

CODE 1.6

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE UNA BÓVEDA TABICADA DE CRUCERÍA A ESCALA REAL SOMETIDA A ASIENTO VERTICAL EN UNO DE SUS APOYOS

**Juan J. Moragues^{1*}; Benjamín Torres²;
Pedro A. Calderón³; José M. Adam⁴; Teresa M. Pellicer⁵**

1: ICITECH, Universitat Politècnica de València
e-mail: jmorague@upv.es, web: <http://www.upv.es/entidades/ICITECH/>
2: e-mail: bentorgo@upvnet.upv.es
3: e-mail: pcaldero@upv.es
4: e-mail: joadmar@upv.es
5: e-mail: tpa@upv.es

PALABRAS CLAVE: Bóveda; Obra de fábrica; Vulnerabilidad; Patrimonio; Estudio experimental

RESUMEN

La sociedad actual está cada vez más concienciada con la necesidad de mantener el patrimonio construido. A pesar de los esfuerzos que se han venido llevando a cabo para mantener dicho patrimonio, aún queda mucho trabajo por hacer. Una de las mayores preocupaciones actuales viene de los fallos que pueden ocasionar las acciones accidentales y eventos extremos sobre los edificios que el ser humano emplea para diferentes usos. De acuerdo con las necesidades actuales, en el ICITECH (Universitat Politècnica de València) se está desarrollando el proyecto SIMAX, mediante el cual se pretende estudiar, entre otras acciones, el efecto de los asientos del terreno en diferentes elementos estructurales de obra de fábrica. Recientemente, se ha ensayado una bóveda tabicada de crucería a escala real, con unas dimensiones en planta aproximadas de $4 \times 4 \text{ m}^2$. Dicha bóveda de crucería, que es idéntica a las existentes en la iglesia de San Lorenzo de Castell de les Cabres (Castellón, España), ha sido sometida a un asiento en uno de sus apoyos con el fin de caracterizar su comportamiento. Este artículo muestra los resultados preliminares más significativos del ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas de nuestras construcciones históricas están hechas de obra de fábrica. Este material presenta unas características que lo hacen especialmente complejo a la hora de evaluar su estabilidad y seguridad, ya que presenta una resistencia a tracción muy reducida y, por lo general, una resistencia a compresión muy superior a las solicitaciones a las que se ve sometido [1]. Además, está formado por elementos frágiles, ladrillos y mortero, que lo hacen especialmente sensible a las deformaciones. Concretamente, las bóvedas de crucería son un tipo singular de estructura de obra de fábrica muy presente en nuestro parque de estructuras históricas, así como en iglesias y otros monumentos. Para este tipo de estructura, los asientos diferenciales y las variaciones térmicas son, junto con las vibraciones, las acciones más desfavorables a las que puede verse sometida [2,3].

Los asientos diferenciales tienen unos efectos negativos en la estabilidad de las bóvedas de crucería, ya que éstos provocan deformaciones y modificaciones en la geometría original, giros y desplomes verticales [4]. De forma más general, los movimientos en los apoyos de una bóveda de crucería pueden provocar la formación de mecanismos que se traducen directamente en la aparición de grietas, las cuales pueden verse deterioradas con el paso del tiempo debido a efectos medioambientales (variaciones de

temperatura y humedad) y mecánicos (fatiga y fluencia, entre otros) [5]. Algunos de los ejemplos más impactantes que ponen en escena el reto de evaluar la estabilidad de bóvedas de crucería sometidas a asientos del terreno puede verse en los asientos diferenciales de estructuras abovedadas de Venecia debido a suelos blandos [6], los asientos en las naves de la Catedral de Milán debido a subsidencia [7] o los de la Catedral de Agrigento, debido a problemas de inestabilidad de laderas [8].

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las bóvedas de crucería sometidas a asientos verticales, durante los últimos años se han realizado modelizaciones numéricas y modelos teóricos de comportamiento. La modelización numérica de las estructuras de obra de fábrica exige emplear complejas y potentes herramientas informáticas junto con parámetros del material como el módulo de elasticidad, rigidez, resistencia a tracción, compresión y cortante del ladrillo y del mortero que los une, ángulo de rozamiento, cohesión, energía de fractura, etc [2]. Debido a las dificultades en caracterizar las propiedades de la obra de fábrica, los ensayos experimentales de laboratorio resultan claves para aproximarse al comportamiento real de este tipo de estructuras. Sin embargo, dada la complejidad y el elevado coste de la realización de ensayos a escala real, existen pocas investigaciones realizadas en este ámbito.

