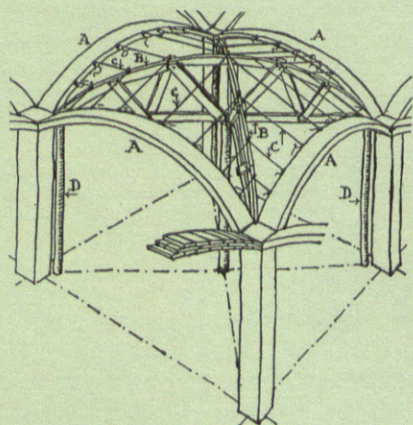
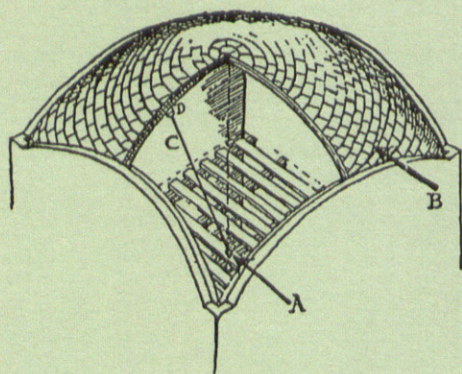
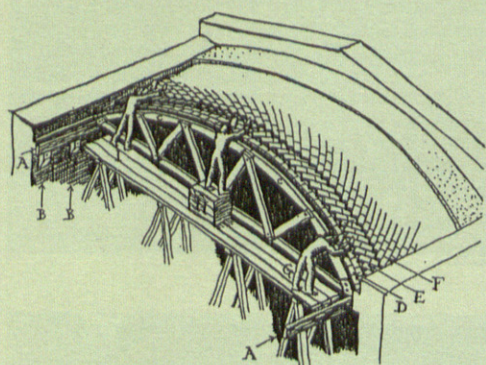
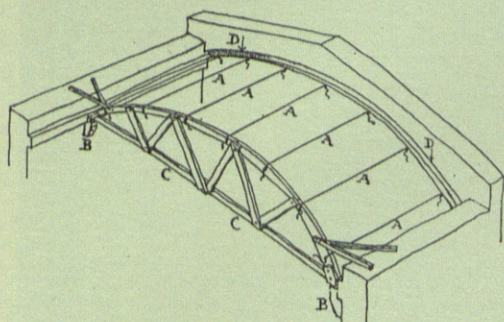


14 mecánica de las bóvedas tabicadas

SANTIAGO HUERTA

Santiago Huerta es arquitecto y profesor de Estructuras de la Edificación en la ETSA de Madrid.



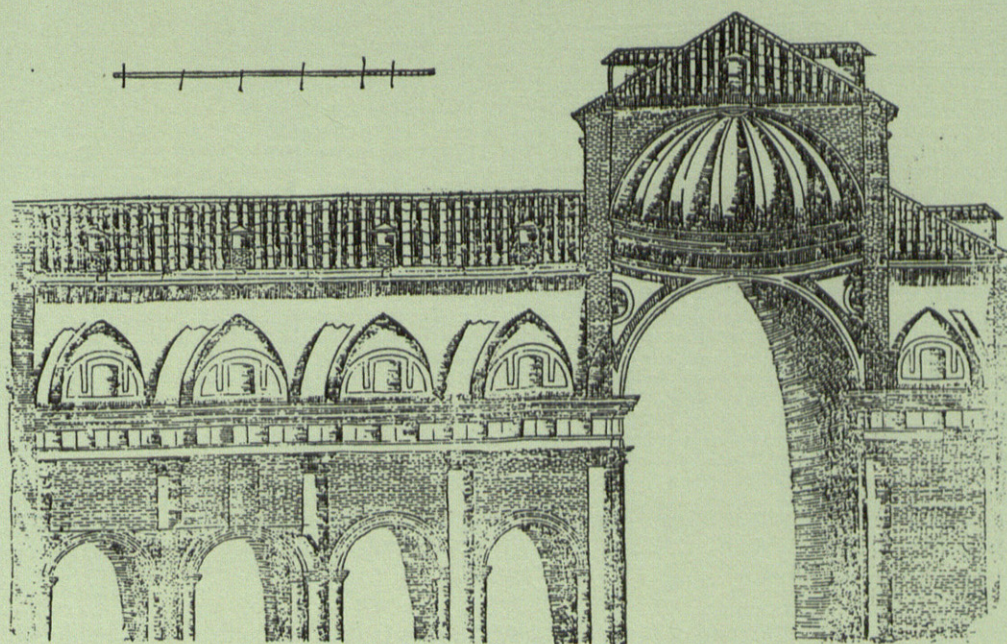
Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, hechas con ladrillo y mortero. Su singularidad proviene de su construcción: los ladrillos se van disponiendo de plano formando una o varias hojas y se ejecutan sin cimbra. Los ladrillos se van disponiendo cerrando arcos o anillos sucesivos, hasta completar la bóveda [i1 e i2]. Durante su construcción la sujeción de los ladrillos se consigue por la adhesión del mortero de fraguado rápido (en general yeso) con los arcos o anillos previos ya terminados, o con los muros de borde. No hay cimbras pero sí se emplean "formas" (cerchas ligeras), camones, o cintreles diversos con el objeto de controlar la geometría de la bóveda, en particular cuando ésta adquiere ciertas dimensiones o se desea una ejecución esmerada. La técnica es en todo análoga a la construcción sin cimbra de bóvedas por hojas sucesivas de ladrillo, que tiene su origen en Mesopotamia y Egipto, y alcanzó su máximo desarrollo en Bizancio. En este último caso de bóvedas por hojas se solía emplear mortero de cal, de más lento fraguado, y la adhesión se suplementa inclinando las juntas de los ladrillos. No obstante, el proceso constructivo se desarrolla de modo similar formando arcos y anillos. Estas coincidencias sugieren un origen común.

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

Hasta mediados del siglo XIX, las bóvedas tabicadas se han empleado para distintos tipos de elementos: a) para cubrir las naves de las iglesias. En este caso, sólo deben soportar su propio peso y la carga ocasional propia del mantenimiento. En general van protegidas por una techumbre superior de madera; b) para formar forjados; c) para construir escaleras. A partir de principios del siglo XIX se empezaron a emplear en España y Francia para la construcción de cubiertas y suelos de edificios industriales, principalmente de fábricas textiles. El empleo del cemento Portland en el doblado permitió utilizarlas como cubierta, sin necesidad de una techumbre superior u otros métodos de impermeabilización. En la Cataluña de finales del siglo XIX y principios del XX se convirtieron casi en un símbolo nacional. Rafael Guastavino las exportó a América, a finales de siglo XIX, y allí les confirió una dignidad que probablemente nunca habían tenido. Las "bóvedas de Guastavino" se construyeron en varios de los edificios más importantes de la zona este de los Estados Unidos de 1890 a 1900.

La técnica de la construcción tabicada se conoce bastante bien y puede consultarse a este respecto una amplia bibliografía. No ocurre lo mismo en lo referente a su comportamiento estructural. Los primeros tratados de arquitectura no distinguían entre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas y el de las bóvedas de rosca de ladrillo o piedra. Sin embargo, a partir del siglo XVIII fueron miradas con recelo por algunos arquitectos que aludían a su falta de seguridad y durabilidad. En particular, se ha considerado que las bóvedas tabicadas tienen un comportamiento estructural esencialmente distinto que el de las bóvedas convencionales de ladrillo o piedra. Como veremos, se las consideraba monolíticas y sin empujes. Guastavino las encuadró dentro de las estructuras "cohesivas", en contraposición a las estructuras abovedadas por "gravedad". Se intentaron análisis según el método elástico, que en muchas de las ocasiones fracasaron. En España se las llegó a calificar de "imposibles de calcular", lo que llevó a la demolición de muchas de ellas y a su sustitución por otros sistemas estructurales más convencionales.

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



13 PROYECTO DE IGLESIA DEL TRATADO DE FRAY LORENZO DE SAN NICOLÁS (1639)

La tradición tabicada en España: Fray Lorenzo de San Nicolás

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

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

Los rellenos y lengüetas pueden servir para soportar un suelo horizontal pero, además, tienen una función estructural: permiten que la bóveda resista sobrecargas asimétricas o cargas móviles. Fray Lorenzo se ocupa asimismo del cálculo de los estribos. Da para ello una serie de reglas que se refieren al tipo más habitual en la época: iglesia de una nave con bóveda de cañón de medio punto o lunetos; la planta es de cruz latina, y el crucero se cubre con una cúpula. En la 13 puede verse una sección tomada de su tratado; nótese la delgadez de la cúpula, que es tabicada. Procede de forma sistemática, asignando las dimensiones en función del material de la bóveda y considerando dos tipos posibles de estribo: muro continuo o muro con contrafuertes. La exposición es discursiva pero puede resumirse en la tabla de la 14.

