

CODE XX**AMBIENT VIBRATION TESTING, DYNAMIC IDENTIFICATION, AND MODEL UPDATING OF A CULTURAL HERITAGE BUILDING. THE CHURCH OF THE ROYAL MONASTERY OF SAN JERÓNIMO (GRANADA, SPAIN).*****PRUEBA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL, IDENTIFICACIÓN DINÁMICA, Y ACTUALIZACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO. LA IGLESIA DEL MONASTERIO REAL DE SAN JERÓNIMO (GRANADA, ESPAÑA)*****RESUMEN**

El análisis y la evaluación de la integridad estructural del patrimonio arquitectónico de las ciudades modernas es actualmente un elemento clave para su correcta conservación. Es bien sabido que una de las principales dificultades que se pueden detectar en un análisis estructural numérico basado en modelos de elementos finitos de este tipo de edificaciones es el alto nivel de incertidumbre asociado a numerosos factores que inciden en el comportamiento de la estructura. Los cambios en las propiedades mecánicas de los materiales estructurales, la interacción suelo-estructura o incluso el proceso de construcción del edificio pueden ser la causa de grandes diferencias entre los resultados obtenidos de un análisis numérico y otros estimados experimentalmente. En este sentido, el uso de técnicas no destructivas como las pruebas de vibración ambiental y el método de análisis modal operacional están muy extendidos como proceso para identificar propiedades dinámicas de estas construcciones históricas. La actualización del modelo de elementos finitos, a partir de los parámetros dinámicos identificados experimentalmente, permite ajustar estos modelos para obtener una estimación más precisa del comportamiento de la estructura.

En el presente trabajo, se describe la implementación de todas estas técnicas en la iglesia del Real Monasterio de San Jerónimo (Granada, España), una iglesia de estilo renacentista (1504) declarada Monumento Histórico Artístico en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz por lo que tiene grado de protección como Bien de Interés Cultural. Se utilizan pruebas de vibración ambiental y el método modal operacional para obtener las frecuencias y formas modales del edificio. El proceso de actualización implica la comparación de parámetros experimentales (frecuencias naturales y formas modales) con los valores equivalentes de un modelo numérico. Una vez finalizado este proceso, se obtiene un modelo de elementos finitos con un comportamiento dinámico similar al observado en el modelo experimental.

PALABRAS CLAVE: “Análisis Modal Operacional”, “patrimonio histórico”, “Real Monasterio de San Jerónimo”

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del estado de salud de una estructura es hoy en día un componente esencial en la previsión de las capacidades y de la vida útil de un determinado bien. Es por lo que en las últimas décadas se han desarrollado distintas técnicas que permiten realizar este tipo de valoraciones. Los avances en sofisticados instrumentos de vibración y rápidos conversores de señales análogas a digitales han hecho posible que las pruebas de vibración ambiental (AVT) se establezcan como una herramienta apropiada para identificar con certeza las propiedades dinámicas de una construcción. En la literatura podemos encontrar numerosas investigaciones sobre AVT asociadas a la aplicación del análisis modal operacional (OMA) en el mundo de la arquitectura [1].

La técnica OMA permite obtener los parámetros dinámicos que caracterizan cualquier estructura a partir de la realización de pruebas de vibración ambiental [2]. La respuesta del sistema estructural es medida mediante sensores que registran aceleraciones en puntos estratégicos. Estos sensores son pequeños acelerómetros cableados o inalámbricos que se colocan en diferentes partes del edificio para registrar su respuesta dinámica.

Entre las principales bondades que presenta la técnica OMA se destaca el hecho de ser una técnica no destructiva que permite la no interrupción de la puesta en servicio del objeto de estudio. Esto resulta de especial interés para el análisis de construcciones históricas con elevado valor patrimonial, donde el uso de este tipo de técnicas [3] resulta ser un factor fundamental. A su vez, los datos obtenidos a partir de la aplicación de OMA son de gran utilidad para llevar a cabo la actualización de modelos numéricos de cálculo en este tipo de edificaciones. La dificultad inicial que supone realizar un modelo numérico en este tipo de edificaciones reside en el elevado nivel de incertidumbre que existe tanto en la definición geométrica y de las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes del mismo, como en la simplificación de vínculos entre elementos estructurales y la relación entre suelo-estructura [4]. Dicho nivel de incertidumbre se logra reducir mediante la calibración de distintos parámetros de actualización, con el objetivo de obtener un modelo numérico que se comporte modalmente como el modelo experimental [5]. Los casos de aplicación de OMA sobre construcciones históricas se han extendido en los últimos años sobre edificios de gran esbeltez tipo torre, siendo, sin embargo, mucho menor el número de casos de estudio en relación con construcciones que presentan mayor desarrollo en planta [6-7].

