

**UN MODELO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS BÓVEDAS TABICADAS  
LAS BÓVEDAS DE GUASTAVINO EN NORTEAMÉRICA.**



*“Ut pendet continuun flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum”* Hooke 1676

# UN MODELO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS BÓVEDAS TABICADAS. LÁS BÓVEDAS DE GUASTAVINO EN NORTEAMÉRICA.

## I. OBJETO

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica ligeras, hechas con ladrillo y mortero, y ejecutadas sin cimbra. Se conforman con dos o más capas de ladrillos de reducido espesor tomados a panderete o de plano, es decir, unidos en cada hoja por su testa y por su canto, quedando la tabla al aire. La primera hoja se toma con mortero de fraguado rápido, tradicionalmente de yeso, y las siguientes con cualquier otro mortero de cal o cemento. El rápido endurecimiento y adhesión del yeso permite ejecutarlas sin cimbra, aunque sí suelen emplearse cerchas o cintres móviles para guiar su forma. Son estructuras ligeras, esbeltas, de notable rapidez en su construcción y buen comportamiento ante el incendio.

Se conoce bien su técnica constructiva, se sabe cómo se hacen, y a la vista tenemos lo que ha podido llegar a hacerse con ellas, pero sabemos muy poco de su comportamiento estructural, apenas podemos preveer de forma cuantificada su estabilidad, se las ha llegado a considerar como imposibles de calcular. Son bóvedas de fábrica, como las de sillería, mampostería o las de rosca de ladrillo, pero extremadamente esbeltas, los métodos de análisis estructural contemporáneo de la teoría de la elasticidad, de la cohesividad y la flexión, no han sido capaces de medir y explicar su fenómeno resistente.

Es una técnica constructiva tradicional y secular de las sociedades del entorno mediterráneo, y muy en concreto de la costa oriental española. Presente en la arquitectura civil, al menos, desde el medievo, en naves y cúpulas de la arquitectura eclesial, en los forjados o escaleras de la arquitectura tradicional. Un sistema constructivo capaz de cubrir amplias luces, económico y seguro ante el riesgo de incendio, que toma un nuevo impulso y renace durante el desarrollo industrial del siglo XIX en Cataluña, para la construcción de cubiertas de naves industriales, principalmente de fábricas textiles durante el pujante desarrollo de la industria catalana. Rafael Guastavino, arquitecto y constructor, de origen valenciano, que estudió e inició su carrera profesional en Barcelona, aquí conoció y utilizó con destreza la bóveda tabicada, al trasladarse a Estados Unidos en el año 1881, allí encontró un ambiente de innovación y desarrollo tecnológico muy favorable, aplicó, estandarizó y desarrolló nuevas posibilidades de este sistema tradicional y expandió la bóveda tabicada a una escala sin precedentes



(Izqda) Fábrica Batlló en Barcelona, de Rafael Guastavino, año 1869.

(Dcha) Cartel publicitario de la empresa constructora de los Guastavino en Estados Unidos

## 2. MARCO TEÓRICO

Las bóvedas tabicadas, y en general las estructuras de fábrica, se han ido olvidando desde la irrupción de las nuevas técnicas constructivas con la revolución tecnológica del siglo XX, dominadas por el hormigón armado y el acero, han ido siendo marginadas hasta entrar en riesgo de extinción su práctica y tecnología. En las últimas décadas, el sistema estructural de bóveda tabicada ha recuperado la atención en determinados sectores de dedicados a la restauración y rehabilitación del patrimonio y de la arquitectura tradicional, y reivindicado como recurso constructivo sostenible, por sus menores costes energéticos y escasa generación de residuos. Las generaciones postmodernas incluyen el factor medioambiental en la balanza de decisiones y la sociedad actual apunta a la recuperación y desarrollo de antiguas técnicas apartadas.

