

Las siete vidas de la bóveda plana de Abeille

The seven lives of Abeille's flat vault

Marta Perelló (*), Enrique Rabasa (*)

RESUMEN

En 1699 Abeille presenta a la *Académie des Sciences* su propuesta para la construcción de una bóveda plana compuesta por piezas todas iguales. El diseño de la pieza o dovela y la estructura resultante de su aparejo fueron una novedad para la teoría del corte de piedra. Las cuatro caras laterales de esta dovela son convergentes dos a dos, de tal forma que con dos de estas caras puede apoyarse en dos piezas, a la vez que dos dovelas adyacentes se pueden apoyar sobre las otras dos caras restantes. Se forma una estructura recíproca que ha tenido una importante presencia a lo largo de la historia. En el ámbito francés, generó un intenso debate acerca de sus ventajas, mientras que en España se quiso comprobar su eficacia a través de la práctica constructiva. Estos ejemplos construidos son recurrentes desde el siglo XVIII, el más reciente, en el siglo XX.

Palabras clave: estereotomía; cantería; bóveda plana; Abeille; Catedral de Lugo; forjados autárquicos; patente Mestre.

ABSTRACT

Abeille introduced to the Académie des Sciences in 1699 his proposal about a new flat vault model. It was composed of one single form of voussoir. The design of this piece and the particular arrangement were a notable innovation. Two lateral faces converge downward, the other two lateral faces converged upward. This faces composition allows the voussoir to rest on two voussoirs in the longitudinal axis as well as two voussoirs are supported in the minor axis of the piece. This kind of structure has been an example to emulate throughout history, especially in Spain, while the French approach was conceptual framework. The first example we know was built in the XVIII century in Lugo's Cathedral, and the last we have evidence was built in the XX century.

Keywords: stereotomy; stonecutting; flat vault; Abeille; Lugo's Cathedral; Mestre patent.

(*) Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: martuca.perello@gmail.com (M. Perelló)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5951-0553> (M. Perelló); <http://orcid.org/0000-0003-1530-7251> (E. Rabasa)

Cómo citar este artículo/Citation: Perelló, M, Rabasa, E. (2022). Las siete vidas de la bóveda plana de Abeille. *Informes de la Construcción*, 74(568): e470. <https://doi.org/10.3989/ic.90648>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 29/07/2021
Aceptado/Accepted: 09/04/2022
Publicado on-line/Published on-line: 27/12/2022

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XVII y durante todo el siglo XVIII, el conocimiento científico, basado en la razón y la experimentación, fue considerado la base del progreso. Suponía, además, una ruptura con la tradición y una apuesta por el descubrimiento. Antes de la introducción de nuevos materiales, como el acero laminado o el hormigón armado, la construcción va a explorar también el límite de las técnicas tradicionales.

En el caso de la construcción en piedra tallada, por ejemplo, adquieren relevancia los problemas de estabilidad asociados a la construcción de arcos adintelados o de bóvedas planas y la traba o el uso de elementos metálicos, como tirantes y otros recursos, para hacer solidarias estas estructuras (1, 2, 3). Las indagaciones en este campo buscaron la ampliación del conocimiento, y los resultados, en forma de nuevos tipos constructivos, fueron extremadamente valorados por coetáneos y por eruditos de momentos posteriores, como se refleja en los compendios sobre la materia, donde se repiten, en ocasiones sin adecuada reflexión e, incluso, con errores.

Ahora bien, es cuestionable considerar la *estereotomía* como una ciencia, puesto que sus recursos habían nacido “en el seno de la propia actividad constructiva, en función de sus necesidades”, y precisamente, al contrario, “las abstracciones geométricas resultantes y los procedimientos gráficos que hubo que desarrollar enriquecieron más tarde a la teoría geométrica” (4). Es decir, en el ámbito de la construcción en piedra tallada, se produce una inversión en la relación lógica o esperable entre técnica y ciencia; entre práctica y teoría; entre saber hacer, que es adaptar la norma de forma congruente para lograr un objetivo, y la teoría, que viene a confirmar la norma congruente con las leyes de la naturaleza. El término *estereotomía* empezó a utilizarse en el siglo XVIII con la intención de dignificar la disciplina que hasta entonces se había denominado *trazas*, *cortes* o *arte de la traza*.

La estereotomía del siglo XIX, que busca aplicar los nuevos conocimientos geométricos, persigue generalmente la sencillez en la solución constructiva, y la facilidad y la economía en su ejecución, pero, en ocasiones, privilegia el interés científico y abstracto de las soluciones formales, resultando poco útiles para el progreso. Algunas invenciones se han mostrado como llamativas, quizás por su idealización geométrica o su sistematización aparente. En los tratados del siglo XIX se pueden encontrar aparejos de gran complejidad que no serán empleados en la práctica, como la solución de Monge para la

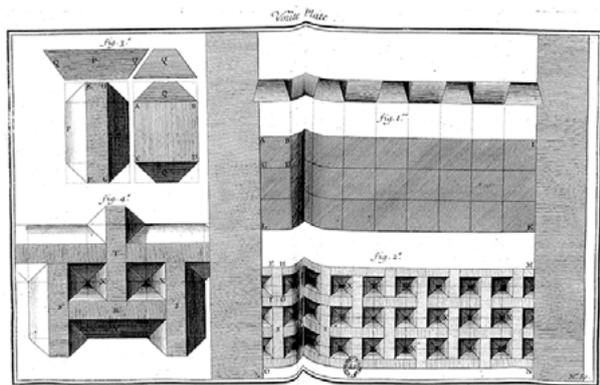


Figura 1. Bóveda plana de Joseph Abeille en *Recueil de machines approuvées par l'Académie*. (Gallon, 1735-1777).

bóveda elipsoidal, y otros que han sido materializados alguna vez, como el despiece llamado ortogonal para las bóvedas de cañón oblicuas, a pesar de su cuestionable utilidad (5). En ocasiones, la construcción de estas invenciones supuso un gran esfuerzo, pues se ha de considerar el problema del trazado, la técnica de labra y la estabilidad del conjunto. Este esfuerzo pudo asumirse bien para demostrar las capacidades de la persona al mando, arquitecto o ingeniero, o de la propia estructura construida; o bien, para demostrar que la teoría se puede poner en práctica.

2. LA TEORÍA

En 1699, se publica la propuesta de bóveda plana de Joseph Abeille (1673-1756), miembro del Cuerpo de Ingenieros y ejemplo de la figura de arquitecto-ingeniero en el Siglo de las Luces (Figura 1), bajo el título de “Voute plate inventée par M. Abeille” en *Recueil de machines approuvées par l'Académie*, un compendio escrito por Jean Gallon (6). Se trata de un nuevo tipo de bóveda plana que, empleando una cierta intuición espacial y mecánica, se aleja de la práctica habitual. Es un buen ejemplo de lo que veníamos anunciando, un invento cuya utilidad y aportación es dudosa. Recordemos que ya se utilizaba la bóveda rebajada para resolver el techo de espacios con escaso desarrollo en altura, y que se habían ejecutado bóvedas planas de aparejos más sencillos bajo el coro de la basílica del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (1583), en territorio español, o en el Castillo de Anet (1552), en Francia (7).

A pesar de la dudosa utilidad de la bóveda plana de Abeille, el invento no caería en el olvido. Con relativa frecuencia, su concepto básico ha sido desempolvado con el objetivo de demostrar su viabilidad y utilidad, con apoyo de los avances técnicos en construcción propios de cada época. En España esto ha sucedido al menos en tres ocasiones, incluso trasponiendo la idea a otros materiales. La aplicación de un sistema estructural concebido para un determinado material a otro no es un recurso novedoso. De hecho, el ingeniero francés Amédée-François Frézier (1682-1773), en su *Traité de stéréotomie*, señala las estructuras recíprocas para forjados de madera de Serlio y Wallis como antecedentes del invento de Abeille.

