

Monitorización estructural local y global durante el desapeo de las bóvedas de una edificación histórica

Local and global structural health monitoring during the bracing removal of the domes of a historical building

Haydee Blanco
Yosbel Boffill
Ignacio Lombillo
Pedro Díaz
Javier Balbás
Luis Villegas

Resumen

El artículo tiene como objetivo presentar las actuaciones seguidas durante el desapeo del abovedado de ladrillo de una iglesia Modernista de finales de s. XIX, tras finalizar las obras de rehabilitación. Ante la necesidad de realizar un seguimiento exhaustivo de los desplazamientos de los arcos y las bóvedas, se planteó controlar la entrada en carga de los elementos estructurales, así como anticiparse a posibles anomalías que pudieran surgir. Dicho seguimiento se realizó empleando dos sistemas de instrumentación. El primero, basado en sensores temporales, garantizaba un control local de los desplazamientos en bóvedas y arcos. El segundo sistema, incluyó elementos de control manual y sensores en continuo con objeto de dar seguimiento a cualquier comportamiento anómalo de la estructura antes, durante y con posterioridad al desapeo de las bóvedas. Los sistemas planteados posibilitaron disponer de un control global centralizado y fiable de todos los elementos estructurales de la construcción.

Abstract

The article aims to present the Structural Health Monitoring (SHM) developed during the bracing removal of several brickwork domes of a late 19th-century Modernist church, after the strengthening works performed on the domes. Given the need for an exhaustive monitoring of the arches and domes movements, a control strategy of the appropriate loading operation of the referred structural elements was developed. Furthermore, the SHM must allow anticipating any anomaly arises during the loading operation. The SHM was carried out using two instrumentation systems. The first one, based on temporary sensors, ensures a local control of displacements in domes and arches. The second system, based on the remote monitoring of several sensors and onsite control, allows following up any unexpected structural behaviour before, during and after the bracing removal of the domes. The systems made possible to get a centralized and reliable global control of the structural elements of the building.

Palabras clave: Edificios históricos / Rehabilitación / Desapeo de bóvedas / Monitorización estructural / Sistema de adquisición de datos

Keywords: Historical buildings / Refurbishment / Bracing removal of domes / Structural health monitoring / Data acquisition system

Haydee Blanco

Universidad de Cantabria
Santander, España
haydee.blanco@unican.es

Yosbel Boffill

Universidad de Cantabria
Santander, España
yosbel.bofill@unican.es

Ignacio Lombillo

Universidad de Cantabria
Santander, España
ignacio.lombillo@unican.es

Pedro Díaz

Siegrist y Moreno S.L.
Madrid, España

Javier Balbás

Universidad de Cantabria
Santander, España

Luis Villegas

Universidad de Cantabria
Santander, España
luis.villegas@unican.es

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BLANCO, Haydee [et al.]– Monitorización estructural local y global durante el desapeo de las bóvedas de una edificación histórica. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 4. ISSN 2183-8488. (julho 2017) 59-72.

1 Introducción

Los sistemas de monitorización estructural (Structural Health Monitoring en sus siglas en inglés) son una herramienta útil que permite controlar y verificar el comportamiento de las estructuras. Éstos sirven de guía, tanto para ingenieros como propietarios, en la toma de decisiones relativas al mantenimiento, economía y seguridad de las estructuras (Merit, 2006). Asimismo, estos sistemas son definidos como ensayos de detección no destructivos in situ que, a través de una variedad de sensores conectados o embebidos a la estructura, permiten analizar y controlar la respuesta estructural con el fin de estimar la severidad de los daños y evaluar las consecuencias de éstos sobre las estructuras. (Housner *et al.*, 1997) (Karbhari, 2005)

Uno de los principales objetivos de un sistema de monitorización es obtener datos cuantitativos acerca del comportamiento estructural de las construcciones o elementos a analizar. Ello posibilita confirmar y/o determinar asunciones de diseño, así como proporciona en tiempo real el comportamiento de las construcciones. En consecuencia, estas herramientas permiten tanto durante el proceso de diseño como de ejecución tomar decisiones acerca de los planes de mantenimiento. Trabajos en esta línea pueden consultarse en *SMooHS Smart Monitoring of Historic Structures* (2010), Schueremans *et al.* (2007), Chang *et al.* (2003), Rossi & Rossi (2001) y Binda *et al.* (2001).

La monitorización puede ser periódica o continua, a corto o a largo plazo, local o global, y contar con un sistema desde pocos sensores hasta cientos, lo cual dependerá de la demanda del objeto de seguimiento.

En línea con lo antes comentado, el presente artículo describe los trabajos desarrollados previo y durante el desapeo de un abovedado de ladrillo de una edificación histórica. Se expone en primer lugar la evaluación realizada del comportamiento estructural de las bóvedas desarrollado a través de un modelo de elementos finitos. Éste permitió disponer de una estimación del comportamiento de los elementos, y en consecuencia plantear un procedimiento de desapeo. A continuación, se recoge la metodología planteada para la realización del desapeo, así como el seguimiento de la respuesta estructural de las bóvedas durante dicha actuación, y puesta en carga. Finalmente, se presenta la evolución de las mediciones durante el desapeo y días posteriores, comparando los resultados registrados con los alcanzados en el modelo.

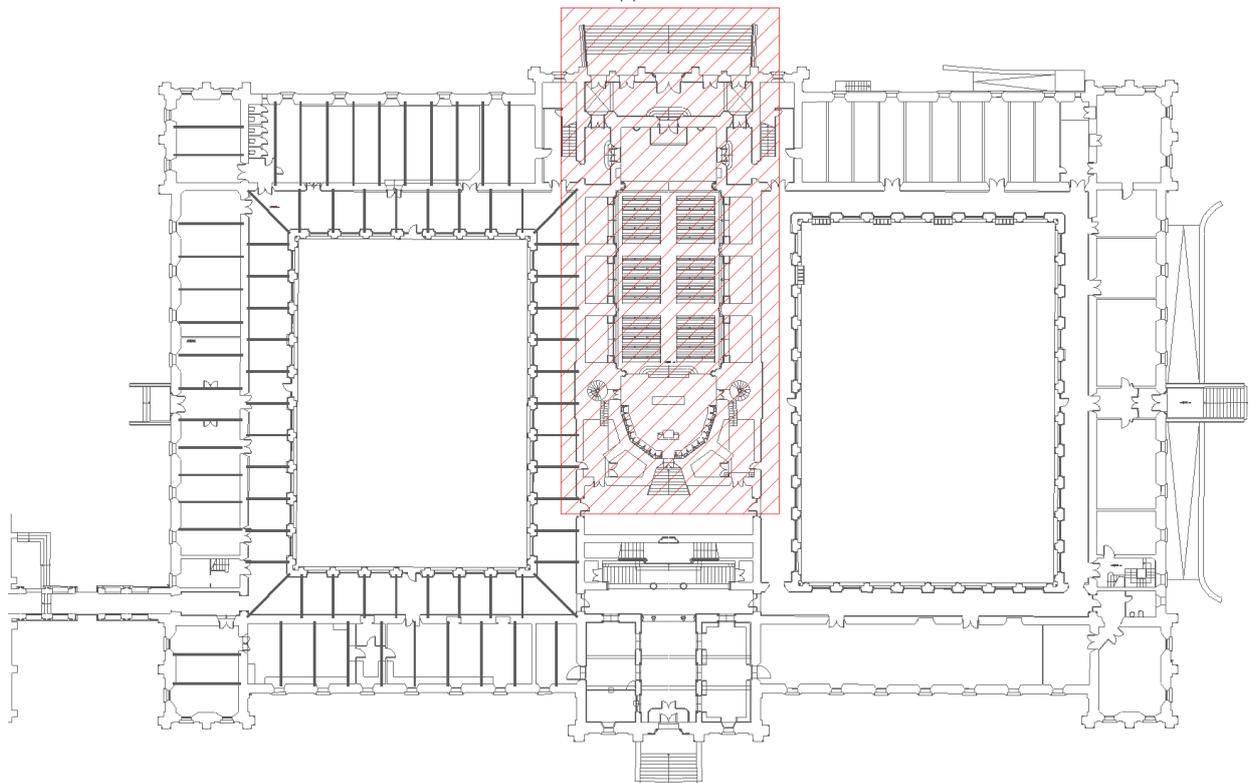
2 Caso de estudio: Iglesia del Seminario Mayor de Comillas

El caso que nos ocupa, la Iglesia del Seminario Mayor de Comillas, se halla inmersa en un edificio Modernista de finales del siglo XIX, el cual se encuentra catalogado como Monumento Histórico-Artístico. Además, éste ha sido declarado Bien de Interés Cultural (BIC), siendo a día de hoy, uno de los elementos de mayor valor del patrimonio histórico, territorial, económico y artístico de la región.

