

Estudio de la seguridad estructural de la iglesia de San Prudencio en Talavera de la Reina

Analysis of the structural safety of the St. Prudencio's Church in Talavera de la Reina

Javier León^{*, a}, Leonardo Todisco^b

^a Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos. FHECOR. jlg@fhecor.es

^b Dr. Ingeniero civil. FHECOR. ltt@fhecor.es

RESUMEN

Este artículo presenta las diferentes fases del estudio de seguridad estructural de la iglesia de San Prudencio en Talavera de la Reina. Para empezar, se ha intentado reconstruir la historia constructiva y clínica de la iglesia. Después, se han desarrollado unos análisis estructurales para evaluar la seguridad de los elementos estructurales con mayor riesgo. Concretamente, el artículo se centra en la actuación en la bóveda de cañón de la nave central, donde se ha incrementado el número de lengüetas y se han recrecido las existentes hasta alcanzar la cota ideal establecida en trabajos de investigación recientes. Se demuestra cómo una actuación sencilla permite duplicar el nivel de seguridad de dicha bóveda.

ABSTRACT

This article presents the different phases that characterized the structural safety study of the church of San Prudencio, located in Talavera de la Reina. First, several attempts have been made to reconstruct the constructive and clinical history of the church. Afterwards, structural analyses have been developed to assess the safety of the structural elements with the highest risk. Specifically, the article focuses on the analysis of the barrel vault of the central nave, where the number of stiffeners was increased and the height of existing ones were increased until reaching an ideal level according to recent research. The paper demonstrates how a simple intervention can duplicate the safety factor of the vault.

PALABRAS CLAVE: relleno, equilibrio, fábrica, seguridad, línea empujes, desplazamiento límite.

KEYWORDS: backfill, equilibrium, masonry, safety, thrust line, limit displacement.

1. Introducción

Este artículo describe el análisis de vulnerabilidad estructural de la iglesia de San Prudencio (también conocida como de Santa Catalina) en Talavera de la Reina, Toledo. El templo, situado al este de la más conocida iglesia Colegiata de Santa María la Mayor o “Colegial”, ha estado en obras durante buena parte de su existencia y presenta una serie de elementos arquitectónicos y estructurales que le dan un carácter único.

2. Descripción de la estructura

2.1 Breve reseña histórica

Se resumen aquí las principales etapas constructivas de la iglesia, a partir de los documentos [1-4]. El monasterio fue fundado a finales de 1367 por don Pedro Tenorio, quien, rompiendo con la tradición de aislamiento de la Orden de los Jerónimos, propuso su instalación en el casco histórico. El monasterio inicial, fundado por

Bula Papal de Benedicto XIII en 1397, tenía una superficie muy limitada que pronto quedó pequeña. A mediados del siglo XV, se decidió construir un nuevo templo. A partir de esta fecha, es posible identificar 5 fases diferenciadas de construcción:

a) 1452-1528: se construye la parte occidental de la nave de la iglesia.

b) 1536-1566: las escasas dimensiones de la iglesia llevaron a la decisión de construir un nuevo templo, cuyas trazas posiblemente fueran encargadas a Alonso de Covarrubias. En 1566 se concluyen la sacristía y el púlpito. Esta etapa es la fase renacentista pura del edificio.

c) 1567-1600: a partir de 1567 se decide terminar el cerramiento del crucero. En 1567, Pedro de Tolosa (aparejador de El Escorial) visitó la obra y [1] “puso alguna dolencia en el seguro de la obra: por las dos hendeduras que tenía el mampuesto de entre las dos pichonas y dos arcos... porque me parecía gran carga las pechinas con los evangelistas, con media vara de relieve”. Aunque Pedro de Tolosa no estaba vinculado a la obra, expuso su valoración profesional a los problemas estructurales que estaban afectando la estructura en aquel momento. Esta información es de gran interés para este trabajo porque deja constancia de que las dos grandes grietas (en la venera y en la bóveda) existían ya en aquella época. Las mencionadas opiniones de Pedro de Tolosa contrastaban con las ideas de Juan de Zumárraga, maestro de obra en aquel momento, y se decide seguir construyendo el cerramiento del crucero. En la última década del s. XVI se construyen el contrafuerte corrido, los machones en la esquina suroeste, el contrafuerte en la esquina sureste (probablemente por indicación de Juan de Herrera) y el Balcón de la Reina. Asimismo, cabe mencionar que, en una fecha no unívocamente identificada, tuvo lugar el colapso de la cúpula.

d) 1601-1644: en este periodo se terminan la cúpula (1622) y la cubierta de la nave bajo el arquitecto Nicolás de Vergara el Mozo.

