



La mecánica ilustrada en los ingenieros militares españoles. El proyecto de los almacenes de pólvora (1715-1798)

*Mechanics illustrated in Spanish military engineers.
The project of powder-magazines (1715-1798)*

J. Lluís i Ginovart (*)

RESUMEN

Los arcos catenarios formaron parte del gran éxito estructural de la arquitectura modernista y, especialmente, de la obra de Gaudí. El estudio de los proyectos de los ingenieros militares españoles, demuestra que fueron ellos los primeros que los introdujeron en el territorio español en el primer tercio del siglo XVIII. El conocimiento y el intento de aplicación de este tipo de estructuras, especialmente en la construcción de polvorines, demostraría el conocimiento de la teoría científica de estas estructuras formulada por Hooke. El estudio de la Mecánica pre-científica fue reclamado por Juan de Herrera en la Academia de Matemáticas (1583), al igual que lo será la Mecánica científica en la Academia de Barcelona (1720). Por ello y ante la utilización del arco y bóveda catenaria, se demostraría también que aportaron las bases de la Mecánica moderna.

Palabras clave: Ingenieros militares; mecánica científica; bóvedas; catenaria.

ABSTRACT

The catenary arches were part of the great structural success of the modernist architecture, and especially in the Gaudí's work. The study of the Spanish military engineers' projects shows that they were the first that introduced in the Spanish territory in the first third of the eighteenth century. Knowledge and the attempt to apply this type of structure, especially in the construction of Powder-Magazines, will demonstrate the knowledge of the scientific theory of these structures made by Hooke. The study of pre-scientific Mechanics was claimed by Juan de Herrera in the Academy of Mathematics (1583), as it is scientific Mechanics at the Academy of Barcelona (1720). For this reason and due to the use of catenary arch and vault, this will show that they provided the bases of modern mechanic.

Keywords: Military engineers; scientific mechanics; vaults, catenary.

(*) Universitat Rovira i Virgili. Reus (España).

Persona de contacto/Corresponding author: josep.lluisg@urv.cat (J. Lluís i Ginovart).

Cómo citar este artículo/Citation: Lluís i Ginovart, J. (2015). La mecánica ilustrada en los ingenieros militares españoles. El proyecto de los almacenes de pólvora (1715-1798). *Informes de la Construcción*, 67(539): e103, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.109>.

Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de **Informes de la Construcción** se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

1. INTRODUCCIÓN

Los arcos catenarios son una de las principales características de la arquitectura del siglo XIX, cuya tipología estructural fue desarrollada como consecuencia de la teoría de arcos de fábrica aplicada a la estática gráfica, y cuyo principal exponente es la obra de Antonio Gaudí (1852-1926) (1).

La teoría de la cadena (2), planteada por Robert Hooke (1635-1703) en la cuestión 2 del *A description of helioscopes, and some other instruments* (1676), proponía: *The true Mathematical and Mechanical form of all manner of Arches for Building*, cuya solución fue «*Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum*» (3). La forma catenaria fue empleada por Christopher Wren (1632-1723) en la cúpula de San Pablo (1675), donde colaboró Hooke (4), (5). La ecuación matemática será formulada por David Gregory (1659-1708), y publicada en *Philosophical Transactions of the Royal Society* (1697). Gregory afirma que la catenaria es la verdadera forma del arco, ya que si estos se sostienen, es porque se puede trazar una catenaria en su interior (6). James Stirling (1692-1770) en la *Lineae Tertii Ordinis Newtonianae* (1717), recogerá en el *Inventio Lineae celerrimi descensus in quacunqu hypothesi gravitatis*, la construcción de una catenaria mediante unas esferas colgantes (7). El método inspiró el análisis de Giovanni Poleni (1683-1761) en la *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano* (1748) (8).

Esta tipología de arcos y bóvedas catenarias fue introducida en España por los ingenieros militares en el primer tercio del siglo XVIII, y quisieron ser empleadas en la construcción de los almacenes de pólvora. El objeto de la investigación es analizar la aplicación de la mecánica científica de los ingenieros borbónicos, en especial las bóvedas de fábrica de los polvorines. Tiene como base el Catálogo Colectivo de las Colecciones de Mapas, Planos y Dibujos de los Archivos Estatales, y pertenecen, la gran mayoría, a la Colección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo General de Simancas (9). El estudio comprende 74 proyectos del intervalo (1715-1798). La metodología se realiza a través de un método comparado con las fuentes directas de las bibliotecas de los ingenieros, como la de la Academia de Matemáticas (10), Jorge Prosper Verboom (1665-1744) (11), Ricardo Clemente Aedo Espinosa (+1787), Ailmer Burgo (+1788), Pedro Martín Cermeño (1722-1790), Miguel de Roncali (+1794) (12).

2. LAS FUENTES DIRECTAS DE LOS INGENIEROS MILITARES DEL SIGLO XVIII

Felipe V nombrará a Jorge Prosper Verboom (1665-1744) Ingeniero General, y a Mateo Calabro director de la Academia de Matemáticas de Barcelona (1720-1738), cargo que desempeñara posteriormente Pedro de Lucuze y Ponce (1692-1779) entre (1738-1779)(13). Una de las funciones de la Academia era la formación de una Biblioteca.

Entre los textos a que tenían acceso los ingenieros destacan *L'architecture des voûtes* (1643) de François Derand (1588-1644) (14), en la Biblioteca de Verboom, y el *tratado de estereotomía* de Abraham Bosse (1604-1676) *La pratique du trait à preuve de M. des Argues Lyonnois pour la coupe des pierres en Architecture* (1643) (15) en la Academia de Barcelona. También el *Compendio Matemático* (1707-1715) de Fray Vicente Tomás Tosca (1651-1723), con el Tratado XVI

del Tomo V, dedicado a la arquitectura militar (1712), precedido por la de Arquitectura Civil y otro de Monte y Cantería, y en especial De la Montea y Cortes de Cantería (16).

El *Traité des Ponts* (1716) Hubert Gautier (1660-1737) (17), y la segunda edición *Augmenté d'une Dissertation sur les Culées, Piles, Voussoirs, et Poussées des Ponts* (1723), y la de 1728 con la *Dissertation sur l'Épaisseur des Culées des Ponts, sur la Largeur des Piles...* (1727) (18), incluyendo el dimensionado de los parámetros de los puentes de fábrica, basada en la de Philippe de La Hire (1640-1719). Aparecen *Les Oeuvres de Monsieur Maroitte* (1717), de Edme Mariotte (1620-1684), con el Tomo 2 del *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides, divisé en V parties* (19), publicado por De La Hire (1686).

Bernard Forest de Bélidor (1698-1761), con el *Nouveau cours de Mathématique* (1725) (20), *La science des ingénieurs* (1729) (21), y la *Architecture hydraulique* (1737) (22) y el segundo Tomo (1739) (23), es la principal referencia de los ingenieros españoles (24). En la *Application de la Mécanique à la construction des Magazins à poudre de le Nouveau cours* dedica una parte a la construcción de almacenes de pólvora, determinando el estribo de una bóveda de cañón y apuntada (Figura 1.1). En el inicio Libro II de *La science des ingénieurs*, determina las topologías de bóvedas; medio punto, apuntadas a tercio punta, las elípticas, las planas, y las de la cadena. En Cap. III. Prop 5, del libro II plantea la curvatura que conviene dar a una bóveda, para que todas sus partes estén en equilibrio, y cuyo resultado es la forma de catenaria. (Figura 1.2).

En este instante Pierre Couplet (+1743), en *De la poussée des voûtes* (1729), se refiere a la *chainette*, como la mejor de las formas para la construcción de bóvedas. Añade que, si se quisiera construir sobre una parte cualquiera de esta bóveda, habría que añadir a la parte correspondiente el peso proporcional con que se la debe cargar (25). También lo hace Amédée-François Frézier (1682-1773), quién publicará (1737-1739) los tres tomos de su estereotomía, incidiendo que la *Chainesse*, es una curva conveniente para el equilibrio de las dovelas, aunque no tiene una forma bella, puesto produce un quiebro en el estribo (26).

