



Análisis Constructivo de la Bóveda Anular del Palacio de Carlos V

Maria Esther Puertas García¹

Bernardino Líndez Vílchez²

Rafael Gallego Sevilla³

David López Martín⁴

Resumen: La estereotomía de la bóveda que constituye el pórtico inferior del patio del palacio de Carlos V en Granada conforma un sistema estructural autoestable, pero durante la fase de construcción el conjunto sería inestable sin el empleo de medios auxiliares. Las técnicas de investigación histórica basadas en inspecciones visuales y la consulta de fuentes documentales conjugadas con la lógica estructural, la optimización de recursos y medios auxiliares permiten alcanzar hipótesis sobre el proceso constructivo de la bóveda. Estas hipótesis pueden analizarse de forma detallada y precisa empleando modelos numéricos que simulen el comportamiento estructural en los primeros estados de la construcción. En este trabajo se presentan modelos de elementos finitos considerando un análisis estático y el comportamiento elástico del material, que sirve de base a la investigación histórica para validar las hipótesis planteadas sobre el proceso constructivo de la bóveda toroidal.

Palabras clave: Bóveda Anular; Proceso Constructivo; Modelo Numérico; Método de los Elementos Finitos.

Análise da construção da abóbada anelar do palácio de Carlos V

Resumo: A estereotomia da abóbada que constitui o pórtico inferior do pátio do palácio de Carlos V em Granada forma um sistema estrutural auto-estável, porém durante a fase de construção o conjunto seria instável sem o uso de meios auxiliares. As técnicas de pesquisa histórica baseadas em inspeções visuais e a consulta de fontes documentais conjugadas com a lógica estrutural, bem como a otimização de recursos e meios auxiliares permitem chegar a hipóteses sobre o processo construtivo da abóbada. Essas hipóteses podem ser analisadas de forma detalhada e precisa usando modelos numéricos que simulam o comportamento estrutural nos primeiros estágios de construção. Neste artigo, são apresentados modelos de elementos finitos, considerando-se uma análise estática e o comportamento elástico do material, que serve de base para pesquisas históricas para validar as hipóteses levantadas sobre o processo de construção da abóbada toroidal.

Palavras-chave: Abóbada Anular; Processo de Construção; Modelo Numérico; Método dos Elementos Finitos.

¹ Doctora en Ingeniería Civil. Profesora del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica. (Universidad de Granada). E-mail: epuertas@ugr.es

² Arquitecto Técnico. Doctor en Arquitectura, Licenciado en Historia del Arte por la Universidad de Granada. Profesor de Historia de la Arquitectura, Composición Arquitectónica y Patrimonio Edificado, gestión y conservación, asignaturas de grado en las escuelas de Arquitectura e Ingeniería de Edificación. Coordinador y profesor del Curso de Experto Propio en Refuerzo, Reparación y Recuperación de Estructuras en Obras de Edificación, Escuela de Postgrado de la UGR. Profesor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la UGR. Email: blindez@ugr.es

³ Graduado en Ingeniería Industrial. Profesor del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica (Universidad de Granada).

⁴ Profesor del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica (Universidad de Granada).

Construction Analysis of the Annular Vault of Carlos V Palace

Abstract: The toroidal vault that covers the lower portico in the courtyard of the Palace of Charles V in Granada presents a structurally self-supporting system. However, during construction, the structure is unstable and auxiliary supporting elements are required. Historical research techniques, based on visual inspections, historic document assesment, together with the logic of structural work and construction materials and resources optimization lead to hypothesis about how the vault was actually built. This hypothesis is subject to escrutiny in this paper, by a numerical model to simulate the structural behavior during the first stages of the vault erection. In this paper several finite based static models are presented, in order to validate the construction process of the toroidal vault proposed earlier in the literature.

Keywords: Annular Vault; Construction Analysis; Numerical Model; Finite Element Method.

Introducción

El creciente interés en la protección, conservación y rehabilitación de construcciones históricas ha motivado una interesante línea de investigación dedicada al desarrollo de herramientas que permitan analizar y evaluar de forma eficiente su comportamiento. Es destacable la atención especial que recibe el estudio de los elementos estructural de fábrica curvos, tales como arcos, cúpulas y bóvedas (BOOTHBY, 2001).

Las bóvedas presentan un comportamiento estructural basado en similares premisas que el de los arcos pero más complejo debido al carácter tridimensional de la estructura ya que la forma geométrica es generada por el movimiento de un arco a lo largo de un eje. Existen numerosos estudios que analizan el comportamiento estructural de este tipo de construcciones empleando tanto métodos clásicos como numéricos, obteniendo las cargas límite de estabilidad (MILANI, 2008; CARINI, 2012) o examinando el comportamiento dinámico de éstas frente a sismo para analizar su vulnerabilidad (KHAN, 2018).

A diferencia de las bóvedas de cañón, cuyo comportamiento estructural es exactamente igual al de un arco, la bóveda hemi-toroidal, al ser una lámina de doble curvatura, sinclástica en el exterior y anticlástica en el interior, aporta un mecanismo de equilibrio adicional debido a las tensiones circunferenciales de compresión en los círculos interiores, que estabiliza el conjunto.

El comportamiento estructural en la fase constructiva de estos elementos singulares no se ha desarrollado hasta la fecha ya que la complejidad del cálculo se incrementa al desconocer detalles sobre los métodos de construcción de la época si no han sido debidamente documentadas. En consecuencia, es difícil establecer hipótesis de cálculo que conduzcan a resultados precisos.