El principal inconveniente de la excitación ambiental, efecto no controlado, es que provoca una falta de estacionariedad del estado de vibraciones. Otro de los inconvenientes es la influencia de los efectos ambientales en los datos de salida. Las variaciones estacionales como temperatura y humedad se ha comprobado que tiene una influencia directa sobre la respuesta dinámica de la estructura, es por lo que existen técnicas para el desacople de estos efectos sobre las señales, por ejemplo, mediante métodos basados en técnicas de regresión lineal múltiple (MLR) [8].

Los métodos y técnicas expuestos anteriormente fueron aplicados en este artículo. Se presenta en este trabajo las pruebas de vibración ambiental realizadas en la iglesia del Real Monasterio San Jerónimo de Granada, edificio que forma parte de un conjunto con carácter patrimonial y que data del siglo XVI. En primer lugar, se llevó a cabo una breve reseña histórica del objeto de estudio, además de una descripción tanto arquitectónica como geométrica, la cual nos permitió llevar a cabo un modelo numérico preliminar. Posteriormente, nos centramos en la caracterización dinámica de la iglesia mediante pruebas de vibración ambiental, mediante dichos ensayos se miden las vibraciones de la estructura producidas por excitaciones de carácter ambiental como puede ser las producidas por el viento o el tráfico, aplicando técnicas de análisis modal operacional (OMA) se estimaron con precisión las propiedades dinámicas del sistema estructural. Por último, se presenta la actualización del modelo numérico preliminar, tomando como base dicha caracterización dinámica, el objetivo es obtener un modelo confiable para realizar una posterior evaluación estructural. Finalmente, se discutirán los resultados obtenidos y se presentarán las principales conclusiones y futuros trabajos a los que dichos resultados nos han conducido.

2. ASPECTOS HISTÓRICOS

El conjunto patrimonial del Real Monasterio de San Jerónimo, perteneciente a la orden Jerónima, se encuentra en Granada (España). La construcción data del siglo XVI y consta de iglesia (Fig. 1.a) y dos claustros, alrededor de los cuales se distribuyen las diversas dependencias (Fig. 1.b). Al monasterio se accede a través del compás o patio ajardinado donde se encuentran las portadas del convento y de la iglesia (Fig. 2.a), a su vez el convento cuenta con dos claustros con celdas y capillas alrededor.

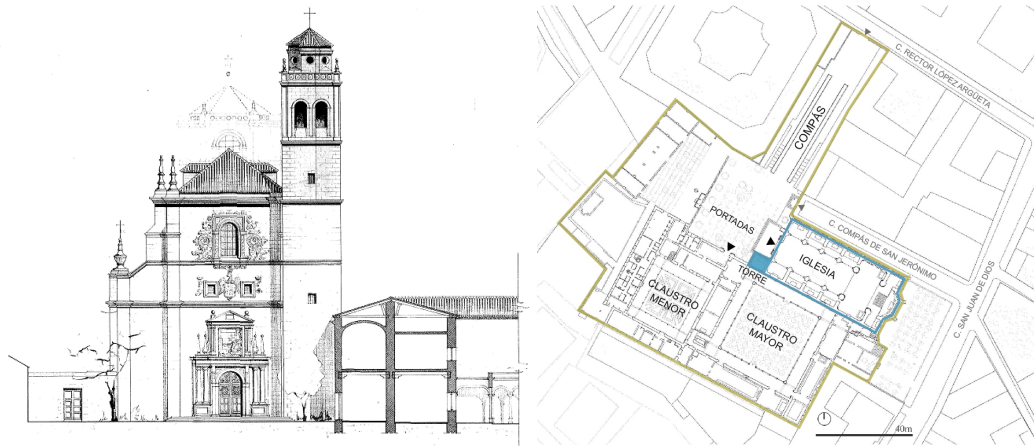


Figura 1. a) Alzado iglesia; b) Planta baja general

El acceso al claustro mayor (Fig. 2.b) se produce a través de una portada, fechada en el año 1594 [9], cuyo cuerpo bajo está configurado con treinta y seis arcos semicirculares apoyados en fuertes capiteles. El segundo cuerpo está construido con arcos carpaneles sobre columnas muy cortas y entre éstos tiene antepechos de piedra con labor gótica.



