

EVALUACIÓN DE UNA INTERVENCIÓN MEDIANTE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL. CAPILLA DE LA JURA EN LA IGLESIA DE SAN JUAN DE LOS CABALLEROS (JEREZ DE LA FRONTERA, CÁDIZ)

Compán, Víctor^{1*}; Pachón, Pablo²; Cámara, Margarita³

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

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

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

PALABRAS CLAVE: Pruebas de vibración ambiental, Análisis Modal Operacional, Capilla de la Jura.

RESUMEN

La capilla de la Jura fue construida a finales del siglo XVI. Se trata de una construcción de marcado estilo gótico, situada en el lado del Evangelio del gran ábside de la iglesia de San Juan de los Caballeros.

El recinto posee planta cuadrada, se levanta en cantería y se cubre con una bóveda estrellada cuyos plementos son de ladrillo. Los nervios descansan sobre columnillas suspendidas con capiteles fitomorfos. El perfil de los nervios consiste en varias molduras que terminan en un baquetón de remate plano.

En el presente se pretende analizar una reciente intervención estructural que se ha llevado a cabo sobre la cubierta de la capilla de la Jura mediante un análisis basado en pruebas de vibración ambiental. Debido a la dificultad que supone evaluar correctamente los efectos de la intervención sobre este tipo de estructuras, fue necesaria la realización de diversas pruebas de vibración ambiental para poder estimar los cambios de rigideces dados en la capilla. Los datos obtenidos en las diferentes campañas experimentales fueron analizados mediante la técnica de análisis modal operacional (OMA). Dicho método es una técnica utilizada en el análisis estructural de edificaciones históricas atendiendo a varios aspectos, tales como la actualización de modelos numéricos o la monitorización continua en la valoración de la salud del edificio. De esta forma se identificaron 6 modos de vibración con sus correspondientes formas modales en un rango de frecuencia de 0 a 12 hercios. Estos datos fueron comparados y evaluados entre sí para concluir el efecto que la intervención estructural ha tenido sobre la estructura de la capilla.

1. INTRODUCCIÓN

Las pruebas de vibración ambiental están consolidadas desde hace décadas como un método experimental realmente eficaz para evaluar el comportamiento dinámico de estructuras a gran escala. Son numerosos los motivos que hacen de esta técnica que sea la más adecuada para este tipo de edificaciones históricas. Entre estos destacamos que la excitación artificial de grandes estructuras conlleva una gran complejidad, los buenos resultados obtenidos de estas aplicaciones en los últimos años, el bajo coste económico que supone hacer este tipo de pruebas y la no interrupción del normal funcionamiento del edificio mientras las pruebas son realizadas [1,2].

Aunque son numerosas las aplicaciones de las pruebas de vibración ambiental que podemos encontrar asociadas al mundo de la arquitectura durante la última década, en el caso concreto de construcciones históricas de fábrica, donde el uso de técnicas no destructivas es un factor fundamental, los casos de aplicación de OMA son menos numerosos debido a dificultades añadidas. Estos casos son aún más reducidos cuando el objeto estudiado es un elemento concreto de la estructura, como en el caso que nos ocupa [3].

En el presente estudio se presenta las pruebas de vibración ambiental realizadas sobre la capilla de la Jura, situada en la Iglesia de San Juan de los Caballeros (Figura 1). Se llevará a cabo un recorrido por el objeto de estudio, tanto por su configuración arquitectónica como por la intervención objeto de estudio. Posteriormente nos centraremos en la caracterización dinámica de la capilla a través de pruebas de vibración ambiental, antes y después de dicha intervención. Se presentará de igual forma el tratamiento de dichos datos mediante la técnica de Análisis Modal Operacional para estimar los cambios de rigideces dados en la estructura tras dicha intervención. Finalmente se discutirán los resultados obtenidos y se presentaran las principales conclusiones a los que dichos resultados nos han conducido.



Figura 1: Vista exterior de la iglesia de San Juan de los Caballeros (Jerez de la Frontera, Cádiz)

2. OBJETO DE ESTUDIO: CAPILLA DE LA JURA

La capilla de la Jura, que data del siglo XVI, se encuentra en la iglesia de San Juan de los Caballeros, una de las seis iglesias históricas creadas por el rey Alfonso X el Sabio sobre las antiguas mezquitas en Jerez de la Frontera (Cádiz, España). La capilla se sitúa en el lado del Evangelio del gran ábside, frente por frente a la Capilla Carrizosa (Figura 2).