3. LOS ALMACENES DE PÓLVORA EN LOS TRATADOS DE ARQUITECTURA MILITAR

En la mayoría de los tratados de arquitectura militar de finales de siglo XVII y XVIII, hay una referencia específica a la construcción de los almacenes, construyéndolos a prueba de bomba aunque, en algún caso, los dispone en cuevas o bajo tierra (27).

La obra de Sébastien Le Prestre, Señor de Vauban (1633-1707), difundida bajo *Manière de fortifier selon la methode de Monsieur de Vauban*, fue editada por el abad Du Fay (1681). Se determina la morfología de los almacenes de pólvora con doble recinto, a la vez que dimensiona y describe la construcción de la cobertura (28). Se construye con bóveda de cinco a seis pies de toesa, a la que recubre para estar a prueba de bomba, con una capa de tierra de seis pies. En edición de 1693 se dibujará, con toda precisión, el doble recinto, con un cuerpo central del almacén, construido con bóveda de cañón, con paredes reforzadas mediante contrafuertes (29). (Figura 2.1).

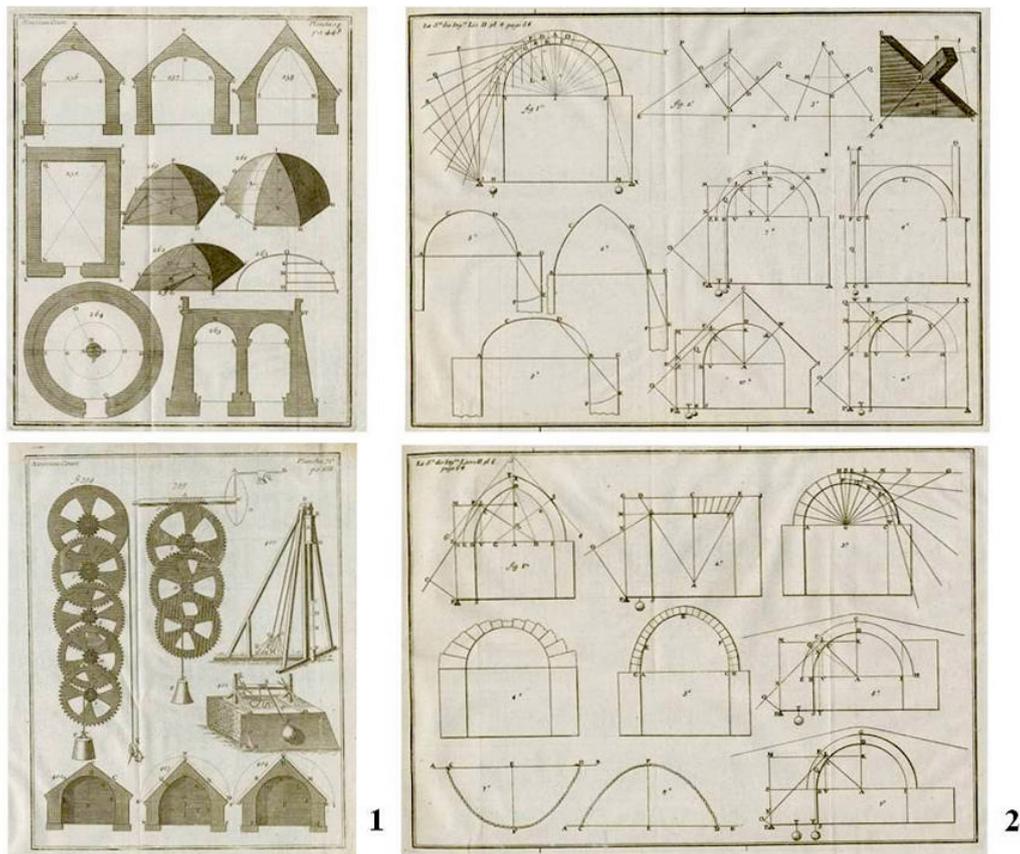


Figura 1. Bernard Forest de Bélidor. 1.1) Nouveau cours de Mathématique (1725).
 2.2) La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et architecture civile (1729)

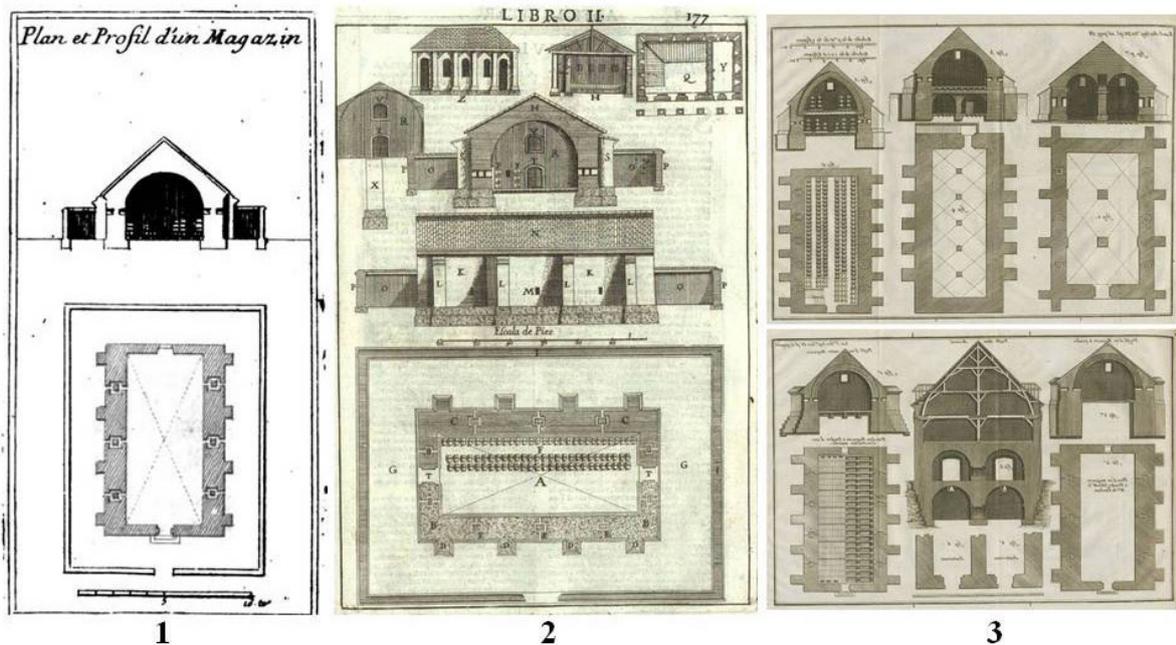


Figura 2 Tratados. 2.1) Maniere de fortifier selon la methode de Monsieur de Vauban (1693), Du Fay. 2.2) Escuela de Palas ó sea Curso Mathematico (1693), José Chafrión. 2.3). La science des ingénieurs (1729), Bernard Forest de Bélidor.

Entre los ingenieros españoles, Sebastián Fernández de Medrano (1646-1705), tratará el tema en *El Ingeniero Primera Parte, de la Moderna Arquitectura Militar* (1687). La cuestión del impacto balístico se resuelve mediante la construcción de una bóveda de fábrica con suficiente

grosor que ha de ser de cuatro pies, en métrica de vara española. Se completa esta primera rosca de la bóveda, mediante un elemento de amortiguación para el fuego enemigo, realizada con otras siete capas, unas de tierra, otras de madera y de estiércol, formando así, un grueso total de

once pies de canto (30). Debido a que en la campaña de Luxemburgo, no soportaron el fuego enemigo, rectificará el diseño en el *El Arquitecto Perfecto en el Arte Militar* (1700), aumentando el grosor total de la sección con doce o catorce pies (31).