El presente artículo muestra los principales resultados obtenidos tras un ensayo a escala real de una bóveda tabicada de crucería, sometida a un asiento vertical en uno de sus apoyos. En primer lugar, se define el ensayo experimental y los diferentes elementos que intervienen. A continuación, se describen los materiales empleados, el proceso constructivo adoptado y se detalla la instrumentación instalada sobre la bóveda. Finalmente se muestran los principales resultados obtenidos y las conclusiones.

2. DEFINICIÓN DEL ENSAYO EXPERIMENTAL

2.1 Geometría.

El ensayo que se plantea en esta investigación consiste en someter a una bóveda tabicada de crucería a un desplazamiento vertical en uno de sus apoyos, simulando de esta forma un asiento del terreno. El objetivo que se persigue es evaluar su comportamiento estructural ante este tipo de acciones extraordinarias a partir de los datos recogidos por una red de sensores instalados en la bóveda. Para ello, se ha construido una bóveda de crucería a escala real.

La bóveda a ensayar ha sido definida tomando como referencia las bóvedas existentes en la Iglesia Parroquial San Lorenzo de Castell de Cabres (Castellón, Spain). Esta iglesia, cuya construcción data de 1750, presenta bóvedas vaídas en la nave central y bóvedas tabicadas de crucería en las naves centrales y sobre el baptisterio. Una de las bóvedas tabicadas de crucería, concretamente la que se encuentra sobre el almacén del coro, ha colapsado, habiendo perdido dos cuartos de su superficie (Figura 1a) correspondiente a toda la superficie entre dos aristas [9]. Se desconoce la fecha y el motivo del hundimiento parcial de este elemento, aunque todo parece apuntar que los asientos del terreno fueron una de las causas principales.

Para el ensayo experimental propuesto, las distancias entre los ejes de las bases de apoyo en las dos direcciones han sido de 4 metros. La altura total de la bóveda con respecto al suelo ha sido de 2.51 metros, teniendo en cuenta la altura de las bases de apoyo (Figura 1b). Los cuatro arcos se construyen mediante cimbra, tienen sección semicircular con un diámetro de 3.6 metros y una flecha en el centro de 1.8 metros. El espesor de los arcos es de 16 cm y están formados por cuatro roscas de ladrillo, yeso, mortero de cemento y mortero de cal. El resto de la superficie de la bóveda está constituida por dos roscas de ladrillo. La primera de ellas se consigue a base de ladrillo y yeso. La segunda rosca está construida con ladrillos y mortero de cal. Para simular la existencia de otras bóvedas contiguas e impedir el libre desplazamiento horizontal de las bases de apoyo de la bóveda, se disponen perfiles metálicos HEB-140 que unen las bases de apoyo entre sí, creando una celosía en este plano. Las bases de apoyo S1, S2 y S4 tienen libre el desplazamiento horizontal en dos direcciones. Además, la base S1 es la base

a la que se le aplica el desplazamiento vertical impuesto. La base S3 es una base fija que tiene impedido los desplazamientos en todas direcciones.



Figura 1. (a)- Colapso en bóveda tabicada de crucería en la Iglesia Parroquial San Lorenzo de Castell de Cabres (Castellón, España). (b)- Imagen de la bóveda una vez construida en los laboratorios de ICITECH, UPV.

2.2 Materiales.

En la construcción de la bóveda se ha empleado mortero de cemento, mortero de cal, y pasta de yeso. Se ha empleado hormigón en la parte superior de cada base de apoyo. Los materiales empleados han sido controlados mediante los correspondientes ensayos mecánicos de evaluación de resistencias, de acuerdo a las indicaciones de la normativa [10]. El ladrillo empleado es cerámico macizo y de dimensiones $23 \times 11 \times 2.6$ cm con un peso específico de 1.78 g/cm^3 . La cal empleada es hidráulica con puzolana natural perteneciente a la casa comercial GRUPO PUMA [11]. El cemento empleado tiene una clase resistente de 42.5 MPa. La Tabla 1 indica las dosificaciones, en kg, de cada uno de los materiales empleados, así como las resistencias a compresión y a flexotracción de cada uno de ellos.

