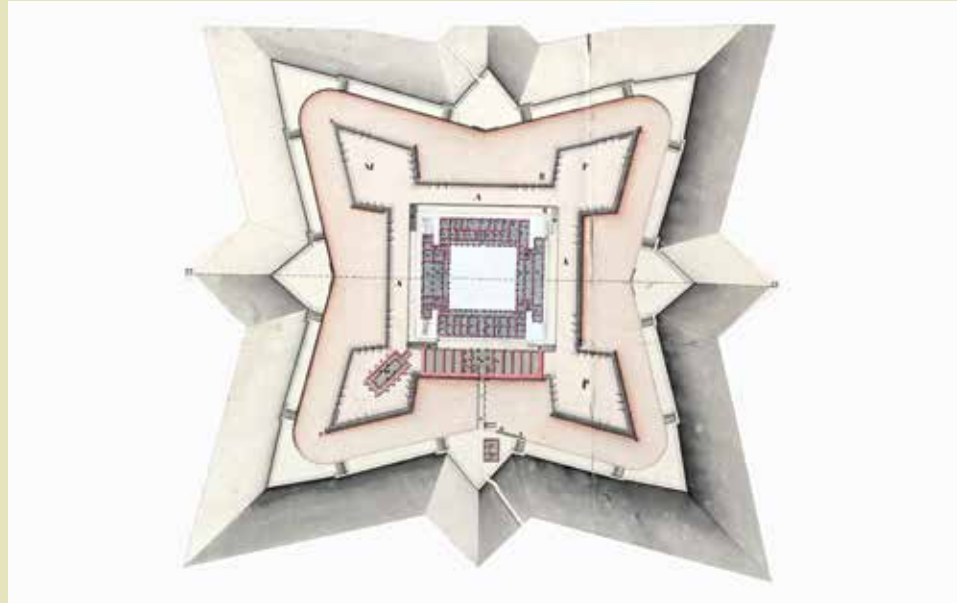


LAS BÓVEDAS OVALADAS DE LA CAPILLA DE LA FORTALEZA DE SAN CARLOS DE PEROTE: UN EJEMPLO DE MECÁNICA MODERNA EN LA AMÉRICA ILUSTRADA *

DOI: <https://doi.org/10.15332/rev.m.v16i0.2473>

Oscar Mansergas Sellens**
Barcelona, España



Detalle plano de la Fortaleza de San Carlos de Perote. Modificado por el autor a partir de: "Plano Perfil, Elevación del Real Fuerte que se ha construido de Orden de su Majestad en las inmediaciones de Perote", Manuel de Santisteban. Veracruz, 1777 (Cartoteca del Centro Geográfico del Ejército, Madrid).

* Artículo de investigación.

** Arquitecto, Asociación Amigos del Castillo de Montjuïc, miembro experto de ICOFORT (Comité Científico Internacional de Fortificaciones y Patrimonio Militar) - ICOMOS. Máster en Restauración y Rehabilitación Arquitectónica por la *Universitat Politècnica de Catalunya*, Barcelona. Correo electrónico: osman@coac.net

RESUMEN

La capilla de la Fortaleza de San Carlos de Perote constituye un ejemplo significativo de introducción de los modernos principios mecánicos ilustrados en el panorama histórico-constructivo mexicano e hispanoamericano. El ingeniero militar Manuel de Santisteban, autor de la obra defensiva, dotó al conjunto arquitectónico de una capilla proyectando un conjunto de bóvedas de directriz ovalada para su cubrición. Las bóvedas otorgan alzada y magnitud, pero sobre todo, por su acercamiento a la forma catenaria, reducen los empujes laterales, verticalizan las cargas y optimizan los estribos sin necesidad de incorporar elementos exteriores para su contrarresto. La utilización de la estática gráfica y el cálculo vectorial para la determinación del estado de equilibrio y de su comportamiento mecánico, evidencia que la elección de su trazado ovalado corresponde a la necesidad de adecuarse a los espesores mínimos de los muros. Los ingenieros militares fueron los primeros en introducir las estructuras de arcos catenarios en España en el siglo XVIII, conocedores de sus beneficios estáticos para las bóvedas. Dicho conocimiento universal cartesiano de la matemática como método para la investigación de la realidad y el cálculo científico de las estructuras de fábrica también fue transmitido en Hispanoamérica, a través de modelos de ingeniería militar.

PALABRAS CLAVE

Fortificación, Perote, mecánica, bóvedas, óvalo.

THE OVAL VAULTS IN THE CHAPEL OF SAN CARLOS DE PEROTE FORTRESS: AN EXAMPLE OF MODERN MECHANICS IN THE ILLUSTRATED AMERICA



Detalle plano de la Fortaleza de San Carlos de Perote. Modificado por el autor a partir de: "Plano Perfil, Elevación del Real Fuerte que se ha construido de Orden de su Majestad en las inmediaciones de Perote". Manuel de Santisteban. Veracruz, 1777 (Cartoteca del Centro Geográfico del Ejército, Madrid).

ABSTRACT

The chapel of the San Carlos de Perote Fortress is a significant example of introduction of modern mechanical principles illustrated in the Mexican-Latin American historical-constructive panorama. The military engineer Manuel de Santisteban, author of the defensive work, endowed the architectural complex with a chapel projecting a set of oval guide vaults for its covering. The vaults provide height and magnitude, but above all, for his approach to the catenary shape, they reduce the lateral pushes, verticalize the weights and optimize abutments without the need to incorporate external elements for their support. The use of graphical static and vector calculation to determine the state of equilibrium and its mechanical behavior, shows that the choice of its oval layout corresponds to the need to adapt to the minimum thicknesses of the walls. Military engineers were the first to introduce the structures of catenary arches in Spain in the 18th century, aware of their static benefits for the vaults. This universal Cartesian knowledge of mathematics as a method for the investigation of reality and the scientific calculation of masonry structures was also transmitted in Latin America through military engineering models.

KEYWORDS

Fortification, Perote, mechanics, vaults, oval.

INTRODUCCIÓN AL CONTEXTO HISTÓRICO

Durante el último tercio del siglo XVIII, los enemigos de la Corona Española pasaron a ser las grandes potencias navales europeas, Francia e Inglaterra. Tras el estallido de la guerra de los Siete Años y la toma de La Habana por los ingleses en 1762, se evidenciaron los defectos de todo un sistema integral de fortificación necesitado de mejorar la defensa de sus posesiones en Ultramar (una población cercana a los 25 millones de habitantes), introduciendo las intendencias para supervisar la administración local, el reconocimiento geográfico del espacio por controlar y defender, y la reordenación de los alcances estratégicos, llegando a pasar por tierras americanas casi un tercio de sus efectivos, con el objetivo de poner a punto la red de fortificaciones que precisaba la monarquía para la conservación de sus vastos dominios que continuaban mostrándose amenazados. Fueron numerosos los proyectos de nueva fábrica y reforma de fortificaciones, trabajos que entrañaron la más importante inversión económica que realizó la monarquía española en América: una estrategia de defensa continental de carácter global que recogió sus frutos en el siguiente gran conflicto contra el Reino Unido durante la Revolución Americana.

En el Virreinato de Nueva España, la preocupación de las autoridades coloniales continuó siendo la defensa estratégica de las vías de comunicación y comerciales entre el puerto de San Juan de Ulúa en Veracruz y la capital de ciudad de México. Las continuas guerras protagonizadas por España en el siglo XVIII hicieron crecer el interés por la seguridad interior del territorio en detrimento de las costas donde el desembarco y el avance de tropas invasoras era cada vez más viable (Ortiz, 1993).

EL INGENIERO MANUEL DE SANTISTEBAN Y LA FORTALEZA DE SAN CARLOS DE PEROTE

En 1763 llega a Veracruz el brigadier de ingenieros Manuel de Santisteban, con el cargo de ingeniero director y el encargo real para la evaluación de fortificaciones y el reconocimiento del *Camino Real* que pasa por Perote. Hace un informe detallado que propone la construcción de un fuerte que asegure el camino, apoye a la fortaleza de San Juan de Ulúa y otorgue defensa en profundidad a través de una línea fortificada interior en posiciones estratégicas para frenar el paso del enemigo desde la costa veracruzana (Jalapa, Orizaba y Quilotepec). Una retaguardia desde un lugar de difícil acceso que aproveche los accidentes del terreno, que contrarreste la movilidad del enemigo en el territorio y que, por sus buenas condiciones climáticas para la conservación de la pólvora, proporcione recursos humanos y almacenamiento de víveres y pertrechos (figura 1) (Calderón, 1953).