El tratado de Fray Lorenzo gozó de gran difusión en los siglos posteriores en España. No es extraño, se trata de un libro excepcional por la abundancia de temas tratados y por la claridad de su exposición. Sus reglas para los estribos se citan en muchos tratados de arquitectura posteriores, por ejemplo el de García Berruguilla (1747) y el de Plo y Camín (1767).

Por supuesto, Fray Lorenzo y el resto de los constructores educados en la construcción tabicada sabían que, una vez terminada la bóveda tabicada, la única diferencia en el comportamiento estructural en relación con las de rosca de ladrillo o de piedra era el menor empuje por la reducción en peso. Seguían haciendo falta estribos, aunque menores. El resto de las circuns-

Mechanics of timber or catalonian vaults

Catalonian or timber vaults are masonry vaults, made with bricks and mortar. Their singularity comes from their construction: the bricks are placed flat forming one or several sheets and are made without arch centre. The bricks are placed forming successive arches or rings, completing the vault (11 and 12). During their construction the fixing of the bricks is achieved by the adhesion of quick setting mortar (plaster in general) with the previous arches or rings already finished, or without the border walls. There are no arch centres but "forms" are indeed used (light trusses), camones, or diverse cintreles with the aim of controlling the geometry of the vault, in particular when this acquires certain dimensions or if a careful execution is wished. The technique is analogous in everything to the construction without vault arch centres by successive sheets of bricks, which has its origin in Mesopotamia and Egypt, and reaches its maximum development in Byzantium. In the latter case of vaults by sheets lime mortar was usually used, it was slower setting, and the adhesion was supplemented by inclining the joints of the bricks. However, the constructive process is developed in a similar way forming arches and rings. These coincidences suggest a common origin.

The timber vaults can be built with very limited thickness. The norm is that there are 2 sheets (about 10 centimetres in total, including an intermediate layer of mortar and the covers), but they can be found with one sheet (about 5 cm). The slenderness ratio, the relationship between the radius of curvature and span is found around one hundred, but there are some a lot more slender. They can also span large spaces, as in the case of the vault above the crossing of the cathedral of Saint John the Divine in New York, which with a 33 m span is the biggest to have been built.

Until the middle of the nineteenth century, timber vaults had been used for different types of elements: a) to cover the naves of churches. In this case, they must just support their own weight and the occasional load due to maintenance; b) to form brick noggin; c) to build stairs. From the beginning of the nineteenth century in Spain and France they started to be used for the construction of covers and floors of industrial buildings, mainly textile factories. The use of Portland cement in the hook allowed them to be used as covers, without the need of an upper roof or any other method of waterproofing. In Catalonia at the end of the nineteenth century and the beginning of the twentieth they almost became a national symbol. Rafael Guastavino exported them to America at the end of the nineteenth century, and there he bestowed on them a dignity which they had probably never had. "Guastavino's vaults" were built in some of the most important buildings in the east area of the United States between 1890 and 1900.

The technique of timber construction is well known and in this respect an ample biography can be consulted. But the same cannot be said in reference to its structural behaviour. The first treatises of architecture did not distinguish between the structural behaviour of timber vaults and brick or stone screw vaults. However, from the eighteenth century some architects who alluded to their lack of safety and durability viewed them distrustfully. In particular, it has been considered that timber vaults have a structural behaviour essentially different from conventional brick or stone vaults. As we shall see, they are considered monolithic and without thrust.

Guastavino framed them within "cohesive" structures, in contrast to the vaulted structures by "gravity". Some analyses were attempted according to the elasticity method, which failed in many occasions. In Spain they were even described as "impossible to calculate", which led to the demolition of many of them and their substitution by other more conventional structural systems.

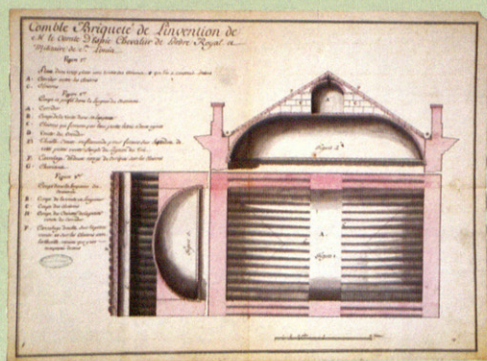
The main aim of this article is to outline the history of the ideas referring to the structural behaviour of timber vaults, so they can finally be put back in their place: timber vaults are masonry vaults. As any other masonry structure they have little resistance to traction, they crack and thrust. They are not monolithic or cohesive. They can be and must be calculated with the same tools as any other masonry vault. They are no less durable if they get the necessary maintenance.

The timber tradition in Spain: Fray Lorenzo de San Nicolás

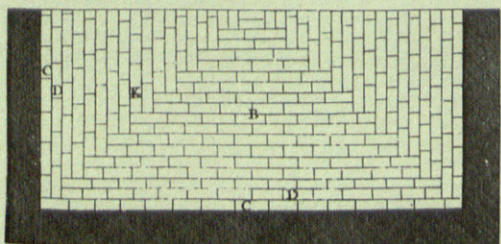
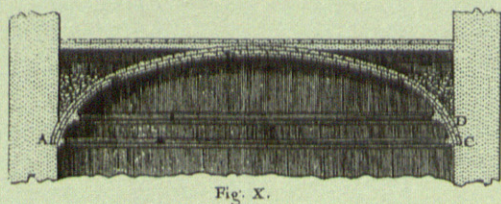
The first documents about this type of construction go back to the fourteenth century and some vaults of this time are still preserved in Catalonia. In the sixteenth century their use was common; they were valued for their ease of construction, high resistance, and above all, their lighter weight, which made it possible to considerably reduce walls and counteracting buttresses. For example, direct references to the advantages mentioned can be found in some written reports circa 1620 during the construction of the Palacio de Carlos V in Granada.

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

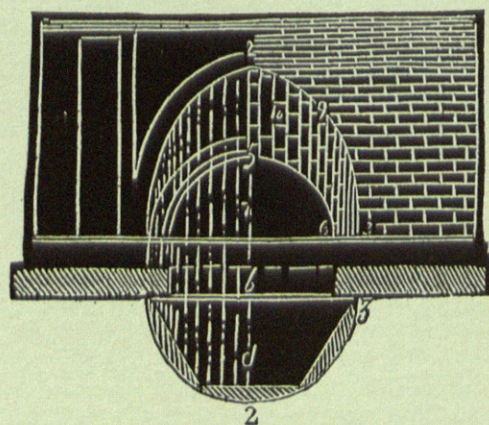
14 REGLAS DE FRAY LORENZO PARA EL CÁLCULO DE ESTRIBOS EN FUNCIÓN DE LA LUZ



15 CUBIERTA TABICADA "INVENCIÓN" DEL CONDE DE ESPIE



16 CONSTRUCCIÓN DE UNA BÓVEDA TABICADA (BLONDEL 1777)



17 CONSTRUCCIÓN DE UNA BÓVEDA DE CAÑÓN CON LUNETAS (FORNÉS 1846)

The most relevant text in relation to the construction and mechanic of timber vaults is the treaty of architecture by Fray Lorenzo de San Nicolás, published in Madrid in 1639. Fray Lorenzo, who worked as an architect and built many timber vaults, described the construction of the fundamental types of vaults (barrel vault, arched vault, half orange, coved vault, etc) of stone, brick screw and timber. No distinctions were made about the goodness or not of one material or another. Fray Lorenzo, it seems, constructively considered the three procedures as equally good and left the choice to the architect in each case. Besides, it is very revealing that, independently from the material, it was necessary to provide the vault with a tusk backing that transmits the thrusts to the abutments. Thus, he indicated the need to make the extrados solid by filling it from the springing to the first third of the height of the vault and to have walls or not bearing partitions as buttresses, which he called "tongues" reaching the second third. Fray Lorenzo was explicit about the structural role of these devices.

The fillings and tongues can assist in supporting a horizontal floor but they also have a structural function: they allow the vault to resist asymmetric or mobile loads. Fray Lorenzo also deals with calculating the abutments. He gave a series of rules that refer to the most usual type at the time: church with one nave with round barrel vault or underpitch vault; the plan is a Latin cross, and the crossing is covered with a dome. In 13 a section taken from his treaty can be seen; notice the thinness of the dome, which is Catalanian. He proceed in a systematic way, assigning the dimension in relation to the material of the vault and considering two possible types of abutment: continuous wall or wall with buttresses. The exposition is discursive but can be summarised on the table in 14.

tancias eran idénticas. En particular las bóvedas tabicadas también se agrietan y las patologías son idénticas a las de ladrillo o piedra.

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

En Francia existió una tradición tabicada de influencia española en la región del Rosellón. Hacia 1700 esta tradición constructiva pasó al Languedoc francés y, en particular, el duque de Belle Isle construyó una serie de bóvedas tabicadas en su castillo, empleando para ello albañiles de Perpignan. La construcción de estas bóvedas tan ligeras causó gran sensación en aquel momento y despertaron el interés de un noble ilustrado, ya retirado, el conde D'Espie. Espie estudió edificios con bóvedas tabicadas y, finalmente, construyó uno, con este tipo de construcción antiincendio [15]. Todas sus experiencias y opiniones las recogió en un pequeño libro, publicado en 1754, titulado *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles*. El libro tuvo una gran acogida y en pocos años se tradujo y publicó al inglés (1756), alemán (1760), y español (1775).