Como puede apreciarse en la Figura 1a, el edificio ocupa una superficie rectangular aproximada de 100 × 65 m, articulándose en torno a dos claustros, de dimensiones aproximadas 35 × 25 m, flanqueando el volumen central en el que se ubican los elementos



(a)



(b)

Figura 1 (a) Perspectiva general del Seminario Mayor de Comillas, y (b) ubicación en planta de la Iglesia

arquitectónicos y artísticos de mayor calidad, el hall de entrada, la escalera principal, el paraninfo, la sacristía y la Iglesia.

La Iglesia en sí (Figura 1b) la conforma un cuerpo principal, con una nave central y dos laterales (capillas), con una zona de ábside al sur y el nártex hacia el norte. El cuerpo principal está constituido por arcos transversales principales, en la nave central, contrarrestados por contrafuertes que separan las capillas laterales. Paralelos al eje de la Iglesia discurren arcos formeros laterales separando la nave central de las capillas. Apoyadas sobre los arcos se encuentran una serie de bóvedas de forma sensiblemente elipsoidal, materializadas por medio de tres roscas de ladrillo macizo de unos 3 cm de espesor. Finalmente, la cubierta se completa por medio de cerchas de madera con tirantes de acero y montantes también de madera.

El edificio, que se encontraba relativamente en buen estado hasta los años ochenta, entró en un progresivo proceso de deterioro desde que dejó de ser utilizado. En consecuencia, y con el paso de los años, la Iglesia se mantuvo sometida a un estado de creciente deterioro, lo que trajo consigo la aparición de procesos patológicos graves que afectaban la estabilidad del inmueble (deterioro de la cubierta de madera: humedades, pudrición, pérdida de tirantes en las cerchas que al disponer de un diseño con apoyo excéntrico conllevó a agrietamientos verticales en todos los paños bajo cubierta de los muros de fábrica, excesiva deformación de los forjados de madera existente, agrietamientos significativos en contrafuertes, muros de fachada y bóvedas, etc.). Pueden ser ampliados en Villegas&Lombillo (2008) los estudios previos realizados sobre la patología, idoneidad estructural y de materiales del inmueble.

Como medida de seguridad, y debido al importante tamaño de las grietas observadas en las bóvedas del inmueble en el año 2009, se dispuso de un sistema de apeo que evitara la posibilidad de desplomes de las mismas, así como la colocación de tirantes en los arcos fajones para equilibrar los empujes producidos por la cubierta. La Figura 2 ilustra la estructura de sostenimiento colocada en aquel entonces y mantenida hasta la actualidad.

Previo al proceso de intervención recientemente realizado, se procedió al registro de daños mediante un levantamiento de grietas y fotográfico. Éstos fueron elaborados a partir de la toma de datos realizada in situ durante las visitas llevadas a cabo en los meses de agosto y septiembre de 2012, confeccionándose un total de 41 planos. La información se agrupó por secciones de acuerdo a la planta de la Iglesia, correspondiendo a las zonas de arcos y contrafuertes, bóvedas, muros interiores y fachadas. En la Figura 3 puede apreciarse, a modo de ejemplo, los daños registrados en el abovedado por su cara inferior. Puede ampliar dicha información en Lombillo&Blanco, *et al.* (2016).

En el año 2015, se inició la rehabilitación estructural de la Iglesia ejecutándose diferentes intervenciones en consonancia con los daños detectados. En dicha actuación se incluyó el refuerzo estructural de diversos elementos, entre éstos las bóvedas, además de la sustitución de la cubierta de la Iglesia.

En relación a las bóvedas de ladrillo, éstas recibieron inicialmente un restablecimiento de la continuidad del elemento mediante sellado e inyección de fisuras. Dicho tratamiento se ejecutó mediante la inyección de un aglomerante hidráulico de cal y eco-puzolanas, superfluido y libre de cemento.

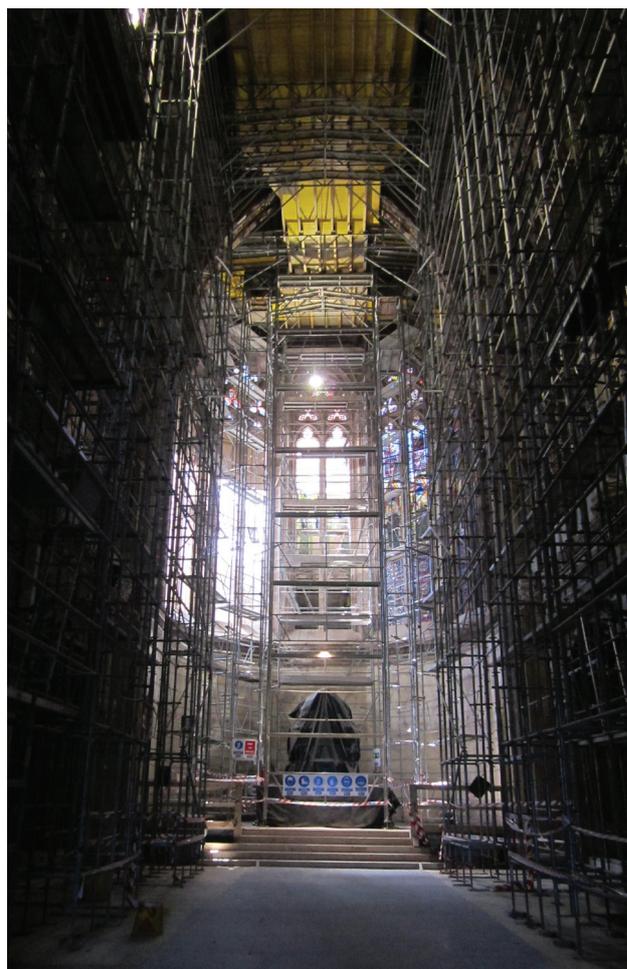


Figura 2 Estado interior del apeado existente en la Iglesia

Adicionalmente, se procedió a la regeneración superior de las bóvedas mediante una envolvente de mortero de elevada ductilidad, a base de cal hidráulica (NHL) y eco-puzolana, a la cual se conectó la bóveda mediante conectores de fibra de vidrio. Complementariamente a las anteriores actuaciones, se procedió a un cosido a base de cuerdas de fibra de carbono en las zonas de las bóvedas con grietas de mayor tamaño. La Figura 4 recoge la evolución de la intervención realizada a estos elementos.