Aprobado el emplazamiento por las Juntas de Generales, Manuel de Santisteban fue propuesto como ingeniero encargado del proyecto y la obra de la Fortaleza de San Carlos de Perote. Había trabajado desde 1763 en proyectos de reforma de San Juan de Ulúa y de fortificación de la ciudad de Veracruz (sirvió a la mejora de las defensas de Nueva España hasta su muerte en ciudad de México en 1785). Era un hombre formado al albor del resurgimiento de las academias, universidades o bibliotecas que las ideas de la Ilustración trajeron a España y de la creación del Cuerpo de Ingenieros Militares, organizado a partir de 1710 por el ingeniero general flamenco Jorge Próspero Verboom (antiguo colaborador de Vauban). Obtuvo experiencia militar en el campo de batalla durante la campaña de Italia (guerra del Segundo Pacto de Familia) en la que participó en 1733. Había sido ingeniero ayudante del director para la enseñanza en la Real y Militar Academia de Matemáticas de Barcelona entre 1739 y 1752, a las órdenes de Pedro Lucuze y Ponce, director general

de la academia y celebre autor del Tratado de Fortificación. Pudo conocer las nuevas técnicas académicas procedentes de la escuela de fortificación hispano-flamenca, aunque su formación teórica, consolidada durante la nueva dinastía Borbón, responde fuertemente a la marcada influencia francesa de las enseñanzas de Sébastien Le Prestre, marqués de Vauban, artífice del perfeccionamiento del sistema abaluartado que imperó durante todo el siglo XVIII (Calderón, 1949) (Capel, 1983).

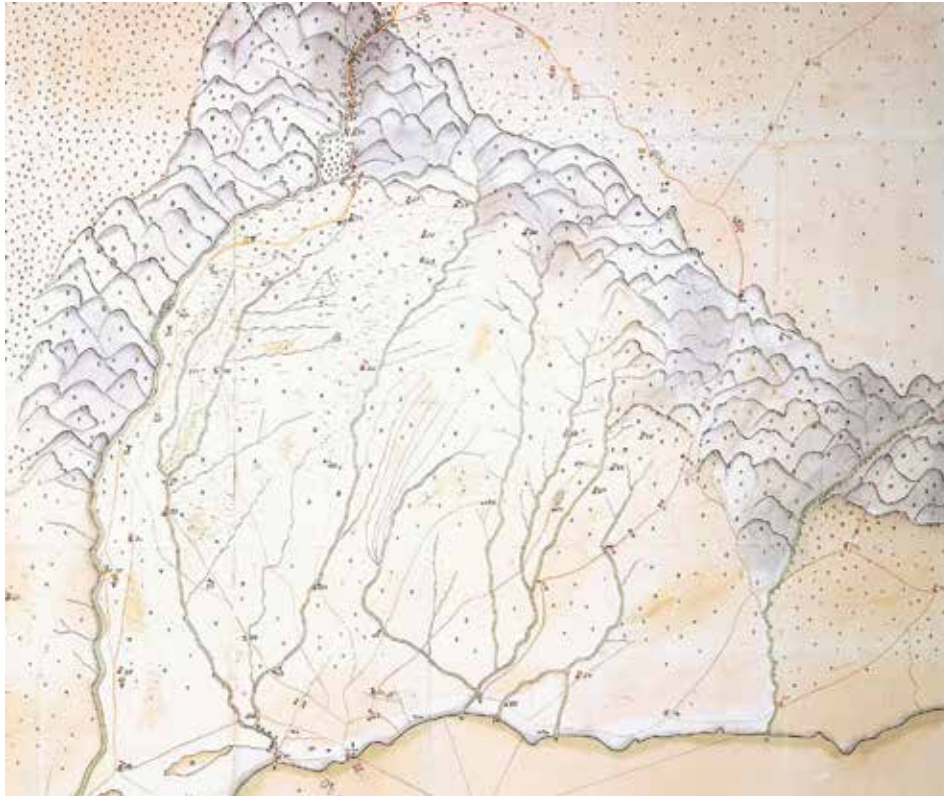
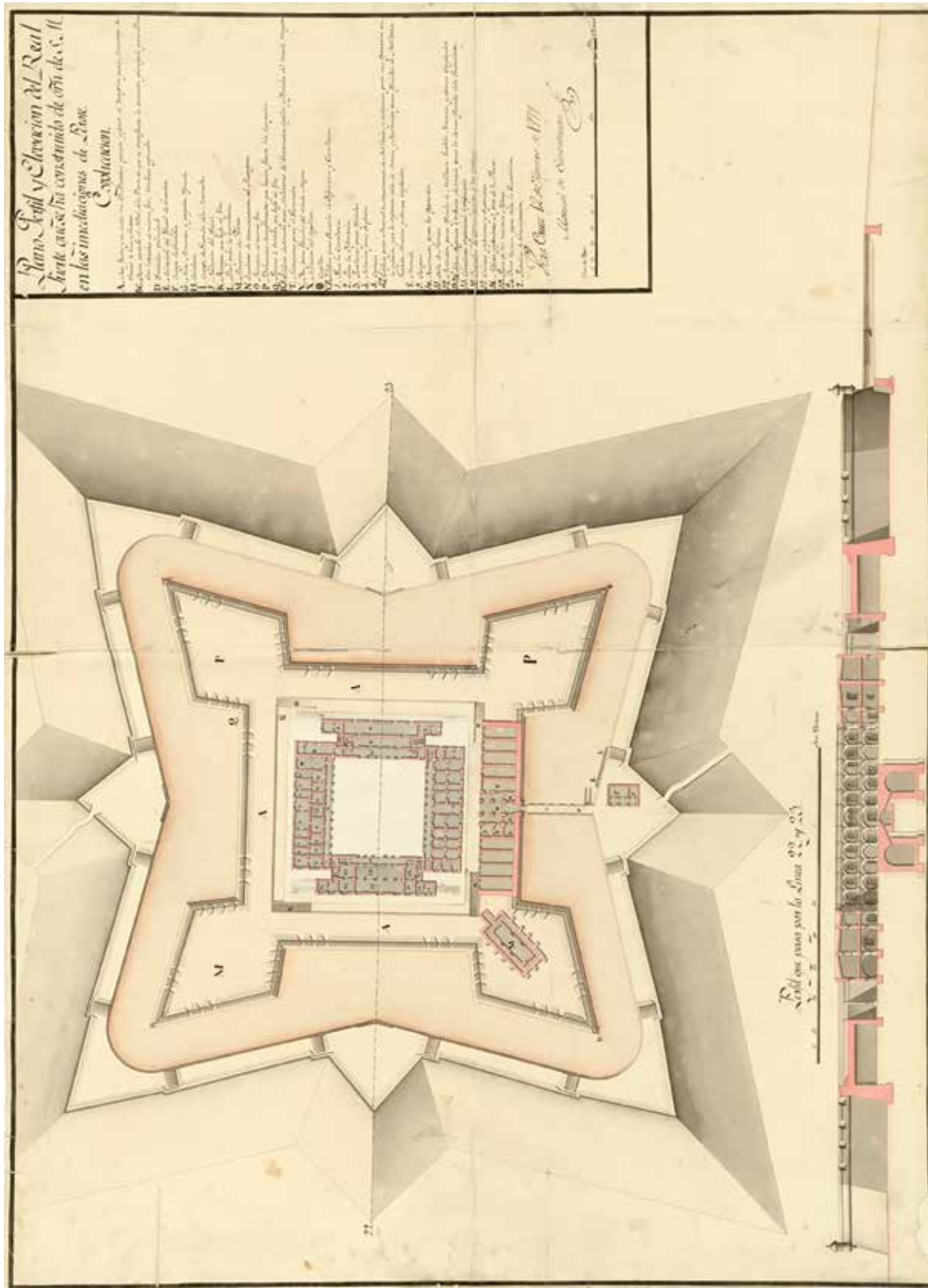


Figura 1. "Plano general que contiene las dos subidas al Reino desde la Plaza de Vera Cruz, á saber por la banda del Norte el que se dirige por Jalapa y por la del Sur los que suben por el paso de la Villa de Orizava". Pedro Ponce, 1777 (Archivo General de Indias / MP-México, 337).

En 1770, Manuel de Santisteban presenta el plano definitivo de una fortaleza para 1000 hombres, de planta cuadrangular, de 280 varas de frente defensivo, con cuatro baluartes en los ángulos orientados a los puntos cardinales, dos de ellos equipados con almacenes subterráneos de pólvora a prueba de bomba, y perímetro rodeado por un foso seco y un camino cubierto con plazas de armas y traveses. En el interior, los espacios abovedados adosados a las cortinas para almacenamiento ocupan la mayor parte de la construcción sujeta al perímetro y en el centro, cuatro edificios independientes (cuarteles, arsenales y sala de armas) configuran los lados de una gran plaza de armas cuadrada que disponía en el subsuelo de un sistema hidráulico de cisternas para el acopio de aguas pluviales. El diseño fue simple, destinado más bien al alojamiento y almacenamiento de materiales que a la fortificación del sitio (figura 2).

Las obras se iniciaron en 1770 y finalizaron en 1775, a falta de la artillería que no llegó hasta 1777. Manuel de Santisteban solicitó la asistencia de su hijo Manuel María Santisteban y trabajó junto al ingeniero Miguel del Corral como director de obra, formado en la Real Academia de Matemáticas Barcelona y arribado a Nueva España en 1764 con la expedición de Juan de Villalba para el reconocimiento de la región de Veracruz y la propuesta para su defensa (Sanz, S. E., 2009).

Figura 2. "Plano Perfil y Elevacion del Real Fuerte que se ha construido de orn. de S.M. en las inmediaciones de Perote". Manuel de Santisteban. Veracruz. 1777 (Cartoteca del Centro Geográfico del Ejército, Madrid).