Este trabajo se centra en el análisis constructivo de la bóveda toroidal del patio del Palacio de Carlos V, ubicado dentro del conjunto monumental de la Alhambra de Granada (figura 1). Para el estudio se ha empleado un modelo numérico que permite verificar la validez de las hipótesis planteadas anteriormente por los autores (LINDEZ, 2015; LINDEZ, 2016).

Figura 1. Vista del palacio de Carlos V dentro del conjunto monumental de La Alhambra.

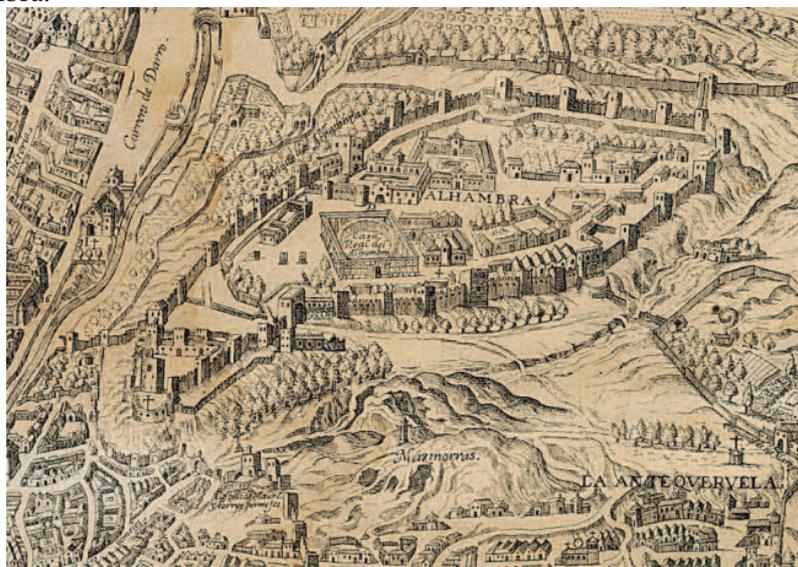


Fuente: Fotografía de los autores.

La bóveda anular del patio del Palacio de Carlos V

La historia del palacio de Carlos V se inicia en 1526 con la visita a Granada del Emperador Carlos V e Isabel de Portugal, en la que recién casados, deciden fijar en la Alhambra su residencia. No sólo este hecho sino también la necesidad de reforzar la figura del Emperador debido a las delicadas relaciones con las Comunidades de Castilla y con el Papa Clemente VII, confluyen en la idea de realizar un gran palacio imperial dentro del recinto (ROSENTHAL, 1988).

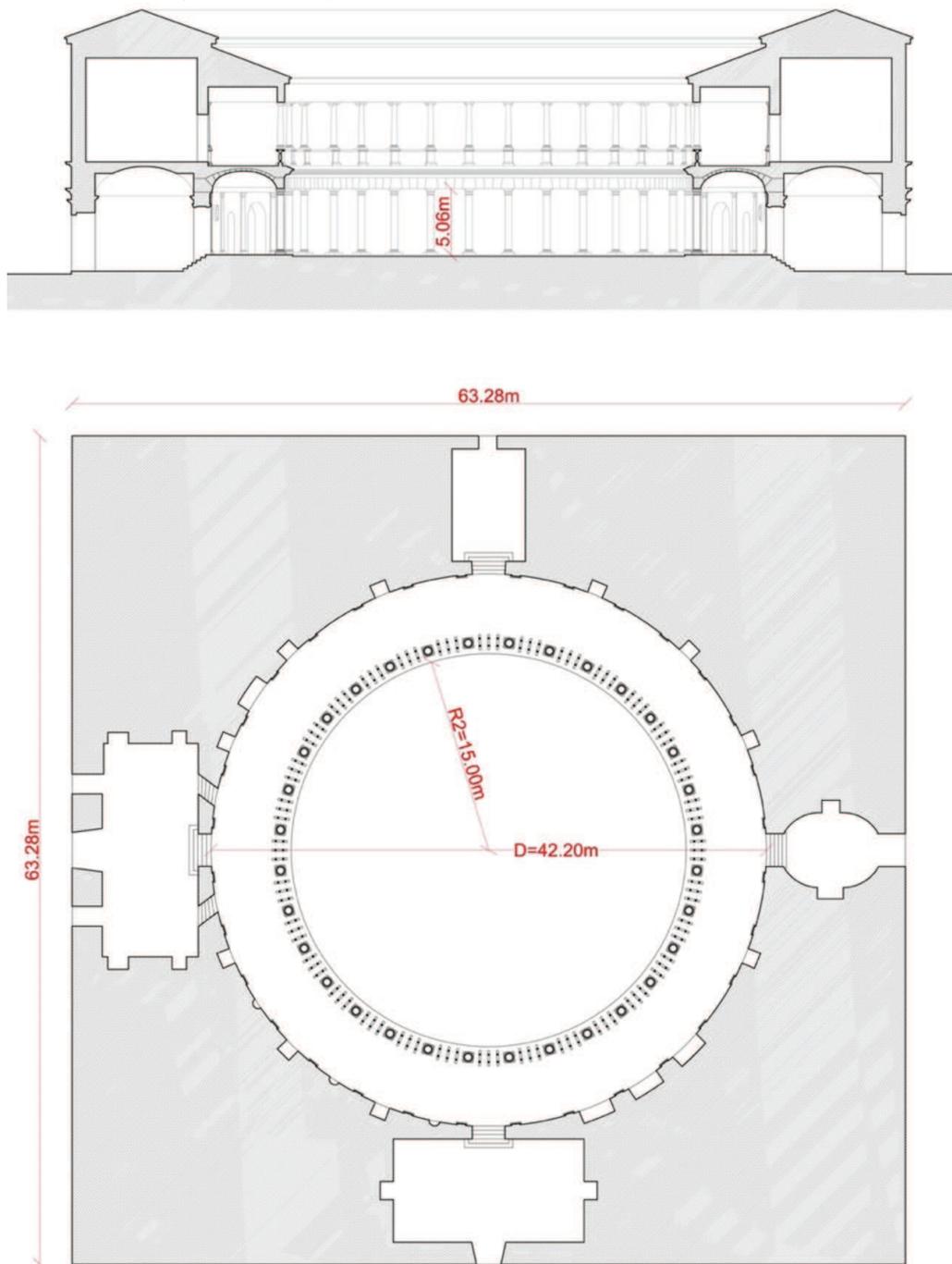
Figura 2. Detalle de la Plataforma de Ambrosio de Vico (1572) dónde se representa el Palacio de Carlos V dentro del recinto de la Alhambra.