En la *Escuela de Palas ò sea Curso Mathematico* (1693), atribuida a José Chafrión (1653-1698), aparece la estructura morfológica de un almacén, en el *Libro de Arte Militar*, Tratado XI (32), similar a la de Vauban (Figura 2.1). Resuelve, a manera de recetario, las dimensiones de los principales elementos constructivos a partir del ancho del almacén. Dispone de un ancho de bóveda de seis pies de vara, al igual que la pared de cerramiento, y que había de estar sostenida sobre una cimentación de ocho pies.

Belidor dedica todo el Capítulo nº 9 del Libro IV de *La science des ingénieurs* (1729), a la construcción de polvorines. Las bóvedas tienen cuatro capas de ladrillo, con tres pies de toesa, hasta formar después un total de ocho pies (Figura 2.3). La obra es traducida por John Müller (1699-1784), *A treatise containing the elementary part of fortification, regular and irregular. For the use of the Royal academy of artillery at Woolwich* (1755), donde tratará los *Of Powder-Magazines* (33). A su vez traducida para el uso de la Escuela de Matemáticas, por Miguel Sánchez Taramas (1769), como *Tratado de fortificación, ó Arte de construir los edificios militares, y civiles* (34) (Figura 3.1). Reflexiona John Müller que, las bóvedas de cañón soportan mejor los impactos de las bombas, que las de forma gótica. Especifica que las bóvedas han de ser de mampostería o de ladrillo, dispuesto en tres rosas, y con un espesor de tres pies, con un total de nueve, siguiendo la tradición de Vauban. En la construcción de bóvedas, los

cimbrados han de quedar en la obra al menos seis meses. Guillaume Le Blond (1704-1781), publica los *Éléments de fortification* (1739), aludiendo a la construcción de almacenes de pólvora, en *Tracer de rempart et le parapet* (35), según el modelo Vauban.

Pedro Lucuze (1692-1779) define en el Capítulo XIX, «Edificios principales», del libro los *Principios de fortificación* (1772), cuyo uso para la Academia, que los polvorines han de tener; «firmeza, comodidad y simetría». Los clasifica con un doble tipo estructural, uno como modelo sencillo y otro a prueba de bomba. El tipo más resistente está construido o con bóveda de piedra o ladrillo de grosor suficiente, o mediante un sistema de amortiguación formado por un entramado de madera recubierta con tierra. En el apartado dedicado a los «Repuestos» dice que un polvorín, que ha de ser a prueba de bomba, se realiza trazando un tipo de almacén con doble recinto (36) (Figura 3).

4. LAS MORFOLOGÍAS DE PROYECTOS DE ALMACENES DE PÓLVORA (1715-1798)

Los almacenes de pólvora son uno de los elementos más sensibles de la arquitectura defensiva, por la necesaria resistencia de los elementos constructivos. La mayoría de los proyectos se construyen a prueba de bomba, realizándose mediante el blindaje del cuerpo superior del polvorín. Se generan dos tipologías constructivas, los sistemas abovedados, y otras con estructuras de madera protegidas con elementos de resorte. Morfológicamente, los almacenes de pólvora se pueden clasificar en función de los sucesivos recintos de protección de la pólvora. Se pueden catalogar los 74 proyectos analizados, en función de los parapetos de protección vertical del recinto del almacén.

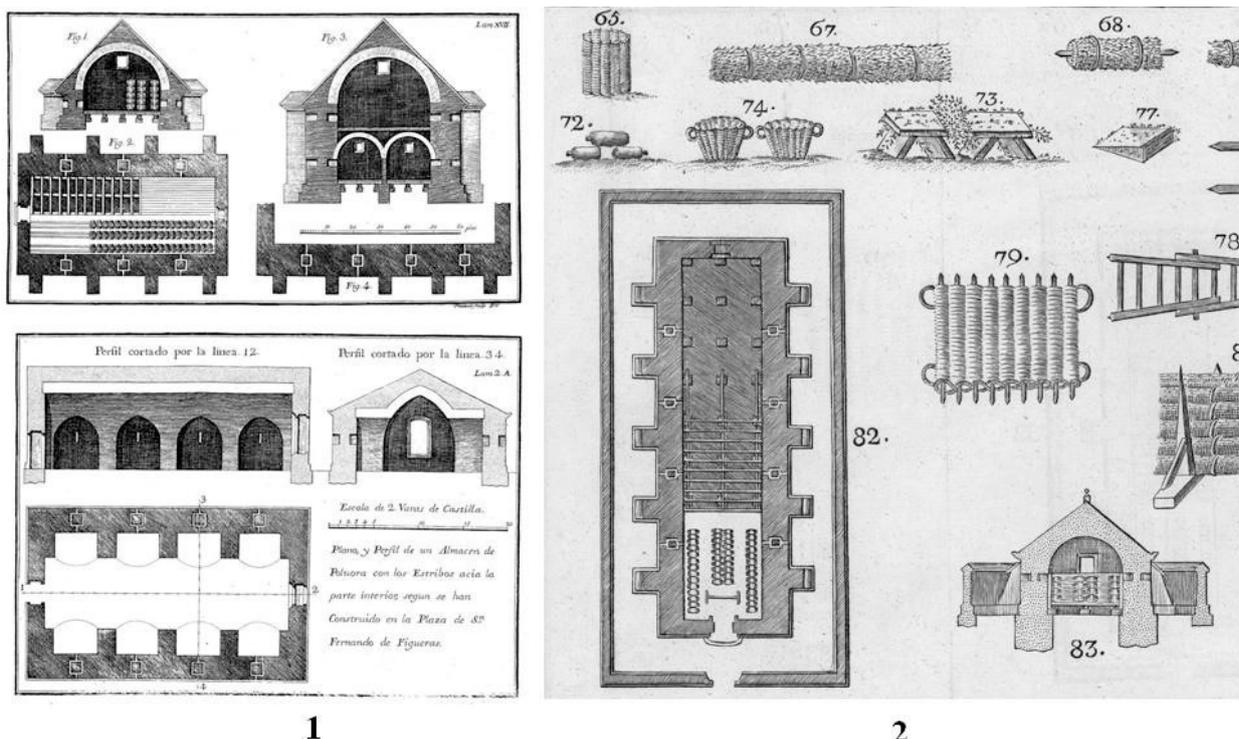


Figura 3. 3.1) *Tratado de fortificación, ó Arte de construir los edificios militares, y civiles* (1769), John Müller.
3.2) *Principios de fortificación* (1772), Pedro de Lucuze.

Unos disponen de un solo cuerpo constructivo, con la pared exterior expuesta directamente al fuego enemigo. Es el caso de los almacenes de pólvora de Zaragoza (1729) [MPD, 39, 041], (Figura 4.1), Cádiz (1749) [MPD, 56, 029], San Sebastián (1738) [MPD, 27, 092] o Peñíscola (1739) [MPD, 18, 262]. Tipológicamente están contruidos mediante estructuras abovedadas. Representan un 22,97 % de los polvorines analizados¹.

Otros, con dos perímetros para la protección del depósito de pólvora, como en Cardona (1718) [MPD, 19, 028], (Figura 4.2), San Sebastián (1722) [MPD, 28, 034], Ceuta (1724) [MPD, 39, 083], Málaga (1724) [MPD, 59, 046] o Gerona (1738) [MPD, 01, 018]. Están contruidos con bóvedas de cañón, representan el 62,16 % de los proyectos.

Otros, con tres perímetros de protección, formando así un doble recinto de protección del cuerpo central del almacén, como en Tortosa (1721) [MPD, 64, 019], Málaga (1721) [MPD, 59, 044], (Figura 4.3), Barcelona (17269 [MPD, 10, 060], Cádiz (1728) [MPD, 08, 236], Zaragoza (1729) [MPD, 28, 010]. Están contruidos con paredes de carga con estructura de madera, representan el 14,86 % de los almacenes.

