

APROXIMACIÓN DE SUPERFICIES PARA LA EJECUCIÓN DE BÓVEDAS TABICADAS

APPROXIMATION OF SURFACES FOR THE EXECUTION OF TIMBREL VAULTS

Luis Giménez Mateu, Isidro Navarro Delgado,
Alberto Cabrera Guardiola

doi: 10.4995/ega.2016.4742

La dificultad que presenta la ejecución de bóvedas tabicadas del tipo “falsa vaída” o “quatre punts” con aparejo en diagonal, es la del replanteo con rasillas en el sencillado de las primeras hiladas, al marcar el ritmo de la fábrica y el rejuntado. La continuidad de las juntas delata la buena ejecución de la bóveda, aproximándose ésta a una superficie de traslación, realizada por el desplazamiento curvilíneo de dos cimbras paralelas. La experiencia en la ejecución por este complejo método demuestra que aparecen desajustes y errores al perderse el rejuntado inicial y no poder seguir una geometría concreta.

Una solución válida consiste en aproximar la bóveda a una superficie tórica, aquella generada por la revolución del arco generatriz tomando como eje la recta perpendicular al centro del arco directriz. Las diferencias de proporción entre ambas superficies son mínimas, pero con esta segunda opción aumenta el control del operario sobre el replanteo y ejecución, al usar cimbras que generan una secuencia repetitiva para las hiladas.

PALABRAS CLAVE: BÓVEDA TABICADA. FÁBRICA DE RASILLA. SUPERFICIE DE DOBLE CURVATURA. SUPERFICIE DE TRASLACIÓN. TOROIDE. SUPERFICIE TÓRICA. IGLESIA ORTODOXA RUMANA BARCELONA

The difficulty presented in the execution of “domical vault” or “quatre punts” timbrel vaults with diagonal brickwork is that of the marking out with cladding tiles in the layering of the first rows, when setting the pace of the construction and joins. The continuity of the joins is a sign of the good execution of the vault, resembling a translational surface made by the curved movement of the two parallel falsework systems. Experience in the execution of this complex procedure proves that faults and errors appear as the initial joins are lost and it is not possible to follow a specific geometry.

A valid solution consists of approaching the vault as a toric surface, generated by the revolution of the generatrix arch taking the axis to be the vertical line perpendicular to the guide arch. The differences in proportion between the two surfaces are minimal, but with this second option the workman has more control over the marking out and execution, by using falsework systems that generate a repetitive sequence for the rows.

KEYWORDS: TIMBREL VAULT, CONSTRUCTION USING CLADDING TILES, DOUBLE CURVATURE SURFACE, TRANSLATIONAL SURFACE, TORUS, TORIC SURFACE, ROMANIAN ORTHODOX CHURCH BARCELONA



1

1. Interior de la cripta con sus bóvedas. Fotografía de los autores

1. Interior of the crypt with its vaults. Authors' photograph

El uso de las bóvedas tabicadas vuelve a ser interesante para aquellas arquitecturas que pretenden aportar un grado más de singularidad y modernidad a sus espacios interiores. Actualmente se están convirtiendo en preciados estandartes de las denominadas construcciones sostenibles por hacer uso de materiales cerámicos y pétreos, con ausencia de acero y en detrimento de las complejas tecnologías. También se autodefine como “construcción inteligente” por solucionar de un modo racional y sencillo problemas espaciales y a la vez estructurales, ya que sus formas no solo pueden definir cualquier tipo de superficie (reglada, alabeada, libre...) sino que además pueden soportar carga estructural. El vocablo inteligente, en este caso, se puede asociar también a los operarios y albañiles que solo con el conocimiento y la experiencia son capaces de resolver las complicadas estructuras con el empleo de materiales tan básicos como ladrillos, yeso, mortero o cemento rápido.

No son muchos los libros y escritos que narran sus bondades estructurales y exponen las características de una

tipología constructiva de carácter tan tradicional en España **1**. Para mayor desaire, el Código Técnico de la Edificación **2** prácticamente no cita ni prevé en sus documentos que un forjado o losa de escalera pueda ser construida actualmente con bóvedas tabicadas. Solamente en el DB-SE-F **3** se deducen las consideraciones a tener en cuenta para fábricas de ladrillo en muros, pero no en bóvedas, por mucho que se quiera asociar estas a los ensayos realizados en paramentos verticales, cuando en realidad no lo son.

Sorprende que una tecnología tan preciada por el mismo Eduardo Torroja **4**, tan experimentada por Rafael Guastavino, o por el mismo Antoni Gaudí en “La Pedrera”, y tan arraigada a comunidades como Cataluña, Valencia o Extremadura, no tenga cabida como elemento estructural en la legislación española actual y solo se pueda considerar asociada a temas de patologías y rehabilitación, o como elementos de falso techo y decoración, siempre sin capacidad estructural.

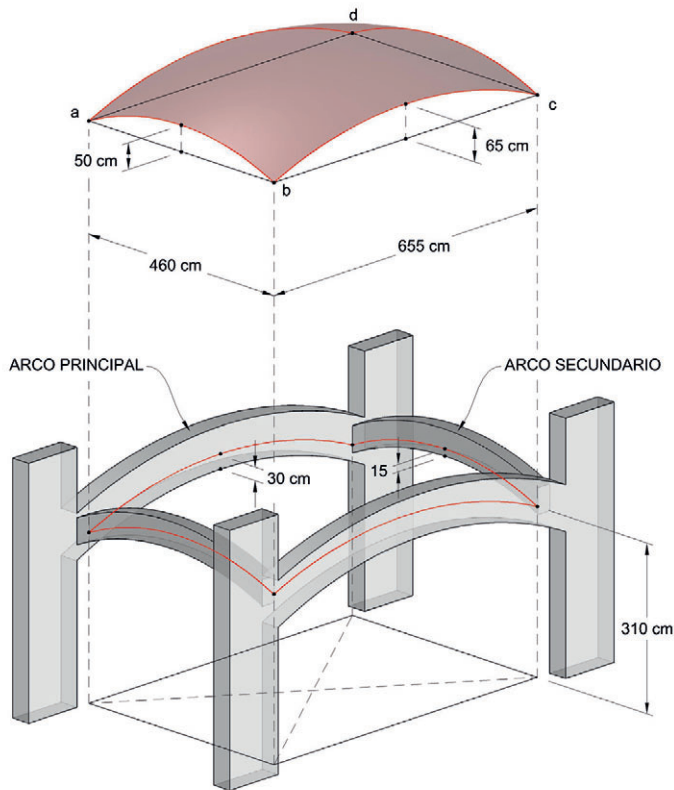
Dentro de estos parámetros se encuentra la obra en construcción de la Iglesia Ortodoxa Rumana de Barcelo-

The use of timber vaults is again of interest for architectures that aim to provide another level of uniqueness and modernity to their interior spaces. They are currently becoming prized archetypes of sustainable construction due to the use of ceramic and stone materials, with the absence of steel and to the detriment of complex technology. They are also self-defined as “smart construction” as they provide a simple, rational solution to spatial and yet structural problems, as their shapes can not only define any type of surface (ruled, warped, free, etc.) but that in addition can withstand a structural load. The word ‘smart’, in this case, can also be associated with the workmen and bricklayers, who with their knowledge and experience alone are able to resolve complicated structures with the use of materials as basic as bricks, plaster, mortar or quick cement.