Tabla 1. Dosificación en kg y resistencias del mortero de cemento, mortero de cal, yeso y hormigón.

Kg	Cemento	Arena	Grava	Agua	Cal	Yeso	Resistencia compresión MPa (28 días)	Resistencia flexotracción MPa (28 días)
Mortero de cemento	5	25	-	3.6	-	-	16.1	3.6
Mortero de cal	-	-	-	3.5	25	-	9.4	2.1
Pasta de yeso	-	-	-	3	-	18	2.4	7.22
Hormigón	190	470	450	90	-	-	29.5	4.4

2.3 Procedimiento constructivo.

Preparadas y niveladas las cuatro bases de apoyo, el proceso constructivo de ambas bóvedas se inicia con la construcción de los cuatro arcos. Los arcos se han construido mediante el empleo de cimbras de acero.

Sobre la cimbra se construye la primera rosca de los arcos, formada por ladrillo y pasta de yeso. Sobre ella, e inmediatamente tras finalizarla, se construye la segunda rosca formada por ladrillo y mortero de cemento, de forma que se consigue una mayor rigidez para estos elementos. Construido el arco, su descimbrado se realiza a las 48 horas. El proceso se repite para los cuatro arcos.

Construidos los arcos, se inicia la construcción de la superficie de la bóveda. Para ello, se inicia con la primera rosca a base de ladrillos y pasta de yeso. La segunda rosca, de ladrillo con mortero de cal, apoya directamente sobre la primera, la cual sirve de encofrado perdido. La Figura 2 muestra una secuencia del proceso constructivo de la bóveda.

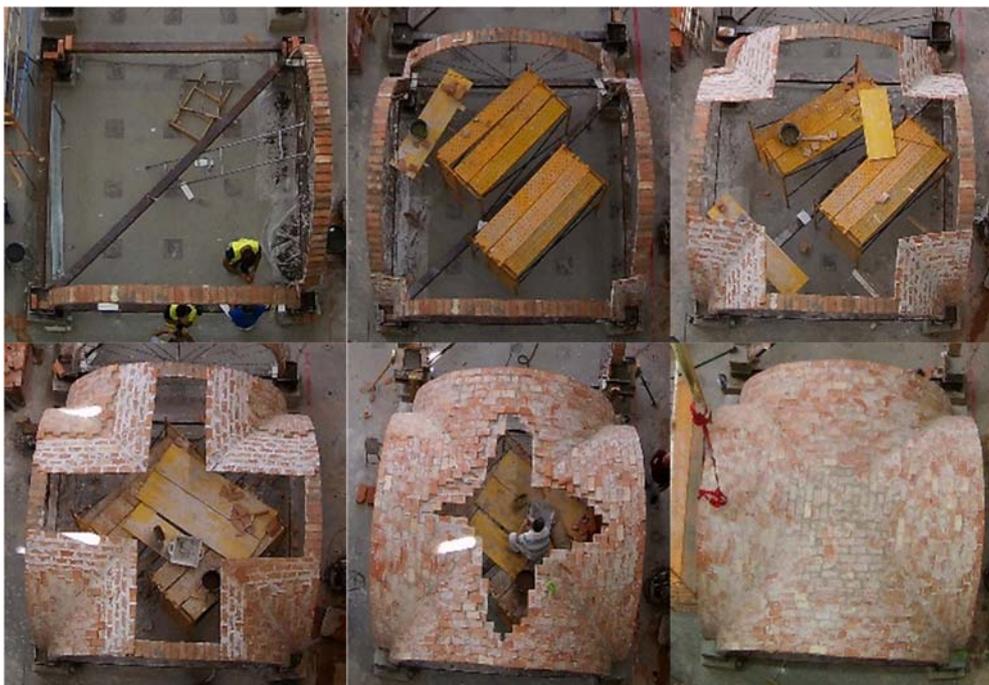


Figura 2. Secuencia del proceso constructivo de la bóveda.

