

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS MEDIANTE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL. APLICACIÓN SOBRE LA IGLESIA DE SANTIAGO (JEREZ DE LA FRONTERA).

Pachón, Pablo^{1*}; Compán, Víctor²; Rodríguez-Mayorga, Esperanza³

1: Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla
e-mail: ppachon@us.es

2: Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla
e-mail: compan@us.es

3: Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno
Universidad de Sevilla
e-mail: espe@us.es

PALABRAS CLAVE: Análisis Modal Operacional; Técnica no destructiva; Iglesia de Santiago.

RESUMEN

Las pruebas de vibración ambiental están consolidadas desde décadas en el mundo ingenieril como uno de los principales métodos experimentales para evaluar el comportamiento dinámico de estructuras a gran escala. La excitación artificial de grandes estructuras conlleva una gran complejidad, lo que hace recurrir al análisis modal operacional (OMA) para la identificación modal de las propiedades dinámicas de la estructura [1, 2].

En los últimos años podemos encontrar numerosas aplicaciones de pruebas de vibración ambiental sobre construcciones históricas de fábrica. Son numerosos los factores favorables que han hecho de esta técnica una herramienta realmente útil para identificar las propiedades dinámicas de una edificación histórica [3,4]. Entre ellos, el bajo coste económico que supone hacer este tipo de pruebas, la no interrupción del normal funcionamiento del edificio mientras las pruebas son realizadas y, especialmente, el hecho de ser una técnica no destructiva, factor fundamental en este tipo de construcciones.

El presente estudio investiga las características dinámicas de la Iglesia de Santiago (Jerez de la Frontera), edificio de carácter gótico construido a finales del siglo XV. Tras realizar las diferentes pruebas de vibración ambiental y utilizar dos técnicas de identificación modal, seis modos de vibración fueron obtenidos en un rango de frecuencia de 0 a 10 hercios. La bondad de los resultados obtenidos fue estudiada comparando las diferencias entre las frecuencias naturales y los desplazamientos modales obtenidos.

Se concluye la idoneidad del método presentado, como técnica no destructiva, para caracterizar dinámicamente edificaciones históricas de fábrica.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio del comportamiento estructural de las construcciones históricas se ha convertido en práctica habitual el desarrollo de un modelo de elementos finitos al objeto de determinar numéricamente su respuesta ante las acciones de naturaleza estática y dinámica.

Para desarrollar un modelo numérico adecuado de la estructura es necesario reducir el número de errores matemáticos a un nivel aceptable, estableciendo con cuidado las hipótesis en las que se apoya el mismo. Sin embargo, incluso con los más cuidadosos y detallados modelos numéricos, desarrollados a partir de los datos disponibles y del mejor juicio técnico, se producen habitualmente diferencias entre los resultados obtenidos experimentalmente y los estimados, por contrapartida, de forma numérica. Esto se debe, de forma típica, a las inevitables incertidumbres asociadas al propio modelado de la estructura, las condiciones de contorno de la misma, las propiedades de los materiales constituyentes y el efecto, no siempre adecuadamente considerado, de los elementos no estructurales. Normalmente, los errores estimados entre las frecuencias naturales estimadas experimental y numéricamente no son despreciables, siendo actualmente aceptado que las propiedades modales identificadas experimentalmente son más fiables que las procedentes del modelo de elementos finitos, como indican los resultados de estudios realizados sobre construcciones existentes. Una vez que los parámetros modales de la construcción histórica han sido identificados experimentalmente, los errores existentes en el modelo inicial de elementos finitos de la estructura pueden ser corregidos, denominándose dicho proceso de mejora, actualización de los modelos de elementos finitos.

En este artículo, se presenta en primer lugar el objeto de estudio, una iglesia situada en la ciudad de Jerez de la Frontera (Cádiz, España) (Figura 1). Se hará un breve recorrido tanto por los aspectos históricos más relevantes, como por su configuración arquitectónica. A continuación, se llevará a cabo la introducción al análisis modal operacional, metodología seguida para caracterizar dinámicamente nuestro objeto de estudio. Una vez introducida la técnica, se presentará los resultados obtenidos en la iglesia de Santiago. Se describe tanto la campaña experimental seguida, como el tratamiento de los datos que nos conducen a la identificación de las propiedades modales de la estructura. Para finalizar, se discutirán los resultados obtenidos y se presentarán las correspondientes conclusiones.