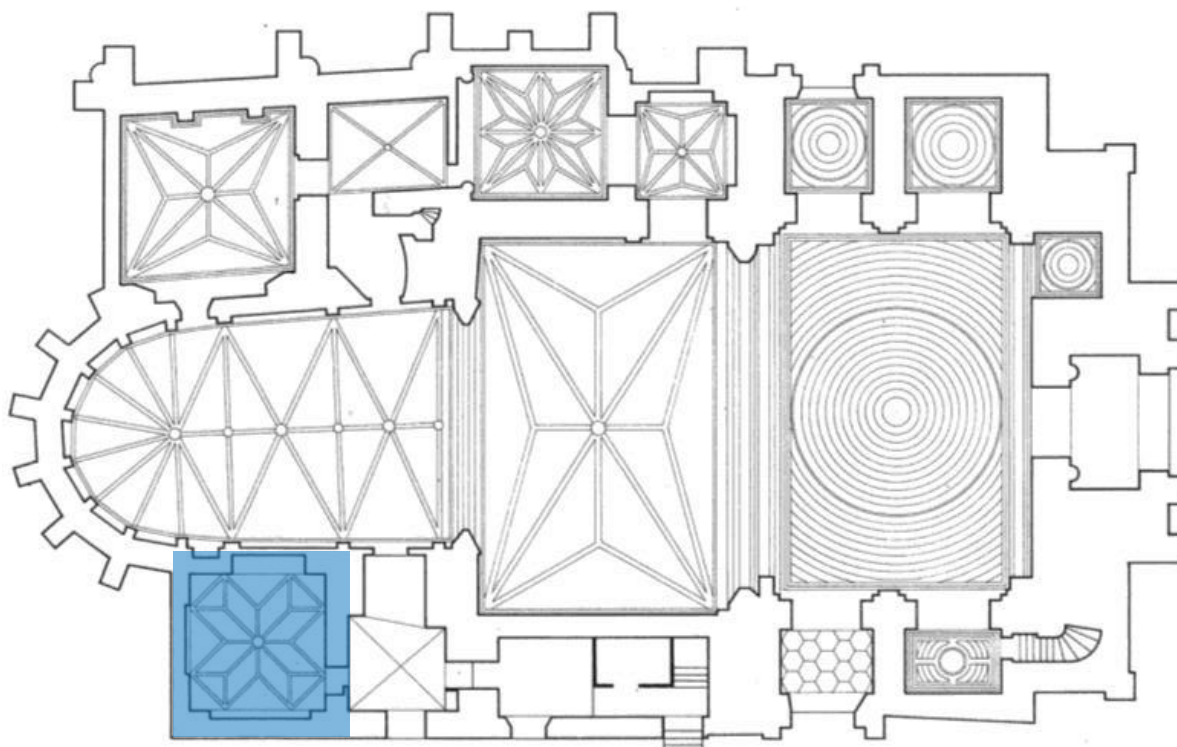


Figura 2. Situación de la Capilla de la Jura.

El recinto posee planta cuadrada, se levanta en cantería y se cubre con una bóveda estrellada cuyos plementos son de ladrillo (Figura 3). Los nervios descansan sobre columnillas suspendidas con capiteles fitomorfos. El perfil de los nervios consiste en varias molduras que terminan en un baquetón de remate plano. Por otro lado, sus muros están levantados a partir de un aparejo pétreo, que se remata con un perfil de ladrillo (Figura 3).



Figura 3. Vista interior y exterior de la capilla de la Jura.

Con el fin de analizar el estado de conservación de la bóveda antes de las labores de intervención se llevó a cabo un estudio geométrico de la misma (Figura 4). Sin embargo, una vez llevado a cabo dicho levantamiento geométrico observamos las deficiencias del mismo para reflejar fielmente la geometría actual de la bóveda. Dicha imposibilidad es tal debido a los desplazamientos, grietas y desplomes que han sufrido algunos de los elementos constituyentes del conjunto, como queda claramente reflejado en la figura 5.