La conclusión de la obra tiene fecha de 27 de septiembre de 1641.

e) 1850-1900: modificaciones varias exteriores al edificio principal. Según las fuentes consultadas, el terremoto de Lisboa de 1755 provoca daños como el que se “desprende una dovela del óculo de la plaza”. En la fig. 1 se muestra una instantánea del fotógrafo galés Charles Clifford. Finalmente, en la década de los noventa del siglo XX [8], se consolida la cúpula principal (mediante un sistema de pretensado) y se acondicionan las cubiertas.

En definitiva, la iglesia de San Prudencio ha estado en obras durante buena parte de su existencia, ha sufrido muchos cambios y ha vivido la intervención de diversos maestros, todo lo cual hace muy complicado, por no decir imposible, reconstruir con exactitud su historia constructiva.



Figura 1. Instantánea de Clifford de 1864

2.2 Descripción general

El cuerpo principal del edificio (en rojo en la fig. 2) presenta una geometría caracterizada por una falsa cruz latina en planta, cuyos brazos tienen una longitud igual a la anchura de la nave principal. Al norte del edificio principal se sitúan una edificación añadida (en amarillo), la sacristía (en azul), a la cual se accede mediante una puerta en el “brazo” norte, y un espacio cuadrado (en verde) que alberga una escalera volada en piedra, de acceso al coro. La única entrada desde el exterior está situada en la fachada sur.

Las figs. 3 y 4 muestran el alzado sur y la cubierta, obtenidos mediante fotogrametría.

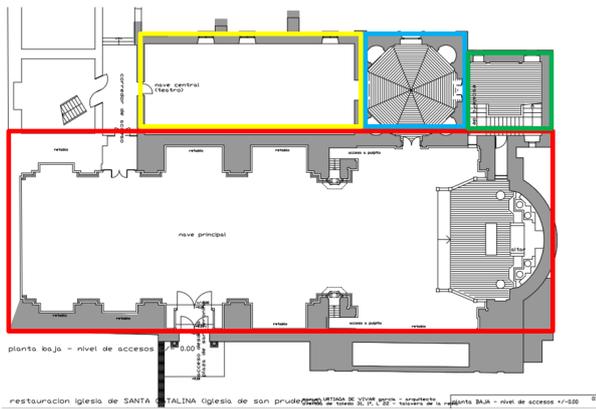


Figura 2. Planta baja



Figura 3. Alzado sur

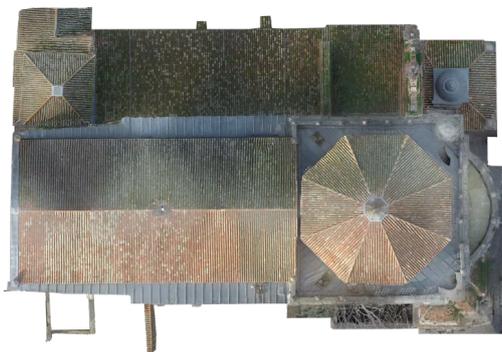


Figura 4. Fotogrametría de las cubiertas

Cabe agrupar los elementos estructurales que forman la iglesia en 3 grupos principales: a) nave principal, b) crucero y ábside, y c) cúpula de sacristía y escalera de acceso al coro.

2.2.1. Nave principal

La nave principal constituye el espacio central de la iglesia, entre los pies de la misma y el crucero. Tiene dos pisos y su planta es rectangular, de 12,5 m de ancho y 28,0 m de largo. Ese espacio se cubre mediante una bóveda de medio cañón, dividida en tres módulos definidos por arcos fajones que se aprecian claramente en la fig. 5. Los arcos fajones, como la bóveda de

cañón, están realizados en fábrica de ladrillo, aunque el trampantojo induzca a creer que es sillería de granito.