Tras finalizar la ejecución de las actuaciones contenidas en la rehabilitación estructural, se planteó la retirada de la estructura de apeo existente en el cuerpo de la Iglesia, frente a acciones verticales, que sustentaba las bóvedas del inmueble. Ante la necesidad de un control exhaustivo de los desplazamientos de los arcos y las bóvedas

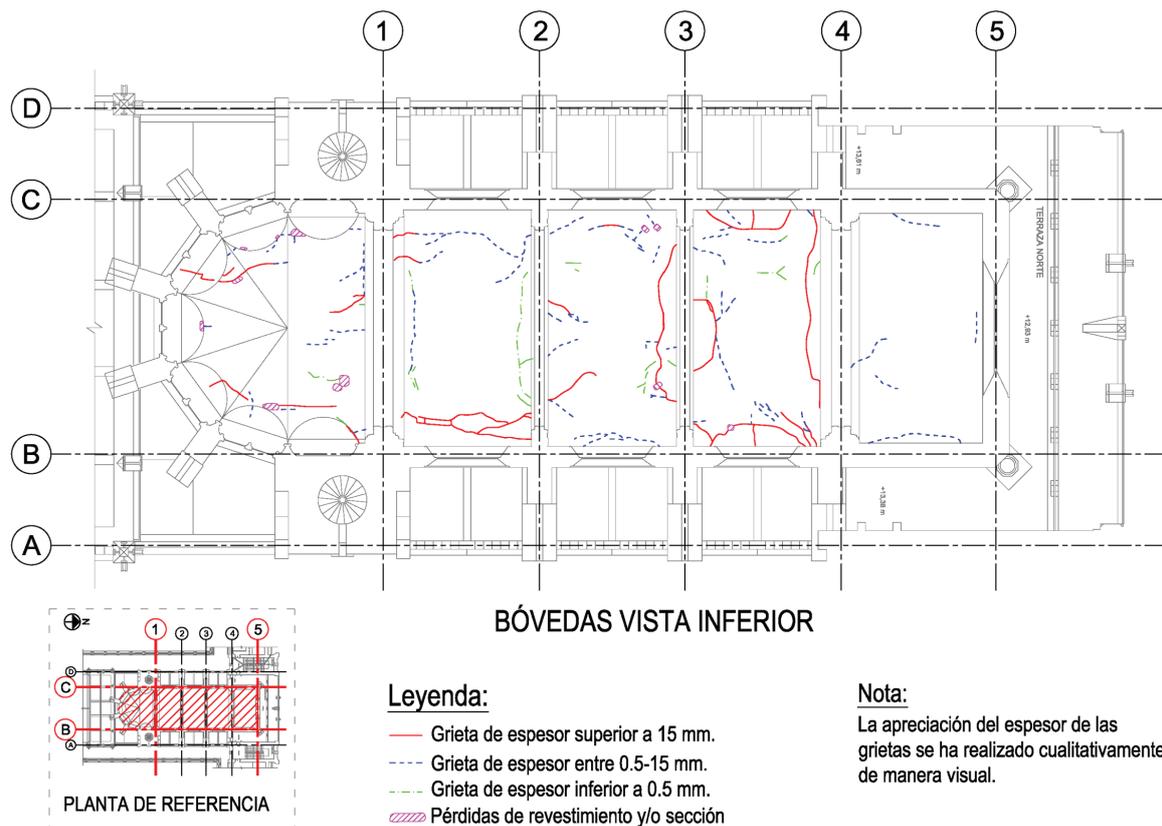


Figura 3 Ejemplo de plano de levantamiento de grietas: Bóvedas vista inferior



Figura 4 Intervención realizada en el abovedado de ladrillo: (a) Inyección de grietas, (b) refuerzo con malla de fibra de vidrio por la cara superior y (c) realización de anclajes mediante fibras de carbono (fiocos)

durante este procedimiento, se planteó una metodología que permitiera controlar la correcta entrada en carga de los elementos estructurales (de manera paulatina y no abrupta), así como avizorar y/o detectar, en caso necesario, cualquier anomalía que surgiese.

3 Análisis previo al desapeo

3.1 Evaluación del comportamiento estructural a través de un modelo de elementos finitos

Para el control del proceso de desapeo de las bóvedas se procedió a simular previamente su comportamiento mediante un modelo de elementos finitos con el programa de cálculo SAP2000, empleado de forma frecuente en el análisis de estructuras. De este modo, se evaluaron dos modelos. En el primero de ellos se modelizó la estructura resistente completa de la Iglesia, representada por un sistema que simulaba el comportamiento tensodeformacional del conjunto arcos-contrafuerzes; mientras que en el segundo se analizaron exclusivamente las bóvedas (Figura 5).

Suponiendo que la estructura de la Iglesia, una vez ejecutados los trabajos de refuerzo planteados, habría alcanzado un punto de equilibrio, se consideró que los movimientos debidos a la entrada de carga de la estructura de la bóveda no se reflejarían en deformaciones apreciables en la misma, por lo que los movimientos medidos podrían atribuirse de forma específica a la deformación de la propia bóveda.

A partir del modelo planteado, y considerando tan sólo el peso propio de las bóvedas y el del material de refuerzo, se procedió al cálculo de la flecha estimada en el centro de las mismas.

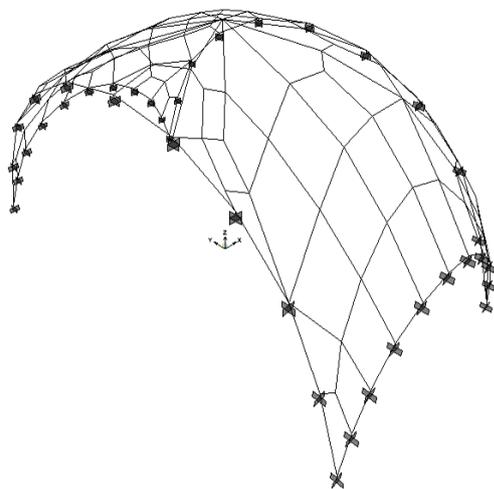


Figura 5 Estructura representativa modelada en un programa de cálculo mediante elementos finitos

En este sentido, referir que el comportamiento real de las bóvedas se ve afectado por muchos factores difícilmente cuantificables e imposibles de simular en el modelo, como son la amplitud de fisuras, el complejo comportamiento constitutivo del conjunto ladrillo-malla de vidrio-mortero de refuerzo, etc. No obstante,

dado el limitado estado de conocimiento con que se contaba de la estructura mixta, se consideró pertinente tener un valor de referencia de la flecha durante el proceso de desapeo de la estructura, de forma que se procediera a la detención del mismo en caso de que la flecha registrada fuera superior a la estimada numéricamente.

Por todo ello, se optó por llevar a cabo un cálculo lineal considerando el material constitutivo como isótropo e indefinidamente elástico. Así, para la bóveda representada, y que corresponde a la bóveda central tipo, la flecha en clave se estimó en 0,40 mm.

3.2 Proceso de desapeo

Tras los resultados arrojados por el modelo de elementos finitos en el que las flechas estimadas fueron despreciables, se procedió a definir el proceso de desapeo de tal manera que las bóvedas de la Iglesia fueran capaces de resistir con seguridad las acciones actuantes.

La estructura en cuestión consta de 5 bóvedas independientes que conforman el techo de la Iglesia, apoyadas originalmente en los muros y los arcos fajones. En la Figura 6a se presenta la distribución en planta de las mismas, así como se recoge la cantidad de elementos de apeo que se disponían en cada bóveda. A modo de ejemplo, la Figura 6b recoge la disposición en planta de los elementos de apeo sobre los que se apoyaba la bóveda 3.

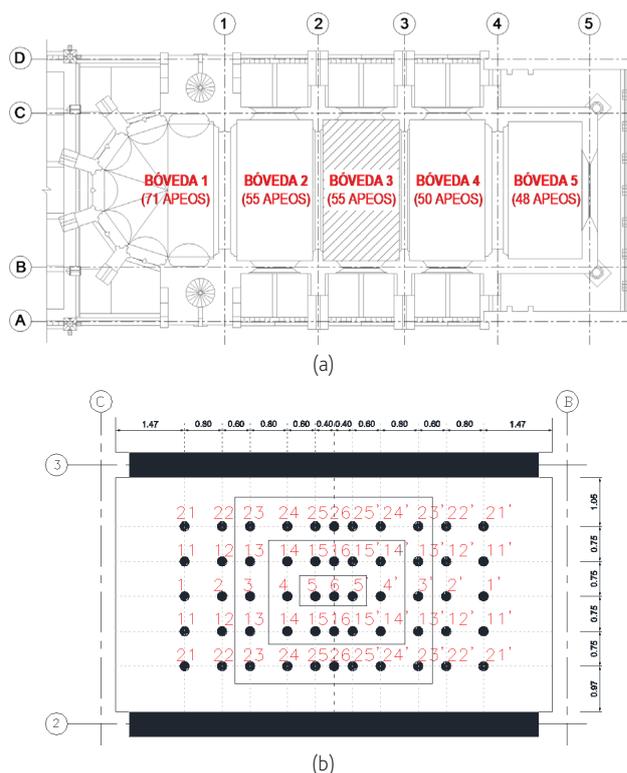


Figura 6 (a) Planta de referencia de las bóvedas de la Iglesia, (b) Ejemplo de disposición de elementos de apeo en la bóveda 3

El proceso de desapeo se concibió de manera que la transmisión de las cargas a la estructura de la Iglesia, fundamentalmente a los

arcos fajones, se ejecutara de forma simétrica, con objeto de evitar acciones laterales no compensadas sobre los mismos. Para ello, dicha actuación se planificó en dos etapas diferenciadas.