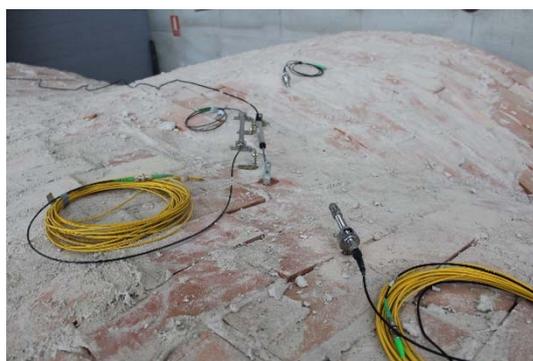
2.4 Monitorización.

Los parámetros controlados durante el ensayo son:

- La evolución de las reacciones en cada una de las bases.
- Las deformaciones en los puntos críticos, donde se espera la aparición de fisuras.
- Las fuerzas en los tirantes metálicos HEB-140.
- Los principales desplazamientos, verticales y horizontales, en las bases de apoyo.



(a)



(b)

Figura 3. Instrumentación instalada sobre la bóveda. (a)- Galgas extensométricas sobre base de apoyo. (b)- LVDT y sensores de fibra óptica en clave de bóveda en su cara superior.

Las reacciones verticales han sido medidas empleando galgas extensométricas, a partir de la rigidez a axil de la base de apoyo. Las deformaciones en los puntos críticos se han registrado mediante dos tipos de sensores. Por un lado, se han empleado *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) de

longitudes 60 y 40, cm. Por otro lado, se han empleado sensores de fibra óptica de longitud, basados en FBG [12] de longitudes 1 metro y 28 cm. Las fuerzas en los tirantes metálicos que unen bases de apoyo han sido medidas mediante el empleo de galgas extensométricas instaladas en el punto medio del alma del perfil. Los desplazamientos verticales y horizontales han sido medidos empleando sensores LVDT. La Figura 3 muestra algunas imágenes de los sensores empleados.

3. RESULTADOS.

3.1 Desplazamientos verticales impuestos.

La aplicación de la carga se ha realizado empleando gatos mecánicos instalados sobre la base de apoyo S1. Como se disponen dos gatos mecánicos paralelos, ha sido necesario sincronizar el movimiento de ambos para garantizar un asiento prácticamente vertical, sin posibilidad de giros.

El desplazamiento impuesto se ha aplicado en escalones, de forma lenta y paulatina. Entre escalones, se ha dejado un tiempo prudencial para que las medidas de deformación, desplazamiento horizontal en apoyos, reacciones en las bases de apoyo y fuerza en tirantes se estabilicen. La Figura 4 muestra el desplazamiento vertical impuesto sobre la base de apoyo S1. Se muestra el asiento medido por dos captadores de desplazamiento colocados diametralmente opuestos en la base de apoyo S1 (Z1 y Z2), así como su valor medio. Se observa que la base asienta manteniéndose prácticamente horizontal. El desplazamiento máximo impuesto alcanzado ha sido de 39 mm, momento en que se decidió finalizar el ensayo ante la aparición de grietas en zonas importantes. Además, y dado el interés en su futura reparación, se decidió no alcanzar mayores niveles de daño en la estructura.

