

Diagnostico de daños mediante pruebas dinámicas en edificios históricos: antigua iglesia de San Jerónimo de Baza (Granada)



José Enrique Povedano Molina
Arquitecto Técnico

SINOPSIS

En este artículo se expone la utilidad de la medición de las vibraciones ambientales para detectar daños estructurales en edificios, en este caso la antigua iglesia de San Jerónimo en Baza (Granada). (Foto 1)

Como consecuencia de las múltiples intervenciones que se han realizado en este edificio desde su construcción en el siglo XVI, unas con alteraciones estructurales (apertura de huecos, supresión de contrafuerte, etc.) y otras con ampliaciones o modificaciones de elementos constructivos (cubiertas, bóvedas, edificaciones anejas, etc.), unido a la complejidad del terreno subyacente, el edificio en general, pero especialmente el conjunto de cubierta y bóvedas presentan un alto grado de deterioro e inminente ruina.

Anteriores investigaciones proponían como causa de los deterioros la falta de estabilidad del terreno de cimentación por la acción de un caz o acequia que circula justo al borde del ábside (Foto 2). En otras se expone como causa de los deterioros la excesiva esbeltez de los muros debilitados por las diferentes reformas, adaptaciones y abandono generalizado.



Foto 1. Fachada principal

En general, los informes realizados anteriormente siguen el procedimiento habitual consisten en el análisis de los materiales, investigación de los sistemas estructurales y evaluación de los daños; la hermenéutica aplicada a los sistemas constructivos históricos determinaría la intervención en su rehabilitación. No existe por tanto una evaluación científico-técnica de la seguridad estructural en su conjunto.

El objetivo de este trabajo es la evaluación de la rigidez de las bóvedas que aunque no presentan daños visibles, se puede observar la separación existente entre estas y los muros perimetrales que las sustentan.

Se realizan las mediciones de las vibraciones producidas por la actividad del medio (viento, vehículos, actividad industrial cercana, etc.), incluso si fuese necesario mediante la excitación del elemento constructivo sometido a estudio con martillos de impacto.

A partir de los espectros obtenidos tanto en el dominio del tiempo como de las diferentes frecuencias de respuesta modal, comparadas con los valores límites tácitamente establecidos en la documentación técnica aplicable, permite ob-



Foto 2. Acequia

servar una diferencia clara entre los elementos dañados y no dañados de la estructura o bien, explícitamente a partir del modelo representativo del mecanismo dinámico obtenido mediante procedimientos de cálculo numérico, p.e. Método de Elementos Finitos (MEF) obteniendo los indicadores que permiten valorar el daño y estimar los esfuerzos que lo ha producido (torsión, comprensión, flexión, etc.).

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La Iglesia de San Jerónimo de Baza es una obra de carácter religioso de finales del Renacimiento con una remodelación en el Barroco. El edificio forma parte de un notable conjunto patrimonial junto con las actualmente desvirtuadas dependencias del monasterio anexo y el Palacio de los Enríquez.

La Iglesia y el desaparecido Monasterio, fueron fundados en 1502 por los Enríquez y Luna, (D. Enrique Enriquez, tío de D. Fernando el Católico y hermano de la reina Doña Juana de Aragón). Su construcción duró desde 1510 hasta el año 1690.

Durante tres siglos se mantuvo el conjunto Iglesia Monasterio, hasta la Guerra de la Independencia en que los frailes abandonaron el convento y todas las dependencias de ambos edificios se convirtieron en acuartelamiento de las tropas francesas.

Tras la retirada de los franceses, se ocupa de nuevo el Monasterio por los Jerónimos, hasta que se aplican las leyes de la Desamortización en 1835, quedando suprimido y cerrado.

A partir de 1839, el monasterio fue convertido en cárcel, usando sin embargo la iglesia para algunas funciones religiosas.

Después de la Guerra Civil de 1936 es cuando definitivamente pasa de uso público a privado para diferentes actividades (almacén, fábrica de harina, taller de automóviles, etc.) acelerando su proceso de ruina.