Figura 1: Iglesia de Santiago (Jerez de la Frontera)

2. IGLESIA DE SANTIAGO (JEREZ DE LA FRONTERA)

La Iglesia de Santiago de Jerez de la Frontera se encuentra situada fuera del recinto amurallado de la histórica ciudad medieval. El templo de Santiago se construye desde finales del siglo XV y hasta la primera mitad del siglo XVI. Se trata de una notable construcción gótica a la que se le han añadido luego en estilo barroco el remate de la torre y la espadaña, así como la Capilla del Sagrario, cuadrada y con una portada barroca al interior, realizada por la Hermandad del Prendimiento en el siglo XVIII. Se podría inscribir como una construcción inscrita en el gótico final, donde el purismo y la desnudez de sus formas son las notas dominantes en las que se sigue en gran medida la pauta marcada por la catedral hispalense.

2.1 Configuración Arquitectónica

Las trazas de la actual iglesia de Santiago (Figura 2), son atribuidas a Alonso Rodríguez, maestro mayor de la Catedral de Sevilla entre los años 1496 y 1513. La similitud entre las trazas de los dos templos es importante, hasta el punto de que Teodoro Falcón Márquez afirma que la Iglesia de Santiago es la herencia más directa de la Catedral de Sevilla [5].

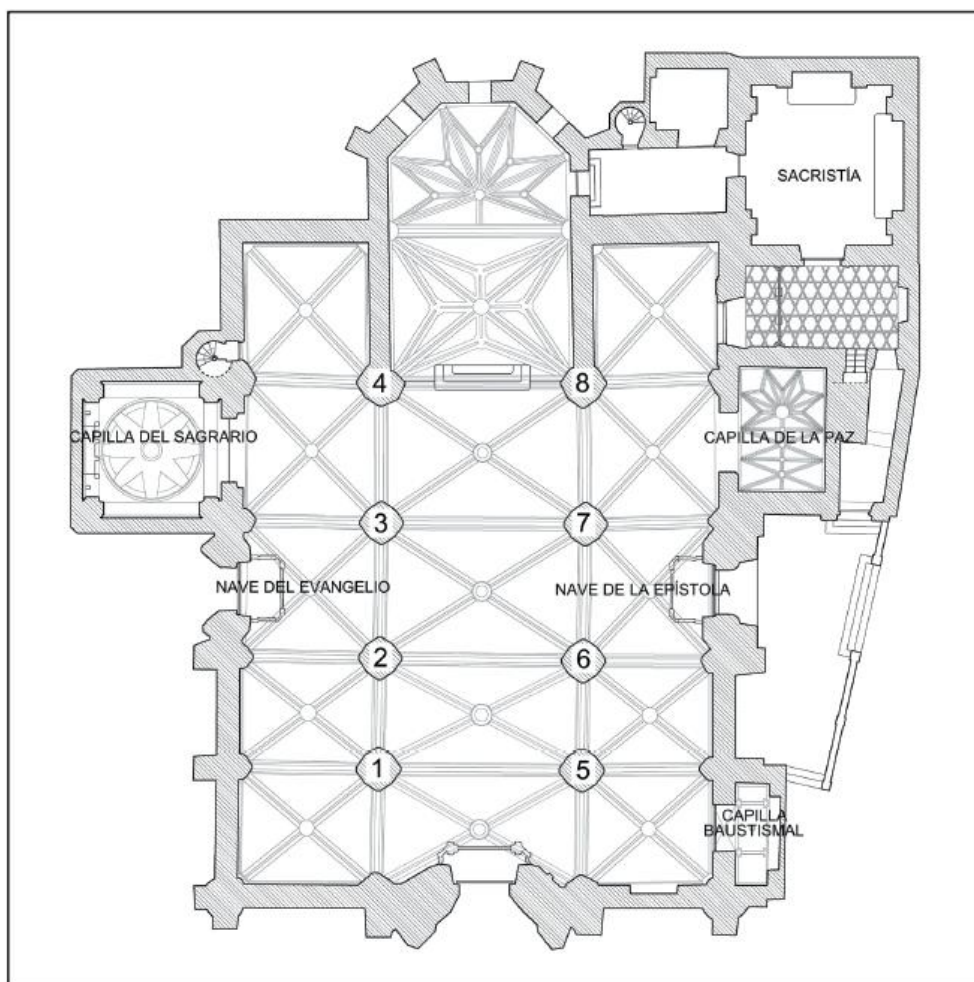


Figura 2: Planta actual de la Iglesia de Santiago

La iglesia, de planta rectangular, consta de tres naves, la central de mayor altura, cubiertas con bóvedas de crucería sustentadas por seis pilares exentos decorados con baquetones sobre basas bulbosas. El ábside, pentagonal, presenta unas ventanas a gran altura sobre la línea de imposta. El resultado es una estructura de dimensiones 43x25 m² en planta y una altura máxima aproximada de 20 m. en la nave central.

Las tres portadas del edificio son góticas, la de la epístola presenta una distribución similar a las de las portadas laterales de San Miguel de Jerez, situada entre dos contrafuertes, y está decorada profusamente con motivos vegetales y antropomórficos. La del evangelio, carece de la rica decoración de la anterior resultando una versión simplificada de la misma. La fachada principal, desarrollada entre dos contrafuertes se divide en dos cuerpos. La parte inferior, que corresponde a la puerta de ingreso, se resuelve mediante un arco apuntado y abocinado coronado por un gablete, mientras que la superior lleva otro arco apuntado en el que se inscribe una hornacina, tanto esta como la torre que remata la fachada se deben a las trazas de Diego Moreno Meléndez y se construyeron entre 1663 y 1673 [5].