Fuente: <http://bibliotecadigitalhispanica.bne.es:80/webclient/DeliveryManager?pid=936754> .

La realización del proyecto queda delegada a D. Luis Hurtado de Mendoza, segundo Conde de Tendilla y gobernador de la Alhambra que junto el arquitecto Pedro Machuca trazan la idea original del palacio configurada por dos figuras geométricas que conforman la planta, el círculo que define el patio central y el cuadrado, coincidente con la planta exterior del edificio (figura 3). El círculo asociado a lo eterno y absoluto, representando la Bóveda Celeste y el cuadrado representando la Tierra, en el ámbito de lo humano y delimitado por los cuatro puntos cardinales. El simbolismo de las figuras geométricas se completa con el octógono que representa la capilla como figura de transición y vínculo religioso entre ambas concepciones (TAFURI, 1987).

Figura 3. Esquema de planta y sección del palacio.



Fuente: Elaboración Marta Rodríguez Ituarriuga. In: LÍNDEZ, B; RODRÍGUEZ, M. La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada. Hipótesis constructiva. **Informes de la Construcción**, 67 (540), 2015.

La originalidad de la planta, sin antecedentes en la arquitectura palatina italiana del cuatrocientos presenta un paralelismo claro en el diseño del patio circular, tanto con el Teatro Marítimo de la Villa Adriana en Tívoli, cuyo diámetro del patio es coincidente, como con el Tempietto de San Pietro in Montorio de Bramante (Figura 4).

Figura 4. Teatro Marítimo de la Villa Adriana en Tívoli y Tempietto de San Pietro in Montorio.



Fuente: Fotografía de los autores.

El patio central es sin duda la gran figura de este edificio. Inicialmente fue concebido con un corredor formado por una bóveda que apoyaba en un doble anillo de pilares con semicolumnas adosadas en su frente (GALERA, 1995). Luis Machuca, hijo de Pedro Machuca, que seguiría al frente de las obras tras la muerte de su padre, cambia la idea original del corredor para construir la bóveda apoyada sobre un muro circular en el exterior y un anillo horizontal interior soportado por 32 columnas de orden dórico. La bóveda que construye es por tanto de tipo toroidal, generada por la rotación de un arco carpanel por tranquil alrededor de una directriz vertical coplanaria con el arco generatriz. Está realizada en piedra calcarenita bioclástica de las canteras de Santa Pudia en Escúzar, Granada (figura 5).

Figura 5. Bóveda del patio central del Palacio de Carlos V.

Fuente: Fotografía de los autores.

Durante el siglo XVI se construyeron varias bóvedas tóricas en España (SALCEDO, 2016) pero ésta es la única que presenta eje vertical. Aunque existen vestigios a lo largo de la historia en los que se presenta bóveda anular o tórica con eje vertical, tales como el Teatro de Marcelo en Roma (13-11 a.C.), la martiria paelocristinana de Santa Constanza en Roma (siglo IV), el Castillo de Bellver (siglo XIV) en Palma de Mallorca o el claustro del Monasterio de Sierra del Pilar (1538) en Oporto (figura 6), la singularidad de la del Palacio de Carlos V reside en su estereotomía que destaca por el empleo de grandes dovelas en relación a las dimensiones del elemento estructural, y ejecutadas de tal forma que encastran con total limpieza y perfección sobre muro y columnas, sin la necesidad de construir grandes apoyos a ambos lados o el uso de nervaduras para estabilizar la estructura (GALLETTI, 2017).

Figura 6. Monasterio de Sierra del Pilar en Oporto (izquierda) y Castillo del Bellver en Palma de Mallorca (derecha).

Fuente: Manuelvbotelho, Wikimedia (izquierda) y fotografía de los autores (derecha).

Supuesto constructivo de la bóveda

Un análisis exhaustivo de la bóveda permite discernir que en el lado del muro la primera dovela forma parte de la fábrica de éste y se ejecuta previamente. Del mismo modo, el anillo interior que conforma el arco adintelado se ofrece también como primera dovela de un total de 15 que pueden contarse en la sección de la bóveda anular.

Por tanto (figura 7), en primer lugar se realizaría el muro perimetral exterior con el arranque de la primera dovela. A continuación, se resolvería el anillo interior, colocando las 32 columnas y una cimbra anular plana que sostuviera verticalmente las dovelas de la primera hilada. Tras la finalización de las dos líneas de apoyo, se dispondrían codales horizontales entre el muro perimetral exterior y el anillo horizontal interior coincidentes con los ejes de columnas, o incluso en mayor número. Estos codales se ajustarían mediante cuñas, proporcionando una precompresión inicial al anillo horizontal interior, necesaria para la estabilización de este arco, como se verá más adelante.