El colindante Palacio de los Enríquez cuenta con declaración como Monumento Histórico-

Artístico desde 1975, habiéndose iniciado expediente de propuesta de inscripción como BIC para el claustro e iglesia, en lógica extensión de la protección que goza dicho palacio y con los que conforman un notorio conjunto monumental.

En la actualidad en el inmueble de titularidad municipal, hasta ahora sin dedicación a un uso concreto, se están llevando a cabo las obras de protección, consolidación y restauración largo tiempo esperadas.

METODOLOGÍA DEL ENSAYO

Con fecha 25 de junio de 2012 la Consejería de Fomento y Vivienda; Dirección General de Arquitectura y Vivienda de la Junta de Andalucía, por medio de sus Laboratorios de Control de Calidad, teniendo en cuenta la documentación técnica existente y las recomendaciones de los diferentes técnicos intervinientes, realiza una serie de trabajos de investigación técnica con objeto de ampliar la información disponible actualmente y que resulte necesaria para la redacción de un proyecto de ejecución encaminado a la consolidación estructural y conservación de dicho edificio.

Como parte de dicha investigación técnica, a continuación se expone la metodología y los resultados obtenidos en la comprobación de la estabilidad de las bóvedas y estimación de su rigidez.

Consiste en mensurar el espectro de vibraciones que las condiciones ambientales producen en el edificio de referencia con la finalidad de obtener un valor de su rigidez estructural.

El método se fundamenta en la propiedad que tienen los materiales sometidos a un frente de ondas de carácter aleatorio de filtrar aquellas frecuencias propias dependientes de sus características físicas y las condiciones de contorno en que se encuentre. La determinación de esta "frecuencia propia" del elemento ensayado está relacionada por tanto con su rigidez entendiendo como tal la relación entre la fuerza desestabilizadora (esfuerzo dinámico de la vibración) y

el desplazamiento que esta produce (espectro frecuencia / desplazamiento), lo cual permite estimar algunos parámetros físicos del material objeto del ensayo.

Aunque los valores obtenidos por este procedimiento están relacionados con las condiciones generales de ejecución y geometría del edificio con independencia del punto en que se realice la medición, al tratarse de un método no destructivo de medición "in situ", la elección del punto de medición debe abarcar todas las posibles circunstancias que afecten a dicha medición; en este caso se realizaron las medidas en la clave de las bóvedas y en las tres direcciones ortogonales (plano X – Y horizontal y eje vertical Z) para cada bóveda ensayada.



Foto 3. Detalle de formación del arco

DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS ENSAYADOS

Se trata de un edificio de estilo gótico-renacentista del siglo XVI formado por una sola nave central con capillas laterales intramuros (hornacinas), crucero con sendas capillas laterales y ábside elevado sobre el nivel de la nave aproximadamente +1,50 m. Los muros son indistintamente formados por tapial o fábrica de ladrillo, sillería o mampostería; las pilastras con fábrica de ladrillo o sillería. A la izquierda (L Evangelio) lleva adosada otra nave de tres tramos, la primera (sacristía) cubierta mediante bóveda de arista y las otras dos también abovedadas aunque actualmente derruidas (Foto 3). El tejado de estas naves laterales se resuelve mediante una estructura simple de "par y picadero" a un agua (Foto 4).



Foto 4. Muros y faldón de cubierta lateral

DATOS DEL ENSAYO

- Ensayo realizado "in situ".
- Fecha de realización del ensayo: 14 de mayo de 2013.
- Condiciones ambientales aproximadas: 18 °C de temperatura y 100% de humedad relativa (lluvia) y rachas de viento flojo a moderado.