2.2 Evolución Histórica

Son numerosos los acontecimientos sufridos por la iglesia a lo largo de la historia que hicieron cambiar la configuración de la misma hasta la geometría que presenta actualmente [5].

A finales del siglo XVII y quizás a causa de la reciente construcción de la nueva torre fachada, concluida en década de los setenta, la iglesia sufrió una grave ruina. En la madrugada del 24 de febrero de 1695, festividad de San Matías, se hunden los pilares segundo y tercero del Evangelio arrastrando consigo los seis tramos de bóvedas que cargaban sobre ellos, el muro que se apoyaba en los mismos y dos arbotantes. Los trabajos consistieron en la reposición de dichos pilares llevándolos a cabo con una mayor sección y fábrica de distintas características a la original.

Durante el siglo XVIII el edificio no presenta ningún problema estructural aunque se estuviera construyendo en el edificio durante toda la centuria. Hacia 1726 se construyó la Capilla de la Hermandad del Prendimiento, en la actualidad Sagrario. Se abre en el cuarto tramo de la nave del evangelio, junto a la puerta que da acceso a la calle. De planta cuadrangular, está cubierta por una cúpula de media naranja apoyada sobre pechinas. En 1733 se efectuó una restauración de la Capilla de la Paz a cargo del arquitecto Francisco Diosdado y, ya en la segunda mitad del siglo, cabe ser destacada la obra de la espadaña, situada sobre el muro meridional del ábside, realizado por Juan de Vargas en 1770.

A finales del siglo XIX comenzaron importantes obras de restauración a cargo de José Esteve y López, arquitecto valenciano afincado en Jerez que ya había restaurado de modo semejante la Parroquia de San Miguel. Con esta restauración se pretende devolver al templo a su antiguo esplendor, siendo una gran reforma con consecuencias directas en el futuro.

En 1902 Se desprendió un trozo de dovela de un arco de la nave principal, y el pilar 1, que venía presentando problemas desde la primera ruina acaecida en el templo, avanza rápidamente en su ruina. Rafael Esteve, arquitecto municipal, declara el pilar antes citado en estado ruinoso, de forma que en 1905 se acometió su reconstrucción íntegramente en piedra caliza. De igual forma el pilar 7 fue intervenido a finales de la segunda década del siglo, sustituyendo los sillares dañados de la base uno a uno.