LA CAPILLA DE LA FORTALEZA

Uno de los espacios arquitectónicos más significativos de la Fortaleza de San Carlos de Perote es su capilla, tanto por su belleza como por sus características mecánicas. Dotada de sacristía y alojamiento para el capellán, se sitúa en el edificio principal del lado noroeste de la Plaza de Armas, destinado a oficiales de mayor rango y a la vivienda del gobernador (figura 3). El ingeniero militar Manuel de Santisteban confirió al recinto fortificado de un relevante espacio religioso con voluntad de servicio espiritual para la tropa alojada en sus dependencias. Las capillas eran elementos recurrentes en las tipologías de ciudadela militar o fortalezas con capacidad de acuartelamiento. Ciudadelas como San Pedro de Jaca (Tiburcio Spannocchi, 1592), Barcelona (Próspero Verboom, 1716), Santiago y San Felipe de Montevideo (Diego Cardoso, 1741) o San Fernando de Figueras (Juan Martín Zermeño, 1753) fueron equipadas todas ellas con edificios religiosos de cierta identidad artística y arquitectónica. Concretamente en Figueras, la lamentablemente inacabada iglesia de planta y cúpula elíptica proyectada por Pedro Martín de Paredes y Zermeño se reivindica como pieza arquitectónica excepcional. Dicha concepción del espacio religioso en el recinto militar, acumulada durante siglos, se plasmó en el diseño de Santisteban para la capilla de Perote, marcada de una clara voluntad simbólica y estética a través de una muestra de lenguaje arquitectónico impregnado de reminiscencias barrocas y austeridad castrense.

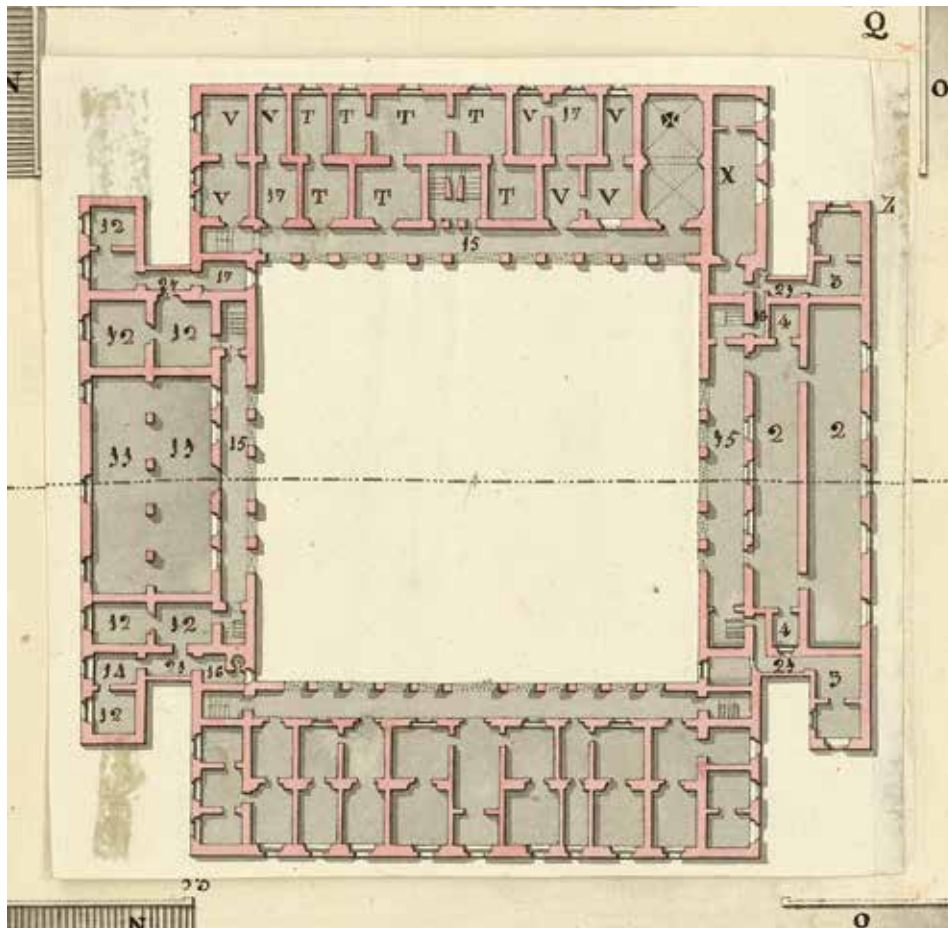
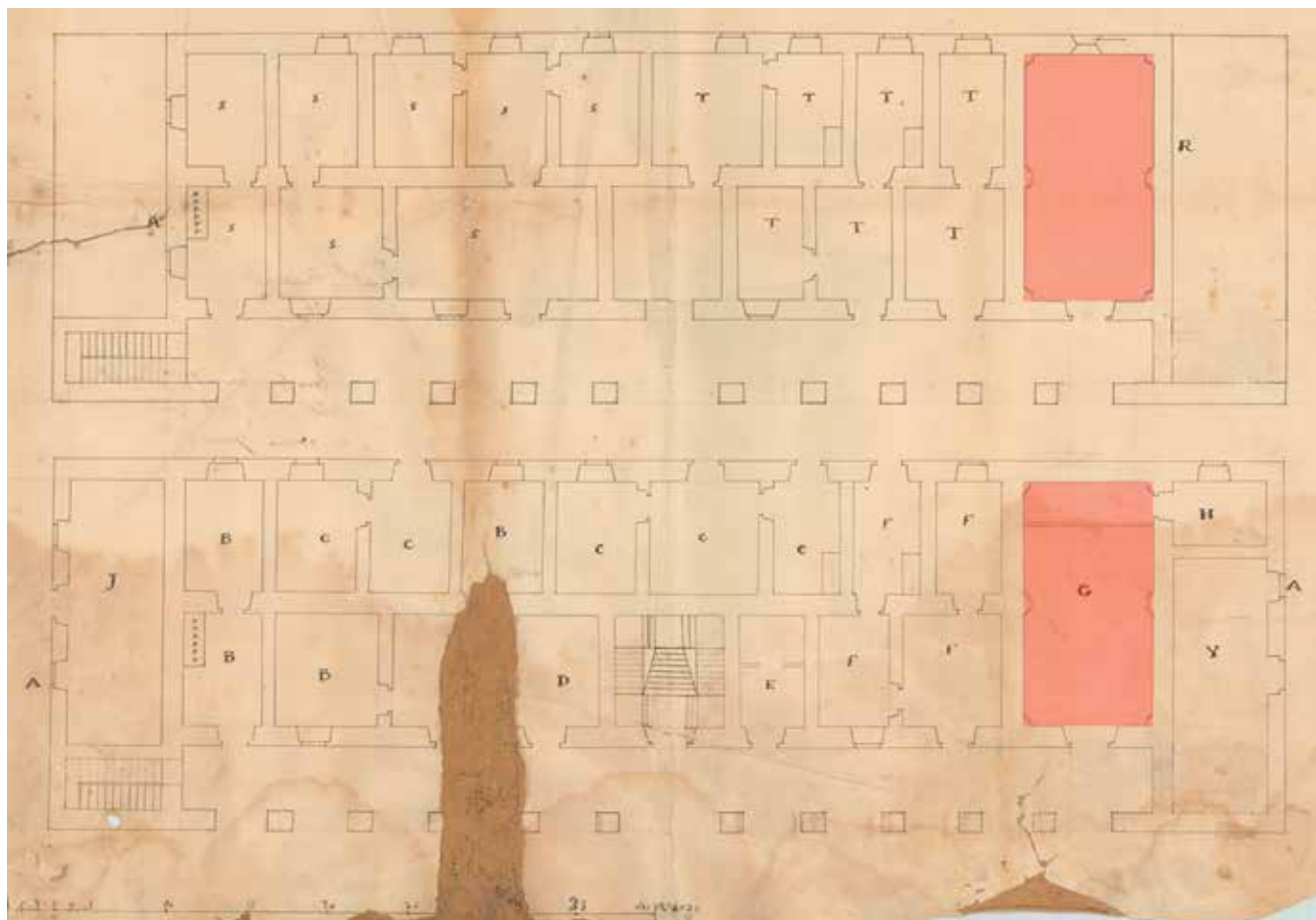


Figura 3. "Plano Perfil. Elevación del Real Fuerte que se ha construido de Orden de su Majestad en las inmediaciones de Perote". Manuel de Santisteban, Veracruz, 1777. Detalle de los edificios de la Plaza de Armas con el edificio del gobernador en el lado superior (Cartoteca del Centro Geográfico del Ejército, Madrid).