Figura 2. a) Compás; b) Claustro mayor

El segundo claustro, concluido en el año 1520, ofrece elementos con diferentes estilos arquitectónicos: góticos, mudéjares y renacentistas, constando asimismo de galería en dos plantas, de siete arcos en cada uno de sus lados, arrancando de columnas con basas, capiteles y cimacios de influencia árabe. La segunda planta, de arcos escarzanos y molduras góticas, se perdió totalmente a causa de un incendio, y fue reconstruida en el año 1965.

La iglesia es de planta de cruz latina con cabecera poligonal, y cuenta con capillas laterales sobre la nave, que se cubre con bóvedas góticas de crucería. Sus dimensiones en planta son 57x24 metros y una altura de 30 metros en la nave central, 35 metros en la cúpula y 46 metros en el campanario. El crucero y cabecera están cubiertas con bóvedas de cañón con casetones sobre pilastras corintias y entablamento con friso adornado. Existen datos de que la traza primitiva se inició en el año 1519. A los pies de la iglesia está la torre, acabada en 1565, y demolida en su mitad superior por los franceses para hacer el puente verde sobre el río Genil. Tenía ocho arcos para campanas y estaba rematada por un antepecho y chapitel muy elevado.

Una vez realizada las investigaciones necesarias para entender el edificio en lo relativo a su configuración arquitectónica y geométrica, se procedió con la generación de modelos numéricos los cuales nos ayudan a determinar un posicionamiento óptimo de los sensores. Mediante análisis dinámicos modales de los modelos numéricos se pudieron estimar los puntos del sistema estructural que ofrecían más información modal (Figura 11). Más tarde, estos modelos fueron calibrados utilizando los

parámetros dinámicos identificados mediante la metodología de OMA. Como resultado, se ha obtenido un modelo numérico con un comportamiento dinámico similar al experimental. Con la finalidad de realizar así la evaluación del comportamiento estructural se ha elaborado un modelo numérico de elementos finitos actualizado que sea veraz, para posteriormente evaluar la salud estructural de la iglesia del Real Monasterio de San Jerónimo.

2.1 Ensayos de vibración ambiental y método de análisis modal operacional

La caracterización dinámica de la iglesia del Real Monasterio de San Jerónimo se ha realizado mediante ensayos de vibración ambiental (Fig. 3). Estas pruebas se llevaron a cabo entre el 15 y 17 de Julio de 2020, con el objetivo de identificar las frecuencias naturales, las formas modales y coeficientes de amortiguamiento modal del edificio.



Figura 3: Medición in-situ, acelerómetro de Referencia 2.

2.2 Modelo inicial de elementos finitos

La aplicación del análisis modal operacional generalmente requiere la creación de un modelo inicial (Fig. 4) que nos permite estimar las principales formas modales del edificio, las cuales nos resultan de gran utilidad para determinar un posicionamiento óptimo de los acelerómetros (Fig. 5). Este modelo de elementos finitos inicial fue generado utilizando Abaqus/CAE 6.13 Software [10]. El modelo consta principalmente de cuatro componentes: muros y bóvedas de mampostería, rellenos y forjados de hormigón, modelados con elementos superficiales y sólidos, el peso y efecto arriostrante de la cubierta de madera sobre la nave central se tuvo en cuenta en dicho modelo. Las propiedades del material se estimaron inicialmente a partir de la bibliografía [11] (Tabla 1). Para las mamposterías de piedra, en muros y bóvedas, las propiedades adoptadas fueron: densidad, 2.000 kg/m³; Módulo de Young, 1.000 Mpa; Coeficiente de Poisson 0,2. Del mismo modo, se consideraron los siguientes valores para los rellenos: densidad, 900 kg/m³; Módulo de Young, 50 Mpa; Coeficiente de Poisson 0,2. Para los forjados de hormigón: densidad, 2.500 kg/m³; Módulo de Young, 38.200 Mpa; Coeficiente de Poisson 0,2.