La bóveda tabicada tiene una larga historia, las primeras referencias se encuentran en las bóvedas por hiladas ejecutadas sin cimbra de la cultura mesopotámica hacia el 2000 a.C., las bóvedas de cubrición de los almacenes y graneros egipcios, el arco persa de sección catenaria de Ctesifonte, construido sin cimbra en el siglo VI a.C, las experiencias griegas, el Panteón romano, Santa Sofía de Estambul edificada inicialmente cristiana sin cimbra en el siglo VI, reforzada en el imperio otomano en el siglo XVI, la cúpula de Brunelleschi, en Santa María del Fiore de Florencia, o las cúpulas de la arquitectura eclesial valenciana.



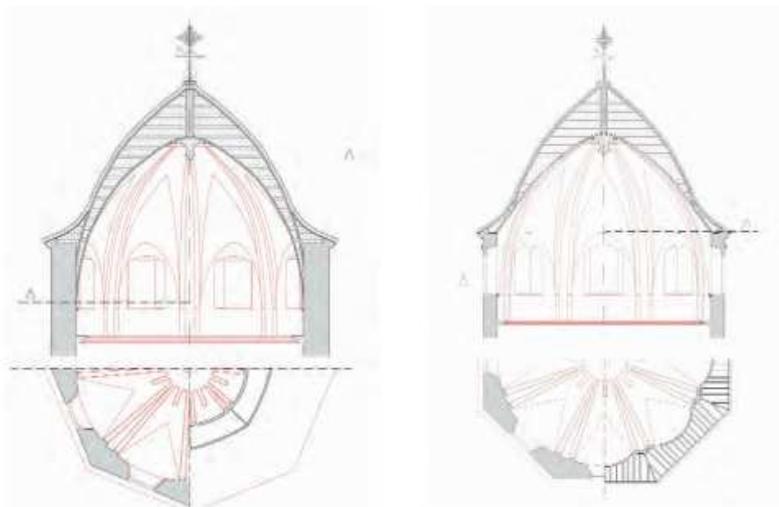
Arco persa de Ctesifonte



Santa Sofía de Estambul



Cúpula de Sta María del Fiore, en Florencia



Iglesia arciprestal de San Jaime en Vilarreal, s.XVIII. Secciones según Alba Soler.



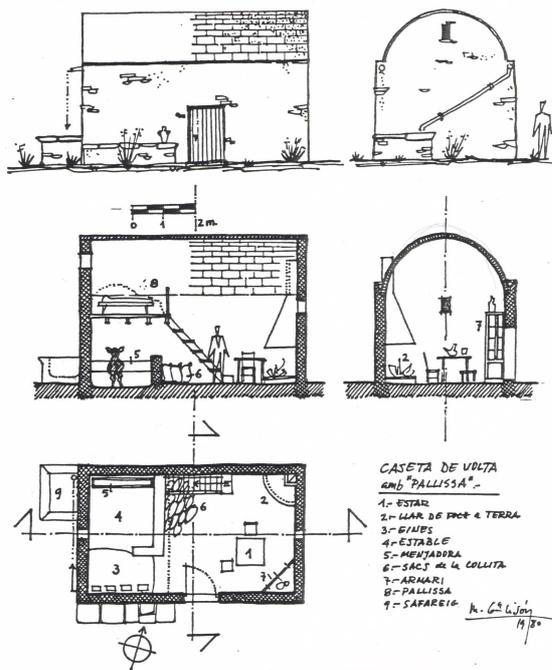
Caseta de volta, de bóveda tabicada, en la sierra de Irta, en término de Peñíscola, (Baix Maestrat, Castellón)

## **ARQUITECTURA TRADICIONAL**

### **CASSETAS DE VOLTA**

Las casetas de *volta* son viviendas agrícolas temporeras y dispersas del secano litoral, construidas con muros de piedra y cubiertas con bóveda tabicada, *amb volta*, de doble rosca de ladrillo macizo tradicional y de distribución localizada principalmente en la zona costera del Baix Maestrat de Castellón. Son casetas temporeras, construcciones elementales con cubierta de bóveda tabicada, de heredades alejadas de los pueblos, ligadas al cultivo del secano arbóreo, servían de albergue temporal, se utilizaban periódicamente para las tareas de labor y estacionalmente en la recolección de la algarroba o la oliva. Arquitectura temporera, que es refugio del labrador y su familia, de su animal de trabajo, el mulo, así como lugar de almacén de la producción agrícola y de los aperos de labranza.