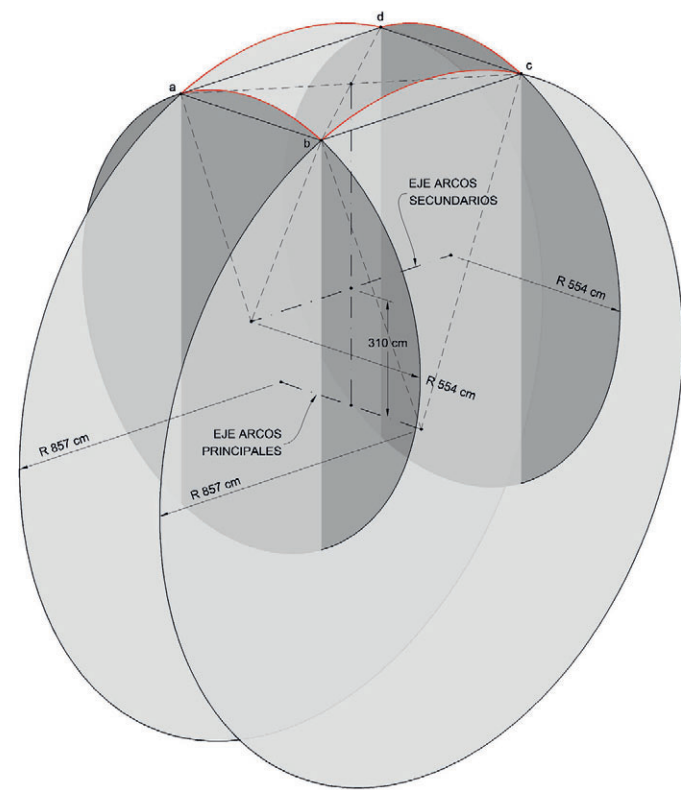
There are not many books and articles that describe their structural benefits and set out the characteristics of a construction type that is so traditional in Spain **1**. And as a further rebuff, the Technical Building Code **2** barely mentions or envisages in its documents that a floor or stairway slab may currently be constructed with timber vaults. Only in the DB-SE-F **3** are the considerations to be taken into account for brickwork in walls deduced, but not in vaults. As much as we may wish to link these to the tests performed on vertical paraments, they really are not.

It is surprising that a technology that was so highly valued by Eduardo Torroja himself **4**, so frequently used by Rafael Guastavino, or even by Antoni Gaudí in “La Pedrera”, and so deeply rooted in Spanish regions such as Catalonia, Valencia and Extremadura, is not accommodated as a structural element in the current Spanish legislation and can only be considered linked to matters of pathologies and restoration, or as elements such as false ceilings and decoration, with no structural capacity.

These parameters include the construction site of the Romanian Orthodox Church of Barcelona **5**. It is a building of worship whose architecture is governed, for liturgical and historical reasons, by the Byzantine royalties inherited by the Orthodox temples in many Eastern European countries. Although partially exempt from compliance with the Technical Building Code, the project for its crypt includes three timber vaults as a false ceiling of the principal nave. These vaults are self-supporting, without applied live loads, with



2



3

a purely representative function. They are also used to hide the ducts that run through the open spaces between them and the upper floor slabs, the *naos 6* floor of the Church.

Each timbered vault begins at a height of 3.10 and four perimeter arches of reinforced concrete distribute the pressure. The main arches, along with the pillars, form a repeated gantry of four units in the hall, and between them there are the secondary arches by way of a brace. The plan-view projection of the arches leaves a rectangular open space of 655 cm x 460 cm for each vault, and the arches are parallel with the same radius, two by two.

The four initial circular arches of the vault are reduced or "lowered arches", contained in the vertical plane, with a proportion between the horizontal chord and its height of approximately 10:1. The fact that the four arches have a similar proportion (10:0.99 for the principal and 10:1.08 for the secondary) is an initial condition of the project to avoid seeing different families of arches and thus standardise the view as a whole.

The vault is designed so that its perimeter follows the curvature of the arches starting between 15 and 30 cm from their lower limit, resting on channels 2 cm deep by 5 cm high made on the exposed concrete, then bush-hammered manually.

na 5. Se trata de un edificio de culto que, por motivos litúrgicos e históricos, su arquitectura se rige por los cánones bizantinos que heredaron los templos ortodoxos en buena parte de los países del este europeo. Aunque exento parcialmente de cumplimiento del Código Técnico de la Edificación, en su cripta se han proyectado tres bóvedas tabicadas como falso techo de la nave principal. Estas bóvedas son auto portantes, sin sobrecargas aplicadas, con una función puramente representativa. También se utilizan para ocultar los conductos que discurren en el espacio libre que queda entre ellas y el forjado superior, suelo del *naos 6* de la Iglesia.

Cada bóveda tabicada nace a 3,10 metros de altura y sus empujes los recogen cuatro arcos perimetrales de hormigón armado. Los arcos principales, junto a los pilares, forman en la sala un pórtico repetitivo de cuatro unidades, y entre ellos se sitúan los arcos secundarios a modo de riostra. La proyección en planta de los arcos deja

un espacio libre rectangular para cada bóveda de 655 cm x 460 cm, siendo los arcos paralelos y con el mismo radio, dos a dos.

Los cuatro arcos circulares de inicio de la bóveda son de tipo rebajado o de "punto hurtado", contenidos en plano vertical, con una proporción entre la cuerda horizontal y su altura de 10:1 aproximadamente. Que los cuatro arcos tengan una proporción parecida (10:0,99 el principal y 10:1,08 el secundario) es una condición inicial del proyecto para evitar la visualización de diferentes familias de arcos y homogenizar así la visión del conjunto.

La bóveda está planteada para que su perímetro siga la curvatura de los arcos comenzando entre 15 y 30 cm desde el límite inferior de estos, descansando en unas rozas de 2 cm de profundidad por 5 cm de altura realizadas sobre el hormigón visto, posteriormente abujardado manualmente.

El tipo de bóveda que se busca se denomina falsa vaída 7 o de "quatre punts" 8, inicialmente generada por el

2. Esquema geométrico de partida para las bóvedas
 3. Definición geométrica del encaje por círculos
 4. Primera hilada ejecutada sin el uso de cimbras.
- Fotografía de los autores

2. Geometric starting diagram for the vaults
3. Geometric definition of the fit using circles
4. The first row executed without the use of a falsework system. Authors' photograph

desplazamiento de una generatriz curva a lo largo de una directriz también curva, contenidas ambas siempre en planos verticales.

Los requisitos iniciales de los arcos y su posición determinan directamente sus radios y la altura de sus centros, en plano vertical. Al iniciarse los cuatro arcos en sendos cuatro vértices de intersección (a,b,c y d), causa que los círculos principales y los secundarios tengan los ejes perpendiculares a sus centros a diferente altura (310 cm), lo cual produce que la superficie de la bóveda no pueda resolverse como un casquete esférico.

Al contrario de lo que pueda parecer, evitar la superficie esférica es adecuado por varios motivos:

- Para evitar “... *la innecesaria complicación del corte de piezas al aparejar por anillos.*” **9**, si las bóvedas fueran esféricas.
- Por razones económicas, para no tener que construir o adquirir hasta tres encofrados esféricos, uno para cada bóveda.
- Por no utilizar cimbras con radios diferentes, ni tampoco cimbras en posición radial, de difícil encuentro con un perímetro rectangular.
- Para optimizar la virtud de las bóvedas tabicadas, utilizando cimbras ligeras y no encofrados bajo grandes porciones de su superficie.

La tradición constructiva demuestra que las bóvedas tabicadas de pequeñas dimensiones carecen de cimbras o encofrados, y que el albañil experimentado posee el conocimiento para una ejecución rápida y más o menos precisa en su resolución. Se añade el inconveniente de la ausencia de mano de obra especializada para ejecutar bóvedas de gran tamaño y dificultad, dada la baja demanda de este original tipo de construcciones.



4

Los escritos analizados narran como condición importante la experiencia de los albañiles y su buen hacer.