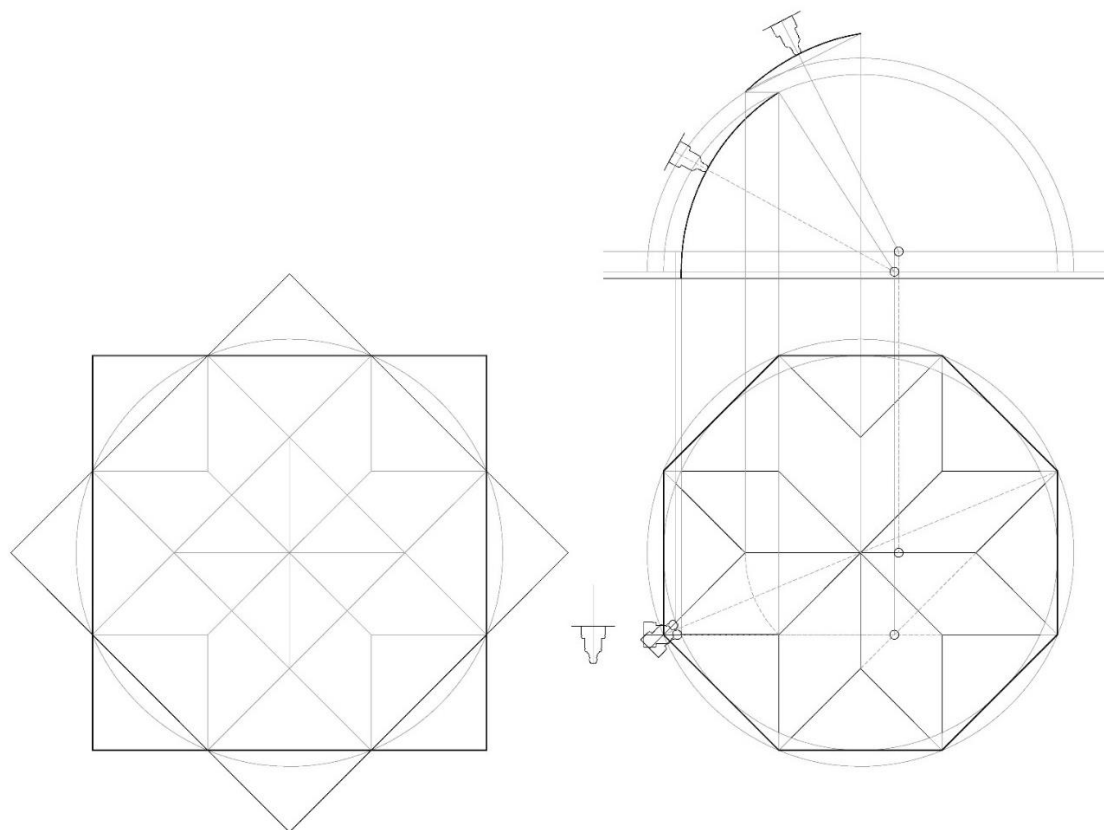


Figura 4. Estudio geométrico de la bóveda.



Figura 5. Grietas y desplazamientos en los nervios.

El objeto principal de la intervención, llevada a cabo por el arquitecto Francisco Pinto no era más que poner en valor todos aquellos elementos a conservar, así como documentar todos lo posible antes de que estos puedan quedar ocultos por la propia restauración. El fin de los trabajos era recuperar la unidad espacial de uno de los más claros ejemplos de la arquitectura que transitó entre el arte musulmán y el gótico, consiguiendo un rico mestizaje, en un contexto histórico que viene a denominarse mudéjar, del cual la Capilla de la Jura ha conservado fragmentos y piezas frágiles.

Al mismo tiempo, la intervención se propuso reparar las numerosas heridas que le ha provocado el tiempo como las grietas que explican su complicado devenir asociado ineludiblemente a la iglesia de San Juan, cuyo estado es tan delicado como el de la Capilla. Considerando que el edificio mostraba una estabilidad estructural aceptable, Francisco Pinto estimó la eficiencia de llevar a cabo refuerzos puntuales para garantizar su adecuada conservación. Dichos refuerzos pueden resumirse en la ejecución de un enfoscado interior para regularizar la superficie, la conexión de los nervios agrietados (Figura 5_izquierda) con una varilla metálica en forma de aspas ancladas a la plementería y a su vez fijadas con resina y, por último, la colocación de un par de bandas de fibra de carbono en las primeras hiladas de la plementería (zona bajo esfuerzo de tracción). La evaluación estructural de la intervención presentada sobre la capilla de la Jura es el objeto principal del presente artículo.

3. ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL

A continuación, se presenta la aplicación del análisis modal operacional como técnica para identificar experimentalmente las propiedades dinámicas de la cubierta de la capilla de la Jura, antes y después de la intervención.

Como primer punto en el proceso de aplicación del análisis modal operacional se generó un modelo previo para decidir la situación de los acelerómetros [1], 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. Ante la imposibilidad de llevar a cabo un levantamiento teórico geométrico, como vimos en el apartado anterior, se decidió recurrir a la técnica fotogramétrica para llevar a cabo dicho modelo previo (Figura 6), el cual sería posteriormente mallado por elementos sólidos de 8 nodos.