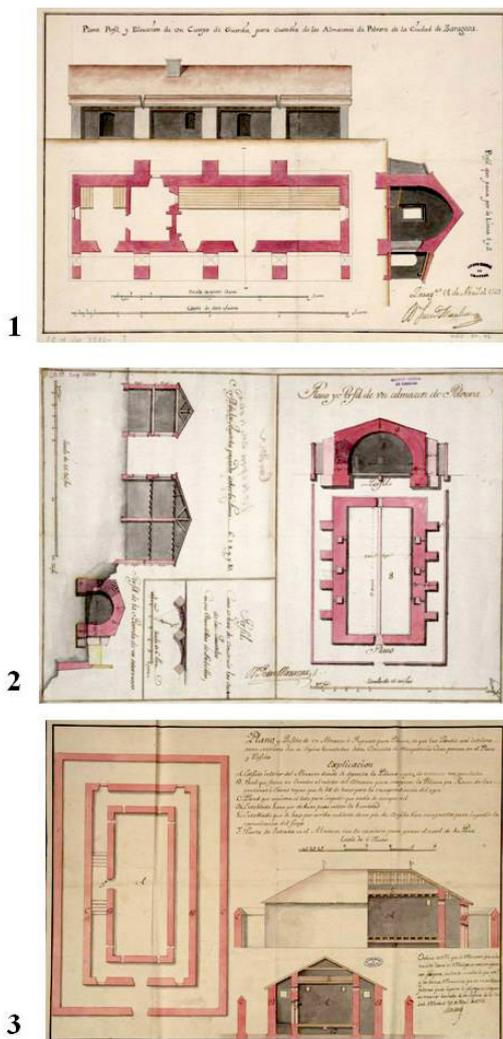


Figura 4. Almacenes de pólvora. 4.1) Zaragoza (1729) [MPD, 39, 041], 4.2) Cardona (1718) [MPD, 19, 028], 4.3) Málaga (1721) [MPD, 59, 044].

5. TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE LOS PROYECTOS DE POLVORINES (1715-1798)

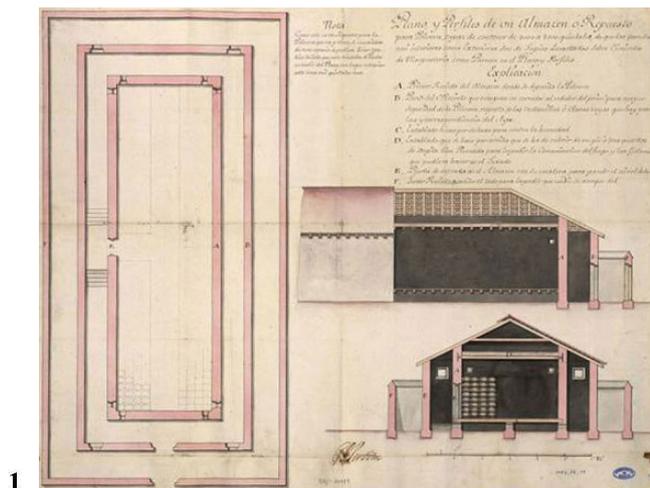
En cuanto a las tipologías constructivas se determinan dos grandes tipologías: aquella en el que impacto es absorbida con estructura de fábrica, con el 52,70 % de los proyectos y otra, soportada por una estructura de vigas de madera, con el 47,30 % de los polvorines. En algunos casos la colisión de los proyectiles se reduce mediante un relleno de tierra o estiércol situados bajo la cubierta de teja.

La tipología de paredes de carga, paralelas a la directriz principal de la nave, con entramado de vigas de madera, lo constituyen el 18,92 % de los proyectos. Varían en función de la luz, las que tienen hasta unas tres toesas, se construyen con un solo vano, como los de Tortosa (1721) [MPD, 64, 019] (Figura 5.1), Málaga (1721) [MPD, 59, 044], Barcelona (1726) [MPD, 10, 060], Cádiz (1728) [MPD, 08, 236] o Zaragoza (1729) [MPD, 28, 010]. Los almacenes que tienen una luz mayor, disponen de dos vanos estructurales; entre estos últimos se diferencian, los muros de carga central, como Cádiz (1728) [MPD, 08, 237], Cartagena (1745) [MPD, 18, 258], o Alicante (1750) [MPD, 65, 088] y [MPD, 65, 092]. Existen otros donde este paño central se realiza mediante pilares: Hondarribia (1733) [MPD, 65, 044], Cartagena (1745) [MPD, 18, 257] y Tortosa (1798), o los que se realizan mediante arcos de fábrica, como los polvorines de Ceuta (1735) [MPD, 07, 179] o Lleida (1739) [MPD, 07, 001].

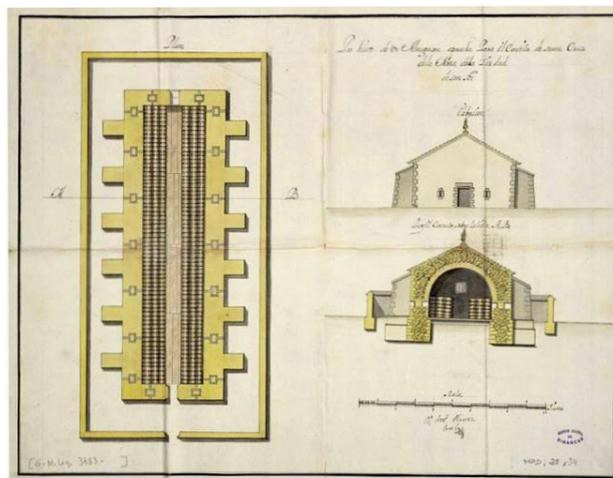
Otra tipología son los arcos de diafragma, con arcos paralelos entre sí, apoyándose el entramado de las vigas de madera con la misma dirección que la directriz principal de la nave; lo constituyen el 6,73 % de los polvorines. Los tratados de arquitectura militar imponen que las paredes exteriores de los polvorines se refuercen mediante unos contrafuertes, por ello se utiliza el estribo del arco de diafragma. Las estructuras así generadas pueden disponer de una sola nave: Benimamet (1751) [MPD, 06, 169], Valencia (1756) [MPD, 07, 028], con estribado hacia el exterior y A Coruña (1774) [MPD, 28, 027], que lo hace hacia el espacio interior, como en el tratado de Müller (1769). Los almacenes de mayor dimensión, están proyectados con dos naves paralelas entre sí, como el de Barcelona (1761) [MPD, 20, 031].

Otra tipología son las realizadas con pares de armadura, a modo de cerchas de madera, con cubiertas a dos aguas; lo forman el 21,62 % de los proyectos. Cerchas de madera con armadura de par hilera, Cádiz (1718) [MPD, 64, 020] y Gerona (1755) [MPD, 10, 073]; otras de armadura de par y nudillo, como Barcelona (1731) [MPD, 18, 100] y [MPD, 18, 101]. Mayoritariamente se realizan con la tipología de cercha de cuchillo español caso de Zaragoza (1729) [MPD, 28, 009], Zamora (1734) [MPD, 65, 042], El Ferrol (1772) [MPD, 04, 089] o Cartagena (1795) [MPD, 46, 051] y [MPD, 46, 052]. En otras ocasiones son cuchillos españoles con variaciones en los tirantes inclinados, como Pamplona (1723) [MPD, 64, 023] y El Ferrol (1738) [MPD, 47, 094]. Cuchillos de tijera, como los proyectos de Monzón (1740) [MPD, 54, 049], Palma (1748) [MPD, 65, 047] y Valencia (1754) [MPD, 06, 170]. Otros casos singulares son el almacén de Barcelona (1796) [MPD, 46, 035], de cercha de cuchillo atirantada con dos pares horizontales, o la estructura de Málaga (1721) [MPD, 64, 022], con armadura de mansarda (Figura 5.2).