Como condicionante inicial, para aumentar la calidad y complejidad de las bóvedas, se determina un aparejo en diagonal o “*a la mescla*” **10**, es decir, con una visualización de las rasillas giradas 45° en planta respecto los límites ortogonales de la bóveda. También se requiere mantener el rejuntado de las rasillas con un espesor cercano al centímetro, y utilizar, en la medida de lo posible, rasillas entera sin recortar ni rebajar. Con ello se añade una mayor precisión y esbeltez al aparejo de la bóveda, realzando su buena ejecución.

En una primera etapa se inicia la ejecución sin cimbra, solamente con la experiencia del albañil que coloca con yeso la primera capa de rasillas, las que se quedarán vistas, denominada “el sencillado”. Se descarta de inicio la posibilidad de empezar por las cuatro esquinas a la vez, dada la dificultad de hacer coincidir piezas enteras en las claves de los arcos, y la compleja ejecución controlando cuatro extremos a la vez.

La primera hilada se soporta en la roza habilitada en el lateral de los arcos de hormigón. Para que las rasillas tengan el vértice en la roza, hay que añadir entre ellas piezas en forma de triángulo isósceles, de modo que su hipotenusa esté en la roza. Sucesiva-

The type of vault sought is called a domical vault **7** or “*quatre punts*” (meaning “four-points” in Catalan) vault **8**, initially generated by the displacement of a curved generatrix along an also curved guide, both contained in vertical planes. The initial requirements of the arches and their position directly determine their radii and the height of their centres on the vertical plane. Initiating the four arches in the four intersection vertices (a, b, c and d) gives the main and secondary circles axes perpendicular to their centres at different heights (310 cm), which means that the surface of the vault cannot be resolved as a spherical cap.

Unlike what it may seem, avoiding a spherical surface is appropriate for various reasons:

- To avoid “... *the unnecessary complication of cutting bricks as they are laid in rings.*” **9**, if the vaults were spherical.
- For economic reasons, so as not to have to build or acquire up to three spherical pieces of shuttering, one for each vault.
- So as not to use shoring systems with different radii, nor shoring systems in radial positions, which are hard to solve when they have a rectangular perimeter.
- To optimise the virtue of the timber vaults, using light shoring systems and no shuttering under large portions of its surface.

The constructive tradition proves that small timber vaults lack shoring systems or shuttering, and that the experienced bricklayer has the knowledge to execute it quickly and more or less accurately. There is however the absence of specialised labour for executing large, difficult vaults, given the low demand for this original construction type. The articles analysed highlight the importance of the bricklayer’s experience and good workmanship.

As an initial constraint to increase the quality and complexity of the vaults, a diagonal or “*mixed*” **10** bricklaying is laid out, in other words, with the cladding tiles rotated 45° on the plan view with respect to the orthogonal limits of the vault. It is also necessary to maintain the joints of the cladding tiles with a thickness of close to one centimetre, and use, wherever possible, whole cladding tiles, without cutting or trimming. This brings greater accuracy and slenderness to the appearance of the vault, enhancing its good execution.

The first stage begins with the execution without a falsework system, but the experience of the



bricklayer who places the first layer of cladding tiles with plaster, those that will be visible. The layering of this first row is known in Spanish as *"el sencillado"*. The possibility of starting at the four corners at the same time is ruled out from the start, given the difficulty of making whole tiles coincide at the keystones of the arches, and the complex execution monitoring four ends at the same time.

The first row is supported in the channel made in the side of the concrete arches. For the cladding tiles to have the vertex in the channel, it is necessary to add tiles in the form of an isosceles triangle, so the hypotenuse is in the channel. Then they are doubled with cladding tiles with grooves on both sides, secured with cement mortar and placed in a herringbone layout, up to a total of three layers.

Angel Trunó explains it in its book **11**, *"in the 'quatre punts' vault the joins do not concur at an axis or centre. Quite the opposite, they are parallel, and can be defined as 'curved-axis cylinders', with the joins perpendicular to this axis, vertical and, consequently, parallel to each other"*.

It is important to note that the definition is correct if we are dealing with regular bricklaying, with continuous bricks, but not when it is diagonal. In this second case the visual alignment of the joins in both directions corresponds to the approximation to elliptical curves, resulting from flat non-vertical sections of the vault surface, that are complex to mark out on the construction site.

The difficulty in the execution of the second row, the large dimensions to cover and, above all, the various failed tests, lead to a reconsideration of the process seeking help from guiding falsework systems. Falsework systems or shuttering can be very light, as they only withstand the loads of the different rows and not the whole vault. Their simplicity is usually used to establish them as guides and reference runs, to prevent errors during the execution process.

The second stage provides the geometric solution to the vault, approximating it to a translational surface. This is obtained by offsetting one of the arches (generatrix) along the other (guide) on the perpendicular plane. Thus it is executed with the help of a falsework system cut away at the top in the form of a secondary arch (shorter), that is moved, maintaining a vertical plane at all times,

mente se ira doblando con rasillas con ambas caras rayadas, sujetas con mortero de cemento y colocadas a rompe juntas, hasta un total de tres capas.

Angel Trunó explica en su libro **11**, *"en la bóveda de 'quatre punts' no hay concurrencia de juntas a un eje o centro, muy al contrario, hay paralelismo de juntas, pudiéndose definir como 'cilindros de eje curvo', con las juntas normales a este eje, verticales y por lo tanto paralelas entre sí"*.

Cabe matizar que la definición es correcta si el aparejo es corriente, con piezas continuas, pero no cuando el aparejo es en diagonal. En este segundo caso la alineación visual de las juntas en ambos sentidos corresponde a la aproximación a curvas elípticas, resultado de secciones planas no verticales de la superficie de la bóveda, de complejo replanteo en obra.

La dificultad en la ejecución de la segunda hilada, las grandes dimensiones a cubrir y sobretodo, los diferentes ensayos fallidos, hacen replantear el proceso para que este se ayude de cimbras-guía. Las cimbras o encofrados pueden ser muy ligeros, ya que solo soportan las cargas de las diferentes hiladas y no toda la bóveda. Su sencillez suele aprovecharse para establecerlos como guías y recorridos de referencia, para no errar durante el proceso de ejecución.

En la segunda etapa se da una la solución geométrica a la bóveda, aproximándola a una superficie de traslación. Ésta se obtiene por el desplazamiento de uno de los arcos (generatriz) a lo largo de del otro (directriz) situado en el plano perpendicular. De este modo la ejecución se realiza con la ayuda una cimbra recortada superiormente en forma de arco secundario (más corto), que se va desplazando, manteniéndose siempre en un pla-

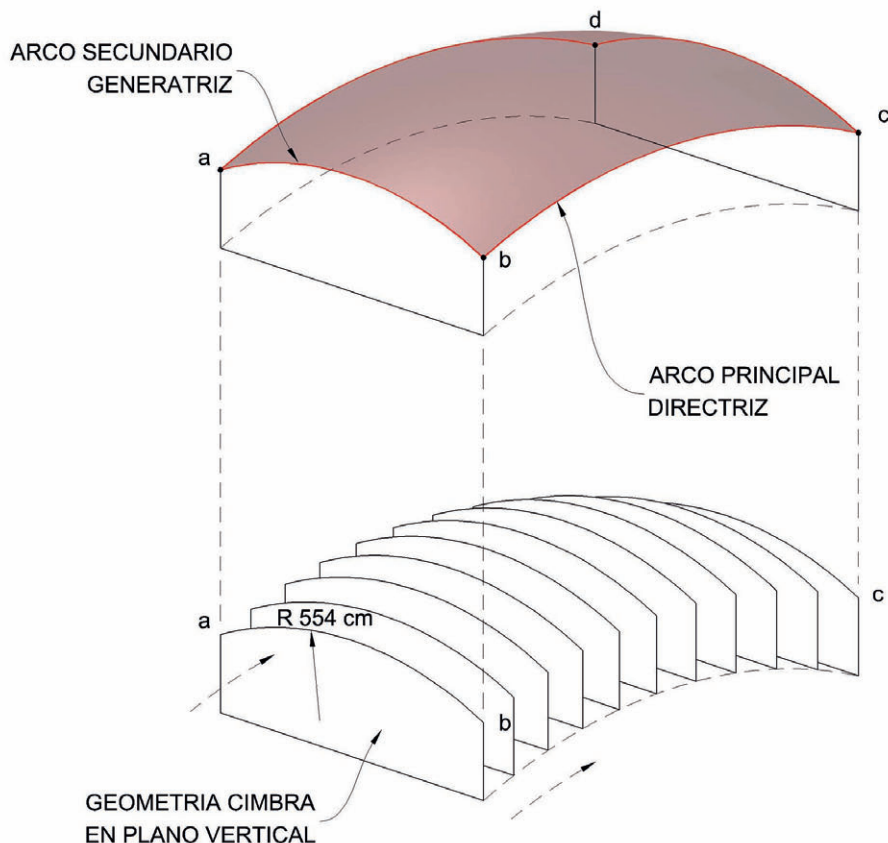
no vertical, a lo largo del desarrollo del arco principal.