La primera fase tuvo lugar en las bóvedas 1 y 5, elementos con menores daños en sus inicios, y ejecutándose de manera independiente a las restantes. Una vez desapeadas y comprobada su estabilidad, se procedió al desapeo de las bóvedas 2, 3 y 4, que se ejecutaron de forma paralela para minimizar los posibles empujes no equilibrados sobre los arcos fajones.

Adicionalmente, el desapeo de la estructura se planteó ejecutarlo de forma escalonada, de manera que inicialmente se procediera a decalar los apeos lo mínimo necesario para asegurar la entrada en carga de la estructura. De acuerdo a los movimientos previstos en el modelo, era suficiente con una holgura del orden de 20-30 mm. De esta forma, en caso de que las flechas fueran superiores a las previstas, se contaría con los apeos como elementos de seguridad.

Al mismo tiempo, se intentó evitar que ninguna de las bóvedas quedara en una situación de “cuelgue”, por lo que la retirada de los elementos de apoyo se llevó a cabo, para cada una de las bóvedas, desde la zona central (clave de las bóvedas) hacia los extremos (muros laterales y arcos fajones).

4 Sistemas de monitorización estructural empleados

Con objeto de analizar y evaluar cualquier posible anomalía durante la realización del desapeo de las bóvedas, se plantearon dos tipos de seguimiento. El primero de ellos, destinado al control de desplazamientos verticales de las bóvedas y apertura horizontal en clave de los arcos. Este seguimiento, de carácter local, se llevó a cabo con transductores de desplazamiento instalados específicamente para el desarrollo de esta actuación, y fueron conectados al sistema de control temporal. Estos sensores se plantearon únicamente en las bóvedas 2, 3 y 4, y en los arcos 2 y 3, elementos que como se ha referido con anterioridad presentaron en sus inicios mayores daños.

Por su parte, el segundo de los controles, de carácter global, se realizó dando seguimiento a los sensores para control remoto en continuo y puntos de control manual instalados permanentemente en el edificio desde el año 2012, en su gran mayoría. Con éstos se pretendía controlar antes, durante y posterior al proceso de desapeo, los desplazamientos, inclinaciones, presiones, temperatura y humedad ambiental, etc. de un número apreciable de elementos estructurales de la Iglesia en el que se encontraban instalados. De éstos referir que, previo a la intervención realizada, no registraron movimientos significativos, circunstancia razonable a la luz de las estructuras de apeo existentes en el cuerpo de la iglesia frente a acciones verticales, así como tirantes a nivel de contrafuerte para contrarresto de los empujes horizontales de los arcos. Los movimientos registrados a lo largo del período monitorizado correspondieron, en gran medida, con los gradientes térmicos manifestados (Lombillo, *et al.* (2014)).

Los sistemas fueron gestionados desde una única ubicación de tal manera que posibilitase el control de ambos a la vez. El emplazamiento concebido como área de control correspondió

a una zona bajo la bóveda 1, con objeto de disponer de un punto de evacuación directo, por su proximidad con la zona de acceso al abovedado, ante cualquier incidencia que ocurriese. La Figura 7 muestra una perspectiva general de dicho espacio, desde el cual se daba seguimiento en tiempo real a ambos sistemas de monitorización (local y global).

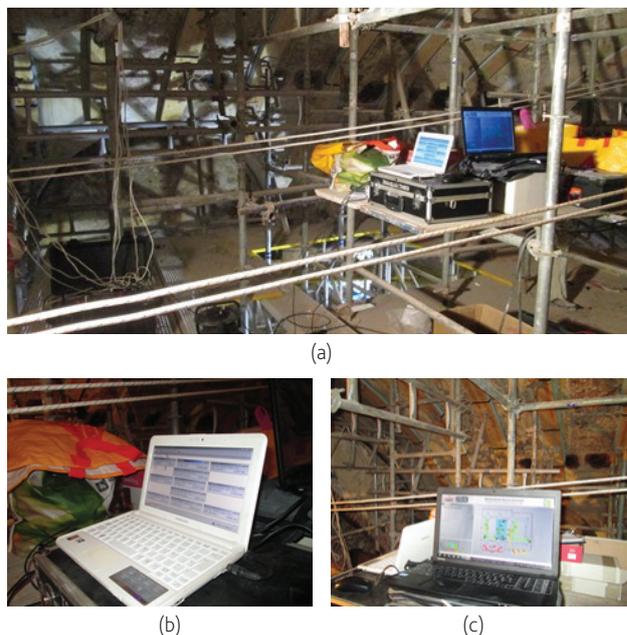


Figura 7 (a) Emplazamiento del puesto de control de los sistemas de monitorización (b) temporal y (c) continua permanente

Asimismo, referir que en la metodología desarrollada el desapeo se planteó en 5 fases, estableciéndose 15 minutos de espera entre la ejecución de cada una. Ello tuvo por objeto garantizar una puesta en carga efectiva de los elementos estructurales rehabilitados (arcos y bóvedas). A modo de ejemplo, en la Tabla I se recoge el procedimiento seguido en la bóveda 3. En consecuencia, se llevó a cabo un registro en el que se recogió la fecha de realización, el elemento a desapear, la fase de desapeo, así como la hora de inicio y final de la actuación para cada uno de los elementos y fases.

Tabla I Procedimiento realizado para el desapeo de la bóveda 3

Fases	Bóveda 3	Hora de Inicio	Hora Final
Fase 1	5, 6, 5'	11:26	11:28
Fase 2	14, 15, 16, 14', 15', 4, 4'	11:42	11:45
Fase 3	23, 24, 25, 26, 25', 24', 23', 13, 3, 13', 3'	12:09	12:23
Fase 4	22, 12, 2, 22', 12', 2'	13:02	13:08
Fase 5	21, 11, 1, 21', 11', 1'	13:37	13:40

Nota: Para conocer la distribución en planta de los apeos (números indicados en la tabla) consultar la Figura 6b.

4.1 Sistema local de control temporal

4.1.1 Instrumentación empleada y sistema de adquisición de datos

De acuerdo con la metodología planteada, el control de desplazamientos verticales en bóvedas y aperturas horizontales en clave de arcos se realizó con sensores instalados de forma temporal para el control de dicha actuación. Para ello, se emplearon transductores de desplazamiento los cuales se conectaron a un data logger portátil, y éste a su vez a un ordenador.

Se emplearon tres tipologías de transductores: los de mayor precisión, Tipo 1 (LVDT, 50 mm) ubicados en la clave de las bóvedas 2, 3 y 4 (Figura 8a); los de Tipo 2 (Transductores de desplazamiento, 25 mm) se instalaron en la clave de los arcos 2 y 3 (Figura 8b); y finalmente los Tipo 3 (Transductores de desplazamiento, 100 mm) fueron colocados hacia los riñones de las bóvedas 2, 3 y 4, dos en cada caso (Figura 8c). Estos últimos permitían controlar cualquier posible efecto "cuelgue" de las mismas durante el desapeo.