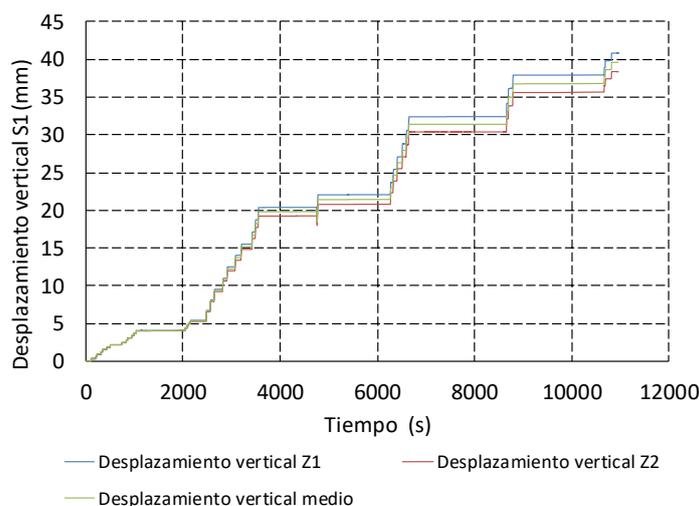


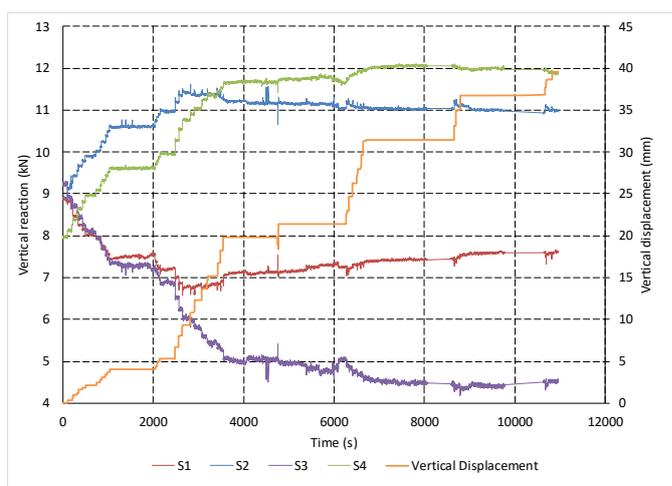
Figura 4. Desplazamiento vertical impuesto en base de apoyo S1.

3.2 Evolución de reacciones.

La evolución de las reacciones en las bases de apoyo se muestra en la Figura 5.a. A la vista de los resultados, se observa que la reacción de la base S1 (base que asienta) disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 6.8 kN lo que supone una pérdida porcentual de un 25% con respecto a su valor inicial. Este valor mínimo se alcanza cuando el asiento vertical es de 10 mm aproximadamente. A partir de este instante, esta reacción permanece relativamente estable durante el resto del ensayo.

Las reacciones en las bases S2 y S4 (bases adjuntas a la base que asienta S1) aumentan de forma análoga durante la primera parte del ensayo. Sin embargo, a partir del instante correspondiente a 2570 segundos desde el inicio del ensayo, se observa que la base S2 no sigue cargando e incluso sufre una pequeña descarga. La reacción máxima alcanzada por S2 es de 11.4 kN, lo que supone un incremento de un 27% con respecto a la que tenía al inicio del ensayo, debido únicamente a peso propio de la bóveda. Tras esta pequeña descarga, el valor de la reacción permanece constante en un valor de 11 kN hasta el final del

ensayo. Este comportamiento en la evolución de la reacción en S2 se debe a la rotura del arco que arranca en S2 hacia la base de apoyo fija S3 (Figura 5.b). La rotura se produce muy próxima a la base de apoyo lo que provoca la descarga de su reacción y redistribución de esfuerzos en el resto de la bóveda. En cuanto a la reacción S4, ésta siempre aumenta hasta alcanzar un valor máximo de 12.1 kN. A partir del instante correspondiente al segundo 3700, esta reacción se mantiene relativamente constante hasta el final del ensayo. Esto implica que la reacción S4 ha incrementado su valor en un 50% con respecto a la reacción al inicio del ensayo. En las proximidades de la base S4 no se han observado grietas que puedan provocar descargas en esta reacción, motivo por el cual esta reacción siempre muestra una tendencia creciente. La reacción de la base de apoyo S3 ha sido calculada a partir del equilibrio de fuerzas verticales. A la vista de los resultados, la reacción en S3 evoluciona de forma muy similar a la reacción S1: se descarga hasta alcanzar un determinado valor de asiento, momento a partir del cual la reacción permanece prácticamente constante.



(a)

(b)

Figura 5. (a)-Evolución de las reacciones verticales en las bases de apoyo S1, S2, S3y S4. (b)- Rotura del arco que arranca en S2 hacia la base de apoyo S3.

3.3 Identificación de fisuras y grietas.

Los estudios teóricos realizados sobre el comportamiento de la bóveda arrojaron que la zona de mayores tensiones principales de tracción se localizaba en la cara superior de la clave de la bóveda, a lo largo del arco de elipse que une las bases S2 y S4. Este modelo fue realizado con el software LUSAS [13]. La Figura 6.a muestra la grietas detectadas en esta zona, que coinciden con los resultados teóricos esperados (Figura 6.b). Las grietas aparecieron a partir de un asiento de 10 mm. En este caso, la grieta aparece recorriendo las juntas entre los distintos ladrillos.