La capilla en cuestión, ocupa el lateral derecho del edificio del gobernador, integrada espacial y estructuralmente en el interior del cuerpo construido, conformado básicamente por tres crujías de muros de carga longitudinales, dos de ellas interiores y una más estrecha como soporte de la galería exterior de fachada de la plaza de armas. El volumen de la capilla engloba parcialmente las dos crujías interiores en un único espacio en planta y los dos pisos del edificio en altura (un tercer piso quedaría suprimido en 1771, en fase de proyecto, por su exposición a los fuertes vientos del norte). La planta interior es de forma rectangular de 13 x 6,75m y tiene una altura libre de 8,50m hasta la clave de su bóveda. El espacio queda dividido por la intersección transversal de un arco fajón de forma ovalada que salva la continuidad del muro portante intermedio entre crujías (figura 4). Ambos lados del arco fajón son cubiertos por bóvedas de directriz ovalada orientada en sentido longitudinal de la capilla, con lunetos de proyección circular sobre los arcos torales o formeros en cada uno de los laterales. El sistema abovedado queda cubierto por un terrado plano de capa de mortero de cal sobre viguería y tablones de madera (económico sistema constructivo utilizado mayoritariamente para los forjados, también intermedios, de los edificios interiores de la fortaleza).

Figura 4. "Plano proyecto de un edifo. pa. Cuartel y Pabellón el intr. del Casto. de Perote en Nueva España: Detalle del Edificio del Frente de Poniente, destinado para aloxamiento de gobernador Sargento Major, Capellan, Ajudantes y demas oficiales del estado Major en el que esta la capilla", 1801. Planta baja y primera (Archivo General Militar de Madrid).

La entrada en la planta baja se efectúa desde el porche arqueado de la plaza de armas. Se accede desde el eje central, pasando por debajo de otra bóveda de arista rebajada que sustenta el coro superior a media altura, accesible desde la galería del entresuelo. Frontalmente, en el extremo opuesto interior se dispone el altar coronado por un gran óculo en la fachada, desde donde lateralmente se ingresa en la sacristía (figuras 5, 6 y 7).



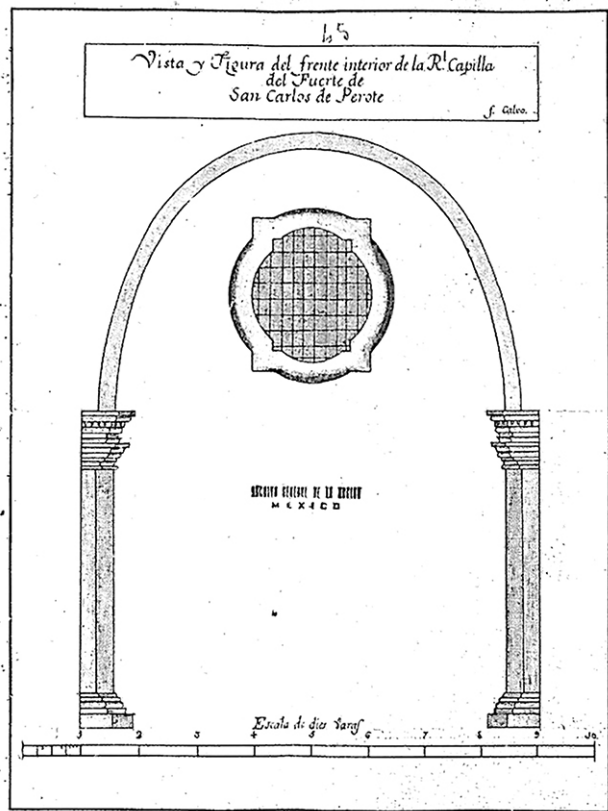


Figura 5. Vista y figura del frente interior de la Real Capilla del Fuerte de San Carlos de Perote, levantado por F. Calvo, 1792 (Ortiz, 1993).



Figura 6. Perspectiva interior de la capilla de San Carlos de Perote. Fuente: Oscar Mansergas Sellens.

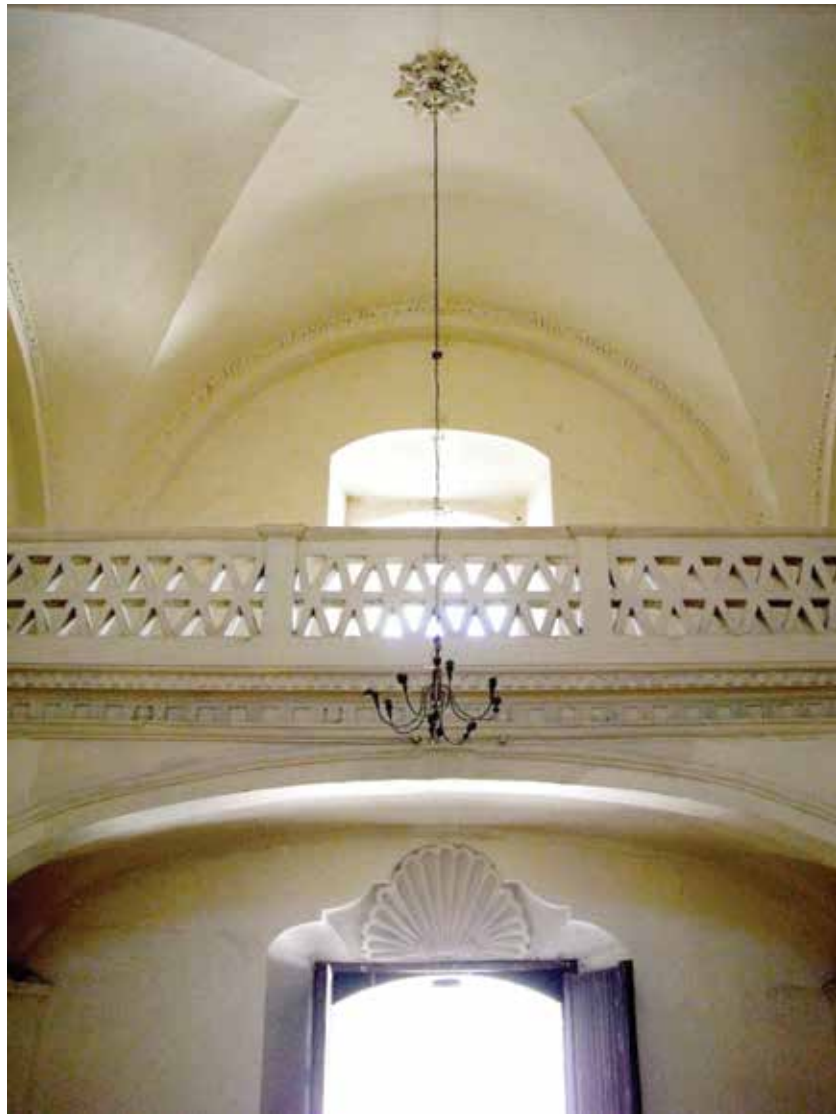


Figura 7. Perspectiva interior del coro de la capilla de San Carlos de Perote.
Fuente: Oscar Mansergas Sellens.

La estructura portante perimetral de la capilla está conformada por muros de carga de un metro de espesor, de piedra caliza blanda de la región (utilizada en lienzos de muros y cortinas) e incluyendo también piezas finamente talladas en piedra *chiluca* de gran dureza y resistencia (utilizada en zócalos, pilares, ménsulas, machones y piezas de labrado decorativo). El conjunto abovedado formado por el arco fajón y las bóvedas, fue construido con ladrillo de barro cocido y mortero de cal como material de aparejamiento. Cabe deducir, a falta de datos concretos, que la configuración constructiva del arco y las bóvedas (espesor y aparejo), pueda corresponder a otros elementos abovedados encontrados en la misma fortaleza, como es el caso de las bóvedas voladas sobre ménsulas que sustentan un pasadizo exterior, formadas por dos hiladas de ladrillo *a rosca* (figuras 8 y 9). El ladrillo era un material dúctil y más ligero que la piedra, que fue ampliamente utilizado en la Fortaleza de San Carlos de Perote (garitas, troneras, parapetos, terrados), sobre todo para la construcción de los 49 espacios abovedados (mayoritariamente polvorines y casamatas bajo terraplén con bóvedas de *tres roscas* de ladrillo a prueba de bomba y relleno de hormigón pisado) con variedad de formas, además de la ovalada, aristadas, de cañón con lunetos, esféricas, esquifadas y octogonales, que se distribuyen por la fortaleza y que evidencia el empleo del material con tales fines (Broca, 2017).