El trasdós de la bóveda que cubre este espacio de la nave principal es accesible desde la cubierta del edificio (fig. 6). Por encima de la bóveda de cañón (con lunetos en ciertas crujías) existe una cubierta a dos aguas, de madera, que apoya en los muros laterales y está atirantada horizontalmente por medio de elementos metálicos que recogen los empujes de la cubierta.

La bóveda está formada por dos roscas de rasilla, con un espesor total, incluidos los enlucidos, de $e = 12$ cm. Por tanto, puesto que la luz libre L es de 12,50 metros, la esbeltez es muy considerable: $L/e = 104$.

La bóveda está rigidizada mediante unas lengüetas dispuestas a intervalos variables entre ellas, y no siempre situadas en las mismas secciones transversales. Estos elementos tienen una importancia enorme en la estabilidad de la bóveda, tal y como se ha demostrado en recientes investigaciones en la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid [5]. Cabe añadir que esta tipología de relleno rígido es frecuente, y se encuentra, por ejemplo, en ubicaciones y en tipologías estructurales tan diferentes como la Lonja de Valencia o la iglesia de Santa María en Melgar de Fernamental (Burgos).



Figura 5. Nave principal desde el interior, hacia el oeste, antes de la intervención

Se ha observado una fisura en clave de bóvedas y de arcos perpiaños (fig. 7), asociada

sin duda a un movimiento de los muros norte y sur. La causa más probable estaría relacionada, como es habitual en construcciones de este tipo, con la percolación de agua desde la coronación del muro a través del relleno entre hojas de los lienzos de los muros, o con un giro o asiento de la cimentación que lleva, a igualdad de empujes, a movimientos debidos a la pérdida de rigidez de los muros con relación a la situación original.



Figura 6. Trasdós de la nave principal antes de la intervención

Además, se han encontrado fisuras tipo Sabouret entre el arco formero de los ventanales y la bóveda de los lunetos (fig. 8). Son la consecuencia lógica del movimiento horizontal de apertura de la bóveda por giro de los muros respecto a la base. También pueden ser el resultado, aunque los muros no hubiesen girado y, por tanto, los arranques no hubiesen sufrido movimientos impuestos, de fenómenos de fluencia y retracción de los morteros, que provocan una variación de longitud de la directriz, incompatible con las condiciones iniciales de apoyo. Son grietas muy frecuentes en estructuras de fábrica con bóvedas de aristas o de lunetos, o también de crucería, y dividen la estructura en una serie de bloques que, frente a un movimiento impuesto de separación relativa de los muros en que se apoyan, dan lugar a movimientos como los que se esquematizan en la parte inferior de la fig. 8.



Figura 7. Fisura arco fajón

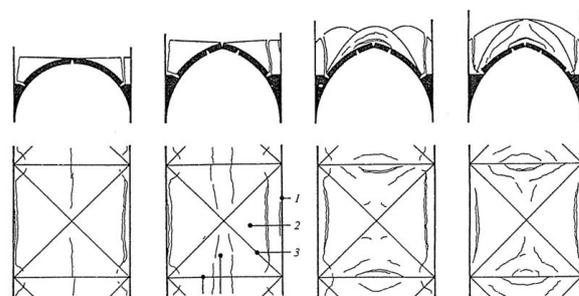
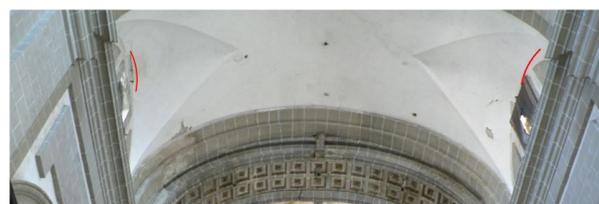


Figura 8. Fisuras tipo Sabouret (en rojo en la foto superior). Abajo, una casuística de fisuras de este tipo para distintas bóvedas según R. Barthel [6].