Existe una junta de dovelaje perfectamente visible en el lado norte del zaguán oriental que corresponde al inicio y fin en el cierre del dovelaje. Hay otras tres, mucho más delgadas, que coinciden con puntos débiles de la estructura envolvente, probablemente fruto de ligeras deformaciones de ésta, magnificadas ante nuestros ojos por torpes intervenciones restauradoras (LÍNDEZ, 2016).

El anillo horizontal interior gracias al apuntalamiento en su trasdós es capaz de resistir los empujes horizontales que las secciones construidas ejercen sobre el mismo, como se justifica en la siguiente sección mediante modelos numéricos.

Figura 7. Idealización del proceso constructivo de la bóveda.



Fuente: Elaboración Marta Rodríguez Iturriaga.

Modelo numérico para la validación del supuesto constructivo

La bóveda toroidal es un sistema estructural mecánicamente autoestable al finalizar la construcción, tal y como queda justificado aplicando la teoría de la membrana (LÍNDEZ, 2016). Los empujes hacia el exterior son absorbidos por el muro perimetral al que está empotrada la bóveda mientras que los empujes

hacia el interior se equilibran gracias al arco horizontal apoyado sobre las columnas.

Sin embargo, durante el proceso constructivo la estructura no cuenta con el mecanismo de equilibrio que proporciona la doble curvatura anticlástica del interior. Al ejecutar la primera sección de bóveda y retirar la cimbra, los empujes hacia el interior harían colapsar al anillo horizontal, en ausencia de apuntalamiento. En el supuesto constructivo se propone el acodamiento exterior descrito en la sección anterior, que se justifica a continuación mediante una serie de modelos estructurales de Elementos Finitos.

Los modelos numéricos son una herramienta muy eficiente para analizar el comportamiento estructural de estructuras de fábrica (IVORRA, 2009; TRALLI, 2014). Concretamente, el Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido aplicado para el análisis estructural de bóvedas permitiendo estudiar el comportamiento de estas geometrías complejas, bajo cargas tanto estáticas como dinámicas. La combinación del MEF con modelos constitutivos avanzados del material, modelos de daño y técnicas de optimización ha permitido obtener resultados realistas (PARENT, 2014; D'ALTRI, 2017) del comportamiento de estas construcciones.

En este caso, se ha desarrollado una simulación numérica empleando el MEF que permite corroborar las hipótesis constructivas anteriormente expuestas. Se han realizado varias simulaciones, la primera consiste en la modelización tridimensional de una sección de la bóveda entre columnas, representando la primera fase y más crítica del proceso constructivo de la bóveda. En esta fase se pueden obtener las reacciones que la sección de bóveda transmite al anillo horizontal interior. La segunda fase consiste en modelizar el comportamiento del anillo horizontal ante estos empujes horizontales en fase de construcción. En los modelos se supone un comportamiento elástico lineal del material que es válido para este análisis, ya que las tensiones de compresión a las que está sometido el material serán muy bajas, y las zonas traccionadas son pequeñas, como se verificará en los resultados.

Propiedades mecánicas del material

La bóveda está construida en piedra calcarenita bioclástica de las canteras de Santa Pudia en el término municipal de Escúzar, Granada. Esta roca sedimentaria es la más empleada en la construcción y ornamentación del patrimonio granadino. La caracterización y descripción de la morfología interna del elemento estructural y sus conexiones es difícil de determinar pero los ensayos no destructivos permiten homogeneizar las propiedades mecánicas del material. La calcarenita se ha caracterizado empleando la técnica no destructiva denominada Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW en sus siglas en inglés), e Impacto-Eco realizado en la misma tipología de roca existente en la Iglesia de los Santos Justo y Pastor (MARTÍNEZ-SOTO, 2018). Las propiedades obtenidas se resumen en la tabla 1 y se puede comprobar que se ajustan a los valores descritos en (UROSEVIC, 2011).

Tabla 1. Propiedades del material.

Densidad	1.850 gr/cm ³
Velocidad ondas P	3929 m/s
Velocidad ondas S	220 m/s
Velocidad ondas de Rayleigh	2026 m/s
Módulo de elasticidad dinámico (E_d)	22,84 GPa
Módulo de elasticidad estático (E_s)	18,65 GPa
Módulo de rigidez dinámica (G_d)	8,84 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Resistencia a compresión	38,65 MPa
Cohesión	1-20 MPa
Ángulo de rozamiento interno	25-35°

Fuente: Elaboración propia.

Análisis estructural de una sección de bóveda entre columnas

Las cargas transmitidas al anillo interior durante el proceso de construcción de la bóveda se han obtenido mediante un modelo tridimensional consistente en la sección de bóveda entre columnas (figura 8). Se considera un espesor uniforme de 15 cm, estimado a partir de la distancia entre la clave de la bóveda y la galería superior (GALERA, 1995).