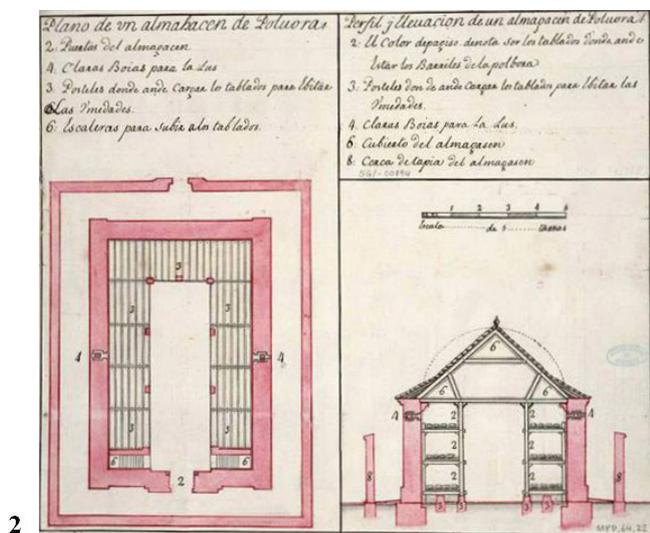
¹ MPD: Mapas, Planos y Dibujos del Archivo General de Simancas.



1

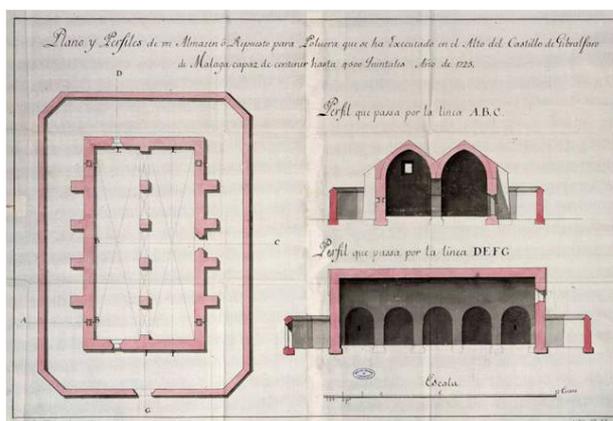


1



2

Figura 5. Almacenes de pólvora. 5.1) Tortosa (1721) [MPD, 64, 019], 5.2) Málaga (1721) [MPD, 64, 022].



2

Figura 6. Almacenes de pólvora. 6.1) San Sebastián (1722) [MPD, 28, 034]. 6.2) Castillo Gibralfaro, Málaga (1724) [MPD, 59, 047].

La bóveda de cañón con obra de fábrica es la más utilizada para la construcción a prueba de bomba; son el 36,49 % de los proyectos analizados. Estos polvorines son consecuencia directa de los tratados de arquitectura militar, por ello obvian indicar el material con que está construida la bóveda. Este es el caso de los de Ceuta (1724) [MPD, 39, 083], Longone en Italia (1725) [MPD, 12, 222], A Coruña (1738) [MPD, 17, 058], San Sebastián (1738) [MPD, 27, 092], Peñíscola (1739) [MPD, 18, 262] y [MPD, 18, 263], Játiva (1748) [MPD, 54, 012], Palma (1748) [MPD, 65, 048], San Sebastián (1750) [MPD, 27, 093], Vivero (1778) [MPD, 19, 241] y Santa Cruz de Tenerife (1792) [MPD, 05, 033]. Otros proyectos indican específicamente el material utilizado para la construcción, con la utilización de sillería: Barcelona (1715) [MPD, 18, 097] o Denia (1748) [MPD, 65, 085]; o la variante que utiliza arco de sillería, con vigas de madera, como de Santa Cruz de Tenerife (1758) [MPD, 18, 050], y utilizada por Fernández de Medrano. En otros mampostería ordinaria, con un recubrimiento posterior cal y canto, como en San Sebastián (1722) [MPD, 28, 034], (Figura 6.1).

Entre las que utilizan el ladrillo cerámico se distinguen: la de una capa o rosca, como Zamora (1738) [MPD, 13, 113], y Ciudad Rodrigo (1739) [MPD, 12, 154]; otras con una pri-

mera capa cerámica en la parte inferior, complementada mediante de cal y canto, caso Cardona (1718) [MPD, 18, 028]; otras bóvedas se proyectan con doble rosca, y rematadas con relleno de mampostería como Pamplona (1718), [MPD, 31, 032], [MPD, 31, 033], [MPD, 31, 034], [MPD, 31, 035], [MPD, 31, 036]; y otras hasta una triple hoja cerámica, como en Longone en Italia (1728) [MPD, 12, 221] y, hasta cuatro rosca como en Badajoz (1749) [MPD, 65, 045].

Las bóvedas apuntadas se utilizan mayoritariamente en las morfologías de los proyectos de almacenes de recinto único, representan un 9,46 % de los proyectos. Es el caso de los polvorines de Zaragoza (1729) [MPD, 39, 041] y San Fernando de Cádiz (1749) [MPD, 56, 029]. Otros con doble recinto como Gerona (1738) [MPD, 01, 018] y San Sebastián (1749) [MPD, 27, 094]. Los proyectos de almacenes de pólvora del Castillo Gibralfaro en Málaga (1724) [MPD, 59, 046] y [MPD, 59, 047], (Figura 6.2), y Ceuta (1737) [MPD, 07, 180], disponen de dos naves paralelas, separadas por pilares centrales de planta cuadrada, que soportan arcos de medio punto.

En otros proyectos se ha observado la utilización de la bóveda tabicada, representan el 2,70 % del total. Es el caso de las bóvedas de pleno punto de Cartagena (1743) [MPD, 18, 256], o la rebajada de Málaga (1748) [MPD, 57, 052].

6. LA CURVE OF EQUILIBRIUM EN LOS INGENIEROS MILITARES ESPAÑOLES

En la construcción de polvorines existen precedentes de la utilización de bóvedas de generatrices que no son arcos de circunferencia. En el caso de la bóveda elíptica existente en Pamplona, construida por Hércules Torelli (1694) y reformada por Francisco Larrando de Mauleon (1644-1736) (37). El edificio construido por Torelli fue duramente criticado, puesto que el polvorín tenía una rasante que sobresalía de la defensa de la plaza. Las bóvedas elípticas fueron introducidas en la tratadística por el Ambroise Bachot (d.1587) en *Le Timon du Capitaine* (1587) (38). El ingeniero Francisco Larrando, profesor de la Escuela de Matemáticas de Barcelona y Zaragoza y autor del *Estoque de la Guerra y Arte Militar*, publicado también en Barcelona (1699) (39), modifica la estructura, sometiéndola a prueba de bomba (1718) [MPD, 31, 031] (40). Por ello fue sustituida la bóveda elíptica por otra de cañón pero más reforzada y rebajada en altura, para ser menos visible y vulnerable por la artillería enemiga.

El proyecto para la rectificación de la bóveda elíptica es sumamente interesante, puesto que explica, mediante un proceso gráfico, el refuerzo del almacén antiguo. Los tratados de arquitectura militar determinan varios tipos bóvedas; la plana, las cañón, las apuntadas, elípticas o las derivadas del óvalos y las de la cadena. Hay que destacar que en el proyecto [MPD, 31, 031] se dibuja la antigua bóveda elíptica que se había de desmontar, ejemplificando así uno de los escasos casos que no están construidos con generatrices derivadas del arco de circunferencia. En el caso de la bóveda elíptica se puede aproximar mediante la construcción de Tosca (1707), que determina por primera vez, la construcción geométrica de óvalos, fijándolos mediante las medidas de sus dos ejes principales (41).

Tampoco tiene una generatriz de arco de circunferencia la bóveda del proyecto del Almacén con bóveda sencilla de Miguel Marín, realizado para la plaza de Tortosa (1733) [MPD, 13, 035] (Figura 7.1). El estudio geométrico revela que la bóveda tiene una luz de 21 pies de toesa, con una flecha de 12 pies y su espesor incluido relleno de cubierta es de un pie. El grueso del muro en la imposta tiene 3,5 pies y los contrafuertes, lo tienen de 7 pies. Se observa que si se disponía una cadena que pasara por las impostas y la clave de la bóveda, se podría trazar un elemento geométrico, en forma de catenaria, con la misma luz y la flecha de la bóveda, y muy similar a la dibujada en el proyecto.