En el primer párrafo de la mencionada memoria de 1699 “Voute plate inventée par M. Abeille”, que hace las veces de introducción, el autor del texto, -no es posible saber si reproduce las palabras de Abeille o si es un juicio de valor del autor del compendio-, expone lo que podría entenderse como uno de los logros reseñables de este invento desde el punto de vista de la estereotomía: diseñar una bóveda con una superficie horizontal plana en el intradós y en el trasdós, y una forma única para todas las piezas.

Las dovelas del invento de Abeille quedan definidas por la geometría de sus seis caras: la inferior es un cuadrado; la superior, un rectángulo; las caras laterales son planos inclinados que contienen dos aristas paralelas, una perteneciente al rectángulo superior y otra al cuadrado inferior. En cuanto a las dimensiones, en el texto mencionado se sugiere que “la longitud de los lados del cuadrado es lo primero que se determina” y que “las dimensiones del rectángulo que forma la cara de extradós estará determinado por la inclinación de las caras laterales”. Como las caras laterales o lechos se inclinan un tercio del espesor, tanto si las caras son en talud entrante o en saliente, “el

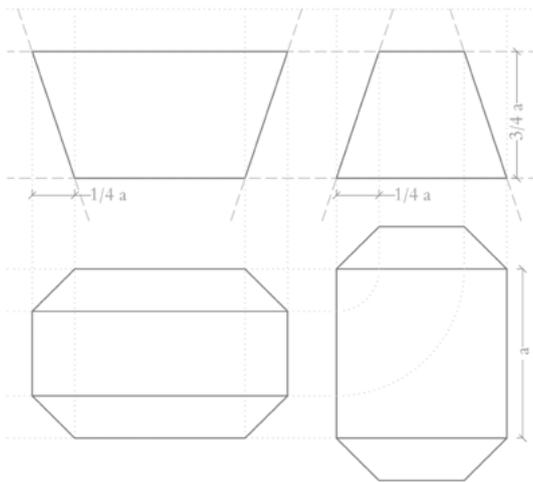


Figura 2. Trazas de la dovela según el texto en “Voute plate inventée par M. Abeille”.

lado largo del rectángulo será más largo que el lado del cuadrado del intradós en dos tercios del espesor, y el lado corto del rectángulo disminuirá respecto del lado del cuadrado de intradós en dos tercios del espesor”. De esta manera, “cada lado pequeño del rectángulo sobresaldrá un tercio del espesor a cada lado de la vertical trazada sobre el extremo del lado del cuadrado, y el lado largo retrocederá el mismo tercio del espesor respecto de la vertical trazada por el extremo del lado del cuadrado que le corresponda”. El espesor es tres cuartas partes de la longitud del cuadrado (Figura 2).

Los dibujos que acompañan al texto describen gráficamente la dovela y su aparejo; sin embargo, las proporciones dadas a la dovela en estos dibujos y las proporciones que sugiere el texto son ligeramente diferentes. Para facilitar la comparación de ambas, es adecuado adoptar el mismo sistema de proporciones que se emplea en el texto. De esta manera, tomando una dimensión cualquiera como lado del cuadrado que define la cara inferior o de intradós, y a la que se denominará a , el espesor queda definido en el dibujo como la mitad de a , en lugar de las tres cuartas partes de a como se señala en el texto. La inclinación de las caras laterales queda definida de la misma manera, retrocediendo o avanzando la tercera parte del espesor, según se trate de las caras inclinadas según el eje longitudinal de la dovela o según el eje transversal. Como consecuencia de la variación de esta dimensión y del espesor, el ángulo de inclinación cambia de setenta y dos grados a sesenta grados (Figura 3). Abeille comenta, a propósito de los vacíos del trasdós de la bóveda, que “es necesario observar que los huecos [...] parecen más grandes en la figura (que acompaña al texto) de lo que serán en la ejecución si se siguen para el tallado o corte de la dovela las reglas que se han dado anteriormente”. Deducimos que las dimensiones con las que debe tallarse la dovela son las descritas en el texto.

A continuación, explica la forma de disponer las dovelas, apoyadas cada una en dos, consiguiendo de esta manera una estructura que, siendo “recíproca en toda su extensión, se sostiene a nivel”. La bóveda resultante tiene un intradós plano y continuo, pero en el trasdós hay huecos, como hemos mencionado, que son piramidales. El texto que describe el invento de Joseph Abeille concluye señalando que, lejos de ser

una desventaja para hacer transitable el trasdós de la bóveda, pueden rellenarse con adoquines de distintos colores consiguiendo así un bonito pavimento.

El P. Sebastien Truchet, o Père Sebastien, de l'Académie Royale des Sciences, queriendo perfeccionar la bóveda de Abeille para conseguir un suelo transitable, suprime los huecos en forma de pirámide invertida del extradós (8) (Figura 4). Truchet propone sustituir los lados rectos de la cara superior de la pieza por curvas. Estas curvas son circunferencias cuyos centros se encuentran en los ejes longitudinal y transversal de la pieza, dos dentro de la proyección de la pieza en planta, los localizados en el eje longitudinal, y los otros dos restantes fuera de dicha proyección, los localizados sobre el eje transversal. De esta forma alcanza su propósito, pero introduce la compleja tarea de hacer coincidir las superficies regladas cóncava y convexa que se generan. La talla de una superficie reglada no supone mayor dificultad que un trabajo metódico basado en registros o referencias y comprobaciones recurrentes; sin embargo, como hemos podido comprobar en su ejecución real, no se puede garantizar la total correspondencia entre la superficie cóncava y la convexa sin un repaso y retallado. Tras la exposición de la mejora, Truchet subraya otra de las ventajas de la construcción de este tipo de bóveda: “el empuje es compartido por las cuatro paredes que la sostiene, mientras que el empuje de las bóvedas en las que las dovelas están en una dirección única, se produce en dos de los lados”.

El ingeniero francés Amédée-François Frézier dedicó el capítulo IV de *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois pour la construction des voutes et autres parties des bâtiments civils et militaires* (1737) al estudio y definición geométrica y constructiva “des voûtes plates horizontales ou inclinées”. Antes de abordar el análisis de la bóveda plana de Abeille, Frézier incide sobre las tres formas en que se puede construir superficies planas: apoyadas en dos lados, o *plate bandes*; apoyadas en cuatro, o *voûtes plates*; y apoyadas en dos lados contiguos e inclinadas hacia el horizonte o *trompes plates*, es decir, trompas cuyo intradós, en lugar de cónico, como es habitual, es plano. También señala que las piezas de uno y otro tipo de bóvedas deben recibir distinto nombre: denomina *claveaux* a las dovelas de las bóvedas planas y *voussoirs* a las dovelas de bóvedas cóncavas. Según Frézier, el

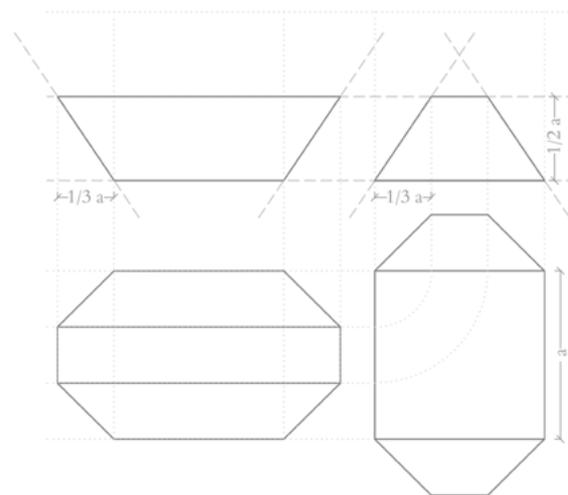


Figura 3. Trazas de la dovela según la figura que acompaña al texto en “Voute plate inventée par M. Abeille”.