Construcción mixta de piedra y ladrillo cerámico, de planta rectangular con dimensiones entre 5 y 8 m de largo y un ancho variable entre 3,5 y 5 m, el espesor de los muros varía según la luz de la bóveda que sustenta, hasta luces interiores de 3 m el espesor es de 60 cm y para superiores es de 70 y hasta 75 cm sobre la fachada principal, son espesores de muro amplios necesarios para recibir y absorber los empujes que genera el apoyo de la bóveda, espesores superiores a los de caseta de cubierta plana o inclinada que tienen de 30 a 45 cm, e incluso a los de masías y casas de poble que tienen de 45 a 60 cm.



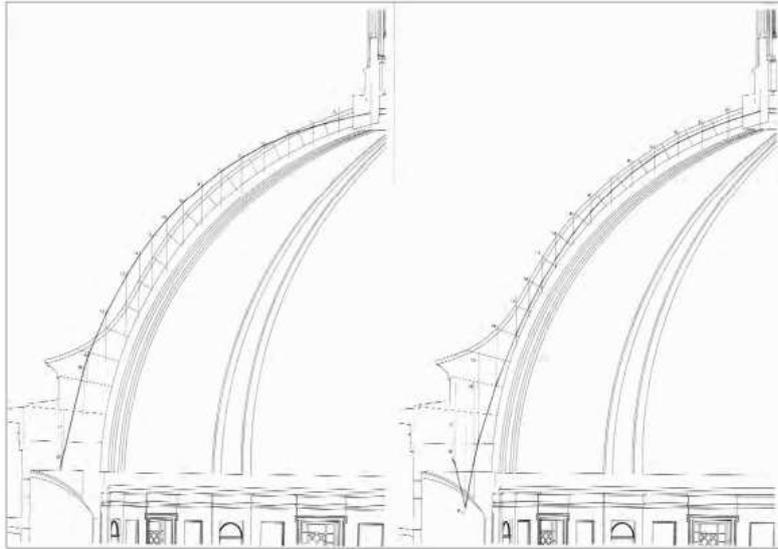
Dibujo de Miguel García Lisón. Planta, secciones y alzados de una caseta de volta en Cala Mundina, en Alcossebre (Alcalà de Xivert, Baix Maestrat), en: M. García Lisón y A. Zaragoza, "La vivienda rural temporera en las comarcas del Maestrat y les Terres del Ebre. Les pallisses y les casetes de volta", Benicarló 1982.

Sobre los muros largos, el de entrada y el trasero, descansa la bóveda tabicada, tienen alturas interiores que varían según los casos entre 1,95 y 2,50 m, y sobre ellos arranca, retirada entre 5 y 10 cm de la cara interior, la bóveda de cañón tabicada, de traza semicircular formada por doble rosca, a veces triple, de ladrillo cerámico macizo de poco espesor, rajola, puestos de plano, y no de canto, tomado con mortero de cal, formando, por lo general, dos hojas o rosas, unidas entre sí con mortero, el arranque se hace apoyando sobre una capa de mortero de cal de nivelación, o bien sobre una hilada de ladrillo tradicional colocado en horizontal coronando el muro de piedra.

A la parte exterior el muro de piedra se eleva de 30 a 40 cm sobre el nivel de apoyo de la bóveda y hace de canal de conducción de las aguas recogidas y vertidas por la superficie exterior de la bóveda, el canal tiene entre 45 y 60 cm de ancho y se forma, por lo general, coronando el muro con tres piezas ladrillo macizo, dos laterales vertiendo hacia una central plana y todas ellas con desnivel descendiente hacia la fachada del aljibe que se sitúa al norte. Los muros menores, los transversales al eje longitudinal de la bóveda, se llevan con piedra hasta la rosca cerámica de la volta, el espesor de estos muros suele ser menor, de unos 40 cm, ya que apoyan y reciben los extremos de la bóveda, pero no reciben los empujes de la base.