Con similares características de trazado que el depósito de Tortosa son los proyectos de almacenes de pólvora para la montaña de Montjuic de Barcelona (1731) [MPD, 07, 057] (Figura 7.2), cuyo trazado se atribuye también a Miguel Marín (42) (43), y almacén de Juan de la Feriére y Valentín en A Coruña (1736) [MPD, 17, 057], (Figura 7.3).

Si sometemos las trazas de los tres proyectos, debidamente escalados, y colocamos una cadena invertida, que pase por las impostas del arco y su flecha, se observa que la cadena, aunque muy similar, no es exactamente coincidente con el perfil de la bóveda. Presenta así pequeñas desviaciones en los puntos más cercanos a la imposta, por tanto la delineación del proyecto no se engendra con la figura catenaria (Figura 8).

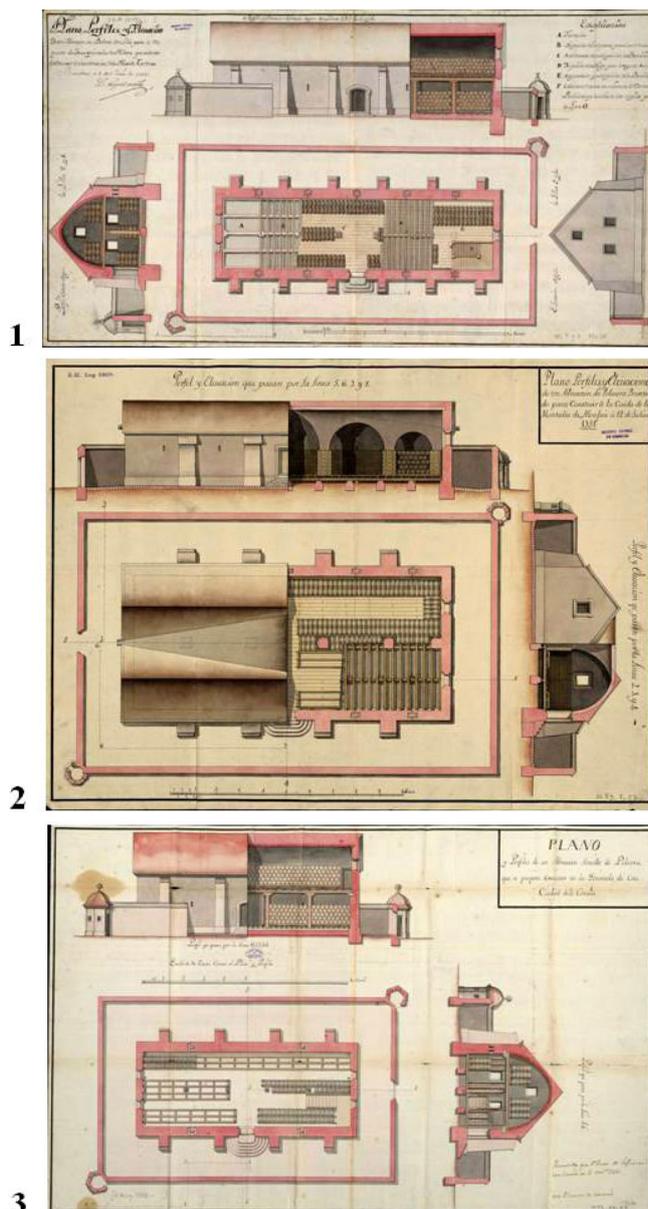


Figura 7. Bóveda catenaria de almacén de pólvora.
7.1) Miguel Marín, Tortosa (1733), [MPD, 13, 035].
7.2) Miguel Marín Barcelona (1731) [MPD, 07, 057].
7.3) J. Feriére y Valentín. A Coruña (1736) [MPD, 17, 057].

La comprobación más exhaustiva sobre las tres trazas anteriores analizadas mediante procesos CAD, y observando las improntas de la puntas de compás sobre el papel, se determina que las figuras geométricas dibujadas no son, ni arcos de medio punto, ni curvas trazadas con arcos a tercia, ni elipses, ni óvalos tangentes a la imposta de la bóveda curva.

Del análisis del dibujo original de la sección de almacén, se comprueba la incisión de tres puntas de compás. Una está situada sobre el eje de simetría vertical de la figura, y las otras dos situadas sobre el eje perpendicular, por debajo de la imposta de la bóveda. Por tanto la traza de la curva está realizada mediante óvalos que no son tangentes a la imposta del arco.

Esta precisión se debe a que la delineación de la catenaria no se puede trazar mediante los tradicionales instrumentos de dibujo, regla y compás. Para la realización del proyecto de los almace-

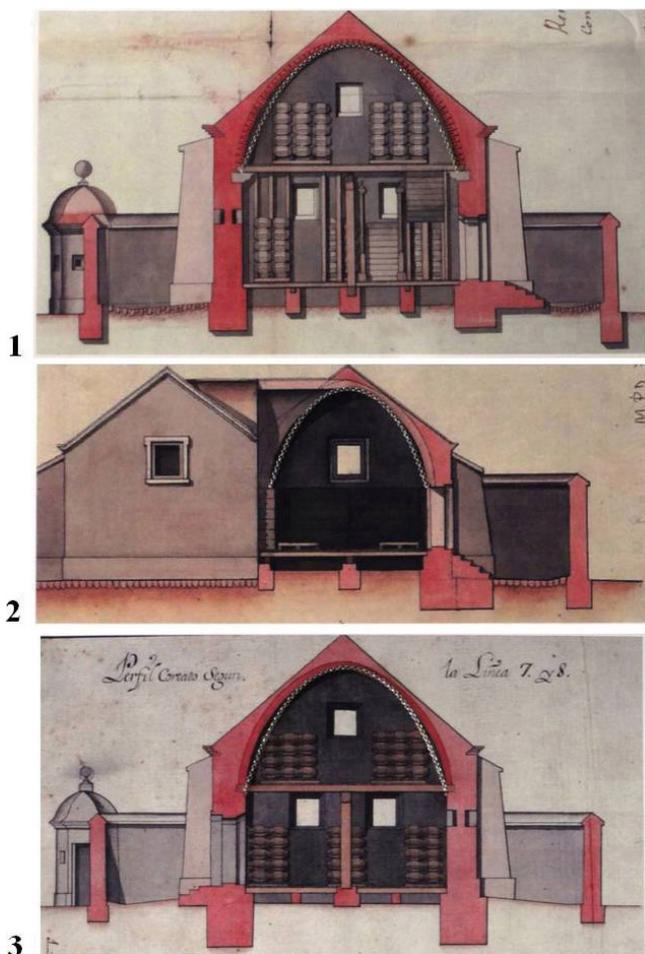


Figura 8. Aproximación a las bóvedas catenarias. 1) Tortosa, 2) Barcelona, 3) A Coruña.

nes, tanto Miguel Marín, como de Juan de la Ferrière, utilizaran un método de aproximación a la curva mediante la construcción de un óvalo. Todo ello no hace más que demostrar la intención de trazar una bóveda curva, mediante la aproximación de la utilización del arco *apaynelado*, ò *carpanel* de Tosca (1707) y (1712), o de *anse de panier* en Belidor (1729) (Figura 9).

La traza geométrica de arcos y bóvedas de sección no circular, como la elipse, se puede trazar mediante la aproximación de óvalos, cuestión bien conocida por los ingenieros militares del siglo XVIII. La bóveda elíptica se puede aproximar mediante óvalos, que son tangentes en la imposta de estos elementos constructivos (Figura 10.2). Utilizan así similar metodología para la traza de la catenaria, mediante óvalos. Al trasladar los óvalos por una sección paralela a sus ejes principales se consigue que la curva no sea tangente a la imposta (Figura 10.1).