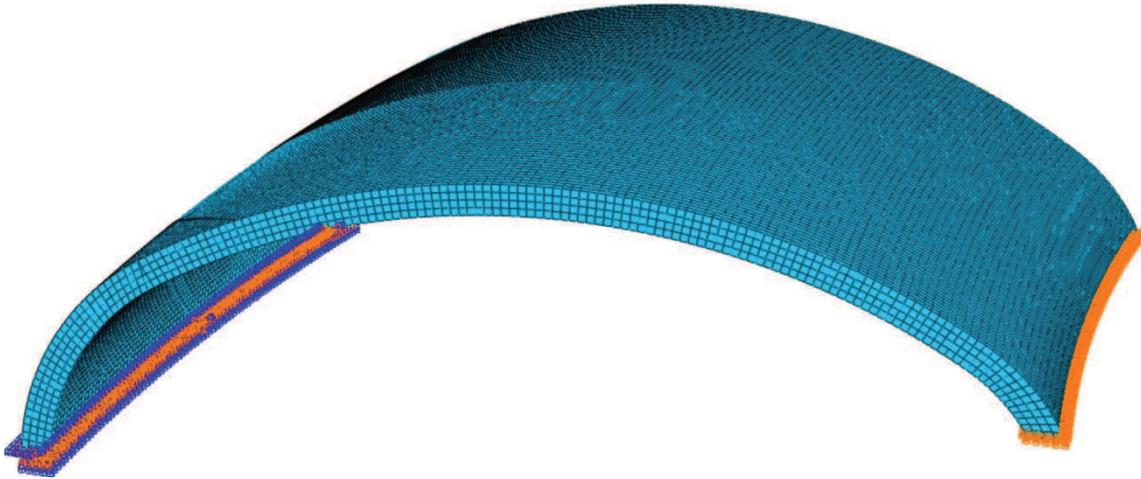
Para la discretización se han empleado 51392 elementos hexaédricos de ocho nodos, definiendo un tamaño de elemento tal que existen al menos cuatro elementos en el espesor a fin de representar adecuadamente el comportamiento a flexión en la bóveda. Se considera el comportamiento del material elástico lineal e isótropo como se justifica más arriba.

Para el análisis estructural de la sección se tienen en cuenta únicamente las cargas verticales debidas al peso propio y se establecen condiciones de apoyo fijo en la zona de la sección que está sobre las columnas y en toda superficie que está sobre el muro exterior.

Los resultados del cálculo se resumen en la figura 9 donde se representa la máxima tensión principal en la sección de la bóveda. En ésta se puede apreciar cómo se asemeja el comportamiento al del arco y el efecto que tiene la componente tridimensional debido a la deformabilidad del arco adintelado. También se confirma que los valores obtenidos están muy por debajo de los límites del material por lo que el comportamiento elástico lineal supuesto es realista.

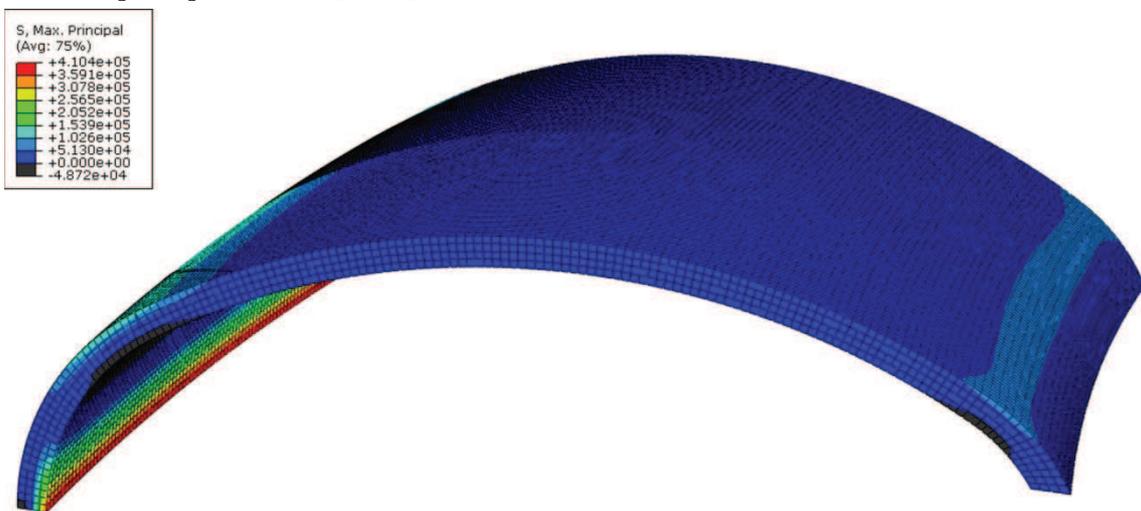
La resultante de tensiones sobre las columnas permite establecer la magnitud de la acción que ejerce la sección sobre el anillo horizontal que alcanza un valor de 13,09 kN, principalmente en dirección radial (ver Fig. 10).

Figura 8. Modelo de elementos finitos de la sección de bóveda entre columnas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Tensión principal máxima [N/m²].



Fuente: Elaboración propia.

Análisis estructural del anillo horizontal

La segunda fase del cálculo consiste en comprobar la estabilidad del anillo horizontal circular sometido a las cargas que transmite una sección de bóveda entre columnas. El comportamiento de este anillo se puede analizar mediante un modelo unidimensional de viga curva (figura 10). Para la discretización se han empleado 318 elementos unidimensionales. En este caso también se considera el modelo de comportamiento del material elástico e isótropo.

La geometría y dimensiones de la sección del conjunto se ha obtenido considerando la primera hilada de dovelas de la bóveda puesto que son las que generan el anillo circular (figura 11). El espesor en planta del anillo es de 50 cm.

Se establecen condiciones de apoyo coincidentes con las columnas, que impiden únicamente el desplazamiento radial. Estos apoyos representan la acción de los codales horizontales descritos más arriba.