Este procedimiento es muy evidente, y facilita la comprensión y visualización de la superficie a ejecutar a los operarios y albañiles. La dimensión de la rasilla es de 28 x 13,5 x 1 cm, con acabado liso en su cara inferior y rayada en la superior, siendo las rasillas dobladas (las de las siguientes capas) con rayado en ambas caras para obtener una mayor adherencia del mortero.

Para ello se construyen dos cimbras con las dimensiones del arco generatriz, que se colocan en paralelo separadas por una distancia calculada para que descansen rasillas tanto de una hilada como de la sucesiva. La finalidad es que las juntas tiendan a proyectarse a 45° sobre un plano tangente a la superficie aproximada de la bóveda en cada punto.

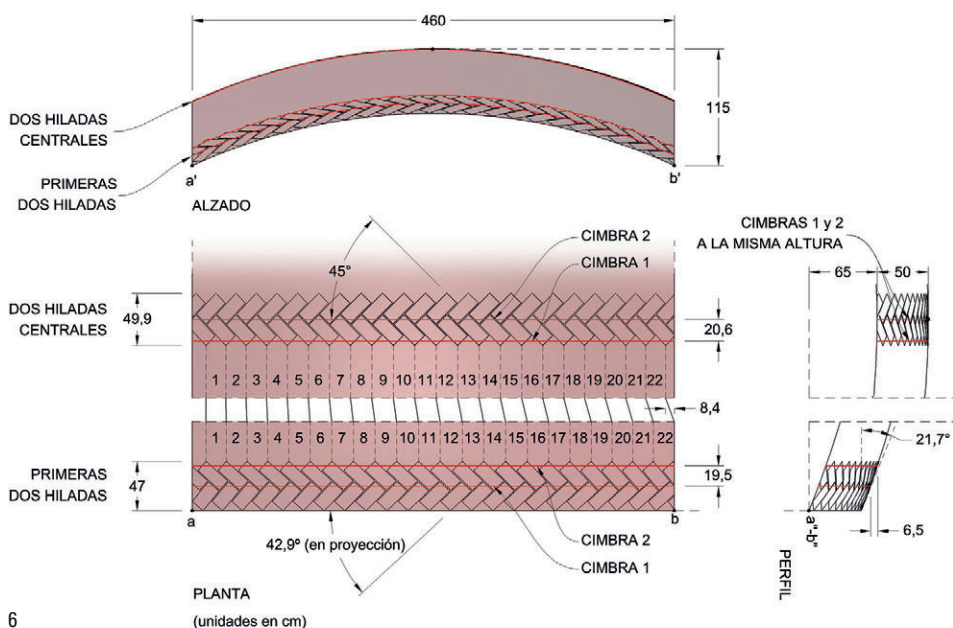
Las dos cimbras se desplazan en paralelo sobre la curvatura del arco de mayor longitud (directriz) manteniéndose siempre en vertical, y por tanto abarcan diferentes alturas entre las dos a modo que avanzan hasta el punto más alto o clave. También la distancia horizontal entre cimbras es variable a medida que se suceden las hiladas, dado que la distancia entre vértices más alejados de dos rasillas pertenecientes a dos hiladas sucesivas es de 47 cm, en el inicio de la bóveda, con rasillas inclinadas 21,7°. Cuando la construcción llega a su parte central (clave del arco directriz) la anterior distancia ha aumentado hasta 49,9 cm debido a que la inclinación de las rasillas ha disminuido hasta colocarse en horizontal.

Las sucesivas hiladas se ejecutan ajustando el largo de la nueva rasilla sobre el corto de la ya presentada, previo desplazamiento en doble dirección de las cimbras; en horizontal,



5

5. Esquema de montaje para la superficie de traslación
 6. Proyecciones de la bóveda ejecutada por traslación
 5. Assembly diagram for the translational surface
 6. Projections of the vault executed by translation



6

se modifica la separación entre ellas y también en vertical, variando la altura entre ellas. La doble curvatura de la superficie a cubrir causa que en cada desplazamiento la rasilla tenga una posición diferente y por tanto la junta entre ellas sea también diferen-

te, ya no paralela, sino de forma trapezoidal, adecuando entre 1 y 2 mm según la posición.

Como se indica en la figura 6, si se mantiene el aparejo diagonal a 45° , el despiece en 22 unidades de las primeras hiladas se convierte en otras 22 en

throughout the development of the principal arch. This procedure is very evident, and facilitates the comprehension and visualisation of the surface to execute by the workmen and bricklayers. The dimensions of the cladding tile are $28 \times 13.5 \times 1$ cm, with a smooth finish on the lower face and grooved on the top. The doubled cladding tiles (those of the following layers) have grooves on both sides for greater mortar adherence.

For this purpose two falsework systems are built with the dimensions of the generatrix arch, which are placed in parallel at a distance calculated so that the cladding tiles of both one row and the next rest on them. The aim is for the joints to project at 45° on a plane tangential to the approximated surface of the vault at all points. The two falsework systems are moved in parallel along the curvature of the longest arch (guide), kept vertical at all times, and therefore the different heights between the two constantly change as they advance towards the highest or key point. The horizontal distance between the falsework systems varies as the rows are constructed, as the distance between the furthest vertices from two cladding tiles in two successive rows is 47 cm, at the start of the vault, with cladding tiles at an angle of 21.7° . When the construction reaches its central part (keystone of the guide arch) the previous distance has increased to 49.9 cm because the inclination of the cladding tiles has been gradually reduced to the horizontal.

The successive rows are executed fitting the long edge of the new cladding tile to the short edge of the one already placed, with a double-direction offset of the falsework system. On the horizontal, the distance between them is modified. On the vertical, the height between them is varied. The double curvature of the surface to cover means that with each offset the cladding tile has a different position and therefore the joint between them is also different. It is not parallel, but rather trapezoidal, adapting between 1 and 2 mm depending on the position.

As indicated in Figure 6, if diagonal tiling is maintained at 45° , the breakdown into 22 units of the first rows becomes another 22 in the central part. The problem lies in that in the distribution there is a difference of 8.4 cm, which must be corrected by the workman in the intermediate rows by cleverly retouching the joints. It is important to indicate that the figures only



7. Primeras hiladas utilizando la doble cimbra paralela. Fotografía de los autores

8. Bóveda ejecutada por el método de traslación. Grafiada la curva libre que define una supuesta alineación en diagonal. Fotografía de los autores

represent the lower face of each cladding tile (the visible face) to avoid the confusion caused by very close double lines when the thickness of the tiles is represented.

The increase in the thickness of the join is more obvious in the upper doubling, as a herringbone layout is made. This is because the vault has a greater radius in the double curvature, so the doubled cladding tiles are further apart.