A mediados de siglo, y tras un informe redactado por el arquitecto Fernando de la Cuadra, comenzaron unas obras de rehabilitación de los muros del lado del Evangelio, así como en las bóvedas correspondientes a dicho lado. Durante la ejecución de los trabajos, en el año 1956, se hunde el pilar 6 (Figura 3), parece ser que por aplastamiento por exceso de carga en el tercio inferior del pilar, teniendo nuevamente como causa la baja resistencia a la compresión del material. Dicho pilar sería reconstruido en 1962 por otro exteriormente de piedra, pero con su núcleo de hormigón ligeramente armado. A su vez se hicieron numerosas intervenciones como la consolidación de la cimentación del edificio mediante el atado con zunchos de hormigón armado de todos los pilares.

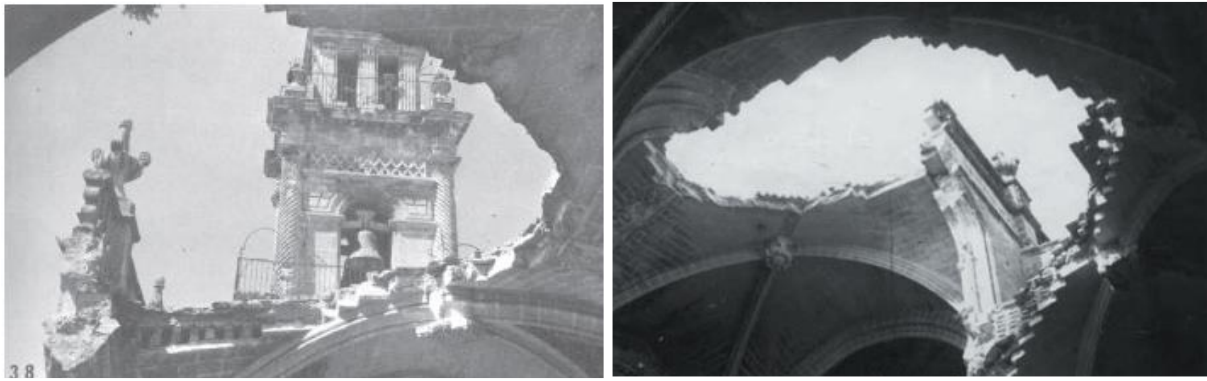


Figura 3: Hundimiento Pilar 6.

Finalmente, en 2003 la iglesia vuelve a mostrar signos de inestabilidad, manifestados a través de grietas en prácticamente todos los pilares salvo el pilar 1, y de forma más aguda en el pilar 5 y en el muro de la capilla Bautismal. Poco tiempo después se inició un análisis detallado encaminado a la consolidación del templo con el arquitecto Emilio Yanes Bustamante al frente, análisis que puede consultarse extensamente en la tesis de la arquitecta Esperanza Rodríguez Mayorga. Dicho trabajo concluyó en una gran intervención de rehabilitación que tenía como premisa fundamental la consolidación de la estructura. Para ello, se utiliza la técnica de inyección armada a partir de la ejecución de abanicos de inyecciones verticales y subhorizontales bajo los elementos indicados en la figura 4. Todas las inyecciones se realizan con mezclas estables de cemento-bentonita [5, 6].