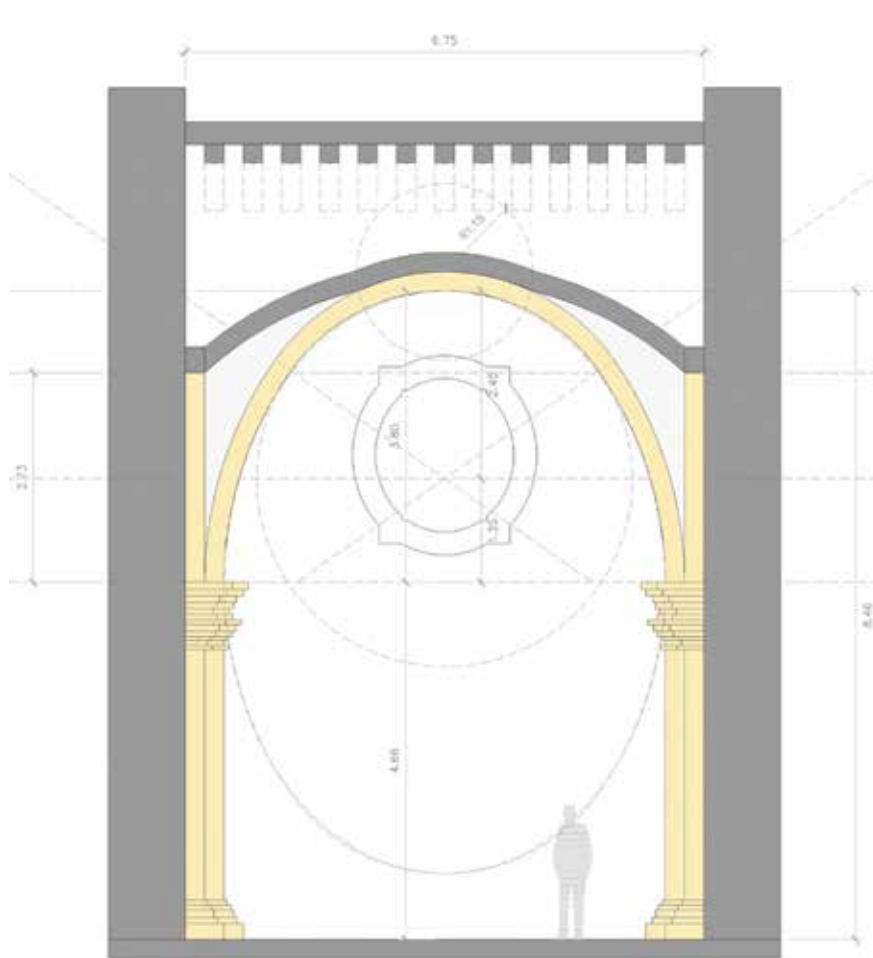


Figura 8. Sección transversal de la capilla de San Carlos de Perote.
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 9. Bóvedas de ladrillo a rosca presentes en la Fortaleza de San Carlos de Perote.
Fuente: Oscar Mansergas Sellens.

ARCO Y BÓVEDAS OVALADAS

El diseño de figuras ovales para los elementos de cubrición del espacio religioso puede ser entendido desde la voluntad artística por su capacidad que conferir alzada, verticalidad y magnitud a un espacio pequeño en planta, sobrio ambientalmente y decorado con sutileza, aunque cabe suponer que la elección formal de dichos elementos corresponde también a una respuesta estática, y no solo estética, a los requerimientos planteados. El perfil ovalado por el que opta Manuel de Santisteban se presenta como una aproximación formal a la figura catenaria (curva ideal de equilibrio que representa físicamente la curva generada por una cadena suspendida de sus dos extremos y sometida a un campo gravitatorio uniforme) que le proporciona una interesante optimización estructural y de recursos materiales, verticalizando las cargas y los empujes laterales, reduciendo así el espesor de los estribos, sus costos y tiempos de ejecución. Manifiesta de este modo sus dotes de ingeniero moderno de comienzos del siglo XVIII, caracterizado por los principios de prontitud, solidez y economía, sin renunciar a su intencionalidad creativa. Demuestra expresa voluntad de adecuar sus formas abovedadas a los muros preestablecidos que contiene la estructura del edificio sin necesidad de aumentar los grosores e incorporar nuevos elementos añadidos para contener posibles empujes mayores producidos por otro tipo de bóvedas.

Las bóvedas ovaladas y sus respectivos lunetos disponen de seis puntos de apoyo, cuatro en las esquinas de la capilla y dos sobre ambas impostas del arco fajón intermedio. Cada apoyo cuenta con el contrarresto de la propia estructura continua del edificio, a excepción de lo que ocurre en el lateral noreste del arco fajón ovalado, donde el estribo de 1,50m de espesor no tiene ningún tipo de estructura de continuidad o contrarresto aumentado en la cámara contigua, más allá del apuntalamiento producido por el forjado intermedio adosado (figura 10). Según los planos, Santisteban adosó únicamente a este lado de la capilla una construcción en planta baja dedicada al alojamiento del capellán (finalmente ejecutada en dos alturas), aunque el estribo noreste del arco fajón se mantuvo exento de cualquier recrecido estructural, evidenciando la confianza que el ingeniero tuvo en la suficiencia de su espesor para la contención de los empujes laterales producidos por las bóvedas y el arco fajón que confluyen sobre este punto.

A modo de ejercicio analítico, conviene determinar cuál es el comportamiento mecánico del arco ovalado con relación a su estribo noreste, en comparación con otras posibles formas geométricas de arcos para las mismas prestaciones, que permita constatar si la elección de la forma oval fue la adecuada para la estructura propuesta.

La aplicación simplificada del cálculo vectorial con estática gráfica sobre el arco fajón ovalado y otro arco de medio punto, por ejemplo, con las mismas solicitudes para los dos casos (mismo espesor, luz, altura de la clave e hipótesis de carga), basándose en las teorías modernas del análisis límite para las estructuras de fábrica de Jacques Heyman (1982, 1995), permite analizar sus diferentes comportamientos estructurales y su estabilidad. El método solo precisa de la geometría y cargas, puntuales y propias, como datos previos. Considera la estructura formada por un material que trabaja a compresión infinita (las tensiones las desprecia por estar normalmente muy por debajo de su resistencia a compresión) y que no resiste tracciones (resistencia casi nula no considerada por su poca magnitud en favor de la seguridad). Se interpreta también la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo, sostenido por su propio peso, que no permite el deslizamiento entre elementos, considerando que el rozamiento entre las juntas es suficientemente elevado.

Para determinar la estabilidad de la estructura hay que comprobar que la “línea de empujes o de presiones” está contenida dentro de los contornos del elemento. La “línea de empujes o de presiones” es el lugar geométrico de la resultante de esfuerzos que mantienen en equilibrio cada parte de la estructura. Si la resultante de las fuerzas se encuentra en el interior de los contornos del elemento estructural, entonces es posible encontrar un estado de tensiones que cumpla con la estabilidad del conjunto. La seguridad está determinada en cada sección por la distancia relativa de la resultante con sus límites. El coeficiente de seguridad es geométrico, y definirá la posición que el empuje nunca tiene que sobrepasar dentro de cada sección.

En las estructuras hiperestáticas (como las bóvedas y los arcos en general), aplicando los teoremas de plasticidad se puede asegurar que si es posible encontrar una solución de equilibrio con las cargas e hipótesis del material, de las infinitas que existen, entonces la estructura será estable. La visión de equilibrio estaba implícita en las reglas geométricas y fue empleada por grandes ingenieros de los siglos XVIII y XIX (Feu, 2017).

Tomando como método de cálculo la mitad del arco fajón que descarga sobre su lateral para ambas geometrías estudiadas, se calcula el peso propio de su masa (volumen por densidad del material), así como las sobrecargas que sobre él actúan (muro superior y terrado). Para ello, se segmenta en varias partes la volumetría que descarga sobre los dos tercios superiores del arco (el tercio inferior se considera inoperante para el cálculo de las líneas de presión que transcurren por su sección), situando en el centro de gravedad de cada segmento su correspondiente peso vectorial. Con dicho diagrama de fuerzas verticales paralelas se crea un polígono funicular de fuerzas que determina la magnitud y posición de la fuerza gravitatoria total resultante del peso del arco en sus dos tercios superiores. A su vez, a partir del diagrama de fuerzas verticales paralelas, se busca un polígono funicular de fuerzas de presión de empuje mínimo que pase a través del tercio central de la sección del arco, estableciendo las condiciones más favorables y menos exigentes con el arco respecto a los empujes laterales, cuya componente horizontal de la resultante sea la menor posible; unas premisas de cálculo que pretenden estudiar la respuesta de la estructura a un hipotético caso de comportamiento estructural perfecto.

Uniendo la directriz horizontal de aplicación de la fuerza de contrarresto de la otra mitad del arco (obtenida por la hipotética curva de presiones anteriormente calculada) con la directriz vertical de su peso propio, se encuentra la intersección entre ambas directrices, desde cuyo punto de cruce se traza la línea de unión con el punto de aplicación de la hipotética curva de presiones del arco en el extremo de su estribo (en el primer tercio del arco, sobre el radio a 30° de la base del arco). La línea adquirida definirá la directriz inclinada del empuje lateral del arco, compuesto por fuerzas verticales y horizontales, determinando el triángulo de la suma de fuerzas y los valores numéricos de sus componentes.

Situada geoméricamente la resultante del empuje del arco en su extremo inferior, se calcula la fuerza vertical del peso propio del estribo, aplicada también sobre el centro de gravedad de la masa, y se combina con la resultante del empuje del arco mediante un nuevo polígono funicular de fuerzas concurrentes que determina la directriz inclinada y magnitud de la fuerza resultante total del empuje del estribo proyectada sobre su base y punto de apoyo o de equilibrio sobre el terreno, con un valor numérico determinado (figuras 11 y 12).

La fuerza resultante del empuje del arco ovalado sobre el terreno recae en el límite del tercio central de la base del estribo de 1,50m de espesor (condición de apoyo para la

correcta estabilidad del muro), mientras que la resultante del arco de medio punto recae fuera del grueso estricto necesario para su contención (condición de apoyo como causa de colapso) (figura 13). A dicha resultante del arco, cabría sumarle el componente horizontal de los empujes diagonales producidos por las bóvedas ovaladas (no calculados por redundantes para la compresión del concepto transmitido), que, aunque menores, aumentarían las exigencias de los estribos y comprometerían, más si cabe, su estado de equilibrio (figura 10).