The continuation of the vault entails irregular movements of the falsework system in both directions, continuous changes in the orientation of the tiles, a loss of parallelism in the joints with continuous corrections to counteract different thicknesses... These disadvantages make it necessary to introduce new guides or axes, other than the falsework system, so that the workman has visual references to continue the vault.

The joints must line up and adjust to continuous curves, which is a sign of good execution. In this present case, the join alignment is distorted following non-flat, sinusoidal curves, impossible for the workman to mark out from the start as they cannot be viewed previously, or draw or shutter in the rest of the unvaulted space.

The result is the constant change in the angle of the cladding tiles and the loss of continuity in the joints as there are no clear references for marking out. Continuing with the vault in these conditions leads to the final result of bricklaying that cannot be received, adjusted randomly in the hands of the professionalism of the workman. In this case, specialised workmanship is not enough to hide the accumulated lack of fit.

Taking into account the previous result and the fact that the surface to cover is translational, although apparently easy to comprehend, it is extremely complex to develop a breakdown of tiles at 45°. Only parametric editing programs can provide the exact position and angle of every tile and the variable thickness of the joins, which must be marked out at the construction site with the aid of specific topographic tools, contradicting the common sense of the technique.

Angel Truño defines it perfectly **12**, "if the curvature is variable, "mixed" bricklaying is difficult to use, as the square does not adapt to the curvature of the vault, so the cladding tiles must be retouched, which goes against the essence of 'el sencillado'".

After the two failed stages, it was decided to study noteworthy examples in search of



7



8

la parte central. El problema yace en que en su reparto aparece una diferencia de 8,4 cm, que deberá ser corregida por el operario en las hiladas intermedias con un hábil retoque en las juntas. Cabe indicar que en las figuras se ha representado únicamente cara inferior de cada rasilla (la aparente) para evitar la confusión con dobles líneas muy próximas si se representan los gruesos de las piezas.

El aumento en el espesor de las juntas se hace más patente en el doblado superior, que se realiza rompe juntas, dado que al tener la bóveda un mayor radio en la doble curvatura, las rasillas dobladas se distancian más entre ellas.

La continuación de la bóveda conlleva desplazamientos irregulares de la cimbra en ambas direcciones, continuos cambios en la orientación de las piezas, pérdida de paralelismo en el

7. First rows using the parallel double falsework system. Authors' photograph

8. Vault executed using the translational method. The blue line shows the free curve that defines a supposed diagonal alignment. Authors' photograph

rejuntado con continuas correcciones para absorber su diferencia de grosor. Estos inconvenientes hacen necesaria la introducción de nuevas guías o directrices, diferentes de las cimbras, para que el operario tenga referencias visuales para proseguir la bóveda.

Es preciso que las juntas deban alinearse y ajustarse a curvas continuas, señal de buena ejecución. En el presente caso la alineación de juntas se desvirtúa siguiendo curvas no planas y sinusoidales, imposibles de replantear por el operario desde el inicio por no poderlas visualizar previamente ni dibujar o encofrar en el resto de espacio sin bóveda.

El resultado es el constante cambio en la inclinación de las rasillas y las pérdidas de continuidad de las juntas al no tener referencias claras para el replanteo. Seguir con la bóveda en estas condiciones conduce a que el resultado final sea un aparejo que no se puede recibir, ajustado aleatoriamente en manos de la profesionalidad del operario. La mano de obra especializada en este caso no es suficiente para disimular los desajustes acumulados.

Con el resultado anterior y el hecho de que la superficie a cubrir sea de traslación, aunque de aparente fácil comprensión, es de extrema complejidad para desarrollar un despiece de piezas a 45°. Solo programas de edición paramétrica pueden dar la posición e inclinación exacta de cada pieza y los gruesos variables de sus juntas, que deberá replantearse en obra con ayuda herramientas topográficas precisas, contradiciendo el sentido común de la técnica.

Lo define perfectamente Angel Truño **12**, "si la curvatura es variable, el aparejo a la "mescla" es difícil de emplear, por no adaptarse la escuadra a la curvatura de la bóveda, debiéndose



9. Fotografía de las bóvedas del Bridge Market, bajo el puente de Queensboro en Nueva York, proyectado por Guastavino. (grafiada la curva no regular que define el final de la primera hilada entera). Fotografía original: <https://ephemeralnewyork.files.wordpress.com/2014/01/bridgemarket3.jpg>

9. Photograph of the vaults of Bridge Market, under the Queensboro Bridge in New York, designed by Guastavino. (The irregular curve that defines the end of the first whole row is shown). Original photograph: <https://ephemeralnewyork.files.wordpress.com/2014/01/bridgemarket3.jpg>

de retocar las rasillas, cosa contraria a la esencia del sencillado”.

Tras las dos etapas fallidas, se decide efectuar un estudio sobre ejemplos notables para buscar soluciones. En los pabellones modernistas del Hospital de Sant Pau de Barcelona se encuentran bóvedas con este aparejo en diagonal, pero los arcos son realzados o de medio punto, lo cual impide de por sí iniciarlas con hiladas enteras. En otros casos las bóvedas son casquetes esféricos casi planos, con muy poca curvatura, donde las diferencias se absorben fácilmente con el rejuntado habitual.

Caso aparte son las bóvedas realizadas por Guastavino en su obra americana, donde se observa en ejemplos con aparejo en diagonal, que la primera hilada no es paralela al arco y tampoco se colocan todas las rasillas enteras.

En la tercera etapa, aplicada a la siguiente bóveda, se intentan solucionar los problemas de ejecución aproximándola esta vez a una superficie tórica o toroide. Otra vez Ángel Truño también hace referencia **13** a que el *“si el arco generador es de curvatura constante, la superficie resultante será parecida a una tórica”*, pero sin especificar más ni aportar ejemplos concretos. El toroide

se interpreta como la superficie generada por la revolución de un círculo alrededor de un eje contenido en el plano de dicho círculo, desplazando así el arco generatriz de un modo radial y no paralelo a sí mismo.

La intención es generar un módulo de repetición único, que en lugar de desplazarse, gire en referencia al eje del toroide. Por un lado exhibe mayor dificultad de ejecución por el desplazamiento radial de las cimbras, por otro lado se obtiene una mayor precisión al tener cada módulo la misma distancia entre cimbras, marcando una pauta de replanteo idéntico para cada movimiento.

Las rasillas empleadas son de elaboración mecánica, industrializada, con los cantos rectos y unas dimensiones muy precisas, lo cual produce que se aprecien con mayor evidencia los errores en la continuidad de juntas. Aunque en el ejemplo no se ha llevado a cabo, es conveniente el uso de rasillas de elaboración manual. A pesar de su mayor coste económico, sus cantos romos y desiguales ofrecen una mayor tolerancia en su posicionamiento y rejuntado.

El toroide a generar se denomina toroide por husos, ya que su eje es en

solutions. In the modernist pavilions of the Sant Pau Hospital in Barcelona there are vaults with this diagonal brickwork, but they are enhanced or mid-point arches, which means they cannot be started with whole rows. In other cases the vaults are almost flat spherical caps, with very little curvature, where the differences are easily absorbed with the usual joins.

The vaults by Guastavino in his American work are a different case. They include examples with diagonal brickwork, where the first row is not parallel to the arch and the tiles are not all placed whole.