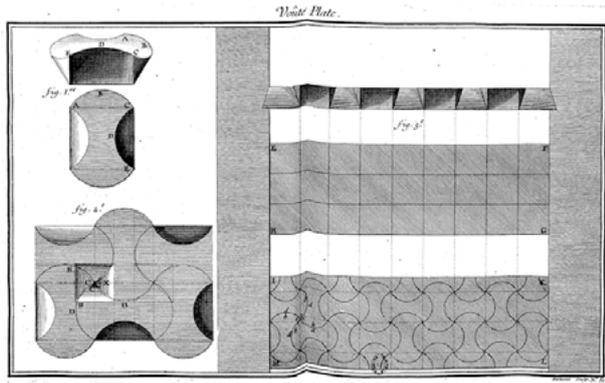


Figura 4. Bóveda plana de P. Sebastien Truchet (Gallon, 1735-1777).

nombre de *voûte plates* “es tan novedoso como la invención de estas bóvedas”, refiriéndose con *estas bóvedas* al invento de Abeille (Figura 5).

Además de estas precisiones semánticas iniciales, Frézier hace una reflexión sobre el objeto que pudo inspirar al ingeniero francés. Como hemos señalado, se refiere a las estructuras recíprocas para forjados de madera de Serlio y Wallis como antecedentes del invento de Abeille. Sebastiano Serlio (1475-1554), al final de su primer libro de geometría (9), define un sistema para hacer forjados de madera cuando las vigas de las que dispone sean de menor dimensión que la luz del espacio a cubrir. En el ejemplo, pensado para cubrir una estancia cuadrada de 15 pies de lado, se emplea un total de ocho vigas de longitud ligeramente menor que el lado de la estancia. Todas las vigas están dispuestas de tal forma que uno de sus extremos apoya en el muro y el otro se enlaza en otra viga que tiene su dirección principal perpendicular a aquella mediante una unión a media madera reforzada con una unión me-

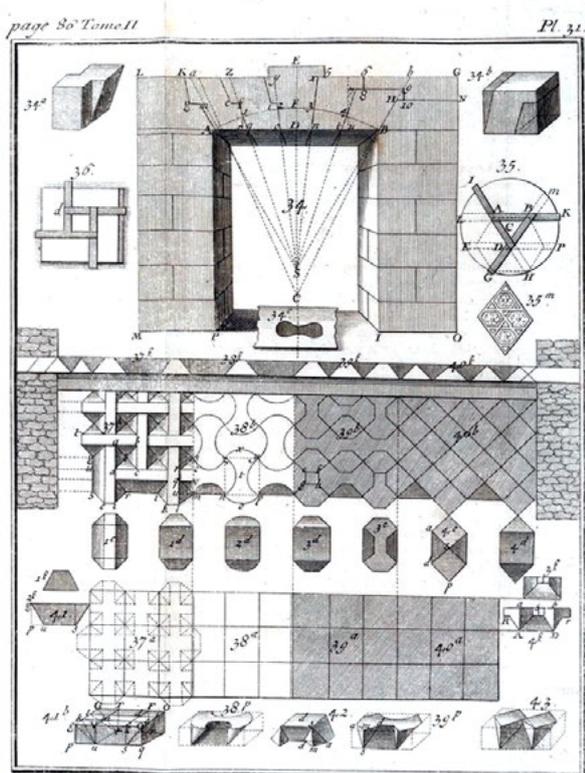


Figura 5. Estudio sobre bóvedas planas de Frézier (Frézier, 1737).

cánica (Figura 6). Para Frézier el sistema consiste en cruzar alternativamente las vigas de forma que estas apoyan recíprocamente el extremo de una sobre el centro de la otra. La descripción de Frézier no coincide con el texto de Serlio, que explica que las piezas son solo un poco más cortas que la luz a cubrir, por tanto, cruzándose con varias perpendicularmente.

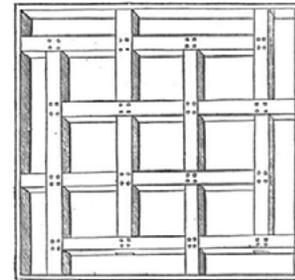


Figura 6. sistema para hacer forjados de madera cuando las vigas de las que dispone son de menor dimensión que la luz del espacio a cubrir (Serlio, 1551).

También John Wallis (1616-1703), en *Mechanica, sive de motu, tractatus geometricus*, publicada en 1670 (10), describe la manera de “construir un suelo plano por medio de vigas unidas entre sí y mucho más cortas que el lado de la superficie de ese piso” y de calcular “la carga que incumbe a cada una de sus articulaciones” (Figura 7), además de citar ejemplos ejecutados en Inglaterra bajo su dirección. Según Wallis, la bóveda se construye empleando dos tipos de piezas de madera: una que mide la cuarta parte del lado del cuadrado y otra que mide dos terceras partes de la longitud de la otra. También señala que los pesos de las dos piezas estarán en la misma proporción que sus dimensiones al ser del mismo material. Aconseja que las uniones sean a media madera, como dibuja Serlio, y que empiece a construirse por uno de los muros perimetrales de apoyo y continuar hasta el muro de enfrente. Finalmente, Wallis apunta que la malla cuadrada puede sustituirse por una figura más simple, como el triángulo, pero no puede construirse hasta el infinito. El límite está determinado por la resistencia del material, y deja en manos de los arquitectos este género de problemas (11).

Villard de Honnecourt (1200-1250) ya había incluido en su *Cuaderno* un dibujo sobre cómo trabajar en una torre o en

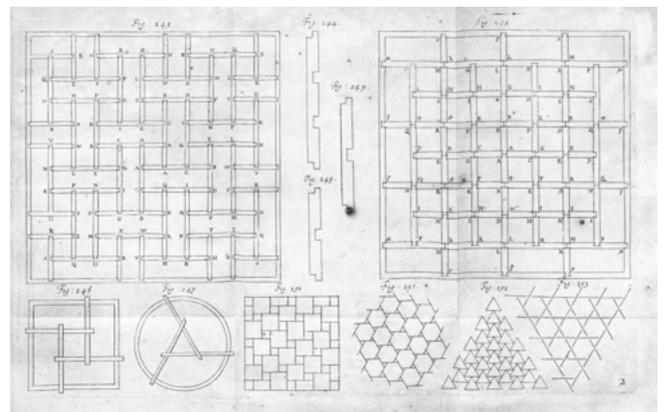


Figura 7. Manera de construir un suelo plano por medio de vigas unidas entre sí más cortas que el lado de la superficie a cubrir (Wallis, 1670).

una casa de madera incluso si la dimensión de las vigas es menor que la luz a cubrir (12). Leonardo da Vinci (1452-1519) también recoge un dibujo similar al de Honnecourt en el Códice Madrid y divagaciones más próximas a las conjeturas de Wallis en el Códice Atlántico (13).

Para Frézier la bóveda plana de Abeille imita a las estructuras recíprocas para forjados de madera de Serlio y Wallis. Señala que, al cambiar de material, las uniones entre las piezas deben ser diferente, aunque se conserve la distribución de las piezas. Los ensambles a media madera son sustituidos por cortes inclinados en los extremos de las piezas, es decir, cada pieza tiene lechos convergentes en esos extremos como en una dovela de un arco, adintelado o no. Forzosamente la inclinación de la cara saliente, lo que Frézier denomina “surplomb”, debe complementarse con una inclinación “en talud” de la cara que la recibe.

Concluye diciendo que la invención de Abeille es más ingeniosa que las estructuras recíprocas para forjados porque el hueco entre las vigas queda relleno por una trama de cuadrados, como un tablero de ajedrez, que da lugar a un techo continuo. A propósito de la discontinuidad del plano superior, añade que si se rellenaran los huecos se conseguiría un bonito pavimento y que se podría incluso rellenar simplemente con un poco de mortero para evitar el paso de aire si la estancia sobre la bóveda no es habitable.