La acción de estos codales es no-lineal, pues resisten compresión pero no tracción, ya que no están trabados a las dovelas.

En la figura 12 (izquierda) se representan las reacciones en los codales que apuntalan exteriormente el anillo horizontal, que son muy pequeñas en todos, salvo en los dos contiguos a la sección de la bóveda. Las reacciones sobre los codales emplazados en las columnas contiguas es de 10.04 kN, pero de tracción sobre el codal, lo cual implica que estos dejan de actuar como apoyo.

Por ello, se plantea de nuevo el cálculo pero eliminando los codales de los pilares contiguos a la sección, obteniéndose en este caso las reacciones en los codales que se muestran en la figura 12 (derecha). En este caso todos los codales están a compresión, por lo que actúan como apoyos.

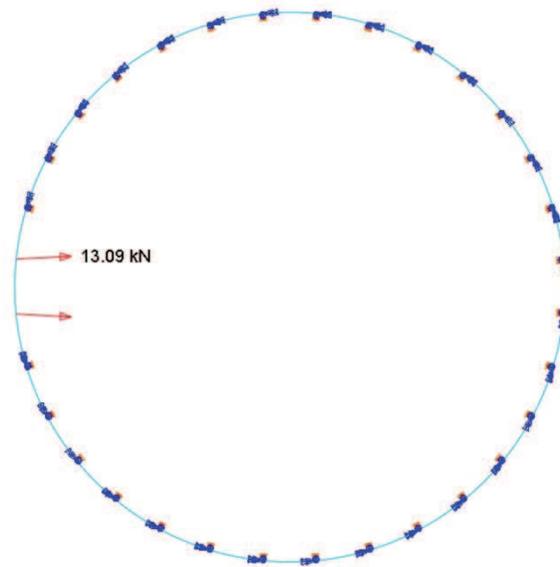
En la figura 13 se representa el axil en el anillo horizontal, de compresión en todo el anillo, variando entre ~30 kN y ~34 kN, es decir, prácticamente constante.

En la figura 14 se presenta la distribución de tensiones normales en la sección del anillo horizontal. Se observa que existen pequeñas zonas de tracción en la cara interior del anillo, en las cabezas de los pilares donde están aplicados los empujes, lo cual indicaría que se produciría una separación parcial de las dovelas en estas regiones, lo cual puede comprometer la estabilidad del anillo.

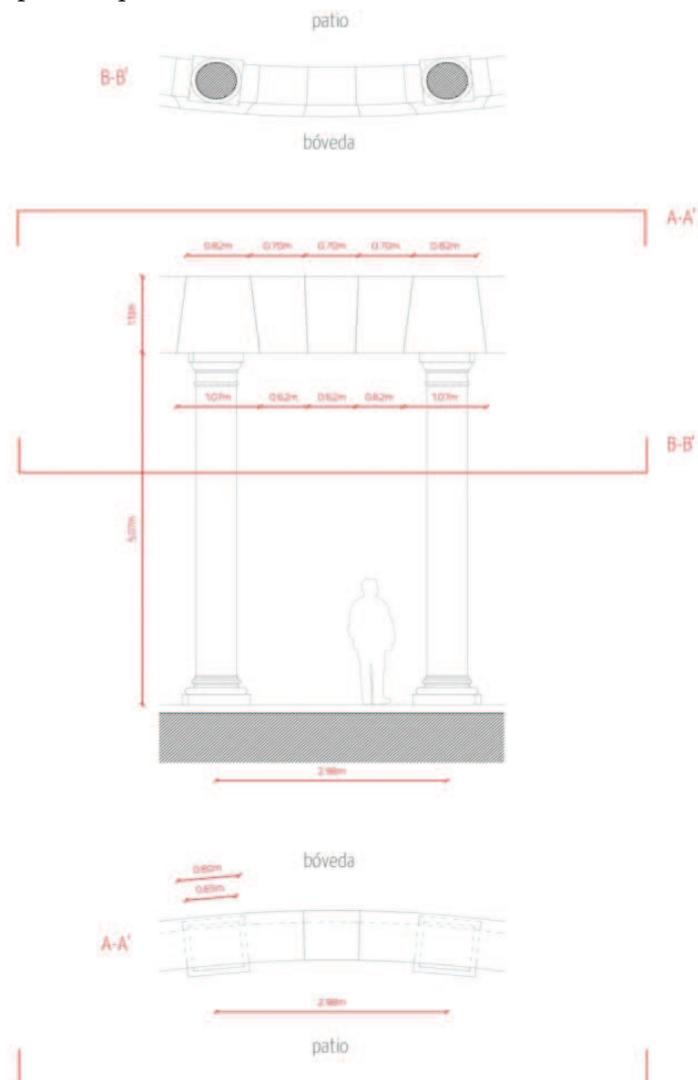
Veamos este aspecto en detalle: la tensión máxima de tracción obtenida en la sección del anillo es de 230,1 kN/m². Esta tracción no existiría si el arco horizontal tuviera una precompresión de ~126,6 kN, que quedaría de esta forma estabilizado. Como se ha comentado más arriba, la precompresión pueden proporcionarla los codales que apuntalan el anillo desde el exterior. La fuerza por unidad de arco que deberían aportar para proporcionar la precompresión de 126,6 kN sería de 8 kN/m, lo cual implica una fuerza en cada puntal de unos 24 kN. Suponiendo una sección del codal de 20x20 cm la cuña necesaria para aportar esa fuerza sería mínima (apenas micras), por lo que basta encajar los codales para que el arco quede estabilizado.