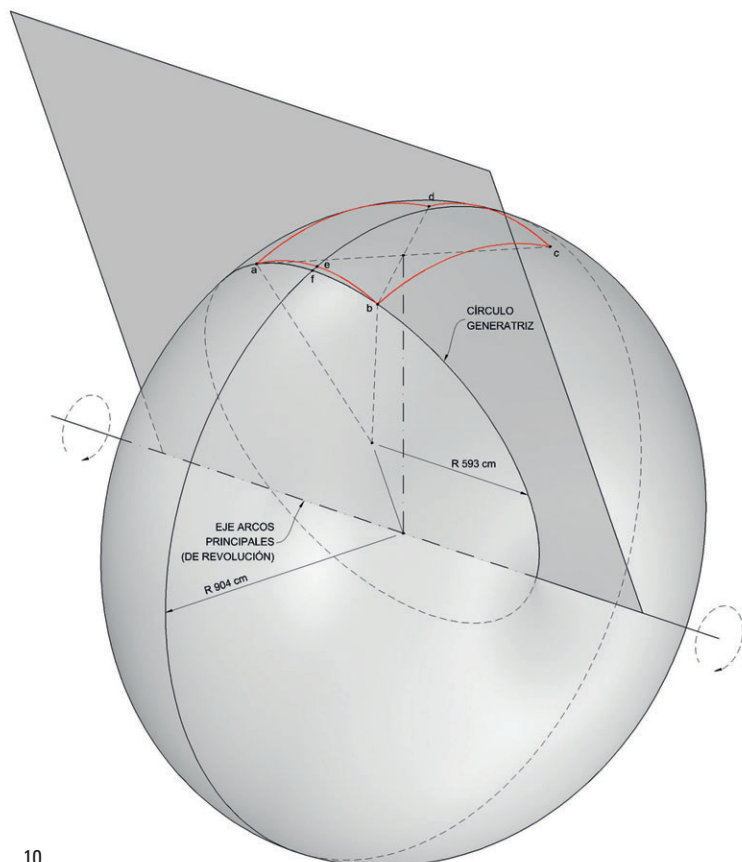
In the third stage, applied to the next vault, this time an attempt is made to solve the problems of execution by constructing a surface as close to a toric surface or torus as possible. Once again Angel Truño **13** says that *“if the generator arch has a constant curvature, the result will be similar to a toric surface”*, but without specifying further or providing specific examples. The torus is interpreted as the surface generated by the revolution of a circle around an axis contained in the plane of this circle, thus displacing the generatrix arch radially and not parallel to itself.

The intention is to generate a single repetition module that, instead of being offset, rotates around the axis of the torus. On one hand it is more difficult to execute due to the radial movement of the falsework system, however greater accuracy is obtained as every module has the same distance between falsework systems, with an identical marking guide for every movement.

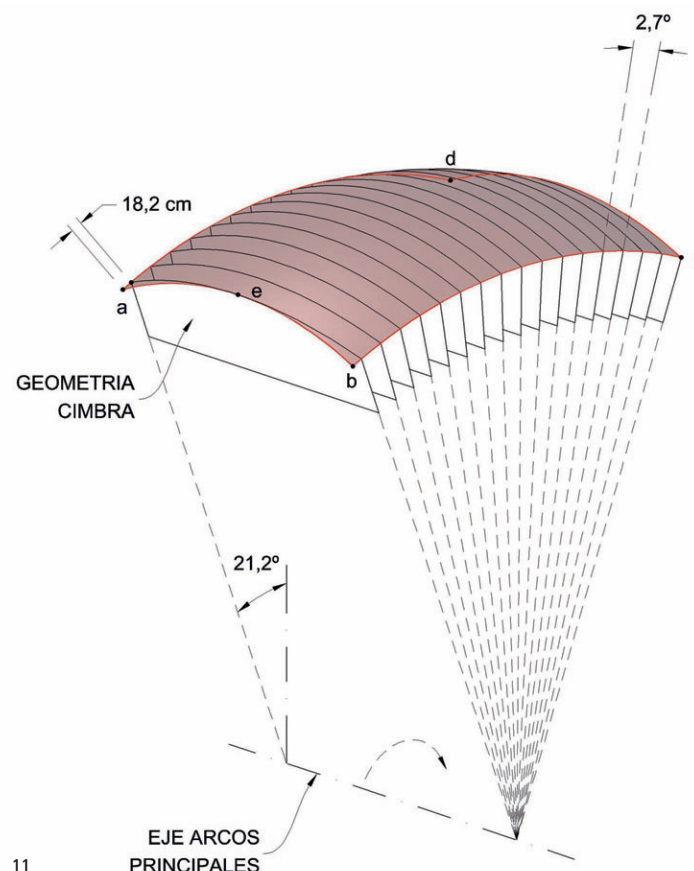
The cladding tiles used are mechanically, industrially manufactured with straight sides and very specific dimensions, which means that errors in the continuity of the joins are more evident. Although this has not been done in the example, it is advisable to use manually manufactured cladding tiles. Despite their greater economic cost, their blunt and uneven edges they provide greater tolerance in their positioning and joins.

The torus to generate is called a spindle torus, as its axis is in reality a chord of the generatrix circle. The straight line perpendicular to the centre of the main arches is used as the axis, and a new circle that passes through the points a, b and f as the generatrix. Is necessary to find this new circle, with a radius of 593 cm, because





10



11

the generatrix arch that goes through a, b and e (where e is the mid-point of the initial arch a, b) is on the vertical plane and is not a radial section of the torus.

Thus point f arises as the intersection between the plane that passes through a, b and the axis, with the circle that passes through e, with a radius of 904 cm.

The revolution means the two new falsework systems are not parallel, but that they are on two planes that meet at the axis of revolution, in the form of a segment **14** or wedge. The angle of opening of the two planes of the falsework systems is obtained by the diagonal position of a cladding tile, and the two will rotate the degrees together until the vault is completed. In the case presented, the repetition module for two rows at 45° covers an angle of 2.7° .

As analysed previously, the initial row cannot be whole cladding tiles, due to the fact that the plane of the falsework system, at the start, is angled at 21.2° and must pass through point e. This means the gap must be filled in with off-cuts of cladding tiles until the vertical plane of the upper arch is reached. Positioning the first truss well sets the pace of the vault, and together with the second, the radial sequence is found that is repeated round and round without varying the proportions throughout the movement.

realidad una cuerda del círculo generatriz. Como eje se utiliza la recta perpendicular al centro de los arcos principales, y como generatriz un nuevo círculo que pasa por los puntos a, b y f. Es necesario encontrar este nuevo círculo, de radio 593 cm, dado que el arco generatriz que pasa por a, b y e (siendo e punto medio del arco inicial a,b) se encuentra en plano vertical y no es una sección radial del toroide.

El punto f surge pues como la intersección entre el plano que pasa por a, b y eje, con el círculo que pasa por e, de 904 cm de radio.

La revolución implica que las dos nuevas cimbras no sean paralelas sino que se encuentren en sendos planos que se cortan en el eje de revolución, en forma de gajo **14** o cuña. El ángulo de apertura de los dos planos de las cimbras se obtiene por la posición en diagonal de una rasilla, y las dos irán rotando los grados solidariamente hasta completar la bóveda. En el caso presentado, el módulo de repetición

para dos hiladas a 45° abarca un ángulo de 2.7° .

Como se ha analizado anteriormente, la hilada inicial no puede ir con rasilla entera dado que el plano de la cimbra, en el inicio, encuentra inclinado 21.2° debiendo pasar por el punto e. Esto implica que se deba rellenar con recortes de rasilla el hueco que se establece hasta llegar al plano vertical del arco de cabeza. El buen posicionamiento de la primera cercha marca el buen ritmo de la bóveda, y junto a la segunda, se encuentra la secuencia radial que se repite giro a giro sin variar sus proporciones durante todo el desplazamiento.