2.2.2. Crucero y ábside

El crucero tiene una geometría en planta de 13,7×17,0 m y está delimitado por cuatro arcos torales y rematado por una cúpula de media naranja sobre pechinas decoradas con el tetramorfos (fig. 9).



Figura 9. Vista del crucero antes de la intervención

La cabecera de la nave está formada por un ábside de eje cilíndrico, de desarrollo inferior a 180° (figs. 2 y 10), cubierto con una bóveda oval de horno que, según el documento [5], representa el modelo propuesto por Vandelvira. Otra venera oval se encuentra en la iglesia de Santa María la Blanca de Toledo [5].



Figura 10. Ábside: foto desde el interior

En el arco toral oeste se ha detectado el dislocamiento del sillar de clave (aquí sí es sillaría), en coincidencia con la fisura en clave del cañón (fig. 11).



Figura 11. Arco toral oeste. Detalle desde el andamio

En la cúpula se han detectado fisuras según meridianos (fig. 12), hasta desaparecer a la cota típica de 52° aproximadamente, desde el eje vertical. La cúpula fue arriostrada en arranques en 1993 y no muestra síntomas de alarma estructural.

En la fig. 13 se muestra cómo la cubierta a ocho aguas de la cúpula se apoya sobre pilas-trillas y enanos de madera que, por lo general, descansan en durmientes dispuestos sobre la zona comprimida superior de la cúpula. En coincidencia con el espacio entre ventanas del cimborrio octogonal extradadoso, se disponen

unas lengüetas o tabiques de ladrillo para aportar el efecto del relleno rígido correspondiente.



Figura 12. Grieta meridiana en la cúpula

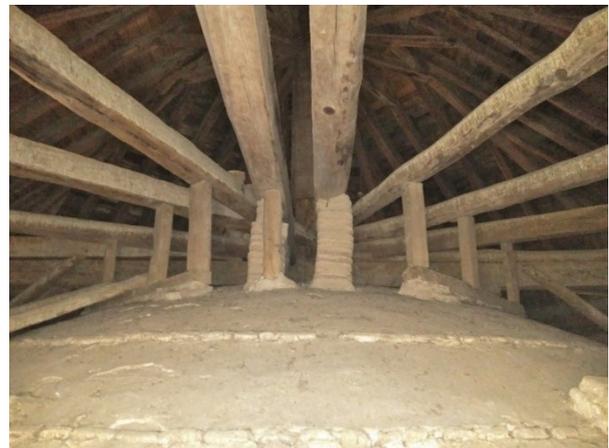


Figura 13. Trasdós de la parte superior de la cúpula

En el ábside se ha detectado una fisura según el meridiano, pasante en apariencia hacia el exterior, y una grieta en la venera con descuelgue de una dovela que quedó acodalada (fig. 14).



Figura 14. Pieza descolocada en la venera

2.2.3. Cúpula de sacristía

La puerta norte del crucero da acceso directo a la sacristía, de planta octogonal, cubierta con bóveda octogonal igualmente (fig. 15). Aparecen numerosas fisuras según meridianos, que dividen la bóveda en gajos independientes.

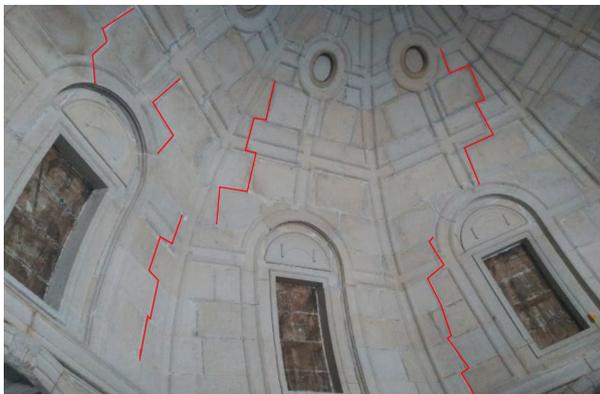


Figura 15. Sacristía, vista desde el interior

2.2.4. Cuerpo de escalera de acceso al coro

Al este de la sacristía se accede a un espacio cuadrado de 7 metros de lado, que alberga una escalera volada que da acceso a la galería del coro y a la cubierta. Se trata de una valiosa y espectacular escalera de 4 tramos. En el documento [9] se señala que las hiladas son perpendiculares a los muros perimetrales y que las trazas de las superficies del intradós con los planos verticales de los muros y los frentes del hueco son rectas, generando una superficie aparentemente reglada en el intradós (fig. 16).