Frézier discrepa de las dimensiones que Abeille proporciona para dibujar las trazas de las piezas. Conviene recordar que Abeille liga la dimensión del espesor a la dimensión del lado del cuadrado. Como consecuencia, al aumentar la dimensión del cuadrado, el espesor crecerá proporcionalmente. Para Frézier, el espesor es una cuestión de juicio, independiente del tamaño del intradós de las dovelas, y sólo debe tenerse en cuenta el ancho total de la estancia, el número de dovelas y la calidad de la piedra —si la piedra es quebradiza, el ajedrezado deberá ser más grande—. También considera errónea la inclinación de las caras laterales o lechos porque provoca “mucho empuje sin necesidad”. Para Frézier la inclinación aceptable de los lechos es de 45° , aunque puede aumentarse un poco, teniendo en cuenta que también aumentará el empuje (Figura 8).

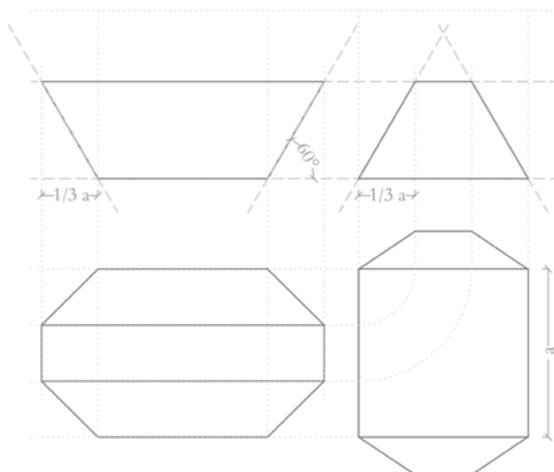


Figura 8. Trazas de la dovela según la figura que acompaña al texto en “La théorie et la pratique...” de Frézier.

A continuación, Frézier propone algunos métodos alternativos para hacer una bóveda plana con un solo tipo de piezas iguales cuyo intradós tenga un despiece en damero y un trasdós transitable. Frézier consideró la dificultad de la talla y aparejo de superficies cóncavas y convexas de la dovela de Truchet. Para mejorar la solución, propuso dovelas limitadas por superficies planas, ofreciendo una versión en la que el extradós es una figura compuesta de hexágonos y dodecágonos irregulares, y otra compuesta por cuadrados regulares diagonalmente opuestos al cuadrado del intradós; también un tercer tipo de dovela con superficies mixtas, versión en la que los lechos de las dovelas son superficies medio curvas, medio planas.

Finalmente afirma que se podría proponer una infinidad de soluciones para el intradós y el trasdós superando la geometría en damero. Demuestra así que domina la naturaleza del problema y dispone de las herramientas necesarias para resolverlo.

En el texto va más allá de en un interesante juego de geometría y capacidad espacial, Frézier completa su aportación con algunas reflexiones acerca de las limitaciones de su uso. Considera que esta invención es más ingeniosa que útil, ya que, al trabajar solidariamente, si fallase una dovela, toda la bóveda colapsaría. Por esta razón, cree que el uso debe estar restringido a estancias o gabinetes que se quieran preservar del fuego y cuya altura no sea excesiva. Así mismo, advierte que, durante el proceso de construcción, es conveniente disponer el conjunto un poco abombado en el centro, con el intradós no completamente horizontal, para compensar las inevitables deformaciones que se producen al descimbrar. Por último, aconseja hacer unas muescas o cajeados en las dovelas de los apoyos para reducir el empuje, lo que quizá en la práctica sería efectivo para garantizar el trabajo solidario. No consta que Frézier la hubiera ensayado alguna vez.

3. CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA

Como hemos visto, la memoria que recogía el invento de Abeille detallaba la geometría de la dovela y el ensamblaje de todas las piezas, pero era limitada en cuanto a la explicación de su origen o necesidad, y las ventajas que supone frente a otros tipos constructivos, como forjados de madera o bóvedas rebajadas. Frézier se aventuró en estas cuestiones y se refirió a los aspectos que garantizan la estabilidad del conjunto, siempre desde un punto de vista teórico.

Recordemos que, en el corte de la piedra, el diseño de las piezas debe garantizar tanto el ensamblaje correcto como la estabilidad de los aparejos (14). La bóveda plana inventada por Abeille no estaba sancionada por la práctica cuando fue presentada ante la Academia. Su aparente sencillez en el diseño podía revelarse inútil al intentar su construcción.

El ingeniero y arquitecto Julián Sánchez Bort (1725-1785), un importante constructor de la España de las Luces (15), aprovechó el proyecto de construcción de la fachada nueva de la catedral de Lugo para proyectar dos bóvedas planas que cubriesen el primer cuerpo de las torres (Figura 9). Para su diseño, Bort se inspiró sin duda en la bóveda de Abeille, pero invirtió su posición, resolviendo así brillantemente el problema de los huecos (16). Quizás la educación práctica que recibió junto a su tío, el arquitecto Jaime Bort, a quien acompañaba a las obras y viajes que realizaba, le permitió advertir

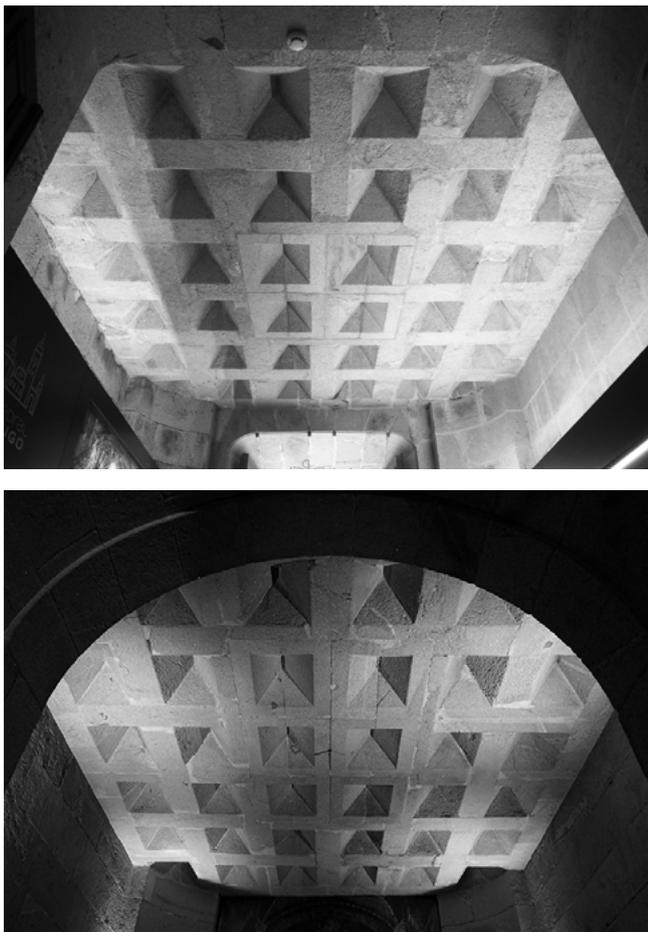


Figura 9. Bóveda plana de la torre sur (superior) y de la torre norte (inferior) en la catedral de Lugo.

que la bóveda invertida seguiría funcionando, puesto que no se altera el apoyo recíproco de las dovelas. Entre 1751 y 1752 Sánchez Bort acompañó a su tío a París para estudiar puentes, redes de alcantarillado, canales y planes de limpieza (17). Probablemente es allí donde pudo conocer la bóveda plana de Abeille, el diseño de la dovela de Truchet o las aportaciones de Frézier.

Las dos bóvedas planas fueron construidas entre 1769, fecha en que Julián Sánchez Bort firma el proyecto para la fachada nueva, con la aprobación de Ventura Rodríguez, y la paralización de las obras, que tuvo lugar en 1775, por motivos económicos derivados de dificultades de ejecución. Cuando se paralizan las obras, el cabildo manda redactar un informe en el que se identificaran las obras ejecutadas y las que restaban por ejecutar. En él se recoge que las torres estaban construidas hasta “el tercio de una orden de pilastras corintias”. En 1778 se retoman las obras, que concluirán en 1878 con la terminación de las torres. Para esta labor, se perforaron las bóvedas de los cuerpos inferiores, con objeto de facilitar la subida de material, bajo el compromiso del constructor de repararlas una vez concluida las tareas (18, 19, 20).