Espie comienza su libro tratando las ventajas de la construcción tabicada, haciendo hincapié en su incombustibilidad, así como en su reducido peso y adaptabilidad. Escribe también una detallada descripción del método constructivo. Pero lo que tiene mayor interés es que dedica un capítulo a comparar las bóvedas tabicadas con las bóvedas convencionales. Empieza describiendo de forma cualitativa la forma en que empujan las bóvedas de fábrica, pero advierte enseguida que estas observaciones no se aplican a las bóvedas tabicadas, pues éstas son de una naturaleza diferente y no empujan contra los muros. Espie atribuye esta ausencia de empujes al carácter monolítico de la bóveda terminada, que forma una masa sólida gracias a la buena calidad del mortero empleado; como no es posible que se produzcan grietas o se divida en trozos la bóveda no produce empujes. Las ideas de Espie fueron aceptadas, en general, sin crítica por los autores posteriores. Este es el caso de Laugier (1755) y de Rieger (1763), pero tuvo particular importancia que las bóvedas tabicadas recibieran un extenso tratamiento en el tratado de Blondel/Patte (1771-1777), uno de los más influyentes de su época [16]. Ya en el siglo XIX, Rondelet (1802) resume esta información y la incorpora su tratado, del que se imprimieron numerosas ediciones.

La influencia de Espie en España y la "Censura" de Ventura Rodríguez

El libro de Espie fue traducido al castellano por Joaquín de Sotomayor (1776). Sotomayor incorpora, entre corchetes, sus propias opiniones y experiencias. Resulta muy interesante que el libro vaya precedido de una Censura de D. Ventura Rodríguez, Arquitecto mayor de Madrid y uno de los arquitectos españoles más importantes del siglo XVIII. El comienzo marca el tono de la censura: "Lograría considerables ventajas el arte de edificar, si todas las ideas que nos proponemos asequibles tuvieran en la práctica el buen éxito que a la fantasía aparece". A continuación sigue una crítica acerba de las ideas fundamentales de Espie: el monolitismo y la consiguiente falta de empujes. Ventura Rodríguez cita varios casos de agrietamientos y desplomes en edificios construidos que demuestran el empuje de las bóvedas: "Pero esta suposición (de ausencia de empujes), o creencia, es 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

Fray Lorenzo's treaty enjoyed a great diffusion in the following centuries in Spain. It is not strange; it is an exceptional book for the abundance of issues treated and its clarity of exposition. His rules for buttresses are cited in many subsequent architectural treaties, for example the ones by García Berruguilla (1747) and Pío y Camín (1767).

Of course, Fray Lorenzo and the rest of the builders educated in timber construction knew that, once the timber vault was finished, the only difference in the structural behaviour in relation to brick or stone screw was less thrust because of the reduction in weight. The buttresses were still needed, although smaller. The rest of the circumstances were identical. In particular the timber vaults also crack and the pathologies are identical to brick or stone ones.

The Catalan tradition in France: The Earl D'Espie and the myth of "monolithism"

In France there was a Catalan tradition with Spanish influence in the region of Roussillon. Around 1700 this building tradition spread to Languedoc and, particularly, the duke of Belle Isle had a series of timber vaults built in his castle, using workers from Perpignan for the task. The construction of such light vaults caused great sensation at the time and aroused the interest of an enlightened nobleman, already retired, the Earl D'Espie. He studied buildings with timber vaults and, finally, had one built with this type of fireproof construction [15]. He gathered his experiences and opinions in a small book, published in 1754, titled *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles*. The book had a great reception and in a few years was translated into and published in English (1756), German (1760) and Spanish (1775).



DR. C. C. LL. 10-15-08

18 VISTA DEL INTERIOR DE LA FÁBRICA BATLLÓ

más gruesas, amparadas de estribos, que a favor de la firmeza son grandes ventajas... y las vemos quebrantadas por muchas partes, y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje..."

Insiste varias veces en la necesidad de dar contrarresto suficiente a las bóvedas tabicadas y recalca la importancia de la "firmeza", además de la "hermosura" y la "comodidad", pues si aquella falta "todo está perdido". Ventura Rodríguez, pues, no comulga con las opiniones de Espie y Sotomayor, considerándolas incluso peligrosas. Hay que resaltar que Sotomayor, como Espie, era un aficionado a la construcción, no un constructor. Ventura Rodríguez, un arquitecto de gran experiencia vio inmediatamente los errores de la teoría "monolítica", sin empujes, del conde de Espie.

En el siglo XIX español, la influencia de Espie es evidente en dos tratados que se ocupan de la construcción tabicada, los de Benito Bails (1796) y Manuel Fornés y Gurrea (1841, 1846). Bails fundamentalmente compila y plagia tratados franceses anteriores, en particular el de Blondel/Patte (1777) si bien en el capítulo dedicado a la construcción tabicada transcribe en primer lugar los párrafos correspondientes de Fray Lorenzo de San Nicolás. Pero luego copia, traduciendo al español, directamente de Blondel/Patte. Aparentemente no percibe la contradicción entre los dos textos.

Los tratados de Fornés son originales. El primero publicado en 1841 y revisado en 1857 constituye una aportación original. Explica con gran detalle el modo de construir los principales tipos de bóvedas tabicadas; de cañón (con y sin lunetos) [17], de escaleras (a montacaballo y de caracol), cúpulas y pechinas, etc. En cuanto a los empujes, Fornés considera que las bóvedas tabicadas empujan, aunque menos, debido a su menor espesor, siguiendo la tradición de Fray Lorenzo de San Nicolás y Ventura Rodríguez.

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

La teoría de la "construcción cohesiva" de Rafael Guastavino Moreno

Rafael Guastavino Moreno fue el primero en intentar formular una teoría que explicase, de forma científica, el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. Nacido en Valencia en 1842, viajó a Barcelona en 1861 donde comenzó sus estudios de construcción y arquitectura. En 1866 ya había construido un bloque de pisos y en 1868 comenzó la construcción de la gran Fábrica Batlló. Aquí empleó la técnica tabicada de modo extensivo [18], y para entonces ya estaba convencido que el progreso futuro y la perfección de la construcción de fábrica se basaba en este tipo de edificación. En 1881 decidió emigrar a América, país en el que pensaba encontrar un ambiente más propicio para el desarrollo de sus ideas. Tras algunos encargos

Espie started his book by dealing with the advantages of timber construction, insisting on its incombustibility, as well as its reduced weight and adaptability. He also wrote a detailed description of the constructive method. But what is more interesting is that he dedicated a chapter to comparing timber vaults to conventional vaults. He starts describing in a qualitative form the way in which masonry vaults thrust, but straightaway he warns that these observations are not applied to timber vaults, as they have a different nature and do not thrust against the walls. Espie ascribed this absence of thrusts to the monolithic character of the finished vault, which forms a solid mass thanks to the good quality of the mortar used; as it is not possible for cracks to occur or the vault to be divided in parts there are no thrusts. Espie's ideas were accepted, generally, without criticism from later authors. This is the case of Laugier (1755) and of Rieger (1763), but particularly important was that the timber vaults received an extensive treatment in the treaty by Blondel/Patte (1771-1777), one of the most influential of its time [16]. In the nineteenth century, Rondelet (1802) summarized this information and it was incorporated into his treaty, of which numerous editions were printed.

Espie's influence in Spain and the 'Censorship' of Ventura Rodríguez

Joaquín de Sotomayor translated Espie's book into Spanish (1776). He incorporated, between square brackets, his own opinions and experiences. It is very interesting that the book was preceded by the Censorship by D. Ventura Rodríguez, the Principal Architect of Madrid, and one of the most important Spanish architects in the eighteenth century. The beginning marks the tone of the censorship: "The art of building would achieve considerable advantages if all the reasonable ideas we propose had in practice the good success that seems possible in fantasy". Next there is a harsh criticism of Espie's fundamental ideas: monolithism and the consequent lack of thrusts. Ventura Rodríguez cites several cases of cracks and collapses in constructed buildings that demonstrate the thrust of the vaults: "But this supposition (the absence of thrusts) or belief, is flattering despite the mentioned experiences, and it is not effectively verified, as the evident examples we have in almost all the Temples in Madrid prove, their vaults are covered with brick and plaster, with a higher curvature, and with thicker walls, supported by abutments, which are great advantages in favour of firmness... and we see them cracked in many parts, and with collapsing in walls, due to the thrust..."

He insists several times upon the need to give enough counter-rest to the timber vaults and highlights the importance of 'firmness', besides 'beauty' and 'comfort', because if the former is lacking "everything is lost". Ventura Rodríguez, thus, does not agree with the opinions of Espie and Sotomayor, considering them even dangerous. It has to be pointed out that Sotomayor, like Espie, was an aficionado of building, not a builder. Ventura Rodríguez, an architect of huge experience, immediately saw the errors of the early Espie's 'monolithic' theory, without thrusts.