La comprobación de los resultados evidencia, de manera teórica, que la elección del trazado ovalado para el arco fajón corresponde a la necesidad de asegurar la contención de los empujes dentro de los espesores de los muros requeridos; a diferencia de otras formas, como por ejemplo el arco de medio punto, que necesitaría de gruesos mayores o elementos añadidos de sustentación para salvar la misma luz a la misma altura. De este modo, se manifiesta la capilla de Fortaleza de San Carlos de Perote como un ejemplo de aplicación de un conocimiento adquirido para la resolución y optimización de un problema estructural.

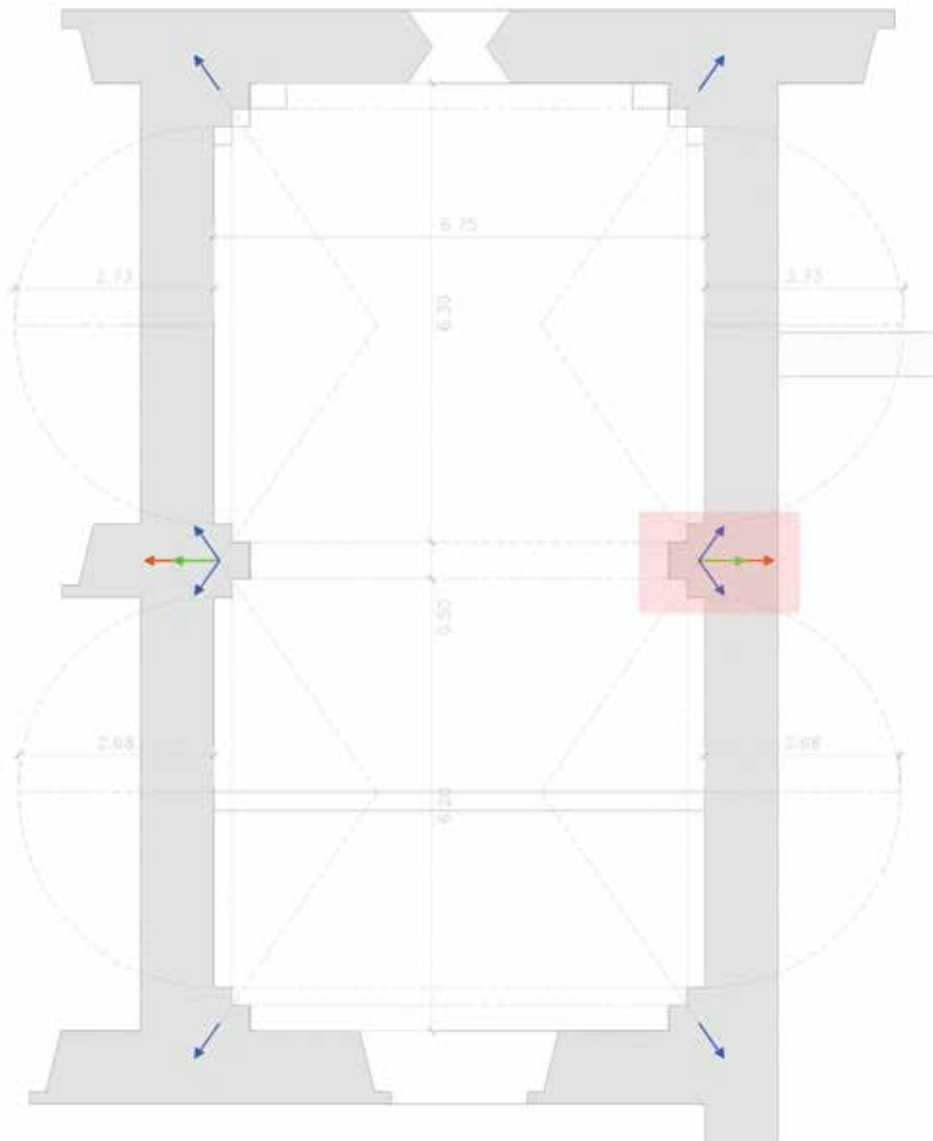


Figura 10. Planta de la capilla de San Carlos de Perote. Componentes horizontales en los puntos de apoyo de las bóvedas ovaladas (azul: componente de las aristas de las bóvedas; verde: resultante de las componentes de las aristas en los estribos del arco; rojo: empuje horizontal del propio arco) y localización del estribo analizado. Fuente: Elaborado por el autor.

ARCO OVALADO

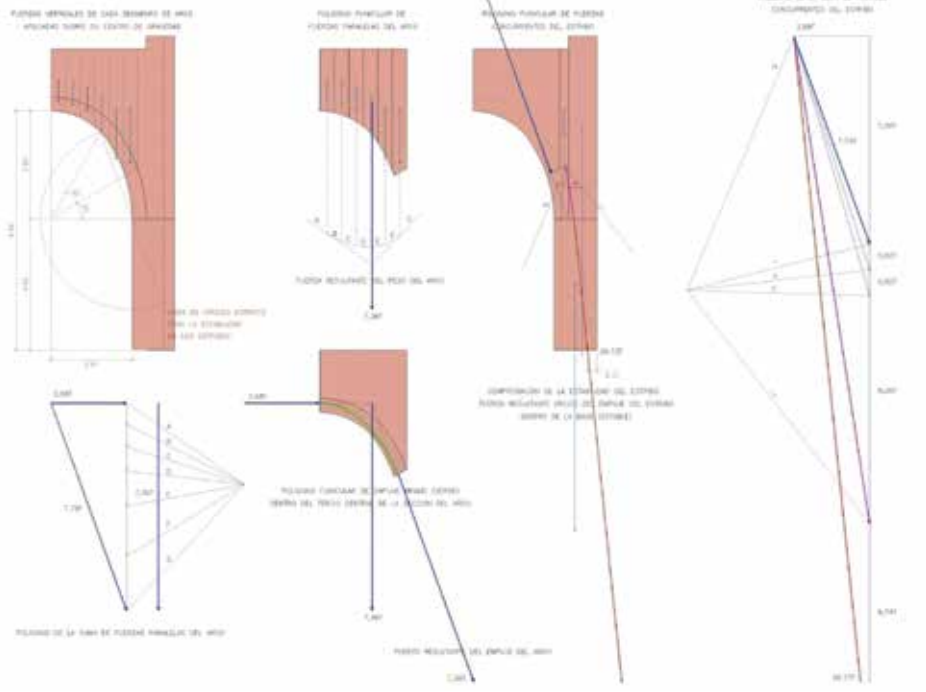


Figura 11. Cálculo vectorial para un arco fajón ovalado con resultante dentro de la base del estribo.
Fuente: Elaborado por el autor.

ARCO DE MEDIO PUNTO

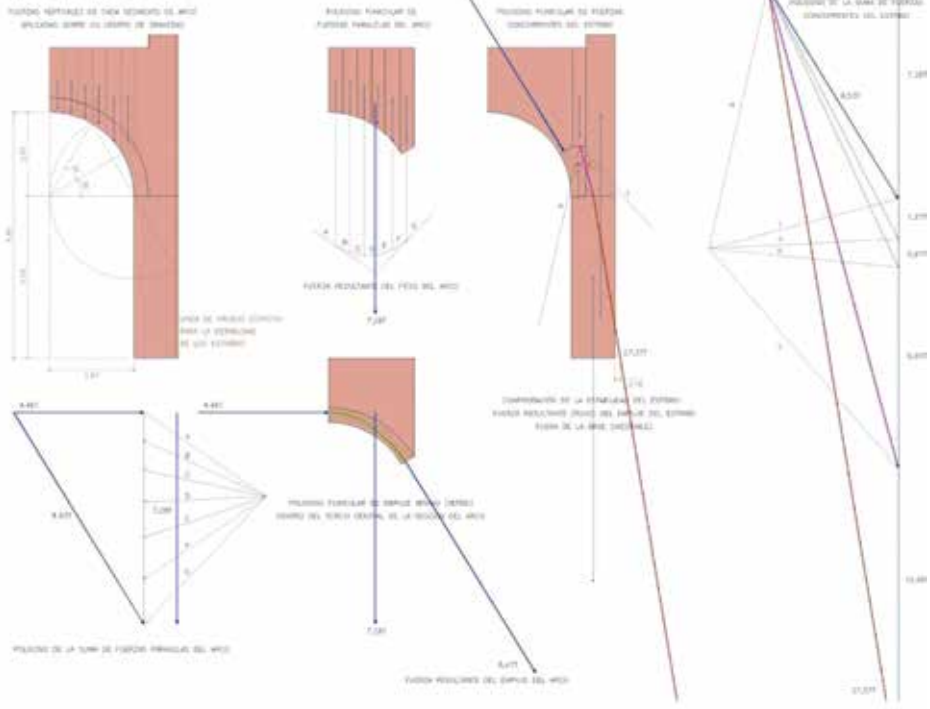


Figura 12. Cálculo vectorial para un arco fajón de medio punto con resultante fuera de la base del estribo.
Fuente: Elaborado por el autor.