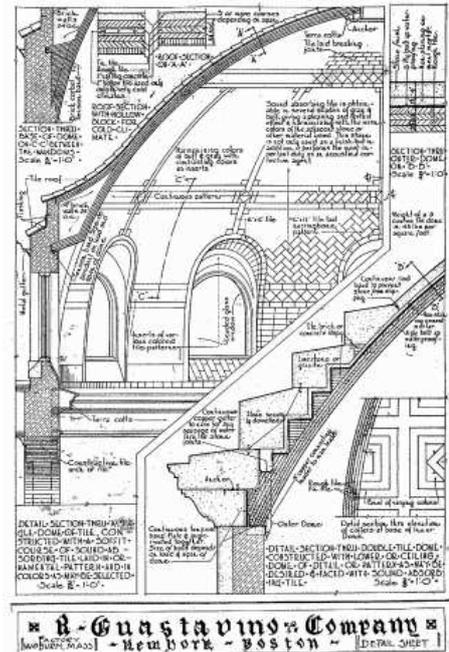


## ANTECEDENTES. MÉTODOS ANALÍTICOS Y ESTÁTICA GRÁFICA



Izquierda. Cúpula de una hoja resistente de sección variable. Polígono funicular de acciones gravitatorias. Según estudio de Alba Soler.

Derecha. Detalles constructivos de las cúpulas tabicadas de Guastavino Company



No tenemos referencias sobre los métodos de cálculo, estimación o proyecto de bóvedas anteriores al medioevo, y de este período únicamente las referencias a sus métodos gráficos y geométricos para el diseño y dimensionado de estas estructuras, y su preocupación por el contrarresto, el apoyo a los empujes horizontales que generan estas bóvedas y cúpulas, una regla gráfica que sistematizó y divulgó Blondel en su curso de arquitectura del año 1675, y que practicaron los constructores medievales, y que aparece en numerosos tratados del siglo XVIII.

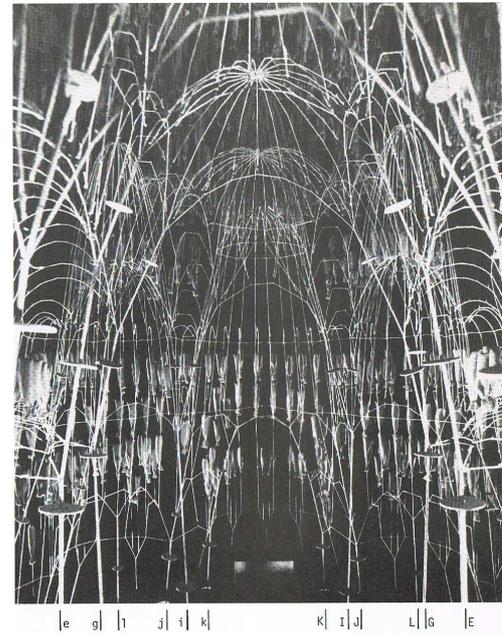
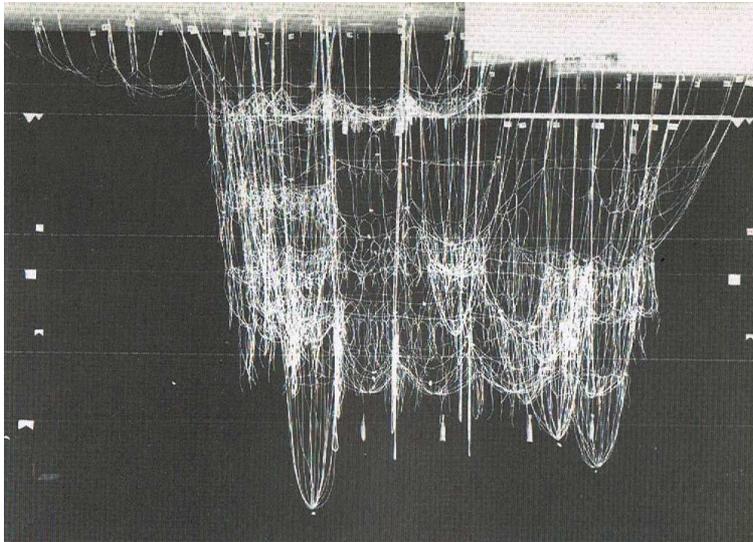
La teoría de la elasticidad formulada por Navier en 1821 abre el camino a los modernos cálculos de las estructuras continuas y cohesivas de hormigón y acero, pero no es capaz de explicar y cuantificar el comportamiento estructural de elementos discontinuos como las bóvedas tabicadas. A la teoría elástica le sucede el modelo de la teoría plástica, que es capaz de explicar algunas cuestiones pendientes y que promete resolver el enigma.