In the nineteenth century, the influence of Espie in Spain was evident in two treaties that are about timber construction, one by Benito Bails (1796) and another by Manuel Fornés y Gurrea (1841, 1846). Bails basically compiled and plagiarized earlier French treaties; in particular the one by Blondel/Patte (1777) although in the chapter dedicated to timber construction he transcribes, in the first place, the corresponding paragraphs of Fray Lorenzo de San Nicolás. But then he copies, translating it into Spanish, from Blondel/Patte. Apparently he does not perceive the contradiction between the two texts.

The treaties by Fornés were original. The first published in 1841 and revised in 1857 constituted an original contribution. It explained with great detail the method of construction for the main types of timber vaults, barrel vaults (with or without underpitch, 17), stairs vaults (on horseback and spiral), domes and pendentive domes, etc. in relation to thrusts, Fornés considered that timber vaults thrust, though less, due to their smaller thickness, following the tradition of Fray Lorenzo de San Nicolás and Ventura Rodríguez.

Fornés, nevertheless, knows about Espie's ideas, probable through Bails, and contradictions start turning up. So, in the first part of the treaty he dis-

cusses the geometry and thickness of the vaults that will determine the thrusts and, therefore, the section of the wall to support them. But further on he wrote: "(the timbrel vault)... the worked covered and thin partitions, their fabric is reduced to a solid body, equally, for example, to the top of a pot, without any more thrust than its own weight". The same way that Bails seemed not to notice these contradictions. However all the designs for vaulting that he included in his second treaty have the usual counter-rest of masonry structures.

The theory of 'cohesive construction' by Rafael Guastavino Moreno

Rafael Guastavino Moreno was the first to try formulating a theory that explained, in a scientific way, the structural behaviour of timbrel vaults. He was born in Valencia in 1842, travelled to Barcelona in 1861 where he started his studies in construction and architecture. By 1866 he had already built a block of flats and in 1868 he began the construction of the great Batlló factory. Here he used the timbrel technique in an extensive way (i8), and by then he was already convinced that the future progress and perfecting of the masonry building was based on this type of edification. In 1881 he decided to emigrate to America, a country in which he thought he would find a more propitious atmosphere for the development of his ideas. After some assignments of minor importance as architect and after working as builder, he realized that if he wanted to actually apply his ideas, he should give up being an architect and work as a builder at the service of the designs of other American architects. In 1889 he founded the Guastavino Fire proof Construction Company and the same year he began his first big work: the construction of the vaults at the Public Library in Boston (i9). The daring and lightness of this new structure got enormous admiration. We must remember that before Guastavino most of the vaults that were built in America were false, and hang from wooden or iron truss. The timbrel vaults, built without the need of heavy arch centre, resulted very attractive for many architects who found that in this way constructive dignity was given to vaults.

After the success of the Boston Public Library, Guastavino worked for some of the most important architects of the time and he built, until his death in 1908, hundreds of vaults and domes of all types, some resting on an iron structure (i10). But the beginnings were not easy; this type of vaulting was completely unknown in America and was looked upon with reticence by many builders. The first thing that Guastavino had to do, therefore, was to convince American architects and engineers about the resistance and high quality of these structures. He needed a historical as well as a technical theory, which would give academic rank to his impeccable constructive practice. In 1892 he published his Essay on The theory and history of cohesive construction, applied especially to the timbrel arch, where he depicts his ideas about the functioning of timbrel vaults.

Guastavino divided masonry construction in two groups in relation to their mechanical behaviour: the 'mechanic construction' or construction by gravity, and the 'cohesive construction' or construction by assimilation. The timbrel construction is cohesive, but is not the only type of cohesive construction. In fact, for Guastavino a good part of the best works of architecture in the past are cohesive; in this sense he cites the Caracalla spa, Saint Sophie, the cathedral in Zamora, Saint Mary of Fiore and the Baptistery in Florence, Saint Peter in Rome, Saint Genevieve in Paris, Saint Paul in London, etc. Apparently, any building built with a material that presents a good adhesion with mortar (Roman concrete, masonry bricks or timbrel vault) falls within cohesive construction. There is no doubt that Guastavino was looking for historical arguments in favour of timbrel construction. Another aspect of great importance is his pointing out the 'natural' character of cohesive construction of timbrel vaults. Guastavino was fascinated by the possibility of constructing buildings by the agglomeration of small pieces, as nature does when forming its conglomerates and in his book he describes the fascination he felt on a visit to the big cave in the Monasterio de Piedra in Spain: "This cave is actually an colossal example of cohesive construction. Why have we not built with this system?" This passage is basic to understand Guastavino's structural thinking. The idea that cohesive construction is a 'natural' construction and, therefore, 'more rational, durable and economic', came to him as a revelation and was the motor force that drove his work all his life.

Resistance tests

As has been said, Guastavino was very conscious of what the problem of convincing American architects about the goodness of the timbrel construction system would entail. Even in Spain, where the practice went back a few centuries, these structures were often seen with distrust. Theoretical and historical speculations were necessary but, above all, some scientific tests had to be carried out. Guastavino did several series of tests. The first systematic tests were done in 1887 in test tubes (i11). In these tests he obtained the values of breaking tensions by compression (14.6 N/mm²), traction (2.0 N/mm²), and shear (0.9 N/mm²), shearing and bending, which allowed him to verify the safety of his vaults by comparison to working tensions.

To contrast these results with real structures he did, later on in 1901, some breaking tests on timbrel vaults with a rise of 1/10 of span. The i12 shows the photograph of one of these tests. The picture is spectacular and says more in favour of timbrel vault resistance than any other theory or sets of lab tests.

The thrust of timbrel vaults and domes

Practically the only information about the calculation methods used by Guastavino is on the Essay. Guastavino deals with two typical issues: the segmental barrel vault and semicircular dome, also surbated. To obtain the thrust of an arch or barrel vault he uses a formula that considers the uni-

de importancia menor como arquitecto, se dio cuenta de que, si quería aplicar sus ideas en la práctica, debía renunciar a ser arquitecto y trabajar como constructor al servicio de los proyectos de otros arquitectos americanos. En 1889 fundó la Guastavino Fireproof Construction Company y en ese mismo año comenzó su primera gran obra: la construcción de las bóvedas de la Biblioteca Pública de Boston [i9]. La audacia y ligereza de esta nueva estructura obtuvo gran admiración. Debemos recordar que antes de Guastavino la mayor parte de las bóvedas que se construían en América eran falsas, y colgaban de unos camones de madera o hierro. Las bóvedas tabicadas, construidas sin necesidad de pesadas cimbras, resultaron muy atractivas para muchos arquitectos que encontraron que de esta manera se devolvía la dignidad constructiva a la bóveda.

Tras el éxito de la Biblioteca Pública de Boston, Guastavino trabajó para algunos de los arquitectos más importantes del momento y construyó hasta su muerte en 1908 centenares de bóvedas y cúpulas de todo tipo, algunas apoyando sobre una estructura de hierro [i10]. Pero los comienzos no fueron fáciles; este tipo de abovedamiento era completamente desconocido en América y era mirado con reticencia por muchos constructores. Lo primero que tuvo que hacer Guastavino, por tanto, fue convencer a los arquitectos e ingenieros americanos de la resistencia y alta calidad de estas estructuras. Necesitaba una teoría tanto histórica como técnica, que diera rango académico a su impecable práctica constructiva. En 1892 publica su *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, Applied Especially to the Timbrel Arch* (Ensayo sobre la teoría e historia de la construcción cohesiva, con particular atención a la bóveda tabicada) donde recoge sus ideas sobre el funcionamiento de las bóvedas tabicadas.

Guastavino divide las construcciones de fábrica en dos grupos en función de su comportamiento mecánico: la "construcción mecánica" o construcción por gravedad, y la "construcción cohesiva" o por asimilación. La construcción tabicada es cohesiva, pero no es el único tipo de construcción cohesiva. De hecho, para Guastavino una buena parte de las mejores obras de arquitectura del pasado son cohesivas; cita en este sentido las termas de Caracalla, Santa Sofía, la catedral de Zamora, Santa Maria dei Fiore y el Baptisterio en Florencia, San Pedro de Roma, Santa Genoveva en París, San Pablo de Londres, etc. Aparentemente, cualquier edificio construido con un material que presente una buena adhesión con el mortero, ya sea hormigón romano, una fábrica de ladrillo o una bóveda tabicada, entra dentro de la construcción cohesiva. No hay duda de que Guastavino está buscando argumentos históricos a favor de la construcción tabicada.