Las mediciones realizadas para cada punto fueron:

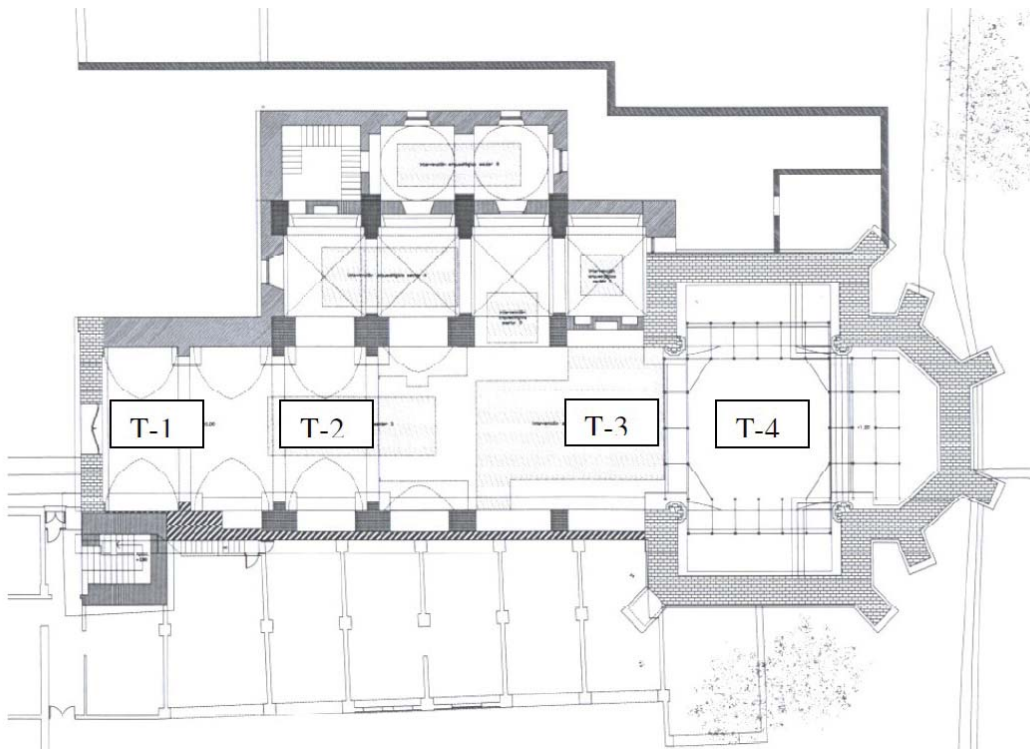
1. Oscilaciones verticales (eje vertical Z).
2. Oscilaciones horizontales (eje longitudinal X y eje transversal Y).



Foto 5. Bóvedas de la nave central



Foto 7. Grieta en ábside



Croquis "Toma de datos"

A la entrada a una cota de +6,00 sobre la rasante de la nave se dispone el "coro" o "tribuna" formado por una bóveda de cañón dividida en tres tramos delimitados por arcos fajones con lunetos laterales. Sobre dichos arcos se disponen crujías de vigas de madera, tablazón de madera y pavimento con baldosas cerámicas sobre base de mortero de cal.

La nave central, a una cota de +11,40 m. se cubre mediante una bóveda de cañón desde el muro de fachada hasta el arco toral que limita con el crucero, dividida en seis tramos delimitados por arcos fajones y lunetos. El abovedado del crucero, sus capillas laterales y el ábside se realiza con bóvedas estrelladas (nervada).

Las membranas para la formación de las bóvedas se realizan con roscas de ladrillo trasdosado con mortero de cal y cubierto con una estructura de madera de par y nudillo y tejado con faldones de pendiente uniforme. (Foto 5: Bóvedas de la nave central). La zona correspondiente a la nave central se resuelve a tres aguas (a fachada principal y dos laterales); el crucero con una cubierta de pabellón a cuatro aguas con faldones laterales a un agua y el ábside se resuelve con faldones poligonales. En la actualidad, el tejado del crucero y los laterales se encuentran prácticamente derruidas.

Adosado al edificio a la derecha en su fachada principal se dispone la Torre del Campanario (Foto 8) formada por muros de fábrica de ladrillo rematada con arcos en cada una de sus cuatro caras y cubierta de pabellón.

Dadas las condiciones del entorno, el estado ruinoso de la construcción y las deficientes condiciones de seguridad, solo se pudieron realizar las mediciones en las bóvedas de la nave central 1ª, 3ª y 6ª y el crucero, no siendo posible acceder con seguridad a la cubierta de la torre, ni a las bóvedas nervadas laterales del crucero.