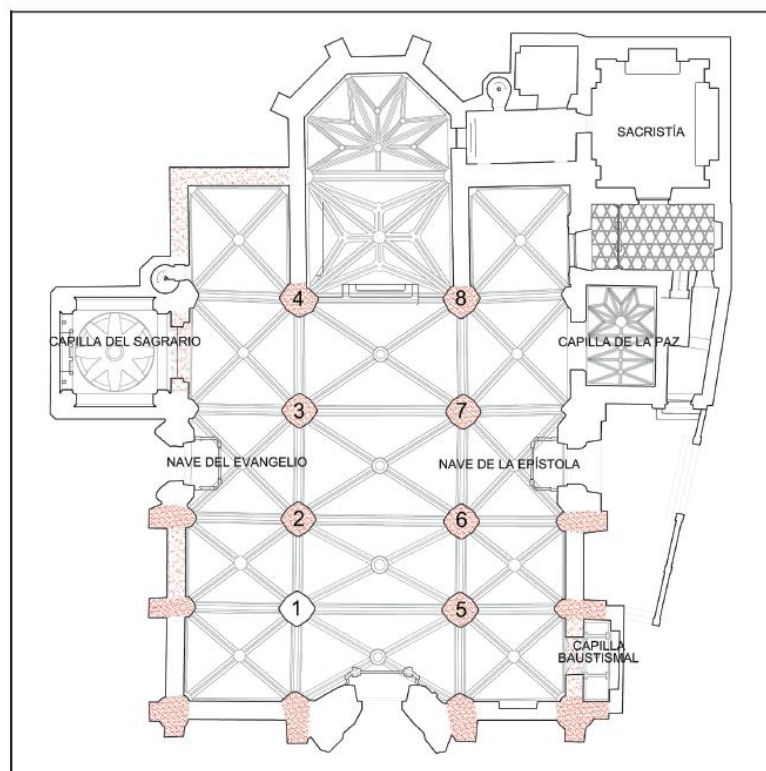


Figura 4: Planta de los elementos consolidados mediante inyección.

Dichos trabajos finalizaron en una primera fase a principios del año 2015. Con objeto de estudiar el comportamiento estructural que presenta en la actualidad la iglesia de Santiago tras las labores realizadas, se planteó la realización de una campaña experimental para caracterizar dinámicamente el edificio. La presentación de dicha campaña y los resultados obtenidos son el núcleo central de este artículo.

3. ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL

Las pruebas de vibración ambiental están consolidadas desde hace años como uno de los principales métodos experimentales para evaluar el comportamiento dinámico de estructuras a gran escala. La excitación artificial de grandes estructuras conlleva una gran complejidad, lo que hace recurrir al análisis modal operacional (OMA) para la identificación modal de las propiedades dinámicas de la estructura [1, 2].

A continuación, se presenta brevemente la aplicación del análisis modal operacional como técnica para identificar experimentalmente las propiedades dinámicas de la Iglesia de Santiago. La aplicación del Análisis Modal Operacional requiere de la generación de un modelo de elementos finitos previo. La utilidad del mismo es la identificación de los primeros modos de vibración y, dentro de los mismos, los puntos con mayor desplazamiento modal. De esta forma se decide la posición de los acelerómetros en el ensayo in situ que se llevará a cabo posteriormente. Se modeló utilizando un modelo geométrico generado con un mallado constituido por elementos superficiales de 3 nodos. Como podemos ver en la figura 5, y tras realizar un primer cálculo modal de dicho modelo, se situaron los acelerómetros de referencia en un punto que presenta un desplazamiento modal considerable en los 3 primeros modos de vibración.

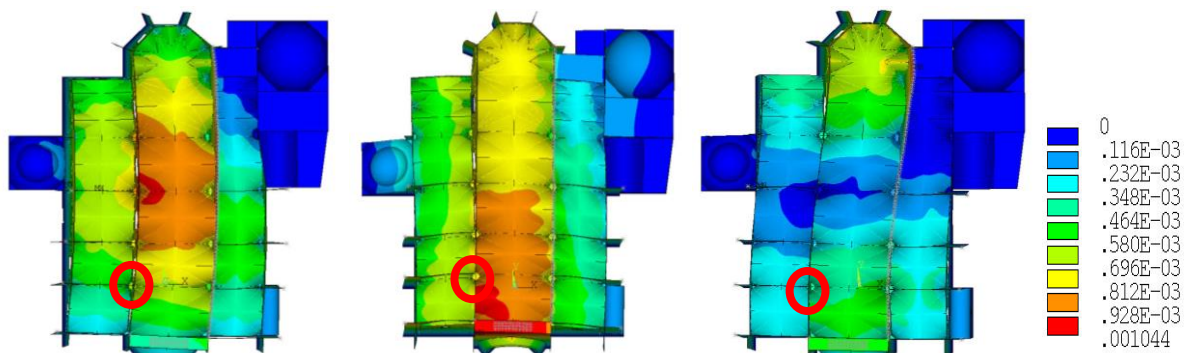


Figura 5: Desplazamientos modales correspondientes a los 3 primeros modos de vibración. Señalado la posición del acelerómetro de referencia.