Otro aspecto de gran importancia es su puntualización sobre el carácter "natural" de la construcción cohesiva de bóvedas tabicadas. Guastavino estaba fascinado por la posibilidad de construir edificios por la aglomeración de pequeñas piezas, como la naturaleza hace al formar sus conglomerantes y en su libro describe la fascinación que le produjo una visita a la gran cueva del Monasterio de Piedra en España: "Esta cueva es realmente un ejemplo colosal de construcción cohesiva, ¿Por qué no hemos construido con este sistema?" Este pasaje es clave a la hora



i9 CONSTRUCCIÓN DE ARCOS TABICADOS EN LA BIBLIOTECA DE BOSTON. EL HOMBRE DE PIE SOBRE UNO DE LOS ARCOS ES RAFAEL GUASTAVINO



i10 BÓVEDAS TABICADAS DE GUASTAVINO SOBRE UNA ESTRUCTURA DE HIERRO. BIBLIOTECA DEL NEW YORK STATE EDUCATION BUILDING

de entender el pensamiento estructural de Guastavino. La idea de que la construcción cohesiva es una construcción "natural" y, por tanto, "más racional, duradera y económica", le vino como una revelación y fue la fuerza motriz que impulsó su trabajo durante toda su vida.

Ensayos de resistencia

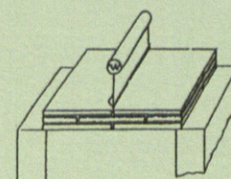
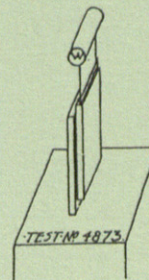
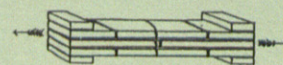
Como se ha dicho, Guastavino era muy consciente del problema que supondría convencer a los arquitectos americanos de las bondades del sistema tabicado de construcción. Incluso en España, donde la práctica se remontaba a varios siglos atrás, estas estructuras eran vistas a menudo con desconfianza. Las especulaciones teóricas e históricas eran necesarias pero había, sobre todo, que realizar ensayos científicos. Guastavino realizó varias series de ensayos. Los primeros ensayos sistemáticos se hicieron en 1887 sobre probetas [i11]. En estos ensayos obtuvo unos valores de las tensiones de rotura a compresión ($14,6 \text{ N/mm}^2$), tracción ($2,0 \text{ N/mm}^2$) y cortadura ($0,9 \text{ N/mm}^2$), cortante y flexión, que le permitieron verificar la seguridad de sus bóvedas por comparación con las tensiones de trabajo.

Para contrastar estos resultados con estructuras reales realizó con posterioridad, en 1901, ensayos de rotura sobre bóvedas tabicadas con una flecha de $1/10$ de la luz. En la i12 se muestra la foto de uno de estos ensayos. La foto es espectacular y dice más en favor de la resistencia de las bóvedas tabicadas que cualquier teoría o conjunto de ensayos de laboratorio.

El empuje de las bóvedas y cúpulas tabicadas

Prácticamente la única información sobre los métodos de cálculo empleados por Guastavino se encuentra en el Essay. Guastavino trata dos temas típicos: la bóveda de cañón rebajada y la cúpula semiesférica, también rebajada. Para obtener el empuje de un arco o bóveda de cañón emplea una fórmula que considera la carga uniforme. Esto equivale a considerar una línea de empujes parabólica y, para bóvedas rebajadas, la aproximación es muy buena. El cálculo de Guastavino es, evidentemente, un cálculo de equilibrio por el que obtiene un valor del empuje, para luego hacer comprobaciones de resistencia y calcular el sistema de contrarresto, ya sea mediante estribos de fábrica o, con mayor frecuencia, mediante algún sistema de tirantes de hierro forjado.

Trata a continuación las cúpulas, que considera la forma por excelencia. Para calcular su empuje Guastavino acude a otra aproximación y supone que el empuje de la cúpula es la mitad del empuje de una bóveda de cañón del mismo perfil. Esto es aproximadamente cierto; es una idea antigua que se remonta a Frézier (1737), y Guastavino pudo haberla aprendido en sus clases de Barcelona.



i11 PROBETAS PARA LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA REALIZADOS POR GUASTAVINO (GUASTAVINO 1893)

i12 ENSAYO DE RESISTENCIA SOBRE UNA BÓVEDA DE CAÑÓN TABICADA (1901)



form load. This is equivalent to considering a parabolic line of thrusts and, for segmental vaults the approximation is rather good. Guastavino's calculation is, obviously, equilibrium calculation by which he obtains a value of thrust, then he checks resistance and calculates the counteracting system, whether is through masonry abutments or, more often, through a system of cast iron ties.

Next he deals with domes, which he considers the form per excellence. For calculating their thrust Guastavino used another approximation and he assumes that the thrust of the dome is half of the thrust of a barrel vault of the same profile. This is approximately true; it is an old idea that goes back to Frézier (1737), and Guastavino might have learnt it in his lectures in Barcelona.

In summary, Guastavino uses a set of simple expressions for calculations that were usual in the calculation of equilibrium of the thrusts of stone arches, vaults and masonry domes. It seems that he is not aware that when applying these formulas he falls into contradiction with his own cohesive theory. Thus, talking about arches, he says: "We consider our arch not as a stone arch, but a simple casting arch that works as a solid arched piece of stone or iron". This type of contradiction abounds in Guastavino's treatise and the attentive reader asks himself how come, that despite this confusion of ideas, he was one of the greatest builders of masonry vaults

and domes.

On one hand, Guastavino tries to think within the reference frame of monolithism, cohesiveness, resistance to traction and bending. It is the framework he has been given in the times he lived, the second half of the nineteenth century, the time of the development of the elasticity theory, within which Espie's previous concepts (change monolithism for continuity, homogeneity, isotropism) are comfortably incorporated. On the other hand, Guastavino is a great constructor and architect of vaults. He possessed the intuition that is born from the knowledge that the crucial problem in the designing of masonries is not resistance but geometry. It is the old tradition of structure calculation. Moreover, when he did the calculations, he used the usual approach, also correct, of equilibrium using simple rules and graphic analyses.

Membrane analysis applied to timbered vaults: Rafael Guastavino Expósito

Timbered domes are thin shells, so it seems obvious for an architect or an engineer nowadays, the use of membrane analysis to calculate the interior shear. Essentially, the membrane analysis is an equilibrium analysis with the efforts contained within the half surface of the shell. Rankine had already formulated the basic equations (1858), but the application to shells of any shape came with Eddy's graphic method (1878), made popular in

America by two articles written by Dunn (1904 and 1908).

Rafael Guastavino Expósito (1873-1950) worked with his father in the business from the age of fifteen years old. As well as doing this work, he simultaneously did his studies of art, architecture and structures which were self-taught. It is very probable that he read Dunn and decided to apply the method of analysis of timbered domes. He tried to estimate traction to be able to calculate and arrange cast iron reinforcements or add counteracting systems. There are two critical zones: in the oculus when there is clearstorey, and in the base (under 52° from the keystone in the closed hemispheric domes). The method allows, in a simple way, to determine traction zones and in consequence to put reinforcements. Guastavino junior patented this idea in 1910. Guastavino Expósito made this type of analysis for many domes, and in particular for the great dome of St. John the Divine. **i14a** shows what seems to be one of the previous calculations of a vault with a span of 100 feet (30 m), approximately the span of the mentioned dome.

But what proves the perfect comprehension of the functioning of masonries is how he perceives the importance of Dunn's observation: that from the point of traction apparition the thrust would stay constant in a masonry vault without reinforcements. This fact gave him the starting point for a completely original designing method of domes without tractions. The

En resumen, Guastavino emplea para el cálculo un conjunto de expresiones sencillas que eran habituales en el cálculo de equilibrio de los empujes de arcos de dovelas, bóvedas y cúpulas de fábrica. Al parecer, no es consciente de que, al aplicar estas fórmulas, entra en contradicción con su propia teoría cohesiva. Así, dice, al hablar de los arcos: "Consideramos nuestro arco no como un arco de dovelas, sino como un arco simple de fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro". Este tipo de contradicciones abundan en el tratado de Guastavino y el lector atento se pregunta, cómo es posible que, a pesar de esta confusión de ideas, fuera uno de los más grandes constructores de bóvedas y cúpulas de fábrica.

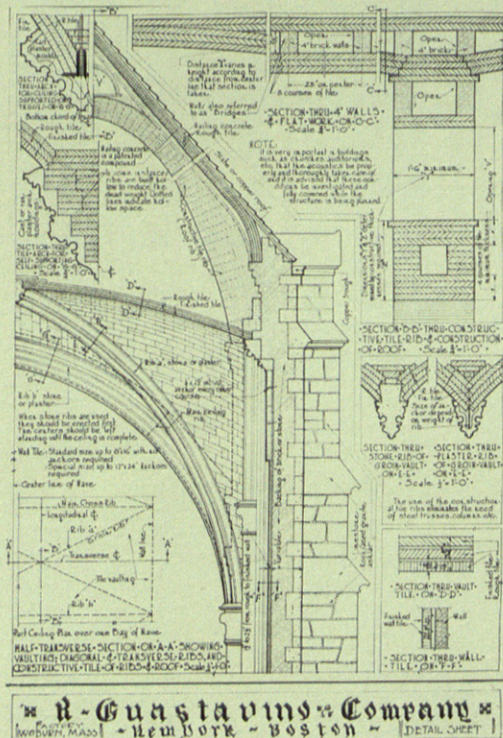
Por un lado Guastavino trata de pensar dentro del marco de referencia del monolitismo, la cohesividad, la resistencia a tracción y flexión: es el marco que le ha sido dado en la época en que vivió, la segunda mitad del XIX, la época del desarrollo de la teoría de la elasticidad, dentro de la que se incorporan con comodidad los conceptos anteriores de Espie (cámbiese monolitismo por continuidad, homogeneidad, isotropismo). Por otro lado Guastavino es un gran constructor y arquitecto de bóvedas. Posee la intuición que nace del conocimiento de que el problema crucial en el proyecto de las fábricas no es la resistencia sino la geometría. Es la antigua tradición del cálculo de estructuras. Además, cuando calculaba empleaba el enfoque habitual y correcto del equilibrio utilizando reglas sencillas o análisis gráficos.