Por otra parte, hay que recordar que otro mecanismo estabilizador proviene de que el anillo horizontal también actúa como arco adintelado, por lo que a las tensiones que salen de este análisis para los empujes habrá que añadir las que se obtienen por la acción vertical, que serán de compresión en estas secciones reduciendo también las tracciones.

Por último, aunque no se analiza en el modelo de elementos finitos propuesto, hay que señalar que el acodalamiento propuesto impide que el anillo horizontal colapse por pandeo, ya que la carga de pandeo de un tramo de arco es mucho mayor que el axil existente.

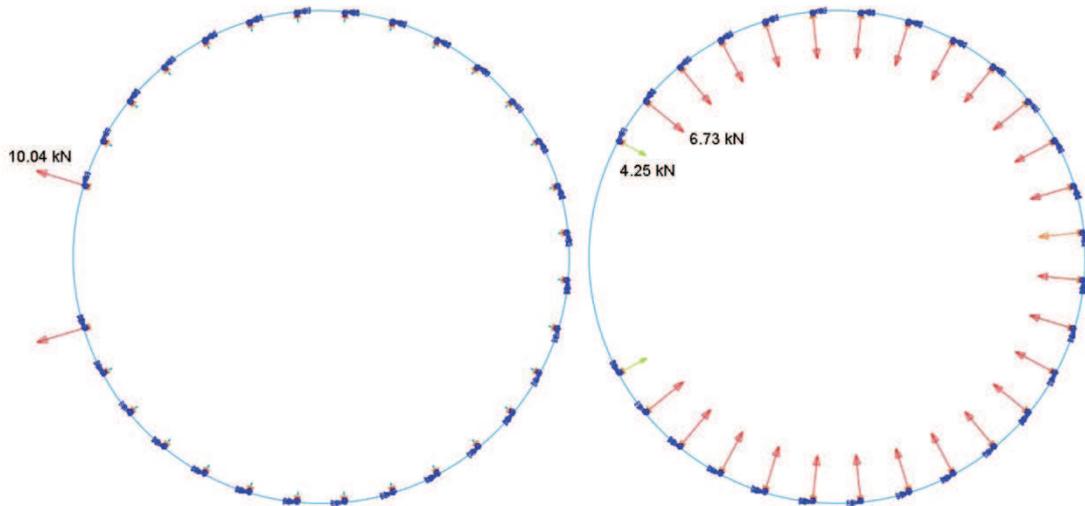
Figura 10. Cargas transmitidas al anillo.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Planta y alzado del pórtico que contiene el arco adintelado en el anillo interior.

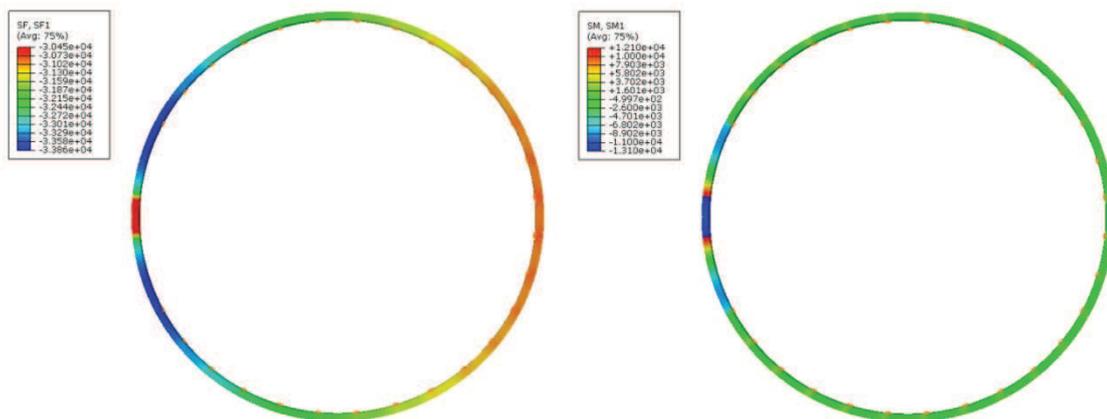
Fuente: Elaboración Marta Rodríguez Iturriaga, publicado en LINDEZ, 2015.

Figura 12. Reacciones transmitidas a los codales contiguos (izquierda) y reacciones en el interior del arco bajo la acción de los codales (derecha).



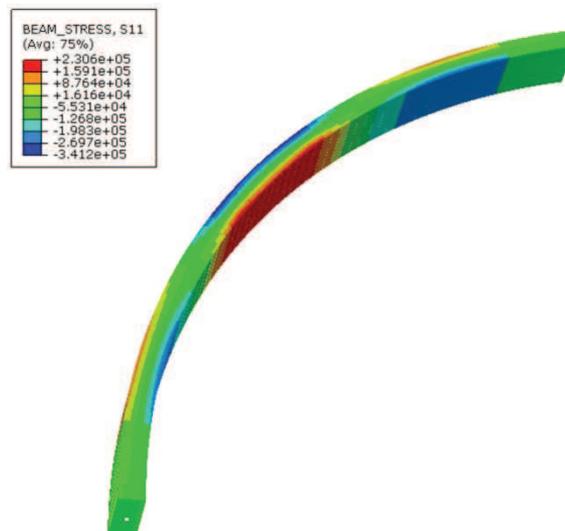
Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Axil [N] (izquierda) y flector [N m] (derecha) en el anillo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Distribución de tensiones [N/m²] sobre la sección del anillo en la zona sometida a carga.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La principal contribución de este trabajo es la validación de la hipótesis constructiva para la bóveda toroidal del palacio de Carlos V en Granada, anteriormente presentada por los autores y que estaba basada en la optimización de recursos y medios auxiliares, y apoyada en inspecciones visuales del conjunto y modelos estructurales más simples. El empleo del Método de los Elementos Finitos da una respuesta realista a la distribución de solicitaciones en la bóveda describiendo racionalmente el comportamiento de la estructura en su fase de construcción, bajo el mínimo posible de simplificaciones geométricas y del material. El análisis numérico del comportamiento estructural durante la fase de construcción contribuye a la ampliación de conocimiento de la historia del monumento, y nos permite vislumbrar cómo pudieron ser las técnicas constructivas empleadas, a pesar de que no han quedado recogidas en documentos de la época.