Otro aspecto en el que difiere respecto del modelo primigenio deriva probablemente de la proporción de la estancia que cubre. Con la dovela que Abeille propone para construir una bóveda plana, la superficie a cubrir es cuadrada; sin embargo, la planta de las torres es ligeramente rectangular. Los huecos, pirámides de planta cuadrada en el original, se transforman en

una especie de cubierta a cuatro aguas con cumbrera en el sentido longitudinal. Julián Sánchez Bort adapta las piezas colocadas en esa dirección. Éstas resultan ligeramente más alargadas que las dispuestas según el eje transversal. Con esta transformación, sería esperable que la superficie plana transitable

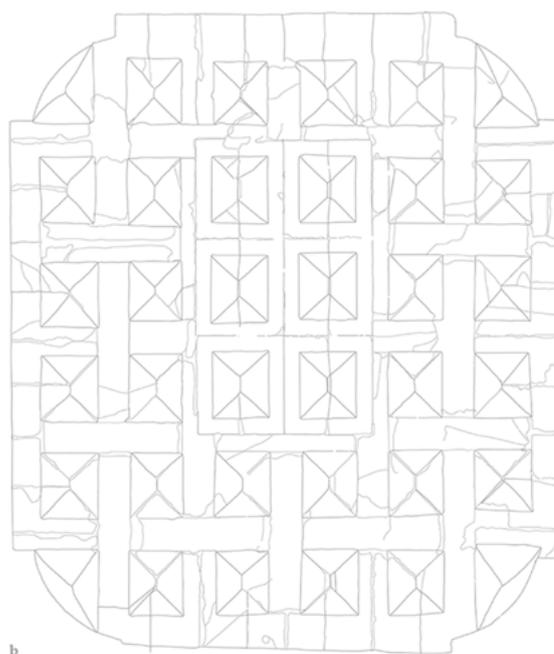
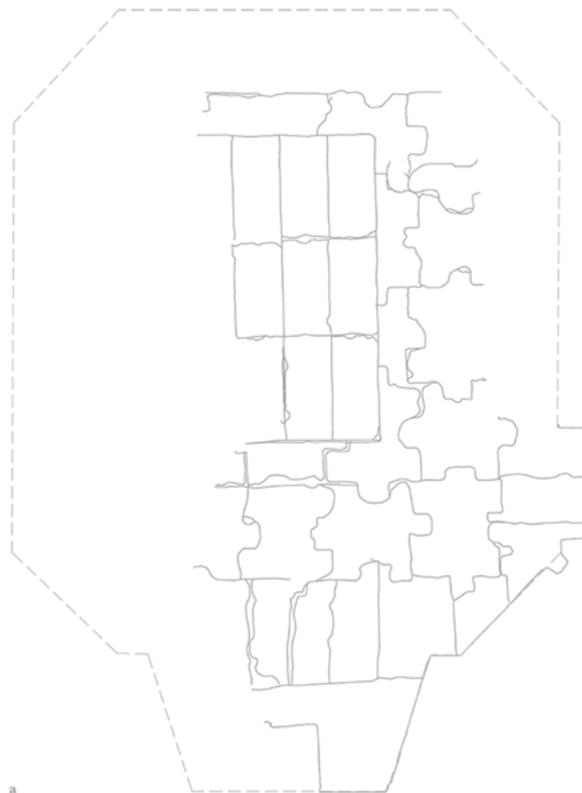


Figura 10. Despiece del estado actual del trasdós (a) y del intrados de la torre norte (b) de la catedral de Lugo.

superior estuviera compuesta por rectángulos y cuadrados alternados. Sólo es accesible parte del trasdós de una de las bóvedas, pero suficiente para descubrir que no sigue el patrón en damero (Figura 10). Exceptuando el hueco desmontado para subir materiales cuando se reanudaron las obras de construcción de la torre, el despiece se asemeja a las piezas de un puzzle, con entradas de unas piezas en otras. Cabe pensar si esta suerte de machihembrado evita el deslizamiento de las piezas por efecto del empuje. En Les Grands Ateliers franceses, bajo la dirección de Joël Sakarovitch, durante tres años consecutivos, 2002, 2003 y 2004, se construyeron experimentalmente tres modelos a escala de la bóveda de Abeille. Un de ellas fracasó por “effet de savonnette” (21), es decir, por deslizamiento en los lechos. En la bóveda que el mismo grupo de investigación construyó para la tienda del Convento de Santa María de la Resurrección (Jerusalén, 2018) bajo la dirección de AAU Anastas architectes y Laboratoire GSA-ENSA Paris Malaquais et SCALES, este efecto se contrarrestó empleando varillas de acero que cosen las piezas en la bóveda. Este recurso, conocido como piedra armada, se empleó con frecuencia en Francia durante el siglo XVIII para ejecutar bóvedas planas de despieces singulares. Julián Sánchez Bort no lo utilizó, pero se puede pensar que recurrió a juntas quebradas, un sistema que ya se utilizaba para evitar el deslizamiento de las dovelas en los arcos adintelados.

En la parte inferior de la bóveda de Lugo, las dovelas mantienen proporciones semejantes a las propuestas por Abeille y Frézier en las láminas que acompañan al texto; el espesor, sin embargo, es mucho mayor. Al componer un modelo fotogramétrico de la bóveda, ejecutado por levantamiento del intradós y el extradós y sus posiciones relativas, advertimos que el espesor guarda una proporción 1:1 respecto del cuadrado base.

Podemos suponer que tanto el recurso machihembrado de las dovelas como el aumento del espesor son recursos que Julián Sánchez Bort emplea para garantizar la estabilidad de la bóveda. Es cierto que, el aumento del espesor podría ser consecuencia de la existencia de dos piezas superpuestas (Figura 11a), pero, dada la coincidencia de la estructura del intradós y el extradós es igualmente probable que se concibiera desde el inicio una única dovela, a pesar de la complejidad de la pieza resultante (Figura 11b). Las piezas del perímetro de las bóvedas de la catedral de Lugo también son resueltas de forma singular. Imitan la forma de las dovelas de Abeille garantizando la continuidad del ritmo de llenos y vacíos y el apoyo recíproco; sin embargo, pueden entenderse como piezas especiales de enjarje.

Lucio del Valle (1815-1874), ingeniero de caminos y arquitecto, trabajó entre 1851 y 1858 en las obras del canal de Isabel II para abastecer de agua a Madrid. En la presa del Pontón de la Oliva, estructura que daba inicio a la red de traída de aguas y

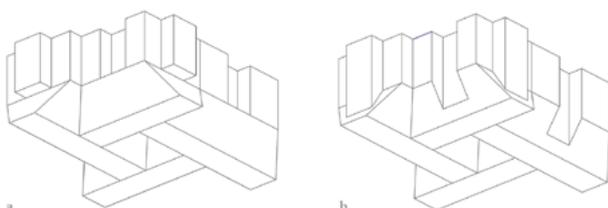


Figura 11. Dos piezas superpuestas (a) y pieza única (b) para la bóveda de la catedral de Lugo.

que actualmente está en desuso, encontramos un conjunto de construcciones anexas a la presa. Destaca la Casa de la Mina de Limpia por la bóveda plana construida en piedra que sirve de cubierta plana transitada (Figura 12). De acuerdo con la investigación de De Nichilo (22), la bóveda plana cubre un espacio rectangular de 310 por 380 centímetros de lado. El extradós, también rectangular, es ligeramente mayor, 328 por 397 centímetros. Su espesor tiene unos 21 centímetros. Las piezas de la bóveda están talladas siguiendo la cuarta forma que describe Frézier para resolver bóvedas planas con piezas iguales entre ellas, y cuyo intradós forma un despiece en damero. Esta cuarta forma viene a resolver el problema de los huecos con forma piramidal en el trasdós, evitando los lados curvos que proponía Truchet. Frézier dice que “añadiendo un tetraedro o pirámide triangular a la pieza de Abeille, al juntarse las cuatro pirámides triangulares o tetraedros, se rellena el hueco en forma de pirámide invertida, y se obtiene una pieza con todos sus lados planos” (23). La forma de las piezas de borde es mixta, una parte es como la descrita por Frézier, y la otra parte sigue la forma de una dovela de un arco adintelado, con lechos convergentes hacia el lado de intradós.