Figura 8 Tipologías de sensores de desplazamiento empleados durante el desapeo de las bóvedas 2, 3 y 4

En resumen, tres sensores de desplazamiento se instalaron en cada una de las bóvedas 2, 3 y 4 de la Iglesia en las posiciones: clave, derecha (Oeste), e izquierda (Este); y una unidad en cada uno de los arcos 2 y 3. Una relación de los dispositivos empleados se recoge en la Tabla II, así como su ubicación en planta puede consultarse en la Figura 9. En relación a este último aspecto, referir que las ubicaciones de los sensores no son simétricas dado que fue necesario ajustarse al espacio disponible entre los apeos.

Tabla II Transductores de desplazamientos empleados en el desapeo de las bóvedas

Nomenclatura	Sensor de desplazamiento	Ubicación
Tipo 1	LVDT - 50 mm	Clave de bóveda
Tipo 2	Transductor de Desplazamiento 25 mm	Clave de arcos
Tipo 3	Transductor de Desplazamiento 100 mm	Hacia los riñones de las bóvedas

Los sensores Tipo 1 y 3, instalados sobre puntales fijos, se apoyaron en los arcos fajones, entre los ejes 1-2, 2-3 y 3-4. Señalar que durante el montaje de estos elementos (puntales) se previó que no se encontrasen en contacto con la estructura de apeo existente

del edificio, con objeto de que se comportaran como unidades independientes. Para ello, se apoyaron en otros elementos que reaccionaban, a su vez, entre arcos opuestos. En la Figura 10 puede apreciarse la disposición de estos puntales en una de las bóvedas.

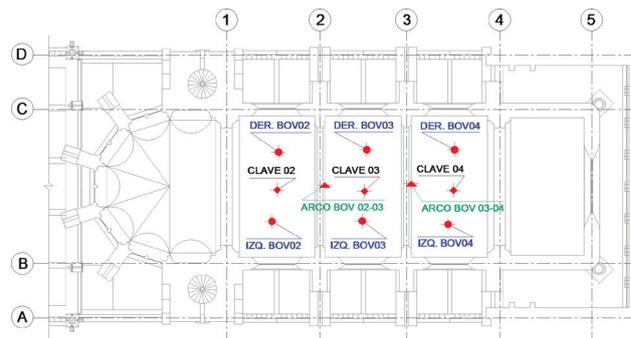


Figura 9 Disposición en planta de los sensores del control temporal



Figura 10 Puntales empleados como soporte de los sensores

Finalmente, para registrar de forma continua la evolución de la señal eléctrica (voltaje) que permitiera obtener los desplazamientos fue empleado un sistema de adquisición, acondicionamiento y registro para la medida de hasta 16 canales analógicos de entrada, con bastidor modelo Cronos SL-2 con 2 módulos de 8 entradas diferenciales modelo CRSL/DCB-8-D, marca IMC. En la Figura 11 se ilustra el data logger empleado durante la realización del desapeo.



Figura 11 Sistema portátil de adquisición de datos empleado en el sistema de control temporal

4.1.2 Calibración y comprobación previa de las medidas

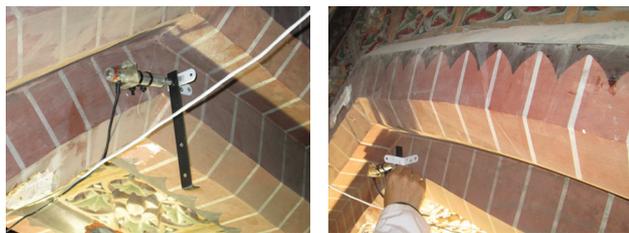
Como parte de los trabajos realizados, una vez instalados, cableados y conectados todos los sensores, se procedió a comprobar la idoneidad de las medidas registradas por los mismos. Ello tuvo por objeto garantizar que todo el sistema de instrumentación cumpliera las condiciones planteadas para la ejecución de los ensayos y, de esta manera, asegurar la correcta obtención de resultados válidos para su posterior análisis.

Para ello, se consideraron dos estrategias según la posición de los sensores. En el caso de los sensores Tipo 1 y 3, dada su posición vertical y curvatura de la bóveda, se procedió a desplazar el sensor controlando la distancia con un metro (Figura 12a). En cambio, para la comprobación de los dispositivos Tipo 2 se empleó un elemento de medida conocida (placa metálica de 2 mm de espesor) colocándola entre el extremo del transductor y la superficie a controlar. La Figura 12b ilustra el protocolo realizado en uno de los transductores. Así, finalizada la comprobación de los sensores, éstos quedaron preparados para dar comienzo al registro de los datos durante la realización del desapeo.

En relación al período controlado, referir que la actividad de seguimiento del control de desplazamiento de los sensores temporales se efectuó durante el proceso de desapeo, y a lo largo de los tres días siguientes.



(a) Chequeo de los sensores Tipo 1 y 3



(b) Protocolo realizado para los sensores Tipo 2 instalados en los arcos

Figura 12 Ejemplos de comprobación realizada a los sensores del sistema de control temporal instalados previo al registro de datos durante el desarrollo del desapeo

4.2 Sistema global de monitorización permanente

El segundo sistema utilizado incluyó elementos de control manual y sensores en continuo con objeto de dar seguimiento a cualquier comportamiento anómalo de la estructura antes, durante y con posterioridad al desapeo de las bóvedas.

4.2.1 Control manual de aperturas/cierres de grietas e inclinaciones

La monitorización manual de los movimientos durante el proceso de desapeo se planteó para un total de 13 variables. De éstas, 4 se destinaron a puntos de control manual para evaluar la apertura/cierre de grietas, mientras que las 9 restantes correspondieron a placas inclinométricas para detectar posibles desplomes de los muros.

De los citados puntos de control se disponía un registro histórico desde el año 2012, lo cual permitió, tras medidas previas y posteriores al desapeo, detectar posibles movimientos.

Para la evaluación de la apertura/cierre de grietas se empleó un deformómetro (marca Demec, con rango de medida de 200 mm y una precisión de 1 μm), mientras que los controles de las placas inclinométricas para detectar posibles desplomes de los muros se realizaron con la ayuda de un medidor de inclinaciones portátil (marca Sensorex, con una precisión de 2 centésimas de grado). En la Figura 13 se muestran las mediciones realizadas previo al desapeo de las bóvedas.

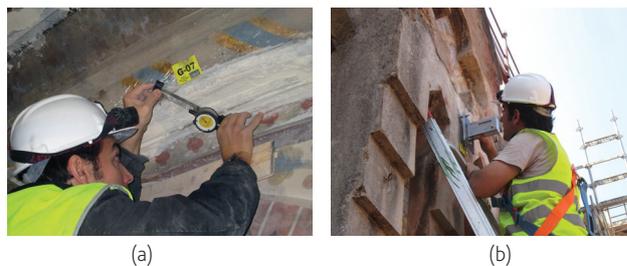


Figura 13 A modo de ejemplo, se presenta (a) el procedimiento seguido para el registro de las amplitudes de la grieta G-07 y (b) la medición de inclinación de una de las placas exteriores previo a iniciarse el proceso de desapeo

4.2.2 Seguimiento remoto de monitorización continua

Conjuntamente con el sistema de control manual, se dio seguimiento al proceso de desapeo mediante un sistema remoto de monitorización continua instalado en la edificación entre los años 2012-2015, y del que se disponía de un registro histórico. Éste permitió detectar posibles incidencias durante el desapeo que se viesen reflejadas en los elementos estructurales de la Iglesia que se encontraban monitorizados.

Los sensores para la realización de dicho seguimiento se agruparon en cuatro estaciones de adquisición de datos que, a su vez, se encontraban conectadas a un PC Industrial en el que se almacenaban

las mediciones, sirviendo igualmente para la posterior gestión remota, vía web, de los datos. En la Figura 14 se aprecian las áreas en las que se encontraban distribuidos los sensores en la edificación, a la vez que la Tabla III recoge su relación por área de monitorización.