Esta determinación está en la línea de las definiciones que posteriormente dará Frézier (1738) sobre la forma de catenaria. A su vez, Belidor (1729), precisa la manera de trazar la verdadera forma de la bóveda catenaria. Así, conociendo la luz y la flecha de la bóveda, se determina la forma arquitectónica, mediante una cadena colgante. Con ello se construye un modelo a escala, que luego puede ser fácilmente transportable a la obra. Por el contrario la delineación de la catenaria en los proyectos de los ingenieros militares tiene una mayor complejidad de trazado, lo que obliga a que se utilice una aproximación de la catenaria, mediante la forma de un óvalo rebajado.

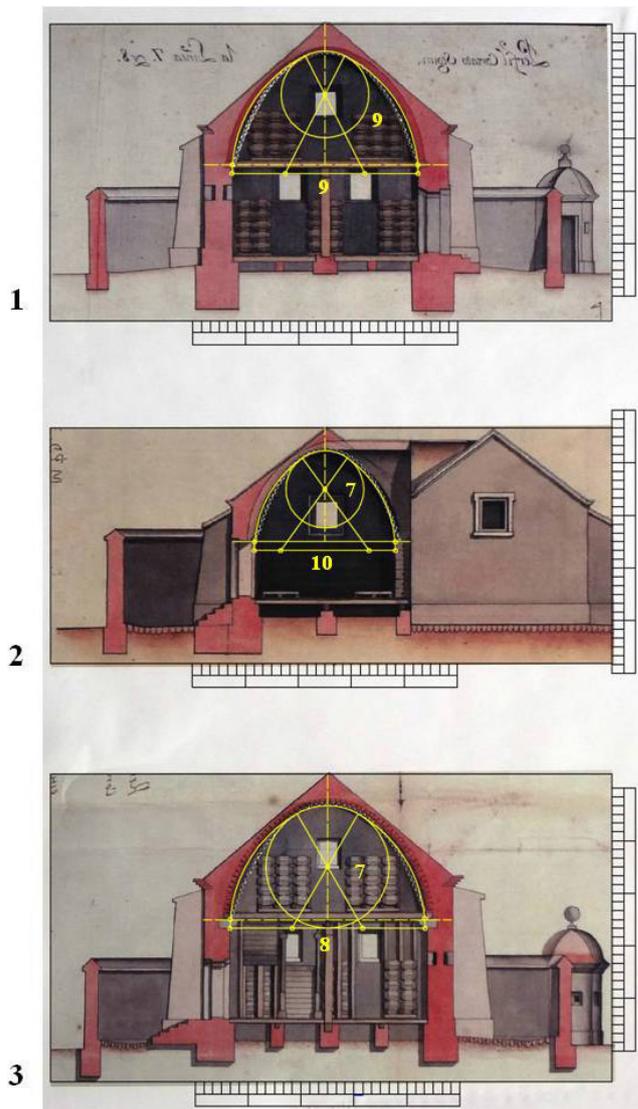


Figura 9. Aproximación bóvedas catenarias mediante óvalos. 1) Tortosa, 2) Barcelona, 3) A Coruña.

7. CONCLUSIÓN

Los ingenieros españoles aproximaron la delineación de bóvedas elípticas mediante los óvalos de Tosca tangentes a la imposta, y las catenarias mediante óvalos con eje desplazado bajo las impostas. Tras los proyectos de los almacenes de pólvora de Miguel Marín para Barcelona (1731) y Tortosa (1733), y de Juan de la Ferrière y Valentín en A Coruña (1736), que representan un 4,05 % de los proyectos analizados, se esconde la intención del trazado de una bóveda con forma catenaria. Estos ingenieros tienen así pleno conocimiento de los principios mecánicos de la moderna teoría de las fábricas. Desde el punto de vista científico, las bóvedas catenarias son las que presentan mayor interés, puesto que introducen los principios iniciados por Hooke (1676) y transmitidos a través de texto de *La science des ingénieurs* (1729) de Belidor en España. De esta manera, en una cadena, cualquier fuerza que tira hacia adentro y empuja lo mismo hacia fuera. La teoría fue llamada como *curve of equilibrium* y seguida por la mayoría de los ingenieros ingleses. Así la forma catenaria que es la deformada de un cable sometido a su propio peso, fue utilizada en España un siglo y medio antes que la arquitectura modernista.

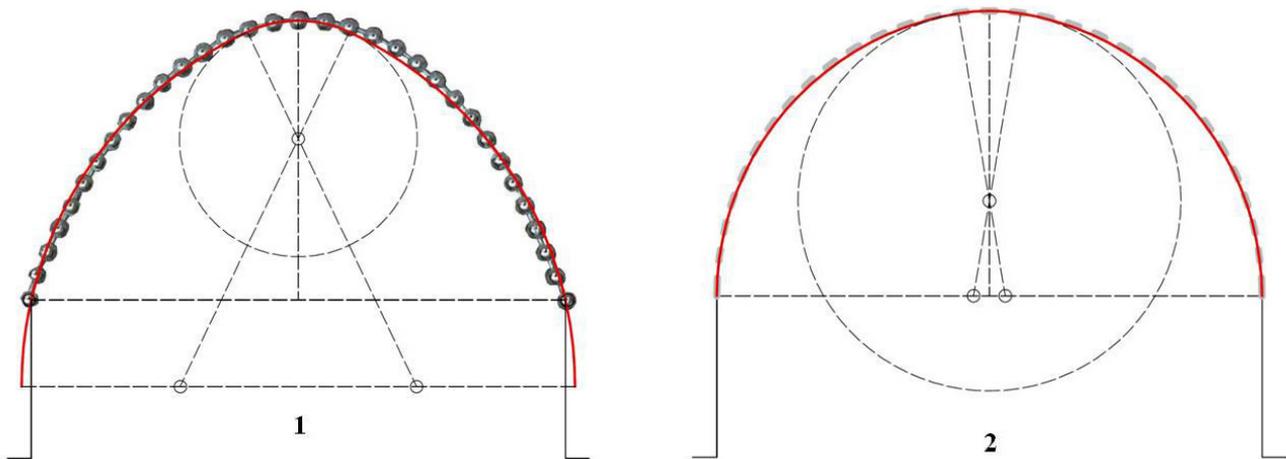


Figura 10. Aproximación bóvedas catenarias (10.1) y elípticas (10.2) mediante óvalos.