REALIZACIÓN DE ENSAYO

El equipo de medida realiza la medición de la siguiente forma:



Foto 8. Torre del Campanario



Foto 9. Apeo del ábside

La señal eléctrica de salida provocada por los movimientos en los elementos piezoeléctricos del "acelerómetro" MMF es acondicionada (amplificación, filtrado y digitalización) mediante el "acondicionador de señal" T.I. El computador monitoriza, procesa los datos y guarda la información en formato específico (texto o gráfico) mediante el software Sigview para su posterior análisis.

La forma más simple de expresar los resultados de la medición es en el dominio del tiempo, el software, mediante un adecuado tratamiento matemático (Transformada de Fourier/FFT) puede expresarlo en el dominio de la frecuencia, optimizando los resultados para el análisis de las frecuencias o magnitudes (aceleración, velocidad o desplazamientos).

OBSERVACIONES Y COMENTARIOS

De los resultados obtenidos se deducen las si-

guientes consideraciones:

- La frecuencia fundamental medida sobre las bóvedas en el plano horizontal X -Y en este tipo de edificios debería estar entre los 4 Hz y 10 Hz (periodos de 0,25 a 0,10 segundos). En general, solo en la T-1 (Fig.1), en fachada y T-4 (Fig.2) en el crucero se obtienen valores de este orden, tal vez debido a la rigidez que aporta el muro transversal de fachada y la geometría poliédrica del ábside.
- Los resultados obtenidos en el eje vertical Z correspondientes a los puntos T-1 y T-2 (Fig.3 y Fig.4) en la nave central son significativamente muy bajos lo cual induce una evidente falta de rigidez a flexión de la membrana consecuencia de la deficiente unión de la bóveda con los muros perimetrales como se ha podido comprobar en el examen realizado "de visus". Los altos valores relativos obtenidos del eje Z en la T-3 (Fig.5) y T-4 (Fig.6) posiblemente sean debidos al apeo de seguridad existente bajo estos elementos (Foto 9).
- Son también significativos los deficientes valores obtenidos en los tres ejes ortogonales de la zona central de la bóveda T-2 coincidente con la zona más dañada según los datos aportados en anteriores informes, así como el valor transversal (eje Y) del crucero (T-4) coincidente con la grieta vertical del ábside producida por la eliminación del contrafuerte. (Foto 7: Grieta

RESULTADOS OBTENIDOS

Toma T1: BOVEDA TRAMO 1º

(Muro de fachada y arco fajón 1º)

Eje long "X" Eje trasv "Y" Eje vert "Z"

Frecuencia principal 0,98 Hz 5,52 Hz 0,77 Hz

Toma T2 BOVEDA TRAMO 3º

(Arcos fajones 2º y 3º)

Eje long "X" Eje trasv "Y" Eje vert "Z"

Frecuencia principal 2,66 Hz 0,77 Hz 0,41 Hz

Toma T3 BOVEDA TRAMO 6º

(Arco fajón 5º y el arco toral)

Eje long "X" Eje trasv "Y" Eje vert "Z"

Frecuencia principal 1,15 Hz 8,66 Hz 7,52 Hz

Toma T4 BOVEDA DEL CRUCERO

(Clave de la bóveda nervada)

Eje long "X" Eje trasv "Y" Eje vert "Z"

Frecuencia principal 4,91 Hz 0,76 Hz 4,76 Hz



Foto 6. Equipo de medición

- Acelerómetro piezoeléctrico uniaxial.
- Acondicionador de señal.
- Computador portátil con software de aplicación para medición de vibraciones.
- Material complementario (cables, mordazas de fijación, cinta métrica, etc.)

transversal del ábside)

- Del análisis de los valores obtenidos puede concluirse que el sistema estructural de las bóvedas, en la actualidad presenta deficiencias en su sustentación sobre los muros perimetrales o arriostramientos laterales. Estas deficiencias están desarrollando comportamientos estructurales de tipo "no lineal" (fisuras, desplomes, discontinuidades entre elementos constructivos, etc.) causantes del deterioro irreversible del edificio y su estado ruinoso generalizado.