Tabla 1: Propiedades de los materiales.

Material / Elemento	Densidad (kg/m ³)	E (MPa)	Coeficiente Poisson
Piedra	2.000	1.000	0,2
Piedra Pretil	2.500	1.000	0,2
Relleno	900	50	0,2
Hormigón	2.500	38.200	0,2
Hormigón + Piedra Torre	6.000	38.200	0,2
Forjados Campanario	3.300	38.200	0,2
Forjado Cubierta Torre	3.000	38.200	0,2
Forjado Torre Pináculo	3.200	38.200	0,2
Fábrica Bóvedas	1.800	1.000	0,2

A partir de los mayores desplazamientos modales obtenidos de este modelo inicial, se seleccionaron las posiciones adecuadas para los acelerómetros de referencia (Fig. 5).

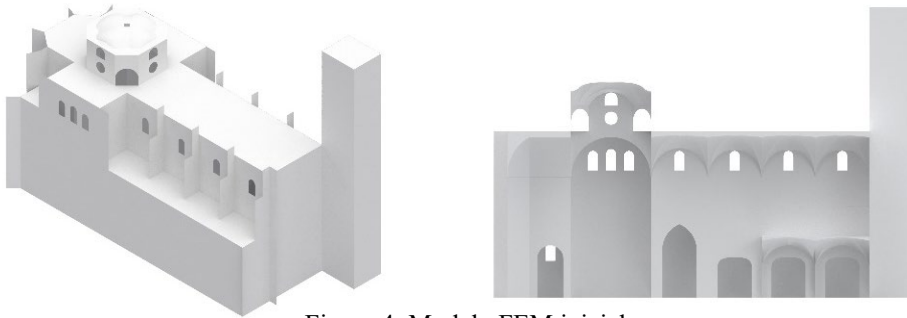


Figura 4: Modelo FEM inicial.

2.3 Pruebas de vibración ambiental

Siguiendo los resultados obtenidos del FEM inicial (Fig. 4), la Fig. 5 muestra el diseño de la campaña experimental, en el esquema podemos observar dos elementos gráficamente representados (punto rojos y negros), los puntos rojos marcan la disposición de los dos acelerómetros de referencia y los negros la disposición de los restantes, sumando un total de 62 puntos a medir. Todos estos puntos se establecieron en las tres direcciones principales (X, Y y Z), para la campaña fueron necesarios 12 medidas y ocho acelerómetros triaxiales que se van cambiando de posición en cada medida hasta completar la red. Los acelerómetros de referencia situado en los puntos P16 y P44 se mantienen fijos para así acoplar las 12 medidas. En cada una de estas puestas se registraron aceleraciones con una frecuencia de muestreo de 100 Hz y un tiempo de muestreo de 12 minutos.

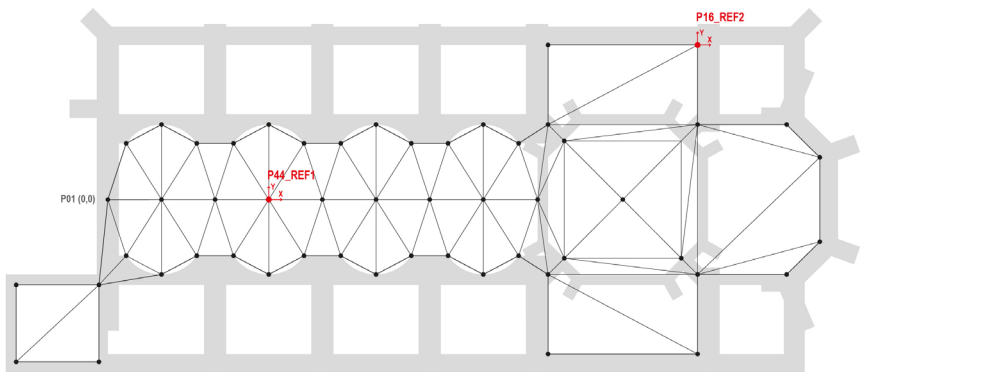


Figura 5: Localización acelerómetros y dirección.