De los citados sensores, se tuvo un seguimiento pormenorizado de un total de 12 dispositivos: 4 LVDTs a modo de fisurómetros, 5 inclinómetros, 3 cintas de convergencia y 3 puntos de control de presiones. La Figura 15 ilustra, a modo de ejemplo, algunos de los dispositivos instalados.

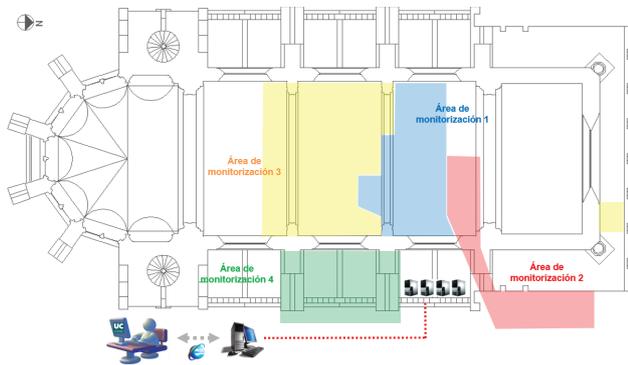


Figura 14 Esquema en planta de las áreas de monitorización controladas con el sistema remoto de monitorización continua

El sistema de adquisición de datos (*Master Terminal Unit, MTU*) se gestionó mediante una aplicación desarrollada en JavaFX que constituye una plataforma para el desarrollo de aplicaciones enriquecidas de Internet. En relación a una consulta más detallada de las prestaciones de dicha herramienta, o sobre la integración del sistema de instrumentación electrónica, adquisición de datos y desarrollo de software de gestión, se remite al lector a Pereda, *et al.* (2014).

Adicionalmente, referir que durante el proceso de desapeo, el sistema de gestión de datos empleado se configuró para que realizara un registro de lectura cada 1 segundo, y con ello efectuar un control minucioso de los datos. Señalar que el sistema usualmente está configurado con una frecuencia de muestreo cada 30 segundos, y de visualización cada 3 segundos. Asimismo, apuntar que la gestión remota de datos se realiza mediante una red cableada, sin embargo, dada la distancia a la que se encontraba el PC Industrial del emplazamiento seleccionado para el control del desapeo (bajo la bóveda 1, a una distancia vertical de más de 20 m), fue necesario emplear una red WiFi para controlar in situ dicha actuación. A este respecto, en la Figura 16a puede apreciarse una visualización de la aplicación desarrollada en JavaFX durante el control del proceso de desapeo, a la vez que la Figura 16b ilustra el PC Industrial junto a sus baterías de seguridad para casos de interrupción de alimentación eléctrica.

Tabla III Distribución de sensores según las estaciones remotas de adquisición de datos

Estaciones	Sensores	Nomenclatura
Área de monitorización 1	Fisurómetro 01	FIS-01
	Fisurómetro 02	FIS-02
	Inclinómetro 01	INCL-01
	Inclinómetro 02	INCL-02
	Cinta de convergencia 01	CONV-01
	Termohigrómetro 01	THG-01
	Fisurómetro 03	FIS-03
Área de monitorización 2	Fisurómetro 04	FIS-04
	Fisurómetro 05	FIS-05
	Termohigrómetro 02	THG-02
	Veleta 01	VEL-01
	Anemómetro 01	ANEM-01
Área de monitorización 3	Fisurómetro 06	FIS-06
	Fisurómetro 07	FIS-07
	Inclinómetro 03	INCL-03
	Inclinómetro 04	INCL-04
	Inclinómetro 05	INCL-05
	Cinta de convergencia 02	CONV-02
Área de monitorización 4	Cinta de convergencia 03	CONV-03
	Sensor de tensión 01	GPS-Contr02
	Sensor de tensión 02	GPS-Contr03
	Célula de presión	CPT

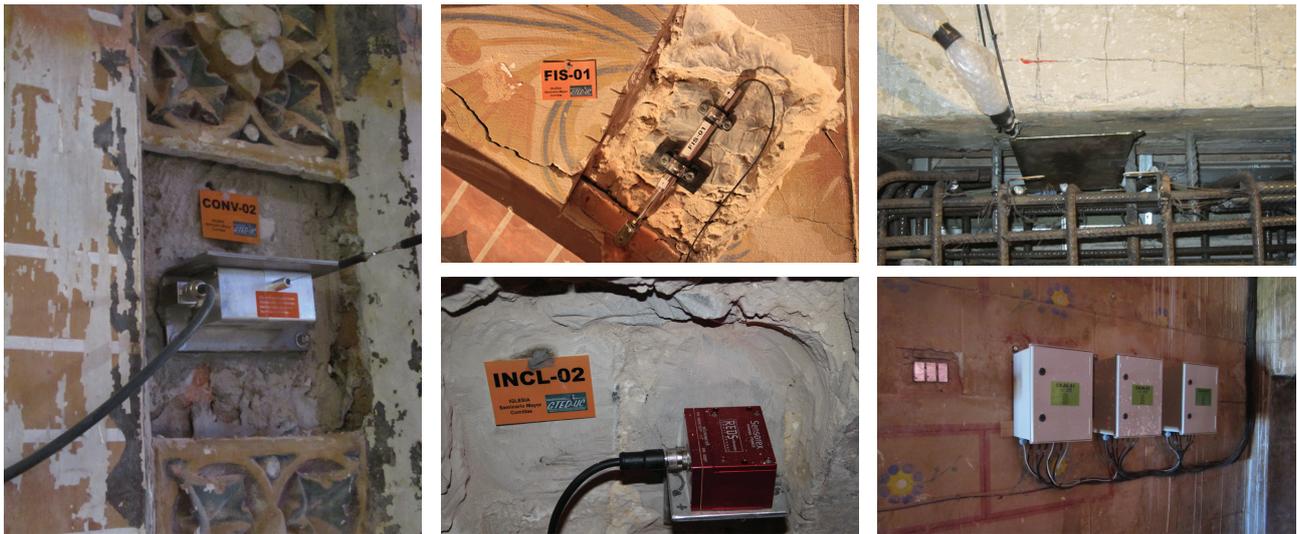


Figura 15 Ejemplos de sensores instalados y controlados durante el proceso de desapeo: cinta de convergencia - CONV02, fisurómetro - FIS01, inclinómetro - INCL02, célula de presión y estaciones de adquisición de datos 1, 2 y 3



Figura 16 (a) Visualización de la aplicación que gestiona los datos de los sensores fijos durante el desapeo, y (b) PC Industrial

Tabla IV Registros de los transductores de desplazamientos durante el desapeo y días posteriores (mm)

Identificador	Durante el desapeo		Días posteriores	
	Máximo	Final parada	Máximo	Final registro
Desplaz. DER_BOV04		1,966		2,121
Desplaz. IZQ_BOV04		1,672		1,725
Desplaz. CLAVE_04	0,059	-0,054		0,010
Desplaz. DER_BOV03		2,628		2,488
Desplaz. IZQ_BOV03	0,784	0,162		0,175
Desplaz. CLAVE_03	0,141	-0,002	0,282	0,162
Desplaz. DER_BOV02		2,582		2,795
Desplaz. IZQ_BOV02		1,413		1,408
Desplaz. CLAVE_02	0,064	0,043	0,049	-0,009
Desplaz. Arco Bóv: 02-03	0,003	0,001		0,003
Desplaz. Arco Bóv: 03-04	0,011	0,009		0,047

5 Discusión de resultados

5.1 Sistema local de control temporal

De acuerdo a la metodología planteada, y en cuanto a la evolución de los movimientos registrados por los sensores del sistema de control temporal instalado para el seguimiento del desapeo de las bóvedas, referir que éstos no registraron un comportamiento fuera de lo normal para este tipo de actuación. Además, cabe señalar que las variaciones manifestadas llegaron a estabilizarse, en su mayoría, durante los días posteriores al desapeo. En este sentido, la Tabla IV recoge los desplazamientos máximos y finales registrados durante el desapeo y días posteriores controlados.