El replanteo de una hilada entre las dos cimbras también marca el espesor de las juntas, que inevitablemente son más anchas en el centro y más estrechas en los extremos (cerca de los arcos secundarios), para poder absorber las diferencias de espacio entre las dos cimbras del mismo modo. Manteniendo las juntas paralelas de 10-11 mm



10. Definición geométrica del encaje por toroide

11. Esquema de montaje para la superficie tórica

12. Bóveda con la doble cimbra orientada hacia el eje de revolución del toroide. Fotografía de los autores

10. Geometric definition of the fit using the torus

11. Assembly diagram for the toric surface

12. Vault with double falsework system oriented toward the axis of revolution of the torus. Authors' photograph

en los extremos laterales, se obtienen juntas no paralelas que oscilan entre 14 y 19 mm en la zona intermedia, próxima a la clave, de gran complejidad para su replanteo. Las rasillas centrales quedan también giradas $0,5^\circ$ en su proyección en planta para poderse ajustar correctamente, y a medida que se aproximan a los extremos se reduce el giro en $0,1^\circ$ cada 3 rasillas, hasta llegar a 0° en la rasilla más extrema, junto al arco directriz.

Los giros y cambios de posición son imperceptibles, sin embargo, el relleno de las juntas realizado en yeso blanco contrasta excesivamente con el color rojo ladrillo y delata fácilmente las discontinuidades y errores. Las juntas de mortero (no utilizadas en este proyecto) suelen ser más oscuras y por ello de buena ayuda para disimular los errores y homogeneizar los resaltes y uñas que se producen en los acomodados a la doble curvatura. El operario sabe que el replanteo del primer gajo, si es correcto, le servirá de pauta para repetir los siguientes hasta cubrir toda la bóveda.

En la cripta de la iglesia se han realizado 3 bóvedas, la central con aproximación a superficie por traslación y las laterales por tóricas, estas últimas con mejor acabado y resolución. El resultado final es que ambos tipos de superficies parten de idénticos arcos perimetrales, pero la clave en la solución tórica es 3,6 cm más baja al tener como sección intermedia un arco de 593 cm de radio, por 554 cm en la solución por traslación.

Esta diferencia de altura es prácticamente imperceptible para el espectador situado en la sala, todo lo contrario a la diferencia entre acabados, que son exagerados entre unas y otras. El elevado coste de derribar la bóveda central y ejecutarla de nuevo



12

es el motivo por el cual la propiedad decide dejarla en pie, lo cual da mayor validez al presente artículo, al poder el lector presenciar en un futuro cercano, los dos ejemplos.

A pesar de toda la documentación escrita y gráfica existente sobre bóvedas tabicadas, sin duda hay todavía aspectos importantes que no se han explicado dada la cantidad de configuraciones posibles entre tipologías, dimensiones, aparejos, rasillas etc. Con toda probabilidad, si el aparejo hubiera sido por hiladas de juntas continuas (como recomienda Luis Moya en sus escritos) y no en diagonal, la dificultad hubiera sido menor, pero al no haberse experimentado no se pueden sacar conclusiones para este artículo.

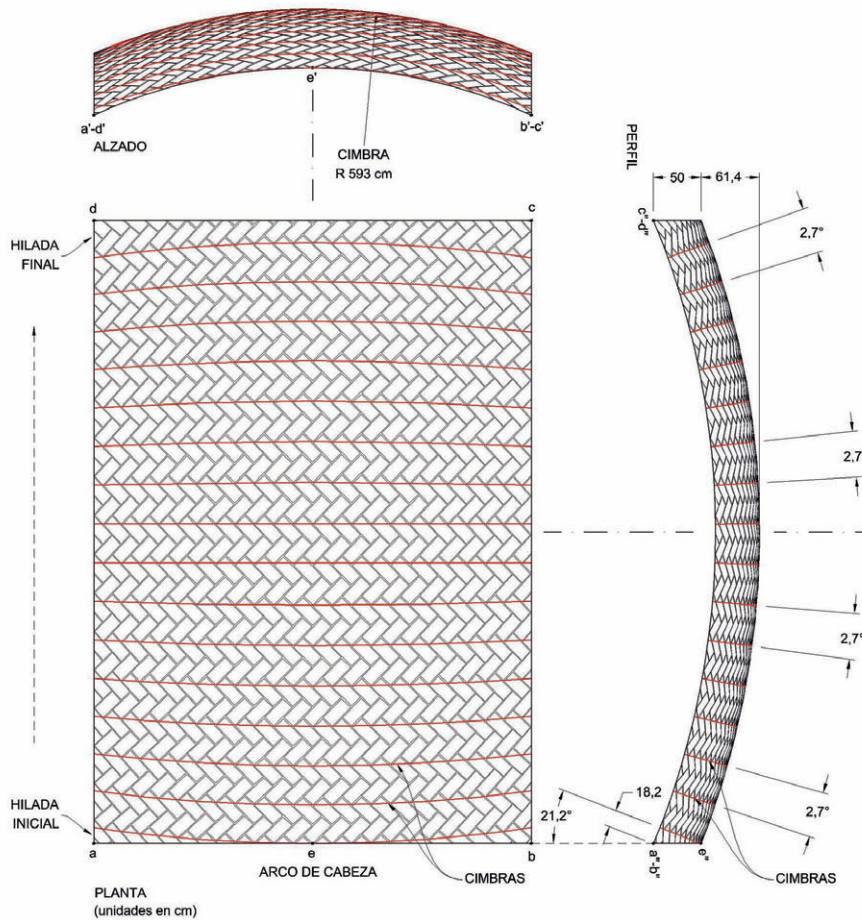
Habitualmente se realizan investigaciones y estudios sobre este tipo de bóvedas, ya ejecutadas, para analizar su geometría y bondades, pero en el ejemplo citado se encuentran los problemas de raíz al ser proactivo

The marking out of a row between the two falsework systems also marks the thickness of the joints that are inevitably wider at the centre and narrower in the ends (near the secondary arches). In this manner, the joints are able to absorb the difference in the space between the two falsework systems in the same way. Maintaining the joints parallel at 10-11 mm at the lateral ends obtains non-parallel joints ranging between 14 and 19 mm in the intermediate area, near the key, of great complexity for marking out. The cladding tiles are also rotated 0.5° in the plan view so they fit correctly. As they get closer to the ends the rotation decreases by 0.1° every 3 cladding tiles, until it reaches 0° in the cladding tile at the end, where the guide arch is.

The rotation and changes in position are imperceptible; nevertheless, joints filled with white plaster contrast excessively with the red brick and easily highlight the discontinuities and errors. Mortar joints (not used in this project) are usually darker and therefore help disguise the errors and standardise the highs and lows that occur in the adjustments to the double curvature. The workman knows that marking out the first segment, if done properly, will act as a guide for repeating the next until the vault is complete. In the crypt of the church 3 vaults have been built, the central one with a translational surface approach and the lateral vaults with a toric method. The latter have the best finish and resolution. The final result is that both types of surfaces start with identical perimeter arches, but the key in the toric solution is 3.6 cm lower as at the intermediate section it has an arch with a radius of 593 cm, and in the translation solution it is 554 cm.

This difference in height is barely noticeable by spectators in the hall, in stark contrast to the differences in the finishes, which vary greatly from one to the other. The high cost of demolishing the central vault and executing it again is the reason why the owner decided to let it stand, which gives greater validity to this paper, as soon the reader will be able to see the two examples in person.

Despite all of the written and graphic documentation existing on timbered vaults, without doubt there are still significant aspects that have not been explained, given the amount of possible configurations of types, dimensions, brickwork, cladding tiles etc. In all likelihood, if



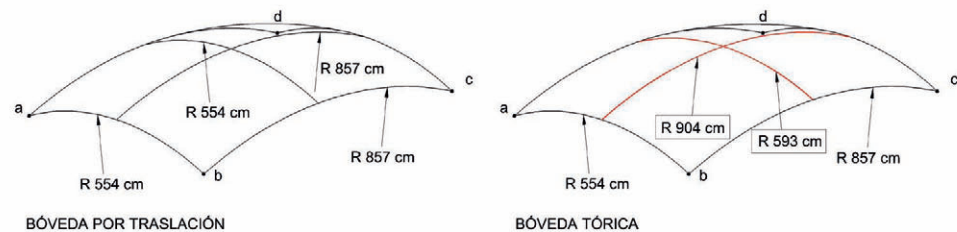
13

the brickwork had been in rows with continuous joints (as recommended in text by Luis Moya) and not diagonal, the level of difficulty would have been lower, but without trying it, conclusions for this paper could not have been drawn.