- Sit. Acelerómetros Ref.
- Puntos de medida

Las excitaciones durante las pruebas de vibración ambiental se asociaron con cargas ambientales. El equipo utilizado (Fig. 6) para estas pruebas estuvo compuesto por acelerómetros de fuerza balanceada con un ancho de banda que oscilaba entre 0,01 y 200 Hz, un rango dinámico de 155 dB, un rango de registro de $\pm 0,25g$ a $\pm 4g$ y con una dimensión de 13,3 cm de diámetro y 6,2 cm de alto, modelo (ES-T). Estos acelerómetros se conectaron a través de cinco cables de 40 m y tres cables de 100 m de largo a un sistema de adquisición de datos de 36 canales con un ADC de 24 bits, provisto de filtros anti-alias (modelo OBSIDIAN X36, ROCK+, GRANITE). El equipo es fabricado por la empresa KINEMETRICS.



Figura 6: Equipo de medida. Central de adquisición de datos y acelerómetro triaxial.

2.4 Análisis modal operacional

Las medidas registradas anteriormente fueron procesadas por dos métodos de análisis modal operacional, uno en el dominio del tiempo, la identificación estocástica del subespacio (SSI) y otro en el dominio de la frecuencia, la descomposición de frecuencias mejorada (EFDD). Ambos métodos [12-13] están implementados en el software Artemis.

Como muestra la Tabla 2 las frecuencias naturales, los coeficientes de amortiguación y las formas modales se determinaron aplicando ambos métodos –SSI y EFDD- y posteriormente se correlacionaron utilizando el Criterio de Garantía Modal (MAC) entre ambos conjuntos de resultados, con el fin de evaluar la precisión de las formas modales obtenidas:

Tabla 2: Resultados OMA: Frecuencias naturales (f), ratio de amortiguación (\mathcal{E}) y desviación estándar.

	SSI				EFDD			MAC
	f (Hz)	Std. f	\mathcal{E} (%)	Std. \mathcal{E}	Std. f	\mathcal{E} (%)	Std. \mathcal{E}	
Modo 1	1,01		1,28		1,01 (0,20%)		0,59 (54%)	0,96
Modo 2	1,38		1,11		1,38 (0,00%)		0,90 (18%)	0,99
Modo 3	1,85		2,00		1,85 (0,16%)		0,96 (52%)	0,96
Modo 4	2,42		2,74		2,39 (1,12%)		0,58 (79%)	0,70
Modo 5	2,61		1,92		2,60 (0,31%)		0,34 (82%)	0,80
Modo 6	3,10		2,08		3,04 (2,22%)		0,71 (66%)	0,74

Como muestra la Fig. 7, las pruebas de vibración ambiental permitieron identificar con precisión los 6 primeros modos de vibración en un rango de frecuencias de hasta 3,10 Hz. Las frecuencias fueron identificadas con diferencias relativas inferiores al 2,22%, tomando como referencia los resultados del método EFDD. Los resultados para la relación de amortiguación muestran una mayor variabilidad (hasta 82%), con relaciones de amortiguación modal promedio del edificio que son 1,85% y 0,68% para las técnicas de SSI y EFDD, respectivamente. Este resultado no es sorprendente y una excitación más alta parece ser necesaria para obtener medidas confiables. Con respecto a las formas modales, los valores del MAC siempre fueron superiores a 0,70, lo que indica una buena correlación entre ambos métodos. El primer modo afecta únicamente a la torre, el segundo modo afecta a la torre y a la zona del crucero con un modo de traslación transversal, el tercero es un modo de traslación transversal simple sin involucrar a la torre, el cuarto muestra un modo de traslación transversal con un giro de eje vertical en la torre, el quinto modo es un modo de traslación longitudinal afectando con un giro de eje vertical a la torre, y por último, el sexto modo corresponde a una flexión de las bóvedas con un punto de inflexión en el centro de la nave central.