La Figura 17 muestra, a modo de ejemplo, la evolución del sensor de desplazamiento ubicado en la clave de la bóveda 2. En ésta se recogen los valores de desplazamiento (en mm) alcanzados durante el desapeo (máximo y final), así como el registro final del período controlado. En cada uno de los casos se representaron los resultados registrados durante el proceso de desapeo (imagen superior), y el comportamiento global del mismo incluyendo los días posteriores controlados (imagen inferior). En esta última, se muestra la duración total controlada, diferenciando en colores la fase de desapeo y el período posterior monitorizado.

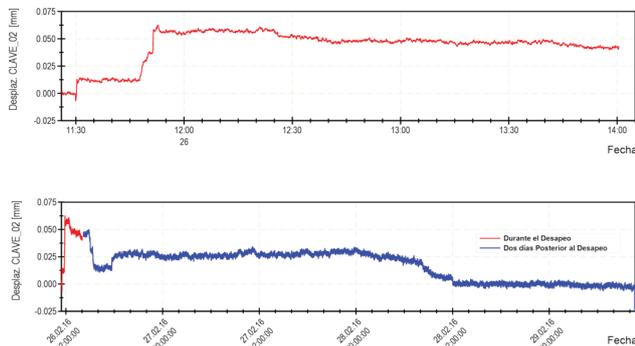


Figura 17 Registro de desplazamiento del sensor ubicado en la clave de la bóveda 2. Valores de desplazamiento (mm) *durante el desapeo* → Máximo: 0,0641, Final parada: 0,0427; y *días posteriores al desapeo* → Final registro: -0,0086. (“+”: desplazamiento de la clave hacia abajo)

De acuerdo a los registros obtenidos, referir que, de manera excepcional, el sensor ubicado en el arco 3 que delimita las bóvedas 03-04 (eje 03) no llegó a estabilizar su medida durante el tiempo monitorizado (Figura 18). No obstante, señalar que el incremento de desplazamiento registrado (apertura de grieta) fue relativamente pequeño (de 0,000 mm hasta 0,047 mm).

5.2 Sistema global de monitorización permanente

Por su parte, la evolución de los movimientos registrados por los sensores del sistema remoto de monitorización continua reflejan poca variación durante la actuación realizada. A modo de ejemplo, se recogen en la Figura 19 los gráficos de evolución de algunos de los dispositivos, desde el día anterior al desapeo hasta tres días posteriores, teniendo en cuenta un período de muestreo de 1 segundo.

En este sentido, referir que los fisurómetros mantuvieron un comportamiento relativamente estable durante el período controlado. Únicamente, el FIS04 registró una ligera variación (Figura 19a), la cual se encontró asociada al desapeo de la Fase 2 de la bóveda 4, e instante en el que se retiraron los puntales cercanos

al sensor. No obstante, señalar que la variación fue puntual y poco significativa.

Por su parte, el comportamiento manifestado por los inclinómetros durante el período controlado no presentó variación angular fuera de lo normal. Puede apreciarse en la Figura 19b ejemplo de evolución de las inclinaciones del sensor INCL04.

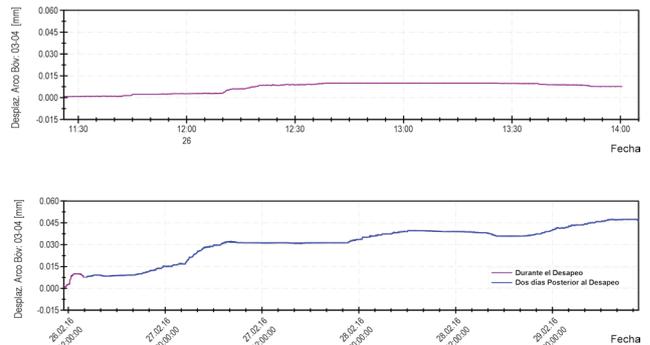


Figura 18 Registro de desplazamiento del sensor ubicado en el arco 3 *durante el proceso de desapeo* (Gráfico superior) y *durante los días posteriores al desapeo* (Gráfico inferior). (“+”: indica apertura de grieta)

En cuanto a los desplazamientos relativos de las cintas de convergencia, referir que éstos no experimentaron cambios significativos. Así, la Figura 19c refleja, a modo de ejemplo, el seguimiento de la cinta de convergencia CONV02. A este respecto, señalar que el pico reflejado en la gráfica no corresponde a la actuación de desapeo, éste se encuentra asociado a trabajos realizados en torno al sensor el día previo.

Finalmente, la Figura 19d ilustra la evolución de las presiones en el punto de control GPS-Contr03 situado en el contrafuerte 03. Tanto en este caso como en el resto, las variaciones registradas fueron poco significativas.

En relación al comportamiento registrado por los puntos de control manual de apertura/cierre de grietas e inclinaciones, cabe referir que las medidas registradas fueron poco significativas dada la amplitud de los movimientos recogidos. A modo de ejemplo, recogemos en la Figura 20 la evolución de la apertura de las grietas controladas en el Arco 4 desde Enero de 2016.

El hecho de disponer de puntos de control manual permite, entre otras, disponer de mediciones de contraste de las lecturas obtenidas de los sensores en continuo. En este sentido, y de acuerdo a la ubicación del FIS04 y G-08, relativamente adyacente una de otra, puede apreciarse como en ambos casos existe una ligera variación de las amplitudes manifestada en la bóveda 04. En el caso del punto de control manual se visualiza una variación de la lectura registrada previo al inicio del desapeo y posterior a la actuación.

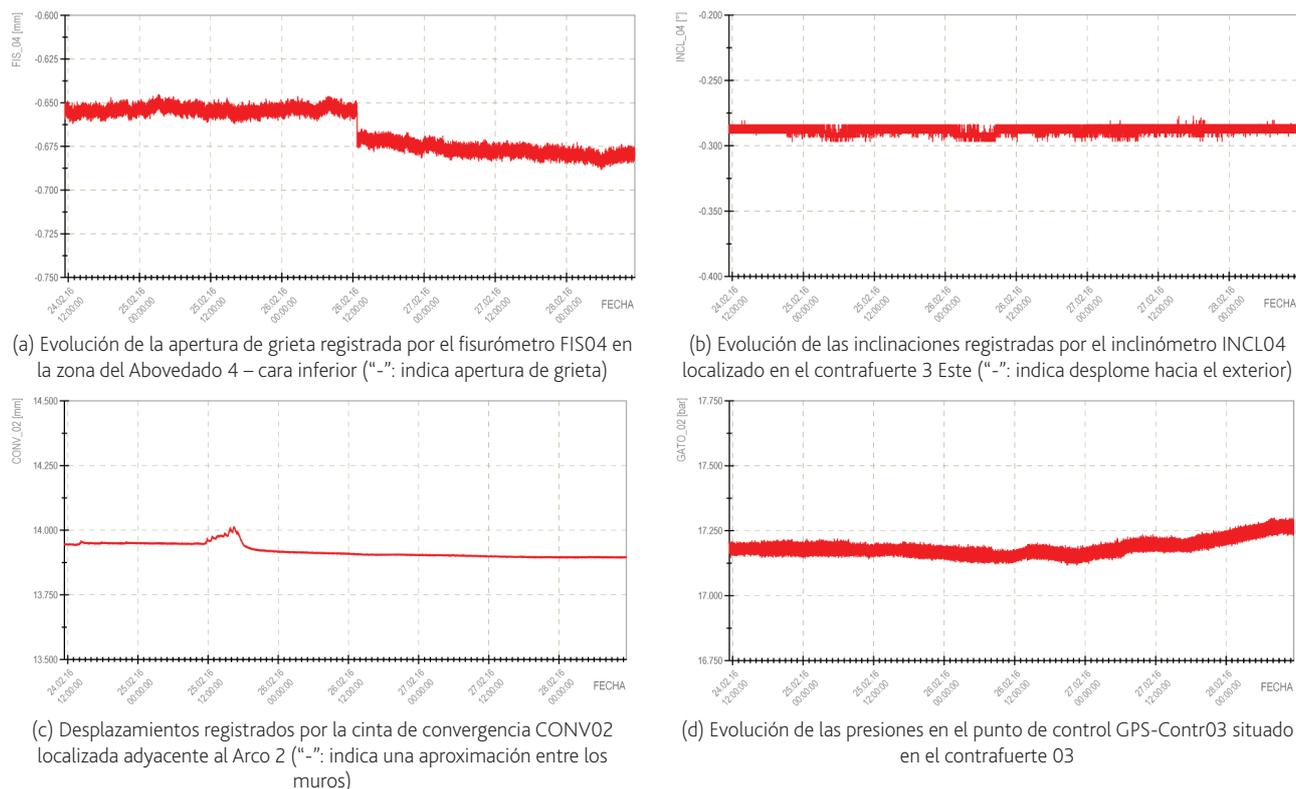


Figura 19 Gráficas de evolución registradas por los sensores del sistema remoto de monitorización continua durante el proceso de desapeo