### ESTÁTICA GRÁFICA. EL MODELO DE GAUDÍ

La forma resistente ideal de un arco es la de una catenaria invertida, esta analogía estructural entre arcos resistentes a compresión y cables colgantes, descrita originalmente por Hooke hacia 1670, fue utilizada por la ingeniería británica durante el siglo XVIII. La estática gráfica, iniciada con la teoría de las líneas de empujes desarrolladas por Moseley en 1835 y Méry en 1840, más tarde completada con los métodos expuestos por Rankine en 1858, Maxwell en 1864 y compilados por el tratado de Culmann en 1866, terminan por dar cuerpo teórico a las ideas intuitivas y experimentales de la analogía estructural, la estática gráfica unifica la teoría que correlaciona líneas de empuje y mecanismos de colapso, permite descomponer el polígono de fuerzas que actúan sobre la membrana, calcular y dibujar las líneas de empuje.

El modelo colgante de Gaudí utilizado para el proyecto y cálculo estructural de la Sagrada Familia de Barcelona, es, probablemente, ensayo más completo y complejo de estática gráfica, utilizando como modelo

una maqueta de cables colgantes con pesos escalados, que seccionaba con fotografías o dibujaba en calcos para calcular gráficamente. El método es integral, unifica el cálculo de la estructura con la definición del proyecto, permite tanto proyectar la volumetría como verificar la estabilidad y cuantificar las líneas de fuerza o empuje.



Dos vistas del modelo desaparecido de Gaudí para la Sagrada Familia realizado entre 1898 y 1908 a escala 1/10, reconstruido por R. Graefe y J. Toslow en 1989.

### 3. OBJETIVOS. ESTABILIDAD DE LA GEOMETRÍA

Las bóvedas tabicadas son estructuras de fábrica, compuestas por pequeñas piezas cerámicas unidas con mortero, que transmiten las fuerzas entre piezas contiguas, el conjunto es una membrana de un material discontinuo y anisótropo. Su comportamiento estructural, nada tiene que ver, por ejemplo, con el comportamiento de piezas continuas e isotropas como las construidas de hormigón armado, ni tampoco en su cálculo estructural. Estamos frente a estructuras que trabajan a pequeñas tensiones y principalmente a compresión, su estabilidad no depende de la resistencia de sus materiales, sino a la estabilidad de su geometría, a su configuración espacial. Se sabe que bóvedas de geometría diferente, sometidas al mismo estado tensional crítico, llegan al colapso de manera diferente.

El objetivo es analizar y describir la relación existente entre geometría y estabilidad en la bóvedas tabicadas realizadas por los Guastavino en Norteamérica, y de esta experiencia detectar las pautas que rigen esta relación entre geometría y estabilidad, sistematizar su comportamiento estructural, y poder predecir, de forma global, la estabilidad de las bóvedas tabicadas. Independientemente de que el problema se pueda resolver matemáticamente con el desarrollo de la Teoría Plástica, si su estabilidad no depende esencialmente de la resistencia de sus materiales, sino de la estabilidad de su geometría, en los métodos gráficos y los modelos a escala sin duda encontraremos estas pautas, las variables son: cargas, volumetría y geometría, y los límites se encuentran en el equilibrio y la estabilidad.

Si somos capaces de cuantificar y predecir esas estructuras de bóveda tabicada, de las que, hasta ahora, se

dice que desafían a la gravedad, seremos capaces de incluir a estas preciosas y valiosas estructuras en nuestro entorno normativo de la construcción, de hecho, el Código Técnico de la Edificación, sigue sin reconocer la existencia de esta tipología constructiva, y por tanto convierte en prácticamente imposible su utilización.