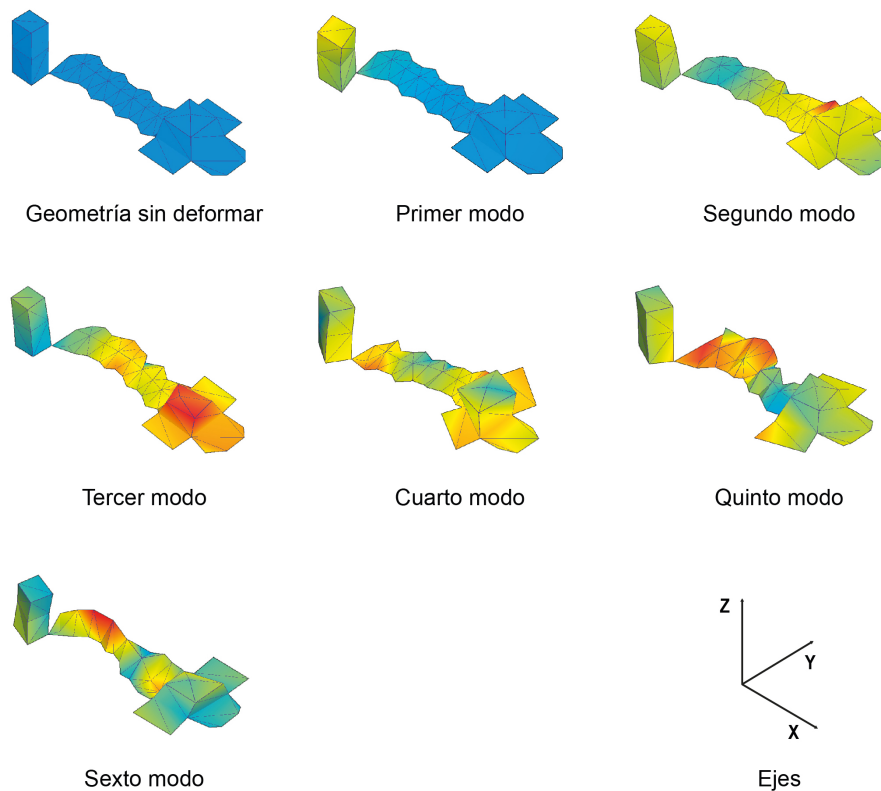


Figura 7: Formas modales de los modos de vibración.

2.5 Calibración de modelos numéricos

El proceso de calibración que se empleó en este trabajo está basado en un proceso de optimización para minimizar la diferencia entre la respuesta experimental y la obtenida por el modelo de elementos finitos (Fig. 8), es decir, se lleva a cabo una actualización de matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del modelo. En primer lugar, se establecieron los parámetros del modelo que son sensibles en la respuesta modal de la estructura, a continuación, se analizó la correlación de los parámetros modales del modelo numérico con los datos obtenidos experimentalmente en término de frecuencias naturales calculadas y de las correspondientes formas modales. Como resultado del proceso y como muestra la Tabla 3 las frecuencias obtenidas del modelo inicial no calibrado y calibrado fueron extraídas con diferencias relativas inferiores al 64,35% y 8,71% respectivamente, tomando como referencia los resultados del método SSI, lo que indica una buena correlación entre el modelo calibrado y el experimental.

Tabla 3: Resultado calibración del FEM.

Modos	SSI	FEM No calibrado	FEM Calibrado
1	1,01	1,67 (64,35%)	1,04 (2,97%)
2	1,38	1,88 (36,23%)	1,34 (2,90%)
3	1,85	2,45 (32,43%)	1,97 (6,48%)
4	2,42	2,72 (12,40%)	2,37 (2,07%)
5	2,61	2,94 (12,64%)	2,72 (4,21%)
6	3,10	3,71 (19,68%)	3,37 (8,71%)