3.4 Desplazamientos y deformaciones mecánicas.

La medida de desplazamientos y deformaciones ha sido realizada empleando sensores de fibra óptica y LVDT. La figura 7 muestra los desplazamientos en mm en la clave de la bóveda en su cara superior. Se observan desplazamientos máximos que, en algunas zonas y al finalizar el ensayo, alcanzan valores en torno a 2.3 mm, que corresponde con la abertura máxima de grieta. En otras, el valor mínimo medido ha sido en torno a 1 mm. A partir de los desplazamientos medidos, se puede obtener que para asientos de 5 y 10 mm, las tensiones de tracción en la zona de la clave de la bóveda son de 1.05 y 1.57 MPa aproximadamente (Suponiendo un módulo de elasticidad del material de 2100 MPa). Es a partir de estos valores cuando cabría esperar la aparición de las primeras grietas. Esto se identifica en torno al intervalo de tiempo 2400 s.

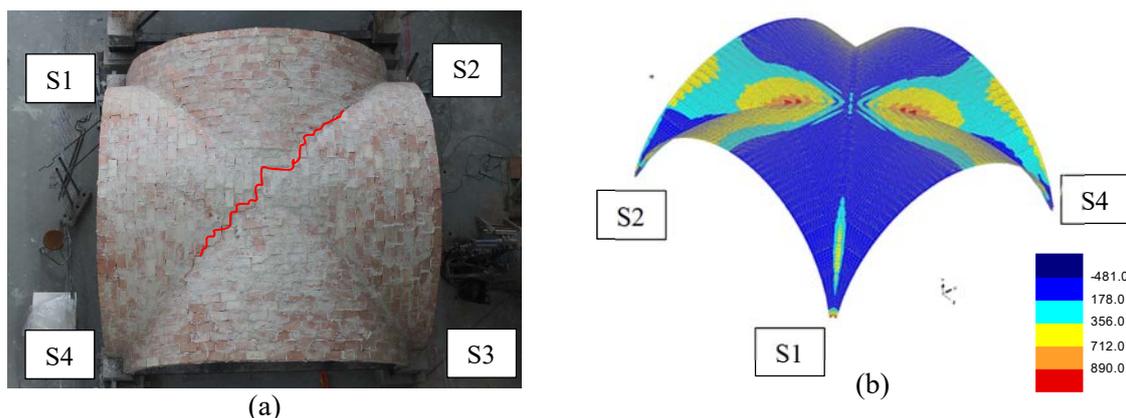


Figura 6. Grietas en la bóveda. (a). Cara superior, arco de elipse que une las bases de apoyo S2 y S4. (b)- Modelo numérico de elementos finitos, donde se observan las mayores tensiones principales de tracción, en KPa, para un asiento de 10 mm en el arco de elipse antes mencionado.

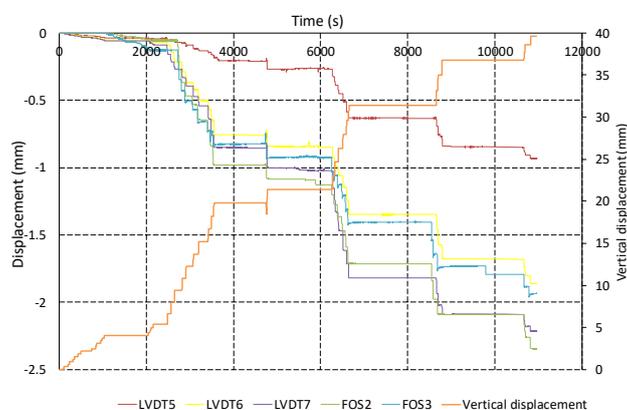


Figura 7. Desplazamientos (mm) en distintos puntos de la clave de la bóveda en su cara superior.