CONCLUSIONES

El método de diagnóstico expuesto resulta concluyente y especialmente recomendable, especialmente en los siguientes casos:

- Control de calidad de la ejecución: De aplicación general en edificios en construcción para contrastar los datos obtenidos con los valores teóricos utilizados en el diseño y especialmente indicado en estructuras de comportamiento

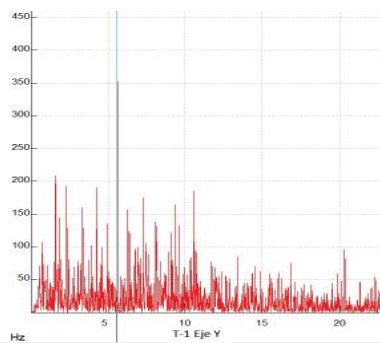


Figura 1

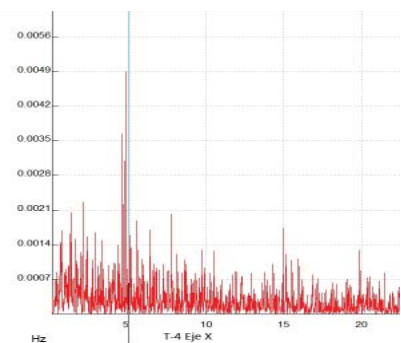


Figura 2

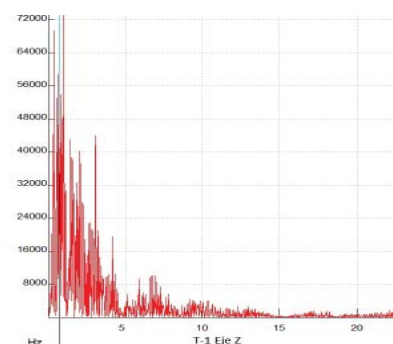


Figura 3

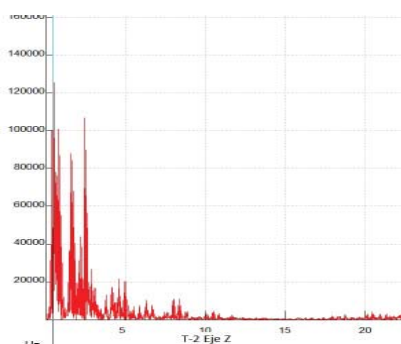
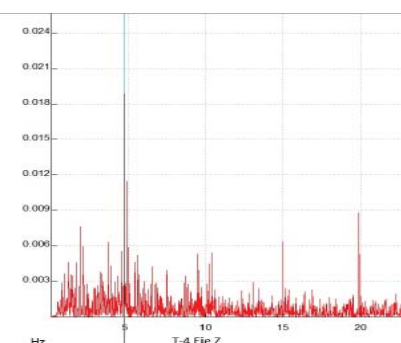
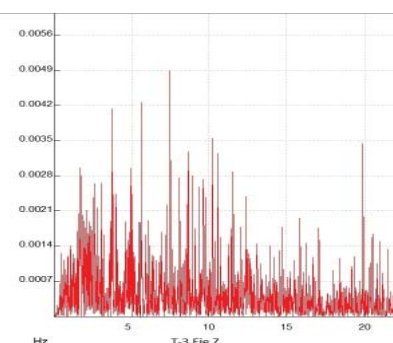


Figura 4



no lineal (madera, mampostería, etc.) como alternativa a las pruebas de carga estáticas no recomendables en estos casos.

- Evaluación de daños causados por sismo: La medición posterior al sismo puede determinar la presencia de daños estructurales importantes.
- Verificación de reparaciones o modificaciones: Especialmente en intervenciones de refuerzo o sustitución que afecten a elementos estructurales con la finalidad de comprobar la idoneidad de las soluciones adoptadas.
- Control de estructuras durante su vida útil: De aplicación en las inspecciones periódicas de edificios para la valoración de posibles alteraciones causadas por sismos menores, envejecimiento de materiales, inestabilidad del suelo, intervenciones incorrectas o modificaciones estructurales realizadas por los propietarios. ■