco	Mortero seco	Mortero seco
	Aparejo	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas	Rompejuntas
Capa 3							
	Pieza	-	Ladrillo	-	-	Ladrillo	
	Material unión	-	Mortero seco	-	-	Mortero seco	
	Aparejo	-	Rompejuntas	-	-	Rompejuntas	
Rigidizadores							
		No	No	Sí	No	No	Sí

Tabla de variables

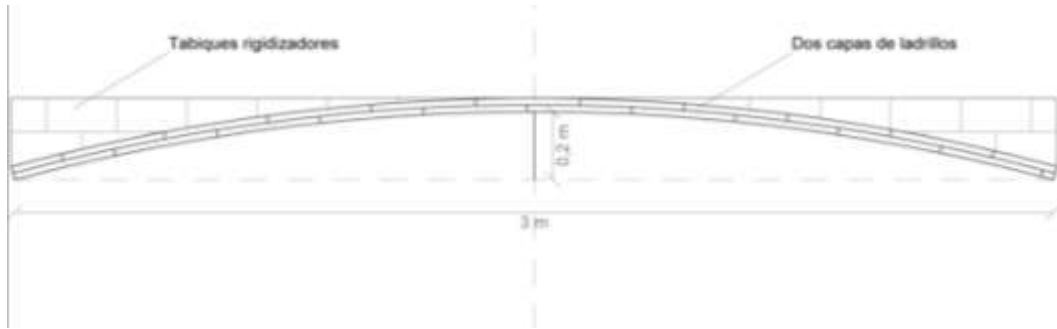
5.2. Modelos de cálculo



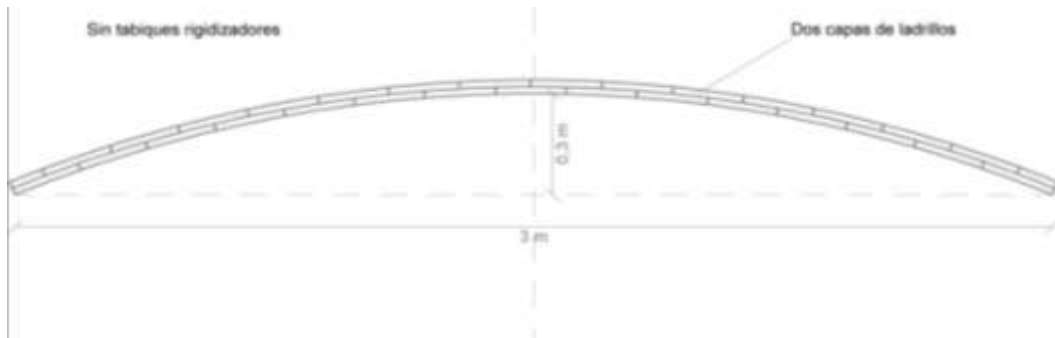
Modelo 01



Modelo 02



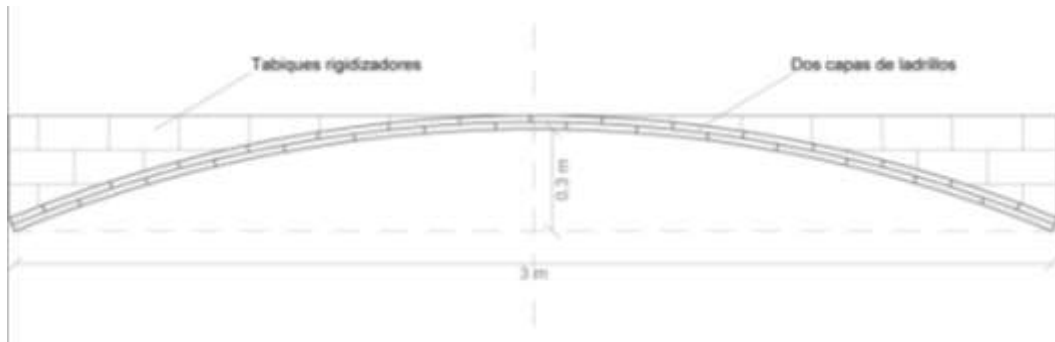
Modelo 03



Modelo 04



Modelo 05



Modelo 06

La metodología a emplear será un constante cruce de información entre las tres vertientes a estudiar.

Vertiente Histórica

1. Extensión del estado del arte y clasificación de los distintos resultados de las pruebas de carga antecedentes.
2. Comparación de resultados obtenidos con experimentos anteriores y posible ampliación de especímenes según resultados contradictorios.