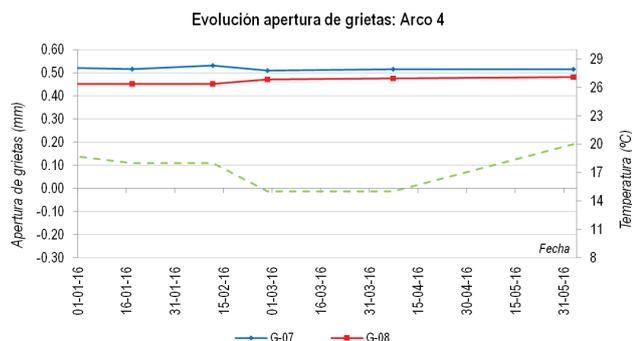


Figura 20 Evolución de la apertura de fisuras en grietas existentes en la zona del arco 4 (“+”: indica apertura de grieta)

6 Conclusiones

A la vista de los movimientos registrados por los diferentes sistemas de monitorización empleados, cabe referir que el desapeo de las bóvedas de la Iglesia se llevó a cabo sin la ocurrencia de ninguna irregularidad durante el desarrollo de los trabajos.

Relativo a la evolución de los sensores del sistema local temporal, cabe referir que, de manera general, durante el proceso de desapeo de las bóvedas no se detectó ningún comportamiento fuera de lo normal, llegando inclusive a estabilizarse cada una de las medidas. El único sensor que manifestó un comportamiento anómalo

fue el sensor de desplazamiento ubicado en el arco 3, el cual no llegó a estabilizar su medida durante el período controlado. No obstante, señalar que el incremento registrado fue poco significativo (de 0,050 mm aproximadamente). Pese a ello, se recomendó dar seguimiento a dicho elemento, con objeto de descartar una actividad de la fisura ubicada en la clave del arco.

En cuanto al comportamiento registrado por los sensores en continuo del sistema global de monitorización permanente ubicados en distintas zonas de la Iglesia (cintas de convergencia, inclinómetros, fisurómetros, etc.), referir que éstos no llegaron a experimentar ningún movimiento significativo durante el proceso de desapeo. Asimismo, en lo que respecta al sistema de gestión empleado, señalar que versatilidad conseguida con el mismo permitió dar seguimiento a los sensores desde un punto alejado del PC Industrial sin la necesidad de conexión por cable.

Por otra parte, destacar la buena congruencia de los resultados alcanzados por los puntos de control manual y los sensores en continuo. La fiabilidad de este tipo de sistemas permite incrementar áreas a controlar minimizando los costes asociados a la instalación de sensores electrónicos en caso de disponer menos unidades.

Con todo lo anterior, queda demostrado, una vez más, que el empleo de los sistemas de monitorización antes, durante y posterior a una intervención contribuye a un incremento en la seguridad de la construcción al proporcionar alertas de posible peligro ante daños y/o degradaciones de los elementos que están siendo controlados.

Finalmente, y tras los resultados alcanzados, puede concluirse

que los sistemas de monitorización juegan un rol importante en el análisis estructural tanto de estructuras en general, como de edificaciones históricas en particular.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo desean manifestar su agradecimiento a la Sociedad de Activos Inmobiliarios Campus Comillas (SAICC, S.L.) por la confianza depositada para el desarrollo de los convenios suscritos que hacen posible el desarrollo de estas investigaciones.

Referencias

- [1] Binda, L.; d Veckey, RC. (eds). (2001) – *Onsite control and evaluation of masonry structures*. RILEM Publications, 369 p. Smart Monitoring of Historic Structures (2010).
- [2] Chang, P.C.; Flatau, A.; Liu, S.C. (2003) – Review paper: health monitoring of civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2 (3) 257–267.
- [3] Enckell, M. – *Structural Health Monitoring using Modern Sensor Technology - Long-term Monitoring of the New Årsta Railway Bridge*. Licentiate Thesis, KTH Royal Institute of Technology. TRITA-BKN. Bulletin 86, 2006. ISSN 1103-4270.
- [4] European Commission Research Project – SMooHS Smart Monitoring of Historic Structures (2010). Monitoring of Historic Structures (Guidelines).
- [5] Housner, G.W.; Bergman, L.A.; Caughey, T.K.; Chassiakoa, A.G.; Claus, R.O.; Masri, S.F.; Skelton, R.E.; Soong, T.T.; Spencer, B.F.; Yao, J.T.P. (1997) – Structural Control: Past, Present, and Future. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 123 (9), 897-971.
- [6] Karbhari, V.M. (2005) – Health Monitoring, Damage Prognosis and Service-Life Prediction – Issues Related to Implementation, in Chapter V, Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, ed. F. Ansari, Springer, pp. 301-310.
- [7] Lombillo, I.; Blanco, H.; Pereda, J.; Villegas, L.; Carrasco, C.; Balbás, J. (2016) – Structural health monitoring of a damaged church: design of an integrated platform of electronic instrumentation, data acquisition and client/server software. *Struct. Control Health Monit.*, 23, 69–81, DOI: 10.1002/stc.1759.
- [8] Lombillo, I.; Blanco, H.; Villegas, L.; Balbás, J.; Carrasco, C.; Liaño, C.; Vela, R.; Pereda, J. (2014) – Monitorización remota de construcciones históricas: Metodología empleada y puesta en marcha en la Iglesia del Seminario Mayor de Comillas. Congreso Latinoamericano REHABEND 2014, Santander, España; Mayo 2014. ISBN libro: 978-84-616-8862-3; ISBN CD: 978-84-616-8863-0.
- [9] Pereda, J.; Vela, R.; Lombillo, I.; Blanco, H.; Villegas, L. (2014) – Integración de sistemas de instrumentación electrónica, adquisición de datos y desarrollo de aplicaciones de software para la monitorización remota de patologías estructurales. Congreso Latinoamericano REHABEND 2014, Santander, España; Mayo 2014. ISBN libro: 978-84-616-8862-3; ISBN CD: 978-84-616-8863-0.
- [10] Rossi, C.; Rossi, P.P. (2001) – A low-cost procedure for quick monitoring of monuments and buildings. RILEM TC 177-MDT Workshop on on-site control and non-destructive evaluation of masonry structures, Mantova, Italy; November 2001.
- [11] Schueremans, L.; Van Balen, K.; Brosens, K.; Van Gemert, D.; Smars, P. (2007) – The Church of Saint James at Leuven: Structural Assessment and Consolidation Measures. *International Journal of Architectural Heritage*, 1: 82–107.
- [12] Villegas, L.; Lombillo, I. (2008) – Descripción general de los estudios previos realizados sobre la patología, la idoneidad estructural y de materiales del Seminario Mayor de Comillas. Conclusiones obtenidas. Libro: *Tecnología de la Rehabilitación y la Gestión del Patrimonio Construido* (REHABEND 2007). Volumen único, pp. 129-149. Editado por el Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria. ISBN: 978-84-691-3612-6. http://grupos.unican.es/gted/07_Foros%20T%20C3%A9nicos/REHABEND2007/Libro_Rehabend2007.pdf