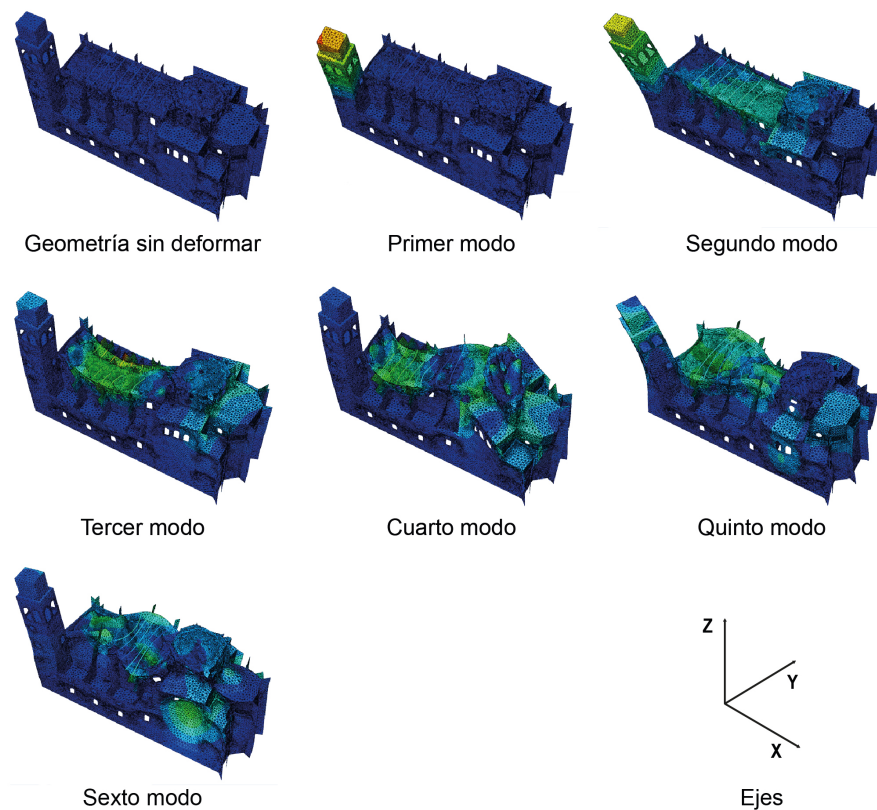


Figura 8: Modos de vibración del modelo numérico calibrado.

3. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta la aplicación de la metodología análisis modal operacional y la actualización de modelos numéricos aplicados a la iglesia del Real Monasterio de San Jerónimo de Granada.

Por un lado, una vez realizadas las campañas experimentales y el tratamiento de los datos, seis modos de vibración fueron identificados en un rango de frecuencia de 1,01 a 3,10 Hz. Los porcentajes de diferencia entre los dos métodos de identificación modal utilizados (SSI y EFDD) siempre fueron menores al 2,22%, y el valor MAC de comparación entre ellos superior a 0,70, lo que indicó una buena correlación entre ambos métodos. Todo ello nos lleva a concluir la eficacia que presenta el análisis modal operacional como técnica para identificar experimentalmente propiedades dinámicas globales y también en elementos concretos, es decir, con un carácter local [14].

La incertidumbre de un modelo numérico en construcciones históricas de fábrica reside principalmente en la dificultad para determinar las propiedades tanto geométricas como mecánicas de los elementos constituyentes. Es por ello por lo que resulta fundamental el apoyo de la calibración de modelos de elementos finitos de este tipo de edificaciones en los datos obtenidos a través de técnicas experimentales como OMA. Como resultado de la calibración se ha obtenido un modelo numérico con un comportamiento dinámico similar al experimental. Para todos los datos obtenidos, los porcentajes de diferencia entre las frecuencias naturales asociadas a los modos de vibración fueron inferiores al 8,71% (Tabla 3). Por lo tanto, el objetivo fundamental de este trabajo fue, por un lado, caracterizar dinámicamente el sistema estructural y por otro, obtener un modelo confiable sobre el cual poder evaluar la salud estructural de la iglesia.

Para validar la bondad del método y como inicio de futuros trabajos, se investigó el motivo o procedencia de patologías observadas en dicho monumento. Como hemos mencionado anteriormente, debido a las vicisitudes históricas, la torre de la iglesia fue derruida y más tarde reconstruida utilizando el hormigón

como material estructural en sus muros y forjados, en contraposición con el resto del edificio realizado en fábrica de piedra. Alineado con este hecho, en el análisis modal se detectaron que las primeras formas modales están asociadas a los movimientos provocados por la torre, como suele ser normal en este tipo de estructuras, además se observó que el comportamiento dinámico en el primer modo coincide con las características de las grietas preexistentes y que se encuentran localizadas entre la torre y la iglesia. Todo hace indicar que el motivo principal de la aparición de esta patología [15] es debido a la discontinuidad material que presenta la parte superior de la torre respecto a su base y a la propia iglesia. Otro factor reseñable y en detrimento del correcto funcionamiento estructural es el peso añadido del tramo superior de la torre. Dicho hecho ha provocado una disminución de las frecuencias del primer modo, considerándose local por solo afectar a esta parte del edificio. Por tanto, el primer modo de vibración asociado a la frecuencia fundamental es el que está directamente relacionado con las patologías detectadas.