Este elemento es, con diferencia, uno de los más representativos de toda la iglesia [9]. La tipología estructural de esta audaz estructura se encuentra descrita en el “Libro de trazas de cortes de piedras”, de Alonso de Vandelvira, quien la denomina *escalera a regla adulcida*. Juan de Portor y Castro (principios del XVIII) también se refiere a ella denominándola *escalera cuadrada capialzada enganchada por hiladas atravesadas a regla*, y cita la existencia de otra parecida en el actual Archivo de Indias de Sevilla (fig. 17). Esta última escalera es obra de Miguel de Zumárraga, hijo del ya mencionado Juan de Zumárraga, que había trabajado en la iglesia de San Prudencio. Consecuentemente, la escalera de Sevilla es posterior a la de Talavera de la Reina.

Otra escalera similar se encuentra en el actual Parador de Plasencia.



Figura 16. Escalera de acceso al coro



Figura 17. Escalera en el Archivo de Indias de Sevilla

En la escalera del nordeste se han detectado fisuras en intradós, con separación de piezas, en parte alta, cerca del desembarco (fig. 18). Estarían vinculadas a movimientos de los estribos, como en el caso de los muros de la bóveda de cañón de la nave. Este daño es muy parecido al que se ha encontrado en la escalera del Archivo de Indias.



Figura 18. Fisura en el intradós de la escalera volada

Los autores de este artículo estimularon el empleo de fotogrametría y laser escaner para

completar la información obtenida con la inspección visual. La fotogrametría servirá de referencia futura para, con una campaña similar, poder detectar eventuales evoluciones negativas. La evaluación de desplomes es el resultado de una combinación entre levantamiento interior y la exterior.

2.4 Materiales

Debido a la limitada extensión de este artículo, no se trata aquí la caracterización de los materiales. Cabe mencionar que dicha caracterización se basó en una inspección visual y no se realizaron ensayos destructivos. Simplemente se menciona que se ha empleado la fórmula de Ohler para estimar la resistencia a compresión. Para la fábrica de ladrillo se ha obtenido $f = 4$ MPa, mientras que para la fábrica de granito (sillares bien labrados con junta casi a hueso) se ha obtenido $f = 21$ MPa para los arcos torales. Estos son valores característicos nominales, no minorados. *A posteriori* se comprobó que los niveles tensionales eran muchos más bajos que la resistencia a compresión de la fábrica.

2.5 Consideraciones sobre las grietas

Cabe recordar que la fábrica manifiesta su modo de trabajar a través de grietas y fisuras, que son la expresión de que la estructura ha adoptado una nueva forma de equilibrio tras la variación de las condiciones de contorno (descimbrado, movimientos de pilares o muros, variación de cargas, acciones físicas y químicas, fenómenos reológicos, etc.). La mayoría de las grietas se generan justo después del descimbrado, cuando arcos, bóvedas o la cúpula, tras el acomodamiento de sus juntas, empiezan a trabajar como tales. Los estribos no son elementos infinitamente rígidos y una rotación de los mismos lleva también a un reajuste de arcos, bóvedas o cúpulas, lo cual es causa de nuevas fisuras, casi siempre en coincidencia con las juntas.

Cuando se experimentan movimientos de los arranques, el arco (o la bóveda) cambia su geometría de partida, abriéndose las juntas entre dovelas en determinadas posiciones, con comportamiento dúctil, adaptándose a la nueva condición de contorno (fig. 19). Los desplazamientos de los arranques pueden ser hacia el exterior o hacia el interior, generando respectivamente un rebajamiento o un incremento de la flecha, lo cual conlleva incremento o disminución de los empujes horizontales. Este proceso, que se autoalimenta, puede disminuir sensiblemente la seguridad de las estructuras de fábrica y, en algunos casos, puede llevarlas al colapso.