Análisis de membrana aplicado a las bóvedas tabicadas: Rafael Guastavino Expósito

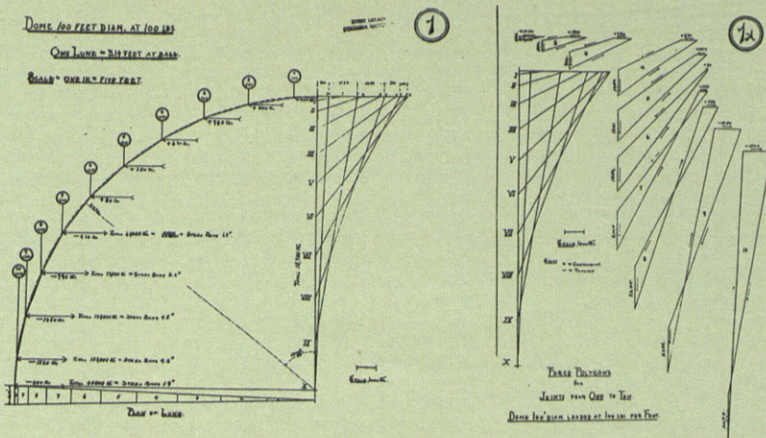
Las cúpulas tabicadas son cáscaras delgadas, parece pues obvio, para un arquitecto o ingeniero de hoy en día, el empleo del análisis de membrana para calcular las fuerzas internas. Esencialmente el análisis de membrana es un análisis de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara. Las ecuaciones básicas fueron formuladas ya por Rankine (1858), pero la aplicación a cáscaras de cualquier forma vino con el método gráfico de Eddy (1878) popularizado en América por sendos artículos de Dunn (1904 y 1908).

Rafael Guastavino Expósito (1873-1950) trabajó con su padre en la empresa desde los quince años de edad. Además, simultaneó esta tarea con estudios sobre arte, arquitectura y estructuras que realizó de manera autodidacta. Es muy probable que leyera a Dunn y decidiera aplicar el método al análisis de cúpulas tabicadas. Particularmente pretendía estimar las tensiones de tracción para poder calcular y disponer refuerzos de hierro forjado o añadir sistemas de contrarresto. Hay dos zonas críticas: en los óculos cuando existe linterna y en la base (por debajo de los 52° desde la clave en cúpulas hemisféricas cerradas). El método permite, de modo sencillo, determinar las zonas de tracción y en consecuencia colocar los refuerzos. Guastavino hijo patentó esta idea en 1910. Guastavino Expósito realizó este tipo de análisis para muchas cúpulas, y en particular para la gran cúpula de St. John the Divine. La **i14a** muestra lo que parece ser uno de los cálculos previos de una bóveda con una luz de 100 pies (30 m), aproximadamente la luz de la cúpula citada.

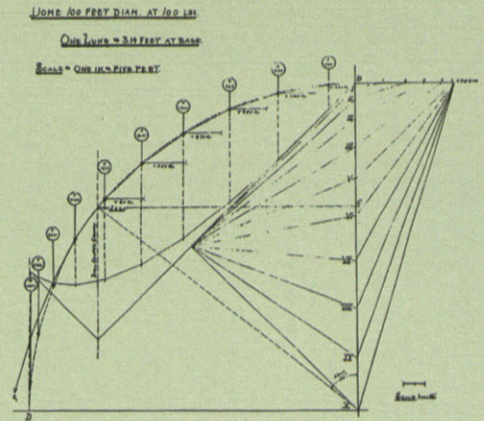
Pero lo que demuestra la perfecta comprensión del funcionamiento de las fábricas es cómo percibe la importancia de la observación de Dunn, de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantendría constante en una cúpula de fábrica sin refuerzos. Este hecho le proporcionó el punto de partida para un método completamente original de proyecto de cúpulas sin tracciones. La parte superior es un casquete esférico trabajando a compresión en todas direcciones; desde el punto donde aparecen las tracciones, se modifica el trazado de la cúpula a partir del diagrama de fuerzas, de manera que la forma resultante correspondiera a una cúpula sin tracciones [**i14.b**]. Guastavino hijo hizo un uso extensivo de este descubri-



i13 CONSTRUCCIÓN DE UNA BÓVEDA DE CRUCERÍA CON PLEMENTOS TABICADOS



114.A ANÁLISIS GRÁFICO DE UNA DELGADA CÚPULA CON UNA LUZ DE 30 M



114.B MODIFICACIÓN DE LA FORMA DE UNA CÚPULA DELGADA PARA EVITAR LA APARICIÓN DE TRACCIONES

miento en el proyecto de sus cúpulas [115]. De hecho el enfoque es mejor que el enfoque catenario puro (por ejemplo, utilizado por Gaudí); la cúpula tiene una sencilla forma geométrica en la zona superior y sólo se desvía de ella cuando es necesario, en la zona de la base.

El análisis elástico: Domenech, Bayó, Terradas

A finales del siglo XIX el análisis elástico se consideraba el mejor enfoque para los arcos de fábrica. Aunque el carácter de la fábrica, heterogéneo y discontinuo, la dificultad para obtener las constantes elásticas, los desplazamientos durante la ejecución, los agrietamientos, etc., eran obvios, y algunos ingenieros eran conscientes de lo dudoso de los presupuestos elásticos aplicados a los arcos de fábrica, la potencia de las ideas elásticas era tan fuerte como para vencer cualquier resistencia. Por otra parte, las ideas elásticas de continuidad, tensión y resistencia a los momentos flectores, encajaban muy bien con la ideas de monolitismo de Espie o la teoría cohesiva de Guastavino. La única diferencia fundamental era que los arcos elásticos sí que tenían empuje. De este modo el énfasis estaba en la resistencia de las bóvedas tabicadas a la tracción y a los momentos flectores.

Domenech (1900) fue el primero en discutir la necesidad de considerar la resistencia a flexión de las bóvedas tabicadas. Para Domenech no hay duda que la única explicación del éxito de las delgadas bóvedas tabicadas proviene de su capacidad de resistir flexiones que puede llegar a anular el empuje horizontal. Reaparece la idea del monolitismo rígido de Espie, el mito de la ausencia de empujes, y la resistencia cohesiva a los momentos flectores. Martorell (1910) abunda en las mismas consideraciones, pero el primero en proponer el análisis de las bóvedas tabicadas como arcos elásticos es Jaime Bayó (1910), que las asimila a arcos metálicos biarticulados. Para Bayó las bóvedas tabicadas empujan, pero este empuje es el del arco biarticulado elástico correspondiente. Se trata, pues, de hallar lo que él denomina el "funicular de las fuerzas elásticas", esto es, la línea de empujes que, además de estar en equilibrio con las cargas, cumple las condiciones de compatibilidad elástica de deformación. Bayó da las fórmulas con las integrales usuales y, luego, explica un procedimiento gráfico de resolución, aplicándolo primero a arcos simétricos de espesor constante o variable, y después a arcos asimétricos.

Bóvedas "imposibles de calcular"

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

Esteve Terradas, gran ingeniero y matemático, fue el primero en intentar un análisis elástico de una bóveda tabicada más compleja, una bóveda de escalera. El estudio de Terradas tuvo su origen en un encargo de Puig y Cadafalch, en 1919, con el fin de resolver el problema que entonces planteaba el cálculo de las bóvedas tabicadas. Pues, como dice Rosell, "las bóvedas de siempre, construidas por los albañiles a *sentimiento*, eran consideradas como *imposibles de calcular*". Terradas intentó realizar un análisis elástico de las bóvedas y examinó problemas elásticos que él conocía muy bien, en particular el de pandeo. Fracasó en su intento. El planteamiento de las ecuaciones de equilibrio elástico para una estructura espacial, como una sencilla bóveda de escalera a montacaballo, es muy complejo. El fracaso de Terradas tuvo como consecuencia reforzar aún más la idea de la imposibilidad de calcular los esfuerzos en las bóvedas tabicadas.

upper part is a spherical cap working by compression in all directions; from the point where tractions appear, the plan of the dome is modified from the shearing diagram, so the resulting form would correspond to a dome without tractions (114b). Guastavino junior used this discovery in an intensive way for the designing of his domes (115). In fact, this approach is better than the pure catenaries approach (for example used by Gaudí); the dome has a simple geometric shape in the upper zone and only deviates from it when necessary, in the base area.