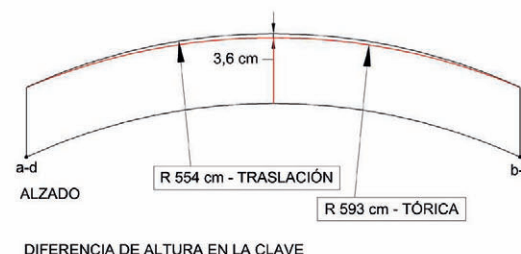
Research and studies into this type of vaults are usually performed on structures that have already been built, to analyse their geometry and benefits, but in the example cited we find the intrinsic problems of handling a proactive model in which what we are used to analysing is being designed. In this sense it is advisable to approach all types of timber vault, not just a geometrically controlled surface, but rather the technology, economy and resources that are going to apply in its construction.

Only in the generation using parametric systems of the digital model can we view the real positions and orientation of each cladding tile. After this it is advisable to verify the data with the everyday reality of the construction site and analyse to what extent it is worth bringing precise technology onto the construction site. It may be the only way not to depend solely on the good workmanship of the bricklayer and to be able to execute the project properly. ■

y proyectar lo que es por costumbre analizar. En este sentido es aconsejable aproximar todo tipo de bóveda tabicada, no solo a una superficie controlable geométricamente, sino a



14



13. Proyecciones de la bóveda ejecutada por toroide
14. Diferencias finales entre ambos tipos de superficies
15. Diferencias finales entre ambos tipos de superficies. Compárese la posición y tamaño de las primeras hiladas. Fotografía de los autores
16. Bóveda ejecutada como superficie tórica

la tecnología, economía y medios que se van a aplicar en su construcción.

Solo en la generación por sistemas paramétricos del modelo informatizado se pueden visualizar las posiciones y orientaciones reales de cada rasilla. Tras ello conviene contrastar los datos con la realidad diaria de la obra y analizar hasta qué extremo compensa introducir la precisa tecnología in situ. Puede ser el único modo de no depender solamente del buen hacer del operario y poder ejecutar correctamente lo que se proyecta. ■

Notas

- 1 / Entre otras publicaciones, destacan las de la bibliografía del presente artículo.
- 2 / Desde 2007, el CTE (Código Técnico de la Edificación) comprende la legislación española que regula los procesos de diseño, cálculo y construcción de edificios.
- 3 / DB-SE-F, acrónimo de Documento Básico de Seguridad Estructural en Fábricas de Ladrillos, perteneciente al CTE.
- 4 / En *Razón y ser de los tipos estructurales*, Madrid, 1960.
- 5 / Templo de culto cristiano ortodoxo ubicado en la calle Capella núm. 25 de Barcelona - www.biserica-barcelona.es
- 6 / En rumano, parte central de la iglesia (bajo el cimborrio) habilitada para los fieles.
- 7 / Denominada así por no ser vaída, es decir, esférica.



15



16

8 / En catalán, denominación habitual que define este particular tipo de bóvedas. También denominada en catalán, bóveda de “punt de mocador”.

9 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, pag.104

10 / En catalán, a la mezcla, en el sentido de mezclar rasillas entre sí.

11 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, pag.104

12 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, pag.106

13 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, pag.104

14 / Así denominado por la similitud geométrica a las partes en que se divide naturalmente una naranja o limón.

Referencias

- BASSEGODA I NONELL, Joan. *Aproximación a Gaudí*. Madrid: Doce Calles, 1992. ISBN 8487111246.
- LÓPEZ, David. Análisis estructural de bóvedas tabicadas. Barcelona: Departament d'Enginyeria de la Construcció - UPC, 2012. Recurso electrónico.
- MOYA BLANCO, Luis. *Bóvedas tabicadas*. Madrid: Dirección General de Arquitectura, 1947.
- OCHSENDORF, John Allen. *Guastavino vaulting: the art of structural tile*. New York: Princeton Architectural Press, 2010. ISBN 9781568987415.
- TRUÑÓ RUSIÑOL, Ángel. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM, 2004. ISBN 84-972-813-06.
- ZARAGOZA, Arturo; SOLER, Rafael; MARÍN, Rafael. *Construyendo bóvedas tabicadas: actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas - Valencia, 2011*. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2012. ISBN 9788483638729.



Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto de innovación docente “EDU2012-37247/EDUC: *E-learning* 3.0 en la docencia de la Arquitectura. Casos de estudio de investigación educativa para un futuro inmediato” del Gobierno de España. Parroquia Ortodoxa Rumana San Jorge de Barcelona, Aurel Bunda, Marin Olteanu, Sorin Deac y Salvador Gomis Aviño

- 13. Projections of the vault executed with the torus
- 14. Final differences between the two types of surfaces
- 15. Final differences between the two types of surfaces. Compare the position and size of the first rows. Authors' photograph
- 16. Vault executed as a toric surface

Notes

- 1 / Among other publications, it stands out the bibliography of this paper.
- 2 / Since 2007, the CTE (Technical Building Code) consists of the Spanish legislation that regulates the processes of design, calculation and construction of buildings.
- 3 / DB-SE-F, acronym for the Documento Básico de Seguridad Estructural en Fábricas de Ladrillos (Basic Document on Structural Safety in Brickwork), belonging to the CTE.
- 4 / In *Razón y ser de los tipos estructurales*, Madrid, 1960.
- 5 / Temple of Orthodox Christian worship on Calle Capella, 25 in Barcelona - www.bisericabarcelona.es
- 6 / In Romanian, the central part of the church (under the dome) prepared for worshippers.
- 7 / Named in this way as it is not vaulted but spherical.
- 8 / In Catalan, the usual description that defines this type of vault. Also called “punt de mocador” or handkerchief point vaults in Catalan.
- 9 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, p. 104
- 10 / In Catalan, mixed, in the sense of mixing cladding tiles together.
- 11 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, p. 104
- 12 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, p. 106
- 13 / Truñó Rusiñol, Ángel; *Construcción de bóvedas tabicadas*, 2004, p. 104
- 14 / Named in this way due to the geometric similarity to the segments of an orange or lemon.

References

- BASSEGODA I NONELL, Joan. *Aproximación a Gaudí*. Madrid: Doce Calles, 1992. ISBN 8487111246.
- LÓPEZ, David. Análisis estructural de bóvedas tabicadas. Barcelona: Departament d'Enginyeria de la Construcció - UPC, 2012. Electronic source.
- MOYA BLANCO, Luis. *Bóvedas tabicadas*. Madrid: Dirección General de Arquitectura, 1947.
- OCHSENDORF, John Allen. *Guastavino vaulting: the art of structural tile*. New York: Princeton Architectural Press, 2010. ISBN 9781568987415.
- TRUÑÓ RUSIÑOL, Ángel. *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, ETSAM, 2004. ISBN 84-972-813-06.
- ZARAGOZA, Arturo; SOLER, Rafael; MARÍN, Rafael. *Construyendo bóvedas tabicadas: actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas - Valencia, 2011*. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2012. ISBN 9788483638729.

Acknowledgments:

Paper funded by the educational innovation project “EDU2012-37247/EDUC: *E-learning* 3.0 en la docencia de la Arquitectura. Casos de estudio de investigación educativa para un futuro inmediato” by the Government of Spain. San Jorge Romanian Orthodox Parish in Barcelona, Aurel Bunda, Marin Olteanu, Sorin Deac and Salvador Gomis Aviño