4. CONCLUSIONES.

Este artículo presenta el ensayo experimental realizado sobre una bóveda tabicada de crucería a escala real (distancias entre apoyos de 4 metros) en los laboratorios del Instituto ICITECH de la UPV. El ensayo consistió en imponer un desplazamiento vertical sobre una de las bases de apoyo de la bóveda y registrar, a partir de una serie de sensores instalados de forma estratégica, la pauta de comportamiento de la bóveda. Los resultados experimentales han sido contrastados con los resultados teóricos obtenidos a partir de un modelo numérico de elementos finitos. A la vista de los resultados mostrados, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- El desplazamiento máximo aplicado a la bóveda fue de 3.9 cm. Con un asiento de este orden de magnitud, se han observado importantes grietas en clave de la bóveda y en algunos arcos, lo que ha obligado a finalizar el ensayo, con el objetivo de no dañar más la estructura y poder realizar una futura reparación.
- Durante el asiento, las reacciones de cada apoyo sufren importantes modificaciones:
 - o El apoyo que asienta (S1) ha sufrido una descarga de un 25% con respecto a su reacción inicial.
 - o Una de las bases, concretamente la S4, ha incrementado su reacción en un 50%, al no presentarse ninguna grieta en las zonas próximas.
 - o La reacción del apoyo S2 ha sufrido un incremento correspondiente a un 27% con respecto a su valor original en la primera parte del ensayo. El valor de la reacción permanece constante en un valor de 11 kN hasta el final del ensayo. Este comportamiento en la evolución de la reacción en S2 se debe a la rotura del arco que arranca en S2 hacia la base de apoyo fija S3.

- La clave de la bóveda en su cara superior ha presentado grietas que recorren las juntas a lo largo del arco de elipse que une las bases S2 y S4. Este comportamiento ha sido contrastado con los resultados numéricos de un modelo de elementos finitos. Al finalizar el ensayo, se han registrado aberturas de grietas en torno a 2.4 mm.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores quieren expresar su gratitud al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad por la financiación del proyecto BIA 2014-59036-R y a las empresas Levantina Ingeniería y Construcción SL y Grupo Puma, por su ayuda y colaboración.

Referencias:

- [1] J. McInerney & M. J. DeJong. Discrete Element Modeling of Groin Vault Displacement Capacity. *International Journal of Architectural Heritage* Vol. 9, Iss. 8, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2014.923953>
- [2] Kaspars Bondars, Aleksandrs Korjakins. Heritage groin vault model generation for the safe exploitation limits definition. *The 10th International Conference on Modern Building Material, structures and techniques*. May, 2010. Vilnius, Lithuania.
- [3] Theodossopoulos, D & Sinha, BP 2008, 'Structural safety and failure modes in Gothic vaulting systems'. In *Eighth International Seminar on Structural Masonry*. Istanbul.
- [4] Sinan Acikgok, Kenichi Soga, Jim Woodhams. Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses. *Construction and Building Materials* 150 (2017) 916–931
- [5] D. Watt, B. Colston, Investigating the effects of humidity and salt crystallisation on medieval masonry, *Build. Environ.* 35 (2000) 737–749.
- [6] Foraboschi P. Specific structural mechanics that underpinned the construction of Venice and dictated Venetian architecture. *Eng Fail Anal* 2017;78:169–95
- [7] Cardani G, Coronelli D, Angjeliu G. Damage observation and settlement mechanisms in the naves of the Cathedral of Milan. In: *Proc. of 10th Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2016)*, 13–15 September 2016, Leuven, Belgium. CRC Press. p. 623–30.
- [8] Valore C, Ziccarelli M. The preservation of Agrigento Cathedral. In: *Proc of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2–6 2013, Paris. p. 3141–44.
- [9] Sáez Riquelme, Beatriz. Iglesias Salón Valencianas del S. XVIII. Levantamiento gráfico, análisis geométrico y constructivo, patología común. Tesis Doctoral. Departamento de Sistemas Industriales y Diseño. Mayo, 2013
- [10] UNE-EN-196-1. Método de ensayos de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. Noviembre 2005
- [11] www.grupopuma.com
- [12] Benjamín Torres Górriz, Pedro Calderón García, Ignacio J Payá-Zaforteza, Salvador Sales Maicas. Experimental and numerical analysis of a hybrid FBG long gauge sensor for structural health monitoring. *Meas. Sci. Technol.* 2014; 25: 125107-125122.
- [13] Lusas. Lusas Reference Manual. Surrey (UK); 2010.