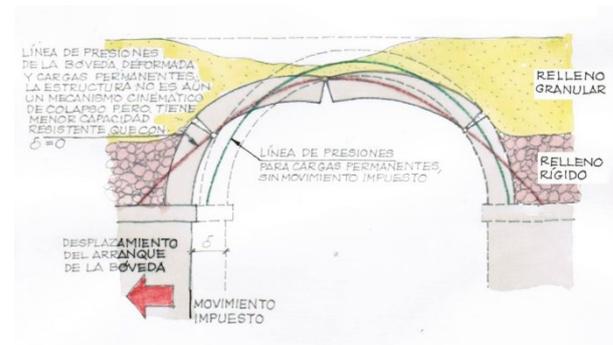


Figura 19. Croquis de una bóveda de medio punto no deformada y deformada, tras un movimiento impuesto de los arranques hacia el exterior [10]

Asimismo, cabe señalar que, a estas deformaciones iniciales, a lo largo del tiempo, se suman otras debidas a la reología de morteros, movimientos inducidos por la temperatura y movimientos inducidos por giros en la cimentación.

Las grietas no suponen, casi nunca, una disminución de capacidad resistente y, en general, no ponen en peligro la estabilidad de la estructura. A lo que hay que prestar atención es a la evolución de las fisuras a lo largo del tiempo.

3. Actuación en la bóveda principal

La bóveda de cañón de la nave central es de una esbeltez muy considerable ($L/e = 12,5/0,12 = 104$), valor muy superior a la de los arcos o bóvedas de fábrica de piedra, pero no es infrecuente en bóvedas tabicadas de ladrillo

La relación entre la nueva cota de coronación de las lengüetas y la flecha de la bóveda pasa a ser de 0,66, valor que encaja con la regla clásica de los 2/3. En la situación reformada, con la nueva cota de lengüetas, el espesor mínimo resulta ser 0,059 m. Por lo tanto, el factor de seguridad geométrico calculado como espesor real / espesor mínimo es $0,12/0,059 = 2,04$. Esta simple actuación permite duplicar el factor de seguridad geométrico, confirmando la importancia de los rellenos en la estabilidad de estructuras estudiados en los últimos años en la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid [5, 11]. El resultado, una vez finalizada la actuación, se muestra en la fig. 23.



Figura 23. Foto trasdós con lengüetas (estado final)

A continuación se estima el incremento máximo de luz que se puede admitir antes del colapso de la bóveda, es decir, el máximo corrimiento horizontal relativo admisible entre altares de muros al nivel del arranque de la bóveda. La fig. 24 muestra, en abscisas, la ratio t/R , es decir, relación entre el espesor t de la bóveda y el radio R de curvatura y, en ordenadas, el incremento de luz admisible antes de alcanzar el colapso por formación de un mecanismo cinemático, para diferentes valores de α (semiángulo del segmento circular a partir de la condición de exento; 90° es el caso de arco exento). El valor inicial de α , con lengüetas de

altura igual a la mitad del radio, es de 60° . Como puede verse, en la situación inicial la estructura prácticamente no tenía ya capacidad alguna frente a desplazamientos impuestos de los arranques, como cabía esperar por tener un coeficiente de seguridad geométrico tan próximo a la unidad. Sin embargo, en la situación reformada, el valor final de α , con lengüetas de altura igual al 60% del radio, es 53° y se puede admitir un incremento alrededor del 1,0%. Considerando una luz entre rellenos rígidos (coronación de las lengüetas) de 8,87 metros, resulta que el desplazamiento máximo admisible, suponiendo movimientos simétricos en los muros, sería de unos 4 cm por cada lado. Por consiguiente, las medidas adoptadas para mejorar el comportamiento estructural y el nivel de seguridad de la bóveda principal de la iglesia cumplen su objetivo.