Estación de metro de City Hall, en Nueva York, de Rafael Guastavino

#### 4. METODOLOGÍA. EL MODELO

*“Ut pendet continuun flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum”* Hooke 1676

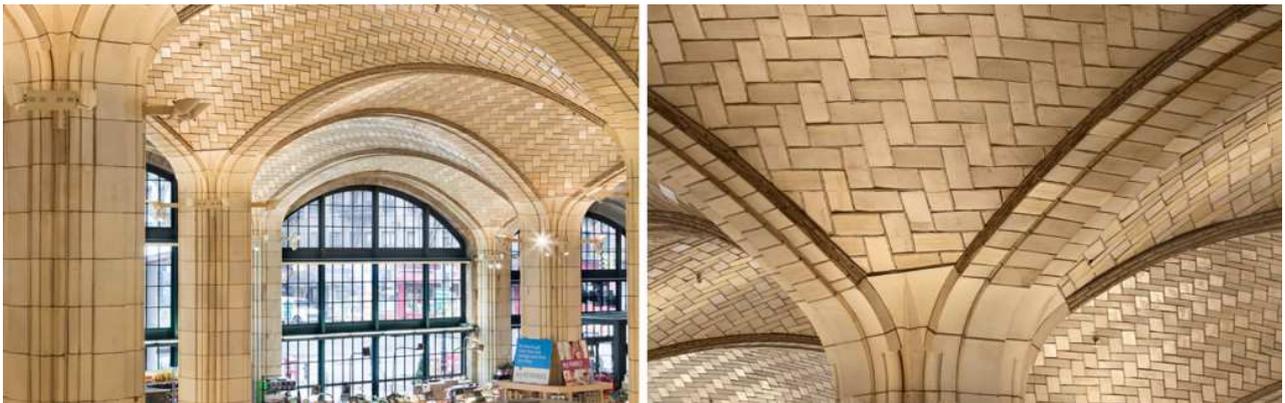
Analizar y describir la relación existente entre geometría y estabilidad, en la bóvedas tabicadas realizadas por los Guastavino en Estados Unidos, aplicando el modelo colgante de Gaudí y la estática gráfica. Tomando como referencia el modelo de Gaudí para la Sagrada Familia y sobre la base de las experiencias al respecto, desde los ensayos al modelo de I. Puig Boada en 1972, Y. Matsukura en 1978, hasta las experiencias desarrolladas en maquetas estructurales por F. Otto en el Institut für leichte Flächentragwerke de Stuttgart, y principalmente con la reconstrucción del modelo para la Sagrada Familia realizada en 1982 por R. Graefe, publicados los resultados de la tesis de J. Toslow en 1989, y completados por R. Graefe en 2009, y en general la experiencia de la estática gráfica.

Sistematizar un modelo de análisis estructural de las bóvedas tabicadas, capaz de analizar gráficamente las fuerzas y verificar la estabilidad del conjunto, detectar las pautas que rigen la relación entre geometría y estabilidad, poder describir su comportamiento estructural, y poder predecir la estabilidad de las bóvedas tabicadas. Indagar en las posibilidades del modelo y desarrollar un método capaz de integrar el cálculo de las estructuras de bóveda tabicada en el proyecto, analizando estructuralmente las bóvedas americanas de los Guastavino, ese marco teórico que se esforzó por encontrar con sus teorías de la construcción cohesiva,

proceso que siguió indagando su hijo en torno al análisis de membrana, y que finalmente, reconoció no haber tenido:

“Pero todo este trabajo fue casi por completo empírico. No había una justificación técnica y, ¿cómo podría haberse tenido?. El espesor de las bóvedas se calculó por intuición, de la misma forma que un buen herrero el tamaño de las piezas que usa o que un buen marinero elige el grosor de una cuerda”

Estuvo aplicando de forma empírica las reglas y métodos tradicionales que aprendió con los estudios y experimentó en su etapa profesional, reglas principalmente geométricas que sin duda aplicó correctamente. Probablemente, en la actualidad, estamos muy cerca de poder dar ese marco teórico



Valencia 30/05/2016

**Miguel Angel Chiari**