No sería extraño que, durante la ejecución de las bóvedas de la catedral de Lugo, o durante un ensayo con modelos a escala, hubiera sido necesario resolver ciertos problemas constructivos no contemplados en el modelo teórico de Abeille y Frézier, como ocurrió en los ensayos mencionados de los Grands Ateliers. No parece que sucediera lo mismo con la bóveda en el Pontón de la Oliva, en la que la única alteración observable es un pequeño descenso de las piezas en torno al centro. Quizás, la forma de las piezas que componen esta última bóveda evita su deslizamiento.



Figura 12. Bóveda plana en la presa de Pontón de la Oliva.

4. CONSTRUCCIÓN CON PIEZAS CERÁMICAS

A principios del siglo XIX, Inglaterra y Estados Unidos encabezaron la búsqueda de sistemas constructivos y materiales que hicieran que los edificios fueran resistentes al fuego. Para este fin resultaba fundamental la sustitución de la madera en estructuras de suelos y techos (24). Las bóvedas planas de piedra no podían ser empleadas para tal fin debido a la complejidad de su ejecución, su peso y carestía, y las precauciones que deben tomarse para garantizar la estabilidad del conjunto edificado, hacen poco viable su uso. En 1754, Félix François Espié había publicado un tratado en el que aconsejaba el uso de bóvedas tabicadas como sistema para hacer incombustibles los edificios. M. A. Laugier, en *Observaciones sobre la Arquitectura*, cuenta que la idea del Conde de Espie fue acogida con indiferencia en su momento; sin embargo, el contenido de este tratado fue traducido a varios idiomas. Joa-

quín de Sotomayor lo traduce al castellano en 1776 y advierte que este tipo de bóvedas ya se construían en España (25).

A lo largo del siglo XIX, en Inglaterra y Estados Unidos se desarrollaron, entre otros sistemas, forjados formados por vigas metálicas y piezas cerámicas que rellenan los huecos entre vigas (26, 27). Estas piezas cerámicas, macizas al principio y huecas después, adoptaban la geometría de las dovelas de un arco adintelado. Pudieron fabricarse cuando los sistemas de producción mecanizada llegaron a estar suficientemente desarrollados, aunque la estandarización no podía ser llevada hasta el final, pues las piezas que forman un arco adintelado no son todas iguales. Probablemente el deseo de reducción del número de piezas distintas es lo que dio lugar al desarrollo de prototipos, como el suelo Foster o, incluso, la patente Hanson para suelos resistentes al fuego, registrada en 1897 (28). Esta última propone una pieza cerámica para la construcción de suelos y techos sin elementos metálicos de apoyo. Estas piezas cuentan con caras laterales inclinadas que favorecen el apoyo recíproco de unas sobre otras (Figura 13). No es extraño que el invento de Abeille, y posteriores interpretaciones, tuvieran alguna influencia en la concepción de estas piezas cerámicas; los tratados de cortes de piedra o de estereotomía se extendían por toda Europa en el siglo XIX.

En 1950, un momento ya avanzado del siglo XX, la patente registrada por Antonio Mestre ante la oficina de Registro de Patentes de Barcelona tomará prestado de forma directa el invento de Abeille, pasando por alto la ventajosa inversión que realizó Julián Sánchez Bort. Quizás Antonio Mestre conoció la bóveda plana de Abeille al consultar el tratado de estereotomía de Antonio Rovira (1897) (Figura 14), ya que éste se limita a explicar el aparejo y a dibujar el despiece de Abeille, sin mencionar realización alguna, ni citar la bóveda plana de la catedral de Lugo.

A mediados del siglo XX, las circunstancias que asolan España dan lugar a la limitación del hierro en construcción. En el Decreto de 11 de marzo de 1941 se prohíbe expresamente el uso de hierro, con carácter provisional, “en la construcción de muros de fachadas traviesas, medianerías o patios con entramado metálicos; en cubiertas inclinadas de luces corrientes, que no excedan en crujía sencilla de seis metros y doble crujía de doce metros” y se anima a que su uso se reduzca “sustituyéndolo con procedimientos a base de hormigón armado del mínimo porcentaje de armaduras y de preferencias en elementos moldeados en taller o que requieren poco encofrado, o bien con enrasillados, bóvedas tabicadas o entramados de madera”. Este motivo vuelve a poner en marcha el mecanismo de búsqueda de soluciones eficaces para la construcción de suelos y techos conocidos ahora como *forjados cerámicos autárquicos* (29). En la publicación de 1945 *Sistemas especiales de forjados para la edificación. Tipos aprobados y revisados por la sección de investigación y normas de la Dirección General de Arquitectura* se recoge de forma sistemática una colección de posibles soluciones, acompañadas de especificaciones técnicas sobre su ejecución, cálculo y coste. Estos sistemas se agrupan en tres tipos: con viguetas metálicas; con armadura metálica que requieren encofrado, total o parcial; y, por último, con armadura metálica que no requieren encofrado y cuyas viguetas pueden ser fabricadas en obra o en taller.

En este contexto, Antonio Mestre Mestre presenta, bajo el título “Sistema de construcción de techos y pisos”, “un nuevo sistema

de construcción [...] en el que no se emplean vigas ni otros elementos de apoyo intermedio, sino piezas prismáticas de sección trapezoidal” que, trabadas unas con otras en las dos direcciones, forman una superficie resistente continua. La invención de Antonio Mestre se presenta como ventajosa frente a los forjados tradicionales que se venían utilizando en construcción, formados por una combinación de piezas que rellenan los huecos entre vigas o viguetas (Figura 15).

En la memoria descriptiva de la patente se detallan las características de las piezas que forman el singular techo. Las piezas con que se construye este forjado presentan dos caras, inferior y superior, paralelas y rectangulares, y otras cuatro caras inclinadas, dos a dos, con convergencia inferior y superior respectivamente. Las laterales, que enlazan el lado menor y el lado mayor de las caras inferior y superior, tienen forma de trapecio. El inventor propone una variante para esta misma pieza al possibilitar que la cara inferior o la superior pueda ser ligeramente cuadrada. De la descripción se extrae que, al producir esta variante, la inclinación de las caras laterales permanecerá invariable, y solo se altera la longitud total de la pieza. Para su fabricación propone la cerámica como material más apropiado puesto que el proceso de conformación es por extrusión en “máquinas ladrilleras usuales” con una boquilla de sección trapezoidal. Como resultado, la sección del sólido continuo es la de un trapecio. No se trata de un sólido macizo, sino de una pieza hueca.

La definición general de la pieza y del sistema constructivo es algo inconcreta. La luz máxima que puede cubrirse con este sistema es difusa. El texto se refiere a una “extensión normal”, o aquella en la

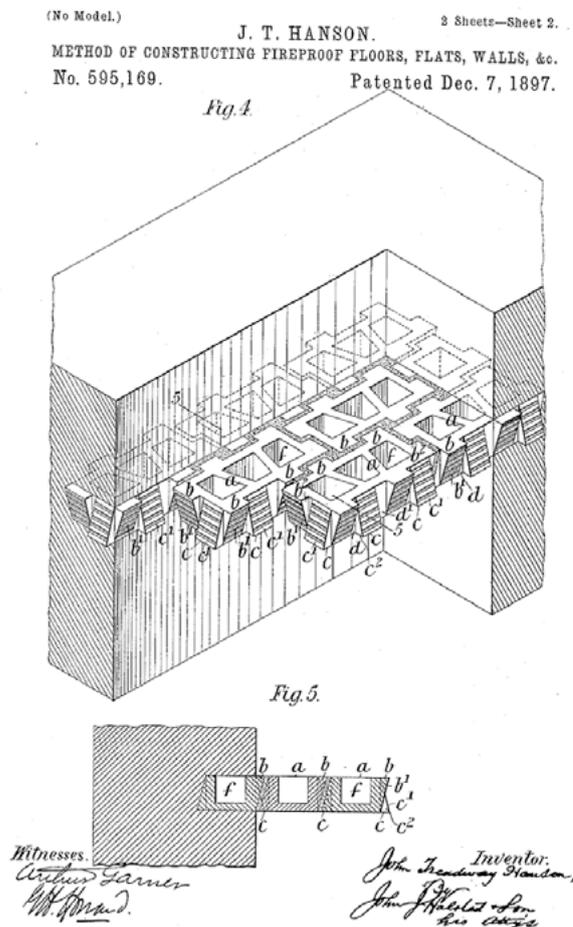


Figura 13. Patente Hanson, 1897.