Vertiente Analítica

1. Análisis de equilibrio de cada modelo (según resultados de densidad de material en el laboratorio). Estática gráfica y método cinemático.
2. Análisis por el Método de Elementos Finitos (según resultados de propiedades del material en el laboratorio): análisis lineal elástico, análisis no lineal con un modelo de daños elasto-plástico.
3. Comparación de resultados.
4. Corrección de los modelos según análisis experimental y comparación de resultados.
5. Conclusiones.

Vertiente Experimental

1. Construcción de las bóvedas propuestas y de las probetas correspondientes.
2. Caracterización del material para su análisis gráfico y virtual.
3. Decisión de la carga (cantidad y punto de aplicación) según los análisis gráfico y por elementos finitos.
4. Pruebas de carga según norma UNE 7457.
5. Comparación de resultados.
6. Conclusiones.

6. Viabilidad

La preparación obtenida tras el máster de Tecnología en la Arquitectura en la rama de Cálculo y Diseño de Estructuras, y el máster Erasmus Mundus de Análisis Estructural de Monumentos y Edificios Históricos, cuyos módulos en la UPC coordina el catedrático de Ingeniería de la Construcción Pere Roca, garantizan la preparación necesaria para llevar a cabo los cálculos y análisis necesarios.

En cuanto a la vertiente experimental, dada la naturaleza de este estudio será necesaria la adquisición de material para la construcción de las bóvedas, lo cual supondrá un gasto a asumir. En este punto se ha de tener en cuenta tres circunstancias fundamentales que reducen el gasto drásticamente:

- No es necesaria la contratación de mano de obra. El aprendizaje en la construcción de las bóvedas por parte de quien escribe estas líneas ha sido clave, contando ahora con experiencia y destreza en este arte.

- Es también fundamental para esta tesis el soporte que recibo del laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona, que garantiza la posibilidad de llevar a cabo los ensayos planteados y su correcta monitorización.

- Parte del material ya está comprado y almacenado en el laboratorio.

Considerando estas circunstancias, el único gasto a asumir vendrá determinado por la nueva adquisición de ladrillos, yeso y mortero de cemento. Si la compra de todo el material se hace en un solo pedido (con la posibilidad de almacenar lo necesario en el laboratorio), el transporte se abarata considerablemente, y estimo que el precio total para la construcción de 15 bóvedas ascendería, como máximo, a unos 1000 euros en total.

Pretendo encontrar financiación por medio de alguna empresa que patrocine esta investigación. La casa SAPIC patrocinó el “Taller de Construcción de Bóvedas Tabicadas” que organicé en la ETSAB en abril de 2012, y es posible que puedan estar interesados en el patrocinio de esta tesis. Si no fuera así, como la inversión no es muy alta, podría costearlo personalmente. Esto supondría un desembolso grande en un solo pago, pero desglosado mensualmente, significaría únicamente una “cuota” de 35 euros por cada uno de los 29 meses de doctorado que estimo tengo aún por delante.

7. Plan de trabajo y estimación de calendario

-Febrero - abril de 2013:

- Pruebas de carga en las bóvedas construidas.
- Preparación de probetas en el laboratorio y caracterización del material para su uso en los modelos de cálculo.
- Taller de construcción de bóvedas tabicadas para la “Semana de día” de la ETSAB (abril 2013) construcción de las bóvedas modelo 5 y 6.

-Mayo - agosto de 2013:

- Estancia en la “Universidade de Minho” para la realización de la tesina del máster en Análisis Estructural de Edificios Históricos: micromodelización; análisis de las bóvedas por los diferentes métodos de cálculo. Conclusiones preliminares.
- Taller de construcción de bóvedas tabicadas en Covarrubias con motivo del “International Festival of Art and Construction”.

-Septiembre - noviembre de 2013:

- Comienzo de la redacción de la introducción, antecedentes y estado del arte.
- Pruebas de carga en las bóvedas construidas.
- Construcción de nuevas bóvedas (modelos 1, 2 y 3) y corrección de modelos de cálculo según resultados de pruebas de carga.

-Diciembre de 2013 - enero de 2014:

- Nuevas pruebas de carga.
- Elaboración de gráficos y comparaciones.

-Febrero - julio de 2014:

- Estancia de investigación en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) de Boston con John Ochsendorf.
- Posibles correcciones de los modelos tras las pruebas de carga.
- Ampliación de lo redactado y posibles modificaciones.