REFERENCIAS

- (1) Huerta, S. (2003). El cálculo de estructuras en la obra de Gaudi. *Ingeniería Civil*, (129): 121-133.
- (2) Huerta, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. *Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica* (pp. 523-532). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (3) Hooke, R. (1676). *A description of helioscopes, and some other instruments* (p.31). London.
- (4) Heyman, J. (1999). *The Science of Structural Engineering* (pp. 3-9). London: Imperial College Press. Traducción de la edición Inglesa. *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera (2001). Doi: <http://dx.doi.org/10.1142/9781860947544>.
- (5) Addis, B. (2013, 9-12 de octubre). Las contribuciones de Christopher Wren y Robert Hooke al nacimiento de ingeniería de la construcción moderna. En Huerta, S., López, F. (eds.) *Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 1-11). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (6) Gregory, D. (1697). Catenaria. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, (19): 637-652.
- (7) Stirling, J. (1717). *Lineae Tertii Ordinis Neutoniana* (pp. 11-14). Oxford: E. Whistler.
- (8) Poleni, G. (1748). *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano* (pp. 30-50). Padova: Nella Stamperia del Seminario.
- (9) Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2014). Catálogo Colectivo de las Colecciones de Mapas, Planos y Dibujos de los Archivos Estatales. <http://www.mcu.es/ccbae/es/mapas/principal.cmd>.
- (10) Segovia, F. (2004). Els fons bibliogràfics de l'Acadèmia de Matemàtiques. En Muñoz, J. M. (coord.) *L'Acadèmia de Matemàtiques de Barcelona. El llegat dels enginyers militars* (pp.77-92). Madrid: Ministerio de Defensa.
- (11) Muñoz, J. M. (1995). La biblioteca del ingeniero general Jorge Próspero Verboom. *Academia* (80): 343-362.
- (12) Galland-Seguella, M. (2004). Las condiciones materiales de la vida privada de los ingenieros militares en España durante el siglo XVIII. *Geo Crítica/Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 8(179).
- (13) Carrillo de Albornoz, J. (2004). Els Directors de la Reial i Militar Acadèmia de Matemàtiques de Barcelona. En Muñoz, J. M. (coord.) *L'Acadèmia de Matemàtiques de Barcelona. El llegat dels enginyers militars* (pp. 129-138). Madrid: Ministerio de Defensa.
- (14) Derand, F. (1643). *L'architecture des voûtes ou l'art des traits et coupe des voûtes*. Paris: Sebastian Cramoisy.
- (15) Bosse, A. (1643). *La pratique du trait à preuve de M. des Argues Lyonnois pour la coupe des pierres en Architecture*. Paris: Imprimerie de Pierre des-Hayes.
- (16) Tosca, V. (1712). *Compendio mathematico. Tomo V, Que comprehende Architectura civil, montea, y canteria, arquitectura militar, pirotechnia, y artilleria* (pp. 81-252). Valencia: Antonio Bordazar (Ed.). En la Biblioteca de la Academia, Verboom, Cermeño y Hermosilla.
- (17) Gautier, H. (1716). *Traité des ponts, ou il est parlé de ceux des romains & ceux des moderns*. Paris: Chez André Cailleau. En las bibliotecas de Ailmer, Espinosa, Roncali, Cermeño.
- (18) Gautier, H. (1723). *Traité des ponts, ou il est parlé de ceux des romains & ceux des moderns. Augmenté d'une Dissertation sur les Culées, Piles, Voussoirs, et Poussées des Ponts* (pp. 335-412). Paris: Chez André Cailleau.
- (19) Mariotte, E. (1686). *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides, divisé en V parties, par feu M. Mariotte, mis en lumière par les soins de M. de La Hire* (pp. 326-476). Paris: Chez Estienne Michallet. En las bibliotecas de Verboom y Cermeño.
- (20) Forest de Belidor, B. (1725). *Nouveau cours de Mathématique à l'usage de l'Artillerie et du Génie, où l'on applique les parties les plus utiles de cette science à la théorie et à la pratique de différents sujets qui peuvent avoir rapport à la guerre*. Paris: Chez Charles-Antoine Jombert.
- (21) Forest de Belidor, B. (1729). *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et architecture civile*. Paris: Chez Claude Jombert.
- (22) Forest de Belidor, B. (1737). *Architecture hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever, et de menager les eaux pour les différents besoins de la vie. Première Partie, Tome Premier. Par M. Belidor*. Paris: Chez Charles-Antoine Jombert.

- (23) Forest de Belidor, B. (1739). *Architecture hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever, et de menager les eaux pour les différens besoins de la vie. Tome Second. Par M. Belidor.* Paris: Chez Charles-Antoine Jombert.
- (24) Galindo, J. (2000). "La Ciencia de los Ingenieros..." en la primera mitad del siglo XVIII. *Informes de la Construcción*, 52(467): 47-54, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.2000.v52.i467.707>.
- (25) Couplet, P. (1729). *De la poussée des voûtes. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris* (pp. 79-117, láms. 4-7). Paris: De l'Imprimerie Royale.
- (26) Frézier, A. F. (1738). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils et militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture. Tomo II* (pp. 97-98, Plancha 33, fig. 50). Strasbourg/Paris: Jean Daniel Doulsseker/Charles-Antoine Jombert.
- (27) Cassani, J. (1705). *Escuela Militar de Fortificación ofensiva y defensiva. Arte de fuegos y de esquadronar* (p. 86). Madrid: Antonio Gonçalvo de Reyes.
- (28) Du Fay. (1681). *Maniere de fortifier selon la methode de Monsieur de Vauban... Par monsieur l'abbé Du Fay* (pp. 171-172). Paris: Veuve Jean-Baptiste I Coignard & Jean-Baptiste II Coignard.
- (29) Du Fay. (1693). *Maniere de fortifier selon la méthode de Monsieur de Vauban... Par monsieur l'abbé Du Fay... Seconde édition augmentée* (pp. 191-193). Paris: Veuve Jean-Baptiste Coignard & Jean-Baptiste II Coignard.
- (30) Fernández, S. (1687). *El Ingeniero Primera Parte, de la Moderna Architectura Militar. Dividido en dos Tomos... Por el Capitan Don Sebastian Fernnandez de Medrano, Maestro de Mathematicas de la Academia Militar de los Estados de Flandes* (pp. 238-240). Brusselas: Casa de Lamberto Marchant.
- (31) Fernández, S. (1700). *El Architecto Perfecto en el Arte Militar dividido en cinco Libros... El General de Batalla Don Sebastian Fernnandez de Medrano, Director de la Academia Real y Militar del Exercito de los Payses Baxos* (pp. 233-234). Brusselas: Casa de Lamberto Marchant.
- (32) Chafrión, J. (1693). *Escuela de Palas ò sea Curso Mathematico. Tomo I* (pp. 175-177). Milan: Emprete Real, por Marcos Antonio Pandulpho Malatesta.
- (33) Muller, J. (1755). *A treatise containing the elementary part of fortification, regular and irregular ... For the use of the Royal academy of artillery at Woolwich. Illustrated with thirty-four copper plates* (pp. 215-222, Part. 3, Secc. 19, Placa 27). London: Printed for A. Millar.
- (34) Muller, J. (1769). *Tratado de fortificación, ó Arte de construir los edificios militares, y civiles escrito en ingles por Juan Muller; traducido en castellano, dividido en dos tomos, y aumentado con notas, adiciones y 22 láminas finas sobre 26, que ilustran al original, por ... Miguel Sanchez Taramas...; tomo primero.* Barcelona: Por Thomas Piferrer.
- (35) Le Blond, G. (1739). *Elemens de fortification dedie `s a son altesse Monseigneur le Prince Charles de Lorraine* (p. 46). Paris: Chez Charles-Antoine Jombert.
- (36) De Lucuze, P. (1772). *Principios de fortificación, que contienen las definiciones de los terminos principales de las obras de Plaza y de Campaña... dispuestos para la instrucción de la juventud militar* (pp. 85-90. Figuras 82 y 83). Barcelona: Thomas Piferrer.
- (37) Laorden, C. (2005, diciembre). Los ingenieros españoles en la creación del arma. *Memorial del arma de Ingenieros*, año CLVIII(75): 63-103.
- (38) Bachot, A. (1587). *Le Timon du Capitaine Ab. Bachot, Lequel conduira le lecteur Parmi les guerrières...* (fig. 20-21) Paris: Au faubourg Saint-Germain-des-Prés.
- (39) Larrando de Mauleon, F. (1699). *Estoque de la Guerra y Arte Militar. Primera y segunda parte, que cada una contiene quatro Tratados.* Barcelona: Casa Cormellas, por Thomas Lorient Impressor,
- (40) Francisco, M. (1717-1718). *Plano de el Almacen de Polvora de la Ciudadela de Pamplona en que se manifiesta sus defectos... y el modo de quitarles y dexar dho Almazen cubierto de la Campaña y con su Boveda aprueva de Bomva...* (Signatura MPD, 31, 031). Archivo General de Simancas.
- (41) Tosca, V. (1707). *Compendio mathematico. Tomo I: Que comprehende Geometria elementar, arithmetica inferior, geometria practica...* (pp. 292-295). Valencia: Por Antonio Bordazar.
- (42) De Lizaur, A. (2010). Anexo V-1. Catálogo de las obras más importantes realizadas en Cataluña por los Ingenieros Militares en el siglo XVIII. En *La Ilustración en Cataluña: La obra de los Ingenieros Militares* (pp. 441-467). Madrid: Ministerio de Defensa.
- (43) Mora, J. (2013). Listado cronológico de las obras de Ingenieros en Cataluña s. XVIII. En Segovia, F., Nóvoa, M. (Coords.). *El Arte Abaluartado en Cataluña. Estrategia de defensa en el siglo XVIII* (pp. 593-598). Madrid: Ministerio de Defensa.

* * *