EL CONOCIMIENTO MECÁNICO

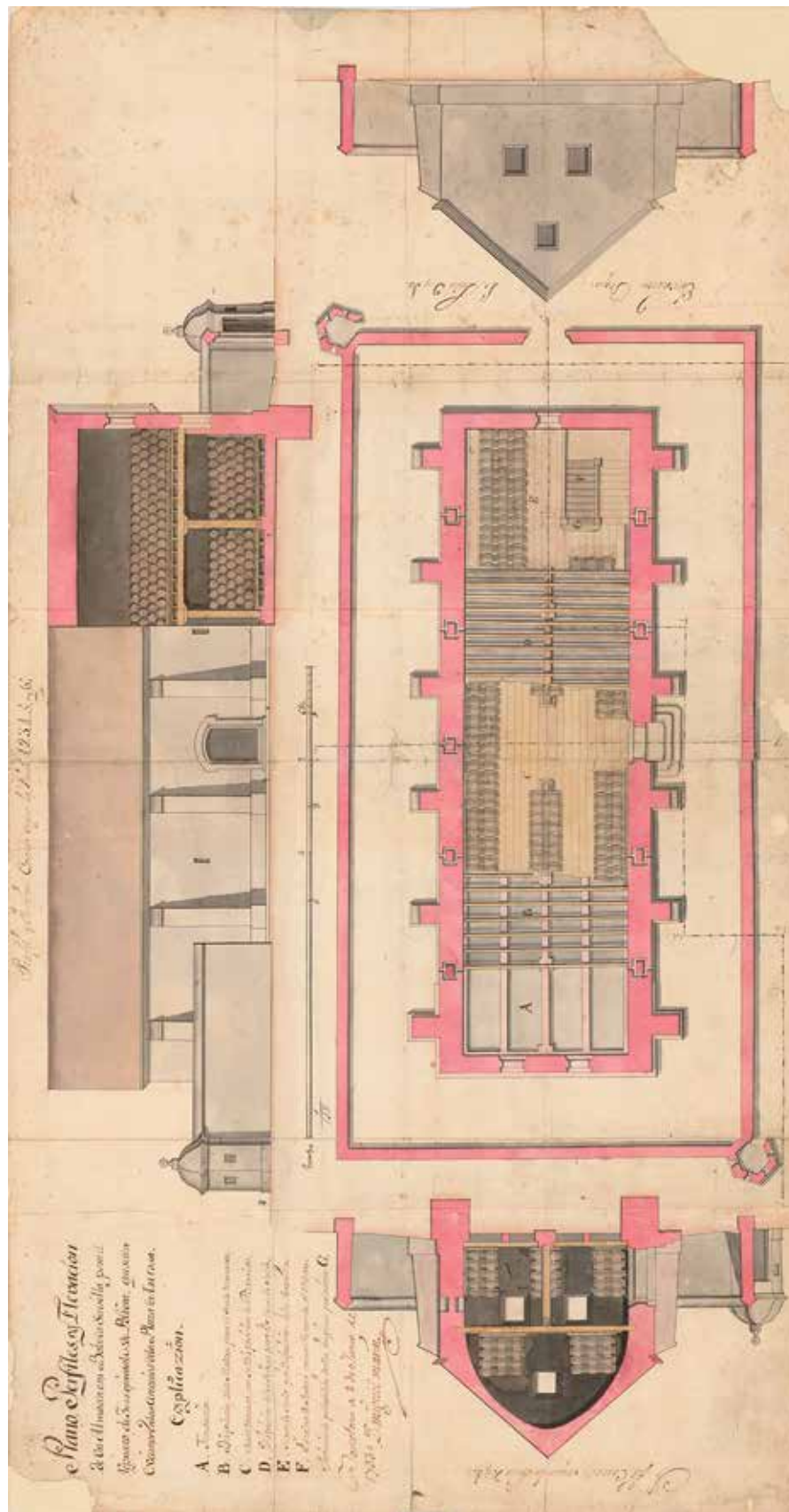
Tras la Guerra de Sucesión y durante el reinado de Felipe V, fue creada en 1720 la Real Academia de Matemáticas de Barcelona por impulso del ingeniero general Jorge Próspero de Verboom, dedicada a la formación de ingenieros militares. La Academia permitió el paso por la capital catalana de una élite de cerca de mil ingenieros que diseñaron y dirigieron importantes obras civiles y militares en la Península y en los dominios españoles de la época.

Manuel de Santisteban fue ingeniero ayudante durante largos años en la Academia (1736-52). El ingeniero Miguel del Corral, su director de obra en la Fortaleza de San Carlos de Perote, se formó en la misma institución durante su etapa en el Regimiento de Caballería de Barcelona (1746-50), además de otros ingenieros como Miguel Costanzó (1762) y Manuel Mascaró (1771) quienes también fueron formados en Barcelona y ejercieron en Nueva España (Calderón, 1949) (Capel, 1983). Todos ellos, gracias a las facilidades ofrecidas por una ordenanza cuyo objetivo era facilitar el destino voluntario de ingenieros en Ultramar mediante el ascenso inmediato en su escala y el consiguiente aumento de sueldo, pasaron a Nueva España llevando consigo los conocimientos de una formación científica basada principalmente en las matemáticas y la geometría.

La Real y Militar Academia de Matemáticas de Barcelona, heredera de las academias de matemáticas de Madrid (creada por Tiburcio Spannocchi y Juan de Herrera en 1583) y los Países Bajos en Bruselas (creada por Sebastián Fernández de Medrano en 1675) en la tarea de divulgación de los conocimientos transmitidos por los tratados de fortificación, también instruyó a sus alumnos con gran incidencia en lo referente a la mecánica científica moderna. Entre la información bibliográfica a la que se tenía acceso desde la Academia, fue la obra del ingeniero militar francés de origen catalán Bernard Forest de Bélidor (1698-1761), *La science des ingénieurs* de 1729, la que causó una mayor acogida e influencia entre los ingenieros de la época. Se trata de la obra del siglo XVIII que mejor explica el conocimiento de los ingenieros militares, ofreciendo un conjunto coherente de conocimientos, nacidos de la experiencia y amparados en modelos matemáticos de comportamiento con clara finalidad práctica y racional. Fue un hito en el desarrollo de la técnica y el primer tratado de construcción basado en métodos algebraicos y mecánicos para la sistematización de la ejecución de los edificios. Utiliza métodos gráficos (según el *Traité des Ponts* de Gautier de 1716) para el cálculo aproximado de los estribos o del centro de gravedad de superficies planas, a través de las fuerzas que actúan sobre el objeto representadas por vectores. Sus teorías son categóricas y aunque algunas pueden manifestar cierta imprecisión, siempre presentan conocimientos de utilidad en busca de la disminución de costos y la mayor brevedad en tiempo de ejecución. La traducción española de la obra de Bélidor se plasmó en el *Tratado de fortificación, ó Arte de construir los edificios militares, y civiles...* del ingeniero Miguel Sánchez Taramas (traducida a partir de la versión inglesa del profesor de artillería y fortificación John Müller en 1755) y no fue editada hasta al año 1769, aunque en España se dispuso con anterioridad de traducciones parciales de la versión original (Galindo, 1996).

En el marco de la expansión de los modernos conocimientos científicos difundidos por la Real Academia de Matemáticas de Barcelona entre los ingenieros militares españoles durante la primera mitad del siglo XVIII, a los que el ingeniero Manuel de Santisteban tuvo acceso, cabe destacar algunas construcciones militares coetáneas que presentan características mecánicas de gran interés. Los proyectos para almacenes de pólvora del ingeniero Miguel Marín en Barcelona (1731) y en Tortosa (1733) –además del de Juan de la Ferrière para La Coruña (1736)– demuestran el insistente intento de aplicación de estructuras de generatriz catenaria para los arcos y bóvedas de los polvorines (Lluís, 2015) (figura 11).

Figura 14. "Plano, Perfiles, y Elevacion de un Almacen con Bobeda sencilla para el repuesto de 3000 quintales de Polbora, que se debe executar en las cercanias de la Plaza de Tortosa". Miguel Marin, 1733 (Archivo General Militar de Madrid).



Dichas construcciones y diseños militares demuestran cómo en las academias se tenía amplio acceso al conocimiento sobre los principios mecánicos de la moderna teoría de las fábricas. Las bóvedas catenarias introducen los principios iniciados en la *Teoría de la cadena* de Robert Hooke (1676) acerca de la curva de equilibrio, deformada de un cable sometido a su propio peso que invertida minimiza las tensiones y reduce el dimensionado de los estribos, dejando atrás las reglas del tercio instauradas por la tratadística de siglos anteriores. Sucesivamente fueron ampliados los conocimientos acerca del polígono funicular a través del cálculo de una cuerda tensada por pesos o fuerzas que no son verticales, utilizando métodos gráficos de composición de fuerzas para la definición del equilibrio, resultantes y tensiones internas (Gómez, 2012), como hiciera Pierre Varignon en el *Project d'une nouvelle mécanique* (1678) o Pierre Couplet en *De la poussée des voûtes* (1729), donde definirían la *chaînette* como la mejor de las formas para la construcción de bóvedas.