Se evidencia la necesidad de la utilización de modelos numéricos calibrados para su aplicación en el análisis de estructuras con carácter patrimonial. Se proponen por lo tanto futuros trabajos de investigación para estudiar el motivo, procedencia y riesgo de patologías existentes en la iglesia del Real Monasterio de San Jerónimo, mediante análisis aplicado a modelos de elementos finitos.

4. AGRADECIMIENTOS

Agradecer al proyecto Hyperion la financiación de esta investigación, también especial reconocimiento a la labor de D. Joaquín Martínez González por el apoyo proporcionado en las diferentes visitas realizadas al Real Monasterio de San Jerónimo de Granada.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pachón P, Compan V, Rodríguez E, Sáez A. Control of structural intervention in the area of the Roman Theatre of Cadiz (Spain) by using non-destructive techniques. *Construction and Building Materials*. 2015; 101(572-583); <https://10.1016/j.conbuildmat.2015.10.141>.
- [2] Ramos L. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures (PhD Thesis). University of Minho; 2007.
- [3] Diaferio M, Foti D, Giannoccaro N. Identification of the modal properties of a building of the Greek heritage. *Key Engineering Materials*. 2014; 628(150-159). <https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.628.150>.
- [4] Atamturktur S, Laman J. Finite Element Model Correlation and Calibration of Historic Masonry Monuments. *Structural Design of Tall and Special Building*. 2012; 21(2): 96-113. <https://doi.org/10.1002/tal.577>.
- [5] Friswell M, Mottershead J. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Swansea, United Kingdom. Kluwer Academic Publishers; 1995.
- [6] Lacanna G, Ripepe M, Marchetti E, Coli M, Garzonio C. Dynamic response of the Baptistery of San Giovanni in Florence, Italy, based on ambient vibration test. *Journal of Cultural Heritage*. 2016; 20(632-640). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.007>.
- [7] Ramos L, Mevel L, Lourenço P, Roeck De G. Dynamic monitoring of historical masonry structures for damage identification. Proceedings of 26th International Modal Analysis Conference. February 1, 2008.
- [8] A. Kita, N. Cavalagli, and F. Ubertini, "Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 120, pp. 180–202, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.10.021>
- [9] Martínez, A. Iglesia de San Jerónimo (Granada). <http://www2.ual.es/ideimand/iglesia-de-san-jeronimo-granada/> (accessed: October 2021).
- [10] Users manuals. Dassault Systemes, Simulia, Abaqus v.6.13-3; 2015.

- [11] Augenti N, Parisi F, Acconcia E. MADA: online experimental database for mechanical modelling of existing masonry assemblages. Proceeding of 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal; September 24-28, 2012.
- [12] Overschee P, De Moor B. Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications. London, United Kingdom: Kluwer Academic Publishers; 1996: 254 p.
- [13] Brincker R, Ventura C, Andersen, P. Damping estimation by frequency domain decomposition. Proceeding of 19th International Seminar on Modal Analysis, IMAC. Kissimmee, USA; February 5-8, 2001.
- [14] Romero M, Pachón P, Compán V, Cámara M, Pinto F. Operational Modal Analysis: A Tool for Assessing Changes on Structural Health State of Historical Constructions after Consolidation and Reinforcement Works—Jura Chapel (Jerez de la Frontera, Spain). Shock and Vibration. 2018; <https://doi.org/10.1155/2018/3710419>.
- [15] Elyamani A, Caselles O, Roca P, Clapes J. Dynamic investigation of a large historical cathedral. *Struct Control Health Monit.* 2017; 24(3), e1885. <https://doi.org/10.1002/stc.1885>.