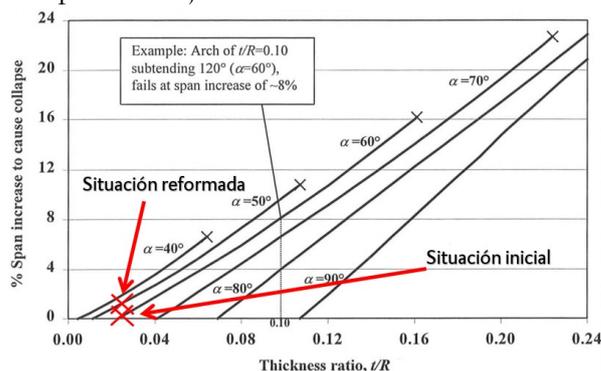


Figura 24. Incremento máximo admisible de luz antes del colapso para diferentes valores de t/R [7]

4. Otras actuaciones menores

Los autores han llevado a cabo una serie de actuaciones menores cuya descripción está fuera del alcance de este artículo, considerada su limitada extensión. No obstante, merece la pena comentar que los cosidos indispensables para asegurar la sujeción de algunas piezas se han realizado con varillas de fibra de vidrio enarenadas superficialmente con árido de sílice para mejorar la durabilidad de estos elementos.

5. Conclusiones

- El conocimiento de la historia clínica no siempre es posible, pero debe intentarse, y no deben asociarse unívocamente los defectos observados a movimientos estructurales. El evaluador ha de discriminar juiciosamente estas cuestiones.
- Los trampantojos y la costumbre no deben llevar al técnico a estimar apriorísticamente los espesores de los elementos constructivos.
- Las bóvedas tabicadas pesan menos y empujan menos, pero son mucho más sensibles a los movimientos impuestos.
- Es posible plantear soluciones muy sencillas, ligeras y de fábrica, sin materiales intrusos, para dotar de seguridad adicional a las bóvedas.
- El conocimiento de cómo funcionan estos elementos permite establecer umbrales de movimientos que, de ser superados, deben mover, en el contexto de la gestión de la conservación, a la adopción de nuevas medidas. Eso está en sintonía con los criterios de economía y sostenibilidad de la conservación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Manuel Urriaga, arquitecto autor del proyecto de restauración, la confianza depositada y el apoyo prestado en la fase de ejecución de los trabajos, así como al personal de obra, particularmente al experto y generoso arquitecto técnico Carmelo Cano.

Referencias

- [1] M. Muñoz Sánchez-Miguel, Proyecto de intervención arqueológica en la iglesia de Santa Catalina – Monasterio de los Jerónimos en Talavera de la Reina, 2015.
- [2] R. Sánchez Sesa, Don Pedro Tenorio y la reforma de las Órdenes monásticas en el último tercio del siglo XIV, *España Medieval*. 18 (1995), 282-302.

- [3] R. Carvajal Alcaide, La iglesia del monasterio Jerónimo de Santa Catalina en Talavera de la Reina. Piezas singulares de cantería documentadas en la tratadística española, *Actas del IX Congreso de Historia de la Construcción* (2015), 357-366.
- [4] D. Gutiérrez Pulido, Pedro de Tolosa, Maestro de cantería del siglo XVI, en la Sierra de San Vicente (Toledo), Excmo. Ayuntamiento de Talavera de la Reina, 2009.
- [5] A. Ramos, Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos. Universidad Politécnica de Madrid. 2015.
- [6] R. Barthel, *Tragverhalten und Berechnung gemauerter Kreuzgewölbe*. Historisches Mauerwerk, 1992.
- [7] J. Ochsendorf, *Collapse of Masonry Structures*, Universidad de Cambridge, 2002.
- [8] F. Jurado, Active repairs in domed structures, *Actas del Congreso STREMAH*, San Sebastián, 1997.
- [9] F. Camaño, Estereotomía y comportamiento estructural de las escaleras voladas en piedra. Trabajo fin de máster. ETSICCP-UPM, 2018.
- [10] VV.AA. Criterios de intervención en puentes de fábrica. Grupo de trabajo “Puentes de Fábrica” del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). Madrid, 2014.
- [11] Mutiloa, L. Desplazamientos límite en estructuras de fábrica: aproximación teórica y desarrollo de una herramienta. Trabajo fin de máster. ETSICCP-UPM, 2018.