que el sistema constructivo puede emplearse con éxito. Si las luces son mayores, se propone el uso de refuerzos, como “varillas metálicas, listones de madera u otros materiales”. Las dimensiones de las piezas no están claras, más allá de una pequeña referencia a la dimensión de un ladrillo; tampoco especifica el ángulo de inclinación óptimo para las caras laterales; ni define la forma de las piezas de borde. Aunque propone piezas cerámicas hacia el final del documento, explica que también podrían ser de cemento, plástico u otros materiales.

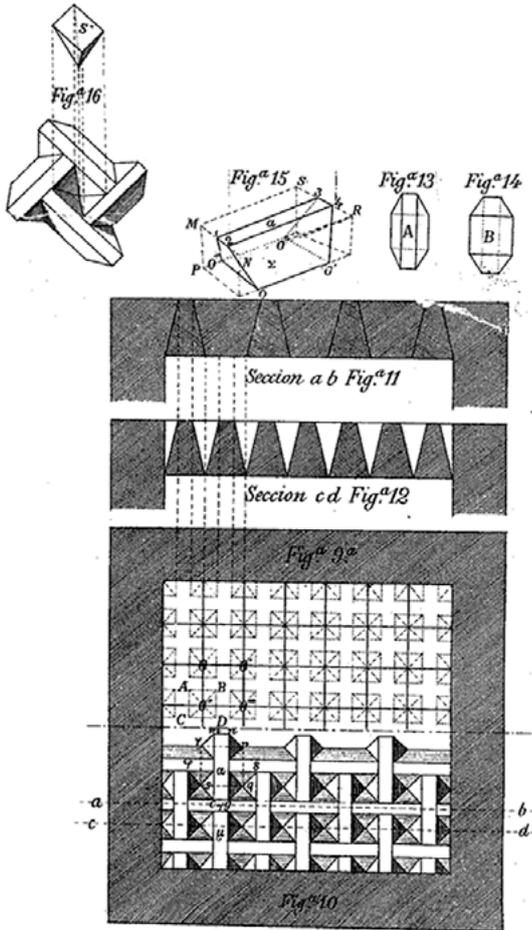


Figura 14. Bóveda plana de Abeille en el tratado de estereotomía de A. Rovira y Rabassa, 1897-1899.

La disposición alternada de las piezas incurre de nuevo en las deficiencias de diseño del pasado e incluso las incrementa. El hueco en forma de pirámide invertida aparece en el plano superior, como cabía esperar, pero también en el inferior, puesto que las dos caras de la pieza, inferior y superior, en la primera propuesta de diseño, son descritas como superficies rectangulares. El inventor propone el relleno de los huecos con mortero de cemento, solución semejante, aunque más sencilla, que la de Abeille, una baldosa, o que la que propuso Rovira, una pirámide tallada en piedra.

Para garantizar la estabilidad del suelo o techo —ahora lo denominaríamos forjado—, es necesario verter una capa de cemento de unos tres o cuatro centímetros a modo de solera. Al tener que garantizar la resistencia a esfuerzos de flexión con la introducción de varillas de hierro o listones de madera, Antonio Mestre se ve obligado a rediseñar la pieza inicial. Propone dos variantes que incorporan ranuras longitudinales

donde alojar elementos lineales, una con la ranura en el lateral y otra en la cara inferior.

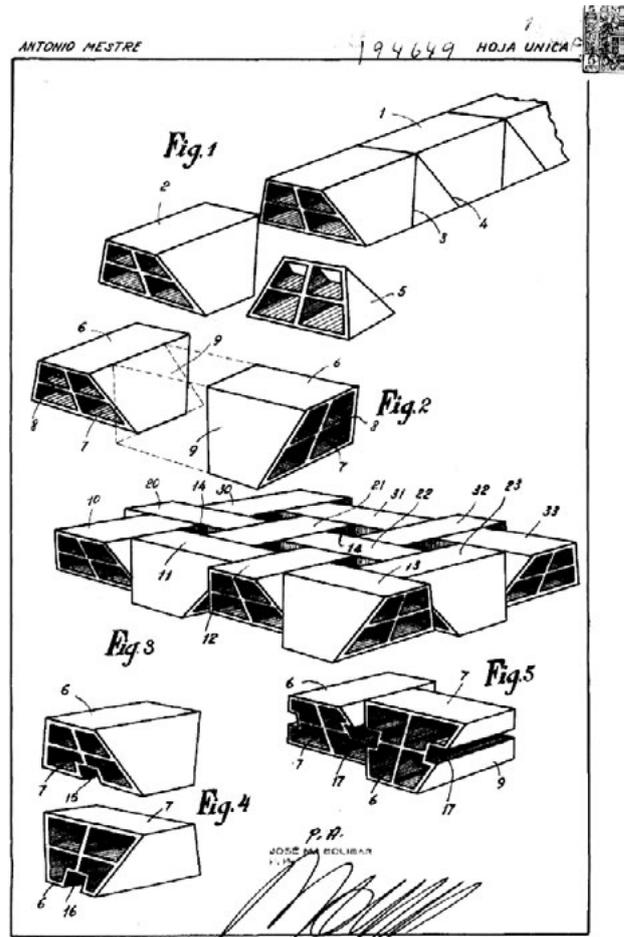


Figura 15. Patente registrada por Antonio Mestre, 1950.

Habrá que esperar a que se publique en 1959 “Entramados y forjados de piso” (30) para resolver las dudas sobre las especificaciones técnicas que suscita la patente de Antonio Mestre. En ella, su autor, Federico Ulsamer, clasifica de mayor a menor grado de prefabricación los sistemas que se venían usando. Incluye en esta clasificación, además de los ya recogidos en la publicación de 1945, los pisos totalmente forjados en obra, ya sean ejecutados con piezas especiales diseñadas para los mismos, esto es, patentes como el “piso Mestre”, o con elementos no patentados, es decir, piezas cerámicas comunes, requieran o no encofrado total y parcial.

La puesta en práctica de la patente de Antonio Mestre resulta menos dificultosa que la ejecución en piedra. En este caso, es indiferente que el acabado sea más o menos estético y que la superficie horizontal superior sea transitable o no. Sobre ella se vierte una capa de compresión que regularizará las imperfecciones y que permitirá el trabajo solidario de las piezas trabadas. La parte inferior o techo se puede cubrir con un tendido de yeso o con un falso techo una vez haya sido desencofrado. Construir un forjado con la patente de A. Mestre supondría además una ejecución rápida y económica. Hemos tenido noticia de un edificio de viviendas en el que se emplea este tipo de piezas para la construcción del forjado (Figura 16). El proyecto de ejecución de este edificio está firmado por Mariano Jaureguizar Azarola y visado en junio de 1966.



Figura 16. Forjado de piezas cerámicas similares a las patentadas por A. Mestre en un edificio de viviendas en Madrid. Félix Lasheras, 2019.

5. CONCLUSIÓN

Ventura Rodríguez, tratando de la pretensión de Sotomayor, en el mencionado elogio de la bóveda tabicada, de conseguir bóvedas monolíticas sin empuje, afirmó que “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” (31). Las bóvedas tabicadas, dejando de lado el mito del monolitismo, han tenido gran éxito antes y después de esta reivindicación.