-Agosto - septiembre de 2014:

- Clasificación, síntesis e incorporación a la tesis de toda la información obtenida en Boston.
- Conclusiones finales.

- Octubre a diciembre 2014:

- Revisión del borrador de tesis por el tutor.

- Enero 2015:

- Entrega de documento final de tesis.

- Febrero - abril 2015:

- Correcciones a la tesis.

- Marzo - mayo 2015:

- Trámites administrativos para la presentación de tesis.

- Junio de 2015:

- Lectura de tesis.

8. Bibliografía

LIBROS O ARTÍCULOS		
Bassegoda Musté, Buenaventura	1997	La Bóveda catalana (Discurso leído el 26 de noviembre de 1946); prólogo de Juan Bassegoda Nonell Zaragoza : Institución Fernando el Católico, C.S.I.C, Excma. Diputación de Zaragoza, 1997
Bassegoda Nonell, Juan	1972	Los maestros de obras de Barcelona. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
	2001	La obra arquitectónica de Rafael Guastavino en Cataluña. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
Bayó, Jaume	1910	La bóveda tabicada. Barcelona: Anuari de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya: 157-84
Bergós Massó, Joan	1936	Formulario técnico de construcciones. Barcelona: Editorial Bosch.
	1953	Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental. Barcelona: Editorial Bosch.
	1965	Tabicados huecos. Barcelona: Col·legi d'Arquitectes de Catalunya i Balears.
Block, Philippe y Ochsendorf, John	2007	Thrust Network Analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: J.IASS. Vol.48 (2007) No3
		Lower-bound Analysis of Masonry Vaults.
Blondel, J.F.	1771-77	Cours d'Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte. Paris: Chez la Veuve Desaint.
Bosch Reig, Ignacio	1949	La bóveda vaída tabicada. Revista Nacional de Arquitectura: 185-99
Cardellach, Félix	1910	Filosofía de las estructuras. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
Casas Romeu, Josefina et al	2001	El Vapor Aymerich, Amat i Jover de Terrassa. Terrassa: Museu de la ciència i de la tècnica de Catalunya - Col·lecció: Quaderns de didàctica i difusió;
Choisy, A.	1873	L'art de bâtir des romains. Traducción (1999). Madrid: El arte de construir de los romanos.
De las Casas Gómez, Antonio	2002	Las bóvedas de los Guastavino. Revista de obras públicas, junio 2002, nº 3.422: 51-60
Dilme, Lluís i Fabrè, Xavier	2002	Teatre "La Massa" de Guastavino. Vilassar de Dalt 1881-2002. Barcelona: Ajuntament de Vilassar de Dalt & Edicions UPC
Domènech i Estapà, Josep	1900	La fábrica de ladrillo en la construcción catalana. Anuari de l'Associació d'Arquitectes de Catalunya: 37
d'Espie, Conde	1754	Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briqueté. Paris: Duchesne.
Fontaine, H.	1865	Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques. Nouvelles Annales de la Construction, 11: 149-159.