Elasticity test: Domenech, Bayó and Terradas

At the end of the nineteenth century the analysis of elasticity was considered the best approach for masonry arches. Although because of the character of masonry—heterogeneous and discontinuous—the difficulty in obtaining the elasticity constants, the movements during the execution, the cracks, etc., was obvious, and some engineers were conscious about how doubtful were the elasticity assumptions applied to masonry vaults, the potency of elasticity ideas was so strong as to win over any resistance. On the other hand, the elasticity ideas of continuity, tension and resistance to bending moment, fitted very well with Espie's ideas of monolithism or Guastavino's cohesive theory. The only basic difference was that elastic arches did have thrust. This way the emphasis was on the resistance of timber vaults to traction and bending moments.

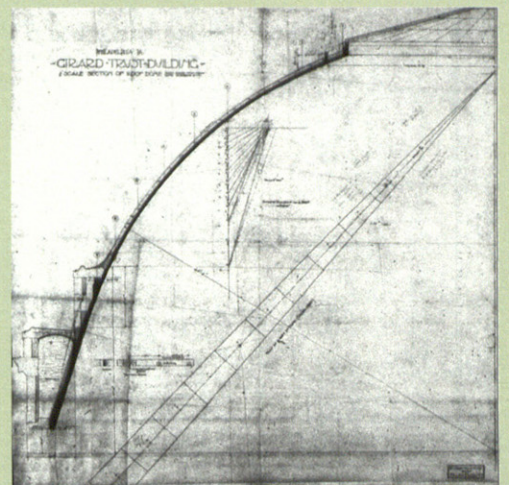
Domenech (1900) was the first to discuss the need to consider the resistance to bending of timber vaults. For Domenech there is no doubt that the only explanation of the success of thin timber vaults comes from their capacity to resist bending that might overturn horizontal thrust. Espie's idea of rigid monolithism reappears, the myth of the absence of thrusts, and the cohesive resistance to bending moments. Martorell (1910) thrives in the same considerations, but the first one to propose the analysis of timber vaults as elastic arches was Jaime Bayó (1910), who assimilated them to two-hinged iron arches. For Bayó timber vaults thrust, but this thrust is on the corresponding elastic two-hinged arch. So, it is about finding what he calls the "funicular of elasticity forces". That is, the line of thrusts that besides being in equilibrium with loads, complies with the conditions of elastic compatibility of deformation. Bayó gives the formulas with the usual integrals and, then, he explains a graphic procedure of resolution, applying it first to symmetric arches of constant or variable thickness, and later to asymmetric arches.

Vaults 'impossible to calculate'

The cohesive ideas first formulated by Espie, picked up, amplified and spread by Guastavino, later applied to elastic design, became a dogma. In 1910, in a book about the philosophy of structures, Cardellach framed the timber vaults within cohesive construction and he highlighted their capacity to resist bending, to which he attributes the infinite variety of forms that can be built.

Esteve Terradas, a great engineer and mathematician, was the first one to

115 PROYECTO DE UNA CÚPULA LIBRE DE TRACCIONES DE 31 M DE LUZ. GIRARD TRUST BUILDING 1905-1907



attempt an elastic design of a more complicated timber vault: a stair vault. The study of Terradas had its origin in an assignment from Puig y Cadafalch, in 1919, with the aim of solving the problem that the calculation of timber vaults meant then. As Rosell says, "the usual vaults, built by builders 'with feeling', were considered as impossible to calculate". Terradas tried making an elastic design of the vaults and he examined elasticity problems that he knew very well, particularly buckling. He failed in his attempt. The approach to elasticity equilibrium equations for a spatial structure, like a simple stair vault on horseback, is very complex. Terradas' failure reinforced even more the idea of the impossibility of calculating the stress in timber vaults.

Later on, Josep Goday in his discourse in 1934 to the Academia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi, made a historical revision of timber vault calculation. He accepts Guastavino's cohesive ideas and coincides with Bayó and Terradas in that the only correct approach is the one that considers timber vaults as thin elastic continuous shells, within elasticity theory. Therefore, the idea that timber vaults can only be calculated as elastic was confirmed and, if this task presented insuperable difficulties, vaults were impossible to calculate. Eduardo Torroja in his book *Razón y ser de los tipos estructurales* (Reason and being of structural types), published in 1956, reproduces this opinion when talking of timber vaults, "so wonderful in their realizations that present theoretic knowledge can hardly explain and measure their resistant phenomenon, genially intuited by (already passed) constructors". Bassegoda in his numerous contributions about timber construction makes similar considerations.

The practice of calculation

As Rankine very correctly indicated in the introductory essay in his book *Mecánica Aplicada* (Applied Mechanics), if the scientist's question is 'what do I want to know?' the technician's is 'what do I want to do'. The theoretical insufficiency, real or supposed, has never stopped builders who have managed the available tools at each moment. Thus, while theoreticians discussed the impossibility of calculating timber vaults, these were being built, architects or engineers made simple calculations to determine the

dimensions of the main elements: the thickness of the vaults and the dimensions of the counteracting systems, whether they are buttresses or ties.

That builders thought that timber vault's thrust is demonstrated by the existence, eternal, of these counteracting systems. French engineers in the nineteenth century as well as Guastavino's did calculations of equilibrium although the hypothesis that originated formulas was in complete opposition to cohesive theory. Luis Moya (1974), the last great builder of timber vaults, recognised the insufficiency of calculation due to the lack of data about the elastic constants of timber vaults, but afterwards he made, or ordered to be made, some equilibrium calculations based on thrust lines that were enough for him to design and build his extraordinary vaults (i16).

Bosch (1947) defended the membrane analysis, but for practical cases, he proposed an ingenious system (inspired, without a doubt, in the nineteenth century manuals about vaults theory) to calculate the thrust of timber pendente vaults, imagining the formation of virtual cross ribs on which, in turn, elemental arches produced by doing parallel cuts on the arches of the contour would rest. Again, it is an equilibrium method that seeks a possible state of compression within masonry.

Bergós (1936, 1953, 1965) dedicated several decades to researching the mechanical properties of timber walls and vaults. He did tests on timber arches of various sizes (up to 3,20 metre of span) trying to justify the application of elasticity theory. But in practical examples of calculation that appear in his book he again uses graphics of thrust lines, that is, methods of equilibrium.

Ángel Pereda Bacigalupi (1951) published one of the last books about calculations of timber vaults. Like Bayó, he supposed two-hinged arches on rigid bearing and calculates them with the usual formulas of elastic arches. Although they have ties he does not introduce their deformation in the calculation, which would lead to important bending tensions. In fact, Pereda is conscious that an elastic design cannot aspire to count with the bending resistance of a timber vault. He explicitly seeks such a thickness that the

line of thrusts is contained within the central third. For this Pereda reduced the admissible tensions of traction, showing knowledge of the properties of the material superior to previous predecessors in elastic design. However, builders hardly did calculations when designing and erecting their vaults. Truñó (2004) described in a detailed way, around 1950, the process of designing and constructing of timber vaults. He worries about the order and method of construction (i17) but not about calculation, and in his book some vague references in this sense appear. He seemed convinced that building vaults of conventional forms were safe by themselves (i18).

Conclusion: timber vault as masonry vault

Timber vaults are masonry vaults, with a good resistance to compression, a low resistance to traction and the possibility of cracking, forming articulations due to the impossibility of sliding. It is true that resistance to traction also allows a certain resistance to bending (for example, a worker can walk on a thin timber arch), but the explanation of the resistance to bigger loads or for long periods of time, has to be sought in the existence of other resistant devices. So, the tongues or transversal partitions, or the consistent filling, which form the base of a brick-nog, are actually part of the structure and allow the support of moving loads of some entity. The principle is always the same: either giving an escape via to the thrusts when necessary, or loading in a way that those are always contained in the masonry. Therefore, the 'cohesive' character is not relevant from the structural point of view, but it is from the constructive point of view. It allows construction without an arch centre, using only light auxiliary elements of control of the form.

Timber vaults are, therefore, masonry vaults and must be calculated as such, within the modern Limit Analysis of masonry structures (formulated with precision by Heyman in numerous contributions since 1966). Within this framework the Fundamental Theorem of Safety, whose main corollary is the equilibrium approach: if we can find an equilibrium solution for a masonry structure with the material working by compression, then the structure is safe. The potency of the theorem resides in the possibility of

Con posterioridad, Josep Goday en su discurso de 1934 ante la *Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi*, realiza un repaso histórico del cálculo de las bóvedas tabicadas. Acepta las ideas cohesivas de Guastavino y coincide con Bayó y Terradas en que el único enfoque correcto es aquel que considera las bóvedas tabicadas como delgadas láminas continuas elásticas, dentro de la teoría elástica.