James Stirling expuso en 1717 la ecuación matemática de la verdadera forma catenaria para el cálculo científico mediante la construcción de una catenaria con esferas colgantes y cuyo análisis estructural sirvió a Giovanni Poleni (1748) en la *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano*. Con posterioridad, el también ingeniero militar Charles-Augustin de Coulomb determinó la existencia de un empuje máximo y mínimo en un arco (1773), dejando el camino para que autores como Édouard Henry-François Méry completen la teoría elástica sobre arcos y bóvedas de fábrica (1840).

Cabe destacar que los planos de las bóvedas proyectadas por Miguel Marín y Juan de la Ferrière en los almacenes de pólvora, no dibujan exactamente una curva catenaria sino que están trazadas desde la caracterización de una figura geométrica: el óvalo. Esta determinación se indica en el tratado de Bélidor (1729), quien reconoce las dificultades para la delineación de la verdadera forma catenaria sobre el plano mediante los tradicionales instrumentos de dibujo, regla y compás, disponiendo una aproximación formal mediante la utilización de un óvalo rebajado. La figura oval y elíptica había sido sobradamente estudiada por la tratadística constructiva desde el siglo XVI y reaparece durante el siglo XVIII con interesantes aportaciones como las de Fray Vicente Tomás Tosca o Bernard Forest de Bélidor. Tosca presenta en su *Compendio matemático* (1715) la construcción geométrica del arco *apaynelado*, o *carpanel* trazado mediante óvalos, y Bélidor haría lo propio en *La science des ingénieurs* (1729), presentando su tipología de bóvedas de *anse de panier* donde se aproxima a la curva catenaria mediante la construcción de un óvalo no tangente a la imposta. Es preciso subrayar que la curva catenaria no arranca tangente a la imposta, a diferencia del óvalo que sí lo hace, por lo que los proyectos de los ingenieros españoles para los polvorines debieron ser dibujados, como plantea Bélidor, con óvalos con eje desplazado bajo las impostas para evitar su tangencia en los laterales, simulando las características de la curva catenaria (Lluís, 2015). De cualquier modo, bien por desconocimiento u otra posible razón, este procedimiento no fue empleado por Manuel de Santisteban para las bóvedas de la capilla de San Carlos de Perote, donde se limita a presentar el óvalo en toda su dimensión, tangente a sus impostas.

Los ingenieros eran amplios conocedores de las diferencias que existían entre la trazabilidad sobre el papel y el replanteo en obra. La disposición de baterías artilleras de costa en forma de herradura era frecuente en el siglo XVIII, y los diseños ovalados que sobre el plano eran fáciles de dibujar con el compás, no lo eran sobre el terreno, debiéndose recurrir eventualmente a la forma elíptica, cuyo replanteo *in situ* necesitaba únicamente dos focos fijados mediante estacas y una sola cuerda. Por el contrario, en el caso de los arcos y las bóvedas, la elaboración del modelo del cimbrado con trazado oval se evidencia más fácil de ejecutar que la elipse (Lluís, 2013).

En todo caso, los ingenieros militares fueron los primeros en introducir las estructuras de arcos con curvatura catenaria en el territorio español durante la primera mitad del siglo XVIII, conocedores de la conveniencia de su equilibrio para las bóvedas (aunque la expansión de la tipología estructural se desarrolló más ampliamente durante el siglo XIX como consecuencia de la teoría de arcos de fábrica aplicada a la estática gráfica), pero es preciso manifestar que fue Manuel de Santiesteban quien, a través de las bóvedas de la capilla de San Carlos de Perote, introdujo las formas ovaladas de aproximación a las teorías catenarias en el territorio americano durante la segunda mitad del siglo XVIII.

CONCLUSIONES

El presente artículo pretende poner de manifiesto el valor tecnológico que se identifica en la elección de las formas ovales para el sistema abovedado de la capilla de San Carlos de Perote. La aplicación del óvalo como figura geométrica, no es fruto de la materialización de una idea medieval, ni de la geometría de ideales formales renacentistas, sino del resultado del cálculo numérico. El ingeniero Manuel Santisteban tuvo amplias nociones de la teoría científica de la cadena o los cálculos de la mecánica pre-científica vigente durante la segunda mitad del siglo XVIII, conocedor de los beneficios estructurales que el arco ovalado proporciona como aproximación formal a la curva catenaria. Las formas geométricas de óvalos y elipses para bóvedas o baluartes de defensa pirobalista, con sutiles diferencias geométricas próximas a la parábola, fueron utilizadas por la ingeniería militar en función de su facilidad de replanteo y trazado. La aplicación de dicho conocimiento representa un avance científico que busca controlar matemáticamente la concepción y la puesta en obra del proyecto estructural, basándose en los valores de la eficacia, la racionalidad y la economía; valores todos ellos tecnológicos.

Los ejercicios analíticos-estructurales de los arcos objeto de estudio en el presente artículo pretenden constatar, a través de la actual estática gráfica aplicada, la eficacia de un método que permite la lectura y la comprensión del funcionamiento de la estructura desde sus zonas más comprimidas y exigentes, así como la validez del replanteo original del proyecto y la mejora que supone la optimización de la geometría con el cálculo científico, respecto a la reducción de los empujes laterales. Varios autores han demostrado que el estudio gráfico de equilibrio es lo más adecuado para analizar la estabilidad de estas estructuras. El estudio gráfico puede determinar la magnitud de las fuerzas, y además ilustra el recorrido de la carga dentro de la estructura, haciendo comprensible el comportamiento de los arcos y las bóvedas. Estos principios ilustrados fueron introducidos por Manuel de Santiesteban, entre otros ingenieros, arquitectos y constructores, a través de sus obras en un nuevo marco geográfico y en un nuevo contexto histórico de expansión de la presencia española en territorio americano y de resurgimiento de las academias científicas (véase también, como ejemplo, las bóvedas parabólicas de madera levantadas por Fray Junípero Serra en la misión franciscana de San Carlos Borromeo del Carmelo, California, 1774). Es por ello que el sistema abovedado de la capilla de San Carlos de Perote constituye un excepcional testimonio del alto valor patrimonial y tecnológico que subyace en la materialización de dichos elementos estructurales, dignos merecedores de ser reconocidos y conservados como precursores de la mecánica científica moderna que se desarrollaría en América a partir del siglo XIX (configurando además nuevas líneas conceptuales posteriormente asimiladas por las arquitecturas de Félix Candela o Eladio Dieste en el siglo XX), estableciendo así la iniciación al estudio del capítulo estructural en la historia de la construcción y, desde luego, un interesante e importante motivo de investigación para futuras tesis sobre el patrimonio arquitectónico hispanoamericano.

REFERENCIAS

Broca, A. (2017). *La Fortaleza de San Carlos. La más destacada obra defensiva de tierra adentro en el territorio nacional*. Editora del Gobierno del Estado de Veracruz.

Calderón, J. A. (1949). Ingenieros militares en Nueva España. *Anuario de Estudios Americanos*.

Calderón, J. A. (1984). *Historia de las fortificaciones en Nueva España*. (2ª ed.). Gobierno del Estado de Veracruz, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Escuela de Estudios Hispanoamericanos.

Capel, H. (1983). *Los ingenieros militares en España - siglo XVIII. Repertorio biográfico e inventario de su labor científica y espacial*. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.

Feu, A. (2017). *Les voltes de rajola doblada. Construcció i seguretat estructural de les esglésies barroques catalanes*. (Tesis doctoral). Departamento de Tecnología de Arquitectura. Universitat Politècnica de Catalunya.

Galindo, J. A. (1996). *El conocimiento constructivo de los ingenieros militares del siglo XVIII. Un estudio sobre la formalización del saber técnico a través de los tratados de arquitectura militar*. (Tesis doctoral) Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (Universitat Politècnica de Catalunya).

Gómez, J. (2012). *La estática gráfica. Instrumento para el conocimiento estructural intuitivo y el diseño de los arquitectos*. (Tesis doctoral) Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia (Universitat Politècnica de Valencia).

Heyman, J. (1982). *The Masonry Arch*. Ellis Horwood, Halsted Press.

Heyman, J. (1995). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.

Lluís, J. (2013). El contexto del saber constructivo del ingeniero militar en el arte abaluartado en el territorio y plaza de Tortosa (1580-1852). En Segovia, F., Nóvoa, M. *El arte abaluartado en Cataluña. Estrategia de defensa en el siglo XVIII*. Editado por el Ministerio de Defensa de España.

Lluís, J. (2015). La mecánica ilustrada en los ingenieros militares españoles. El proyecto de los almacenes de pólvora (1715-1798). *Informes de la Construcción*, vol. 67.

Ortiz, J. E. (1993). *Arquitectura militar de México*. Secretaría de la Defensa Nacional. Ediciones del Equilibrista y Turner Libros.

Sanz, S. E. (2009). *Proyecto Ejecutivo para la rehabilitación de la Fortaleza de San Carlos. Investigación histórica. Documental*. Fortalezas.org. DGOP SEDESMA.