LIBROS O ARTÍCULOS		
González Moreno.Navarro, José Luis	2000	Configuración constructiva de las bóvedas «convexas» de la iglesia de la Colonia Güell, obra de Antonio Gaudí. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000.
	2000	Configuración constructiva y comportamiento mecánico de las bóvedas tabicadas. Estudio de dos edificios abovedados del siglo XIX en el Baix Llobregat (Barcelona) Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000.
	2003	La bóveda catalana en el final del siglo XIX: Guastavino, Domènech i Gaudí. L'Alguer (Sardenya): Seminari Di Studi Architettura e Restauro nei Paesi della Corona d'Aragona.
	2005	La bóveda tabicada: entre la conservación y la destrucción. Informes de la Construcción, Vol. 56, nº 496, marzo-abril 2005
Graus, Ramon y Rossell, Jaume	2009	La fàbrica Batlló, una obra influent en l'arquitectura catalana. Barcelona: VIII Jornades d'Arqueologia Industrial de Catalunya (Barcelona i les grans fàbriques dels segles XIX-XX). Associació del Museu de la Ciència i de la Tècnica i d'Arqueologia Industrial de Catalunya (mNACTEC)
Guastavino Moreno, Rafael	1892	Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timbrel vault. 2ª ed. Boston: Ticknor and Co.,1893 (1ª ed. 1892).
	2006	Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura. Madrid: Instituto Juan Herrera - CEDEX - CEHOPU
Gulli, Riccardo	1993	Il sistema tabicado. Una tecnica tradizionale per il recupero. Napoli: Atti del Convegno Internazionale: Il recupero degli edifici antichi, manualistica e nuove tecnologie, 109-208.
	1994	Una ipotesi di intervento conservativo per il recupero delle volte in folio portanti. Bologna: Atti del Convegno di Studi: La ricerca del recupero edilizio, Ancona, 51-62.
	1995	Bóvedas tabicadas: Architettura e costruzione. Roma: CDP Editrice.
Heyman, J	1995	The Stone Skeleton. Cambridge: Cambridge University Press.
	2005	Historia de la Teoría de las Estructuras. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
Huerta, Santiago	2002	Las bóvedas de Guastavino en América: libro publicado con ocasión de la exposición: Guastavino Co (1885-1962) la reinención de la bóveda. Madrid: CEHOPU, Instituto Juan Herrera
	2006	La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Guastavino. Madrid: CEHOPU, Instituto Juan Herrera
López López, David y Domènech Rodríguez, Marta	2012	Tile Vaulting as an Alternative. 38º congreso Internacional de la "International Association for housing Science" (IAHS).
Loren Méndez, Mar	2009	Texturas y pliegues de una nación. New York City: Guastavino Co. y la reinención del espacio público de la metrópolis estadounidense València: General de Ediciones de Arquitectura (Tc cuadernos)

LIBROS O ARTÍCULOS		
Mas-Guindal Lafarga, Antonio J.	2011	Mecánica de las Estructuras Antiguas, o cuando las estructuras no se calculaban. Ed. Munilla-leria.
Moya Blanco, Luis	1947	Bóvedas tabicadas. Madrid: Dirección General de Arquitectura.
Ochsendorf, John	2005	Los Guastavino y la bóveda tabicada en América. Informes de la Construcción, Vol. 5, nº 496 marzo-abril de 2005
	2010	Guastavino Vaulting. The art of structural Tile. Princeton Architectural Press
Parks, Janet, Neumann, Alan G., AIA	1996	The Old World Builds the New. The Guastavino Company and the technology of the Catalan vault, 1885-1962. New York: Avery Architectural and Fine Arts Library and the Miriam and Ira D. Wallach Art Gallery - Columbia University in the City of New York
Pereda Bacigalupi, Ángel	1951	Bóvedas tabicadas. Cálculo y ejemplos resueltos. Santander: Editorial Cantabria.
Redondo Martínez, Esther	2000	Las patentes de Guastavino & Co. en EEUU 1885-1939. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU
Reese, Megan L.	2010	Structural Analysis and Assessment of Guastavino Vaulting. Premio Bienal Guastavino 2010.
Rondelet, Jean	1802	Traité théorique et pratique de l'art de bâtir. Paris: Chez Firmin Didot.
Rossell, Jaume i Serra, Isabel	1987	Estudis d'Esteve Terradas sobre la volta de maó de pla. En Cinquanta anys de ciència i tècnica a Catalunya, Barcelona: Institut d'Estudis Catalans: 22-23.
San Nicolás, Fray Lorenzo de	1639	Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte. Madrid: s.i.
Tarragó, Salvador (et al)	2002	Guastavino CO. (1885-1962) Registre de l'obra a Catalunya i Amèrica. Barcelona: Col·legi d'Arquitectes de Catalunya
Teruel Cano, Andreu	2010	Guia pràctica de les estructures de ceràmica horitzontals. PFC, Arquitectura Técnica UPC.
Truñó, Ángel	1947	Construcción de bóvedas tabicadas. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

9. Publicaciones y ponencias propias realizadas en este campo:

"Tile Vaulting as an alternative". Ponencia y publicación en el 38º Congreso Internacional Anual de la *International Association for Housing Science (IAHS)*. ISBN: 978-975-561-417-5. ISBN: 978-975-561-418-2 (DVD-ROM)

"Renewing Traditional Technology". Ponencia en el 39º Simposio del *International Committee for the History of Technology (ICOHTEC)* en Barcelona. 10 a 14 de julio de 2012 en Barcelona.

"Structural Analysis of Tile Vaulting". Ponencia en el bloque: "Guastavino Construction: Learning from the past" del 3º Encuentro de la *Construction History Society of America* en el MIT de Boston. 2-3 de noviembre de 2012. Pendiente de publicación.