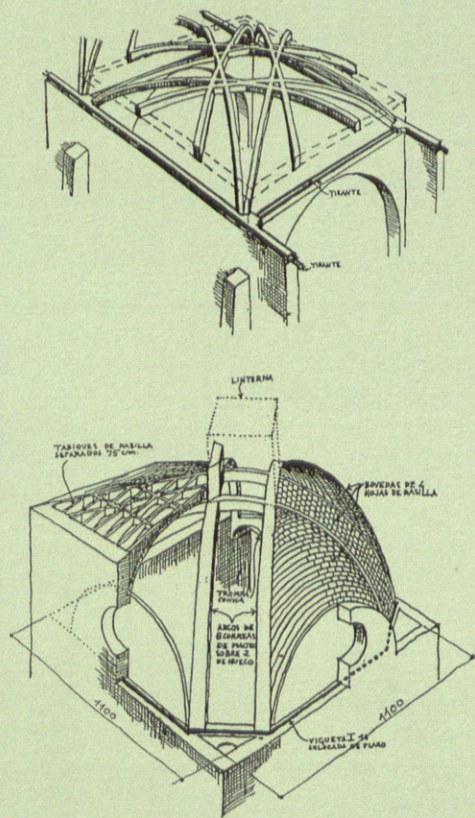
Por tanto, se confirmaba la idea de que las bóvedas tabicadas sólo se podían calcular como elásticas y, si esta tarea presentaba dificultades insuperables, las bóvedas eran imposibles de calcular. Eduardo Torroja en su libro *Razón y ser de los tipos estructurales*, publicado en 1956, abunda en esta opinión al hablar de la bóveda tabicada, "tan maravillosa en sus realizaciones, que difícilmente alcanzan los actuales conocimientos teóricos a explicar y medir su fenómeno resistente, genialmente intuado por constructores (ya desaparecidos)". Bassegoda en sus numerosas aportaciones sobre la construcción tabicada, realiza consideraciones parecidas.

La práctica del cálculo

Como apuntó muy acertadamente Rankine en el ensayo introductorio de su libro de *Mecánica Aplicada*, si la pregunta del científico es "¿qué quiero saber?", la del técnico es "¿qué quiero hacer?". La insuficiencia teórica, real o supuesta, nunca ha detenido a los constructores que han manejado en cada momento las herramientas disponibles. Así, mientras los teóricos discutían sobre la imposibilidad de calcular las bóvedas tabicadas éstas se seguían construyendo y los arquitectos o ingenieros realizaban cálculos sencillos para determinar las dimensiones de los elementos principales: el espesor de las bóvedas, y la dimensión de los sistemas de contrarresto, ya fueran estribos o tirantes.

Que los constructores pensaban que las bóvedas tabicadas empujaban queda demostrado por la existencia, desde siempre, de estos sistemas de contrarresto. Tanto los ingenieros franceses del siglo XIX como los Guastavino realizaban cálculos de equilibrio aunque las hipótesis que originaban las fórmulas estaban en frontal oposición a su teoría cohesiva. Luis Moya (1947) el último gran constructor de bóvedas tabicadas reconoce la insuficiencia del cálculo debido a la falta de datos sobre las constantes elásticas de las bóvedas tabicadas, pero después realiza, o manda realizar, cálculos de equilibrio en base a líneas de empujes que le bastaron para proyectar y construir sus asombrosas bóvedas [i16].

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



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

Ángel Pereda Bacigalupi (1951) publicó uno de los últimos libros sobre cálculo de bóvedas tabicadas. Como Bayó, supone los arcos biarticulados sobre apoyos rígidos y los calcula con las fórmulas habituales de los arcos elásticos. Aunque lleven tirante no introduce su deformación en el cálculo lo que conduciría a unas tensiones de flexión importantes. De hecho, Pereda es consciente que un cálculo elástico no puede pretender contar con la resistencia a flexión de la bóveda tabicada. Explícitamente busca un espesor tal que la línea de empujes elásticos esté contenida dentro del tercio central. Para ello Pereda reduce las tensiones admisibles de tracción, mostrando un conocimiento de las propiedades del material superior a los anteriores predecesores en el cálculo elástico.

No obstante, los constructores apenas realizaban cálculos a la hora de proyectar y levantar sus bóvedas. Truñó (2004) describió hacia 1950 de forma minuciosa el proceso de proyecto y construcción de bóvedas tabicadas. Le preocupa el orden y método de la construcción [i17] pero no el cálculo, y en su libro sólo aparecen vagas referencias en este sentido. Parece convencido de que, al construir bóvedas de formas convencionales, éstas eran seguras por sí mismas [i18].

Conclusión: La bóveda tabicada como bóveda de fábrica.

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, con una buena resistencia a compresión, una baja resistencia a tracción y la posibilidad de agrietarse, formar articulaciones, debido a la imposibilidad de deslizamiento. Es cierto que la resistencia a tracción permite también una cierta resistencia a flexión (por ejemplo, un albañil puede andar sobre un delgado arco tabicado), pero la explicación de la resistencia de cargas mayores o por largos períodos de tiempo hay que buscarla en la existencia de otros dispositivos resistentes. Así, las lengüetas o tabiques transversales, o el relleno consistente, que forman la base de un forjado, son en realidad parte de la estructura y permiten soportar cargas móviles de cierta entidad. El principio es siempre el mismo: bien dar una vía de escape a los empujes cuando sea necesario, bien cargar de manera que aquéllos estén siempre contenidos en la fábrica. Por tanto, el carácter "cohesivo" no es relevante desde el punto de vista estructural, pero sí lo es desde el punto de vista constructivo. Permite la construcción sin cimbra, empleando sólo ligeros elementos auxiliares de control de la forma.

Las bóvedas tabicadas son, pues, bóvedas de fábrica y deben calcularse como tales, dentro del moderno Análisis Límite de estructuras de fábrica (formulado con precisión por Heyman en numerosas contribuciones desde 1966). Dentro de este marco se demuestra el Teorema Fundamental de la Seguridad, cuyo principal corolario es el enfoque del equilibrio: si podemos encontrar una solución de equilibrio para la estructura de fábrica con el material trabajando a compresión, entonces la estructura es segura. La potencia del teorema reside en la posibilidad de "elegir" la solución de equilibrio. Si el analista es capaz de encontrar una solución de equilibrio a compresión, la estructura también será capaz de ello. De hecho el analista considerará sólo algunos de los infinitos estados de equilibrio posibles en una estructura hiperestática, en función del problema que quiera resolver.

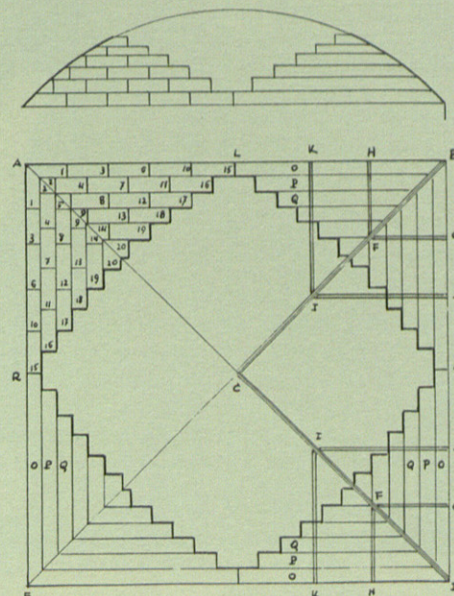
Los análisis de equilibrio de la antigua teoría de bóvedas resultan ser, pues, perfectamente correctos. Las fórmulas simplificadas de Guastavino padre, los análisis gráficos y el empleo de modelos catenarios de Gaudí, el análisis de membrana de estados de compresión de Guastavino hijo, son correctos. Los análisis elásticos "a compresión", como los de Pereda citados con anterioridad, son también correctos, pero hay que recordar que no son más "reales" que cualquier otra solución de equilibrio.

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

'choosing' the equilibrium solution. If the analyst is capable of finding a solution of equilibrium by compression, structure would also be capable of this. In fact, the analyst only considers some of the possible infinite states of equilibrium in a hyper-static structure, in relation to the problem that needs to be solved.

The equilibrium analysis of the old theory of vaults seems to be, after all, perfectly correct. Guastavino senior's simplified formulas, the graphic analyses and the use of Gaudí's catenary models, the membrane analyses of states of compression by Guastavino junior are correct. The elastic analyses 'by compression', such as those by Pereda mentioned previously are also correct, but it must be remembered they are no more real than any other equilibrium solution.

Furthermore, the traditional proportional rules for designing vaults and abutments (Fray Lorenzo's type) are also essentially correct. The problem of safety of a masonry vault, whether stone, brick screw or timber, is a problem of geometric form of the structure. The stable forms contain lines of thrusts in equilibrium with loads. The traditional rules codify these forms and their use is rational and correct.



i17 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA BÓVEDA EN RINCÓN DE CLAUSTRO

i18 CONSTRUCCIÓN DE UNA CÚPULA TABICADA HACIA 1950 EN BARCELONA