La frase de Ventura Rodríguez podría ser aplicada al invento de Abeille. En este caso, el “éxito que a la fantasía aparece” surgió con tal fuerza que movería a muchos otros autores a su mejora. Se ha acometido, incluso, su realización, y en ese mismo terreno de la práctica ha surgido una ocurrencia feliz, como es la de la inversión de la bóveda. Parecía muerta esta vía cuando la decadencia de la construcción en piedra tallada se añadió a los inconvenientes y carestía del invento. Sin embargo, la idea ha sido recuperada en otros materiales, y, de nuevo, se ha llegado a hacer realmente.

Joseph Abeille, Sebastien Truchet, Amédée-François Fréziér, Julián Sánchez Bort, Lucio del Valle, Antonio Mestre y Mariano Jaureguizar Azarola han sido los protagonistas de esta historia. Unos por interés académico, otros por las posibilidades constructivas que ofrece el invento, han recurrido a una vieja idea que parece que mantiene su atractivo con el paso del tiempo. En los últimos años algunas iniciativas la quieren recuperar en piedra, incluso adaptarla a superficies curvas, a costa de renunciar a la forma única para las piezas, y empleando para su talla máquinas de control numérico, (32); la economía dirá si despegan del terreno de la fantasía.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Fundación Juanelo Turriano el apoyo a este trabajo mediante la concesión de una beca de doctorado.

REFERENCIAS

- (1) Picon, A. (1988). *Architectes et ingénieurs au siècle des Lumières*. Marseille: Éditions Parenthèses.
- (2) Radelet-de Grave, P., Benvenuto, E. (1995). *Entre mécanique et architecture. Between mechanics and architecture*. Basel: Birkhäuser.
- (3) Nègre, V. (2010). Pour une histoire technologique de l'architecture. En Carvais, R., Guillaume, R., Nègre, V., Sakarovich, J. (dir.) *Édifice et artifice. Histoires constructives* (pp. 17-22).
- (4) Rabasa Díaz, E. (2013). Estereotomía: teoría y práctica, justificación y alarde. *Informes de la construcción*, 65, 5-20.
- (5) Rabasa Díaz, E. (2000). Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX. Madrid: Akal.
- (6) Gallon, J. (1735-1777). Voute plate inventée par M. Abeille. *Machines et inventions approuvées par l'Académie Royale des Sciences depuis son établissement jusqu'à présent* (pp. 159-162). Paris: Académie des Sciences.
- (7) Pérouse de Montclos, J.-M. (1982). *L'architecture à la française: du milieu du XV^e à la fin du XVIII^e siècle*. Paris: Picard (pp.162-165).
- (8) Gallon, J. (1735-1777). Voute plate inventée par le Père Sebastien, de l'Académie Royal des sciences. *Machines et inventions approuvées par l'Académie Royale des Sciences depuis son établissement jusqu'à présent* (pp. 163-164). Paris: Académie des Sciences.
- (9) Serlio, S. (1551). *Il primo libro d'architettura di Sabastiano Serlio. Le premier livre d'architecture de Sébastien Serlio*. Paris: Jehan Barbé.
- (10) Wallis, J. (1670). *Mechanica, sive de motu, tractus geometricus*. Londres: G. Godbid.
- (11) Radelet-de Grave, P. (2012). La voûte plate est-elle une proposition perdue dans l'oeuvre de Wallis? En Gargiani, R. (ed.), *L'architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle histoire de la construction*. Lausanne: Presses Polytechniques et Univertaires Romandes (pp. 385-391).
- (12) Honnecourt, V. (1225-1235). *Cuaderno*, manuscrito (facsimil Madrid: Akal, 1991)
- (13) Sánchez, J.; Escrig, F.; Rodríguez, M^a.T. (2010). Una aproximación analítica a las mallas recíprocas diseñadas por Leonardo. *Informes de la Construcción*, 62(518), 5-14. <https://doi.org/10.3989/ic.09.032>.

- (14) Rabasa Díaz, E. (2015). Traza, descripción, razón. Lenguaje y grafismo en los tratados de corte de piedras. En Rodríguez Ortega, N., Taín Guzmán, M. (coord) *Teoría y literatura artística en España: revisión historiográfica y estudios contemporáneos* (pp. 412-459).
- (15) Crespo Delgado, D. (2016). Una época para el cambio. Los viajes del arquitecto e ingeniero Julián Sánchez Bort. En Cámara Muñoz, A., Revuelta Pol, B., (coord.), *Libros de caminos y días. El viaje del ingeniero*. Segovia: Fundación Juanelo Turriano y UNED. (pp 77-94).
- (16) Rabasa Díaz, E. (1998). La bóveda plana de Abeille en Lugo. En *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid: Juan de Herrera, SEDHC, U. Coruña, CEHOPU. (pp. 409-415)
- (17) Forte Cutillas, M. (2018). El arquitecto Jaime Bort en París (1751-1752). En *Revista Historia Autónoma*, 12, 121-132.
- (18) Yzquierdo Perrín, R. (1991). Arquitectura neoclásica en la Catedral de Lugo. En *Congreso Nacional de Historia de la Arquitectura y del Arte*. A Coruña: Universidade, Servicio de Publicacións, (pp. 109-125).
- (19) Vila Jato, M.D. (1988). Notas sobre la construcción de la fachada principal de la Catedral de Lugo. En *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología*, 54 (pp 454-465).
- (20) Vigo Trasancos, A. (1984-1985). El arquitecto-ingeniero Julián Sánchez Bort: perfil bibliográfico y obra en Galicia. En *Cuadernos de Estudios Gallegos*, 35(100), 501-525.
- (21) Sakarovich, J. (2007). Géométrie descriptive et expérimentations constructives. En *Archives Internationales d'histoire des Sciences* 57 (159), 443-454.
- (22) Nichilo, E. (2003). Learning from stone traditional vaulted systems for the contemporary project of architecture. the experimental construction site at the Ponton de Oliva. En Huerta, S. (Ed.), *Proceedings of the First International Congress Construction History*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, pp. 743-754.
- (23) Frézier, A.F. (1737). *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils et militaires*. Paris: C.A. Jombert.
- (24) Wermiel, S. (1993). The development of fireproof construction in Great Britain and the United States in the Nineteenth Century. *The International Journal of the Construction History Society*, 9, 3-26.
- (25) Huerta Fernández, S. (2005). Mecánica de las bóvedas tabicadas. *Arquitectura: Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid*, 339, 102-111.
- (26) Freitag, J.K. (1899). *The fireproofing of steel buildings*. New York: J. Wiley & Sons.
- (27) Voormann, F., (2012) Utilization de planchers en briques creuses en L'architrave, le plancher, la plate-forme. En Gargiani, R. (ed.), *L'Architrave, le plancher, la plate-formes*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes (pp. 537-543).
- (28) Hanson, John T. (1897). Method of constructing fireproof floors, plats, walls and c. London, England. Assignor to the Hanson's Fire-Proof Floor Syndicate, Limited, same place. Filed Mar. 6, 1897. Serial No. 626,294. En *The official Gazette of the United States Patent Office* 81(5) p.1729.
- (29) Azpilicueta Astarloa, E. (2004). La construcción de la arquitectura de postguerra en España (1939-1962) (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Arquitectura.
- (30) Ulsamer Puiggari, F. (1959). *Entramados y forjados de pisos*. Barcelona: CEAC, cop.
- (31) Sotomayor, J.; Aznar, P.; Espie, F. (1776). Modo de hacer incombustibles los edificios, sin aumentar el coste de su construcción. En Madrid: En la oficina de Pantaleón Azanar.
- (32) Fallacara, G.; Tamborero, L. (2007). *Verso una progettazione stereotomica. Nozioni di stereotomia, stereotomia digitale e trasformazioni topologiche. Ragionamenti intorno alla costruzione della forma. Towards a stereotomic design. Notions of stereotomy, digital stereotomy and topological transformations. Reasoning about the construction of the form*. Roma: ARACNE.