El sello imperial, signo de posesión de la totalidad, como observa Manfredo Tafuri, queda aquilatado en el palacio del Emperador, el Cesar de Roma, en uno de los mejores ejemplos de pureza arquitectónica del clasicismo español. “Por otro lado ejemplifica de manera excepcional el difícil problema compositivo y de articulación arquitectónica del producto de dos culturas de altísima calidad estética, evidenciando figurativamente su contraste, manifiesto desde las múltiples panorámicas que ofrece su emplazamiento, pero a la vez enfatizando los fuertes vínculos que las unen por sus similitudes, no solo desde el punto de vista formal, sino por su ascendencia común, la arquitectura clásica” (LÍNDEZ, 2015). Tradición y modernidad en la Granada del siglo XVI se complementan en la definición de uno de los más extraordinarios conjuntos monumentales: el Patrimonio Alhambra.

Referencias

- BOOTHBY, Thomas E. Analysis of masonry arches and vaults. **Progress in Structural Engineering and Materials**, 3, 2001. pp. 246-256.
- CARINI, A; GENNA, F. Stability and strength of old masonry vaults under compressive longitudinal loads: Engineering analyses of a case study. **Engineering Structures**, 40, 2012. pp. 218-229.
- CHIARUGI, A; FANELLI, A; GIUSEPPTTI, G. Diagnosis and strengthening of the Brunelleschi Dome. In: **IABSE Symposium 1993**, IABSE, Zürich, 1993.
- D'ALTRI, A.M; CASTELLAZZI, G; DE MIRANDA, S; TRALLI, A. Seismic-induced damage in historical masonry vaults: A case-study in the 2012 Emilia earthquake-stricken area. **Journal of Building Engineering**, 13, 2017. pp. 224-243.
- GALERA, Pedro Antonio. **El Palacio de Carlos V: La idea arquitectónica**. En RODRÍGUEZ, J.P. (Coord.). El Palacio de Carlos V. Un siglo para la recuperación de un monumento. Editorial Comares, 1995.
- GALLETTI, Sara. Stereotomy and The Mediterranean: Notes Toward an Architectural History. **Mediterranea, International Journal on the transfer knowlegde** 2, 2017. pp. 73-120.
- KHAN M.A., PAUL D.K. Seismic Performance of Masonry Arches and Vaults. In: RODRIGUES, H., ELNASHAI, A., CALVI, G. (eds) Facing the Challenges in Structural Engineering. **GeoMEast 2017**. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham, 2018.
- LÍNDEZ, B; RODRÍGUEZ, M. La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada. Hipótesis constructiva. **Informes de la Construcción**, 67 (540), 2015.
- LÍNDEZ, B; LÓPEZ, D; GALLEGO, R. La bóveda toroidal del palacio de Carlos V en Granada. **Quaderns d'Estructures**, n. 57, 2016. pp. 27-52.

- LÓPEZ, Rafael. El Renacimiento en Granada. Cuadernos de Arte Español, **Historia 16**, n. 18, 1992.
- MARTÍNEZ-SOTO, F; PUERTAS, E; GALLEGO, R; SUÁREZ, F.J. Using spectral analysis of surface waves to characterize construction materials in built cultural heritage: The Church of San Justo y Pastor. **6th International Conference on Heritage and Sustainable Development**, Granada, 2018.
- MILANI, E; MILANI, G; TRALLI, A. Limit Analysis of masonry vaults by means of curved shell finite elements and homogenization. **International Journal of Solids and Structures**, 15, 2008. pp. 5258-5288.
- PARENT, T; DOMENE, N; SELLIER, A; DUJARRIER, C. **Structural analysis of masonry historical construction: Ribbed-vault case study**. Conference: Structural Faults and Repairs, London, 2014.
- ROSENTHAL, Earl Edgar. **El Palacio de Carlos V en Granada**. Alianza Editorial, 1988.
- SALCEDO, M; CALVO, J. La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada. Levantamiento y análisis geométrico y constructivo. **EGA, Expresión Gráfica Arquitectónica**, vol. 21, núm. 28, 2016.
- TAFURI, M. El Palacio de Carlos V en Granada: arquitectura 'a lo romano' e iconografía imperial. Granada: **Cuadernos de la Alhambra**, 24, 1987. pp. 77-108.
- TRALLI, A; ALESSANDRI, C; MILANI, G. Computational Methods for Masonry Vaults: A Review of Recent Results. **The Open Civil Engineering Journal**, 8, 2014. pp. 272-287.
- UROSEVIC, M; SEBASTIÁN, E; RUIZ, E; CARDELL, C. Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España. **Materiales de Construcción**, 301 (61), 2011. pp. 93-114.

Recebido em 22/04/2018.

Aceito em 08/06/2018..