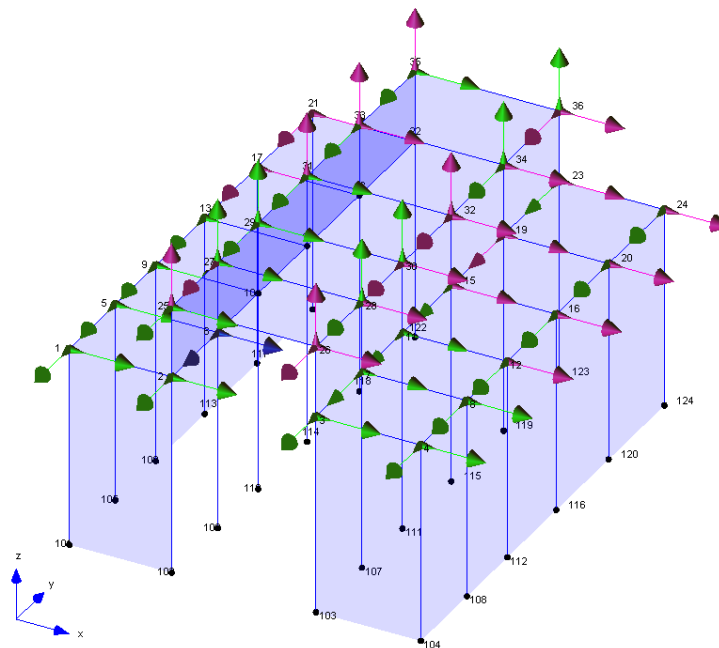


Figura 6: Situación de los puntos de medida

El resto de los acelerómetros se fueron moviendo a lo largo de los 36 puntos restantes situados a lo largo de las cubiertas de cada una de las 3 naves de la iglesia (Figura 6). Los acelerómetros se situaron siguiendo las tres direcciones principales, de forma que fue necesario realizar un total de 17 medidas de 12 minutos cada una de ellas.

Para llevar a cabo la toma de datos se utilizó un equipo compuesto por ocho acelerómetros uniaxiales de fuerza balanceada Episensor de la casa comercial KINEMATRICS, con ancho de banda de 0-200 Hz, y una central de adquisición de datos tipo GRANITE de la misma marca (Figura 7).



Figura 7. Equipo de medida.

Tras llevar a cabo la campaña experimental se procedió al tratamiento de los datos. Para ello se utilizó el software Artemis [7] (Figura 8), el cual tiene implementado los dos métodos de identificación modal utilizados: el método de Descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFFD) y el método de Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI).

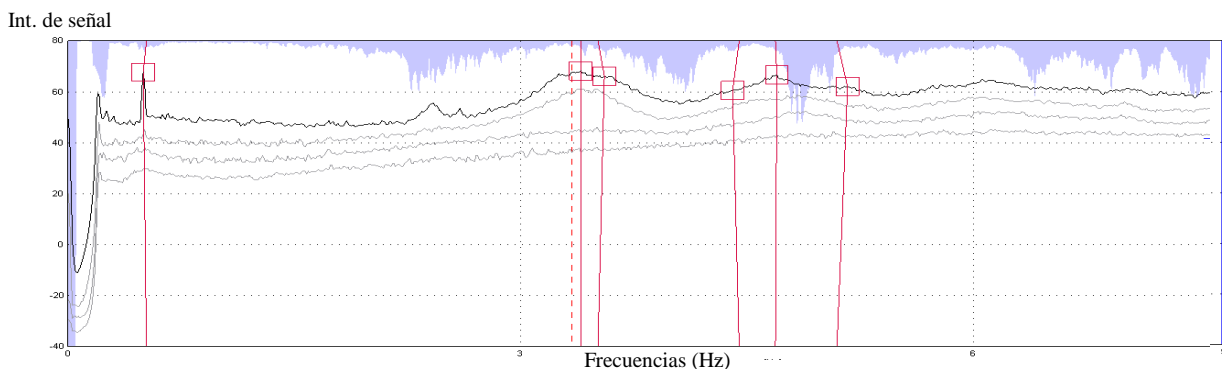


Figura 8. Espectro de respuesta. Identificación de los parámetros modales mediante el método EFDD.

Con ambos métodos se identificaron seis modos de vibración en un rango de frecuencias de 0 a 9 Hz. La similitud de los valores de las frecuencias obtenidos por ambos métodos, así como la proximidad del parámetro MAC a 1, avalan la veracidad de los datos obtenidos (tabla 1). El valor MAC (Modal Assurance Criterion) compara de forma cuantitativa todas las combinaciones posibles de pares de formas modales.

Tabla 1. Resultados Experimentales

Modo	Frecuencia Natural			MAC
	EFDD [Hz]	SSI [Hz]	Error [%]	
1	0.481	0.444	7.69	0.952
2	3.297	3.288	0.27	0.933
3	3.512	3.461	1.45	0.854
4	4.448	4.455	0.15	0.835
5	4.647	4.619	0.60	0.785
6	5.154	5.055	1.92	0.772

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha llevado a cabo la aplicación de pruebas de vibración ambiental sobre la Iglesia de Santiago, en Jerez de la Frontera. El objetivo marcado fue caracterizar dinámicamente el objeto de estudio, para en fases posteriores poder actualizar nuestro modelo de elementos finitos y así analizar numéricamente el comportamiento estructural del conjunto.

Una vez realizada la campaña experimental y el tratamiento de los datos, seis modos de vibración fueron identificados en un rango de frecuencia de 0 a 12 Hz. Los porcentajes de diferencia entre los dos métodos de identificación modal utilizados (EFDD y SSI) siempre fueron menores al 8%, y el valor MAC de comparación entre ellos superior a 0.75, lo cual nos asegura la existencia de los mismos. Todo ello nos lleva a concluir la eficacia que presenta el Análisis Modal Operacional como técnica para identificar experimentalmente propiedades dinámicas en este tipo de edificaciones.

Como futuro trabajo, en la actualidad se están utilizando las propiedades dinámicas identificadas para actualizar el modelo tridimensional de elementos finitos. De esta forma se minimiza en gran medida el nivel de incertidumbre inicial que existe tanto en la geometría como en las propiedades mecánicas reales de los materiales constituyentes. Una vez el modelo este actualizado se podrá hacer un análisis estructural exhaustivo de la iglesia de Santiago.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ramos, L. *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. PhD Thesis, University of Minho (2007).

[2] Rodrigues, J. *Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. PhD Thesis, University of Porto (2004).

[3] Ramos, L. F.; Aguilar, R.; Lourenço, P.; Moreira, S. Dynamic Structural Health Monitoring of Saint Torcato Church. *Mechanical Systems and Signal Processing* (2012).

[4] Gentile, C., Saisi, A. Dynamic-based F.E. Model Updating to Evaluate Damage in Masonry Towers, Proceedings of the 4th International Seminar on Structural analysis of Historical Constructions. Padova, Italy (2004).

[5] Rodríguez-Mayorga, E. *Rehabilitación del Templo Parroquial de Santiago Apostol en Jerez de la Frontera. Anamnesis, diagnosis, terapia y control*. PhD Thesis, Universidad de Sevilla (2011).

[6] Williamson, C. Remedial grout injection of buildings. *Construction & Building Materials*, vol. 2, núm. 3, 145-147 (1988).

[7] SVS. ARTeMIS Extractor 2010 release 5.0. <<http://www.svibs.com>>; 2010.