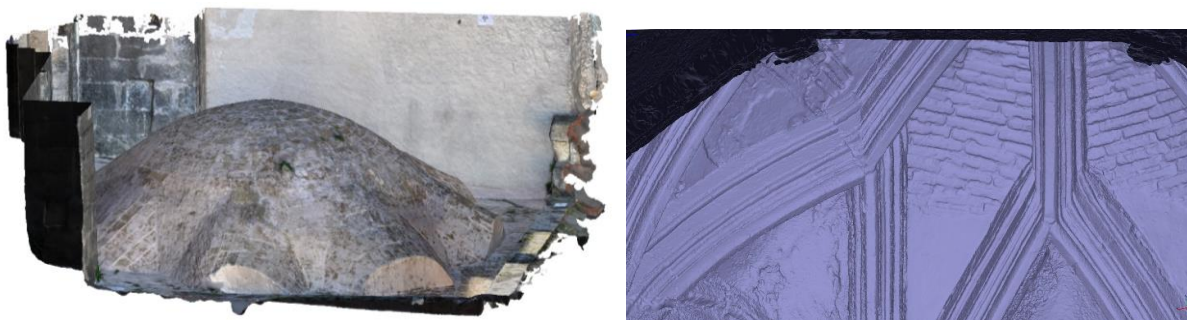


Figura 6. Modelo numérico de la bóveda a partir de un levantamiento fotogramétrico.

Como podemos ver en la figura 7, y tras realizar un primer cálculo modal del modelo previo, en los puntos con mayor desplazamiento modal se situaron los dos acelerómetros de referencia. El resto de los acelerómetros se fueron moviendo a lo largo de los 15 puntos restantes situándose en las tres direcciones principales. Esta configuración sería la misma en las pruebas de vibración ambiental realizadas tanto antes como después de la intervención.

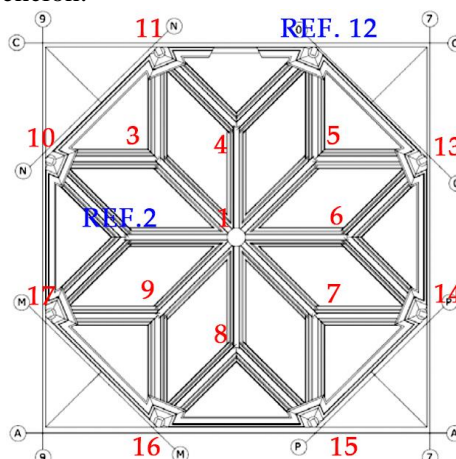


Figura 7. Puntos de medida. Acelerómetros de referencia en los puntos 2 y 12.

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 8).



Figura 8. Equipo de medida.

3.1. Caracterización dinámica antes de la intervención

Siguiendo las premisas consideradas previamente se llevó a cabo la primera campaña experimental en abril de 2015. Para llevar a cabo dicha campaña fueron necesario realizar 11 medidas de 10 minutos cada una de ellas, para cubrir con los 8 acelerómetros los 15 puntos de medida previstos en sus tres direcciones.

Tras llevar a cabo la campaña experimental se procedió al tratamiento de los datos. Para ello se utilizó el software Artemis [4] (Figura 9), 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).

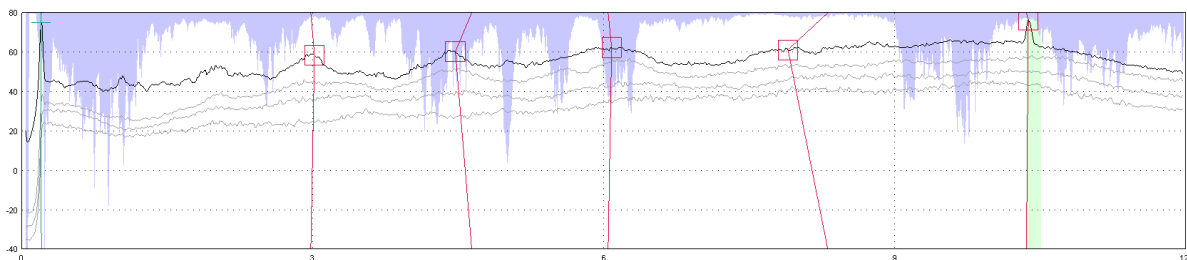


Figura 9. Espectro de respuesta. Identificación de los parámetros modales mediante el método EFDD.

Con ambos métodos se identificaron seis modos de vibración en un rango de frecuencias de 0 a 12 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 antes de la intervención

Modo	Frecuencia Natural			MAC
	EFDD [Hz]	SSI [Hz]	Error [%]	
1	0.198	0.201	1.49	0.88
2	2.977	2.995	0.66	0.98
3	4.598	4.417	3.93	0.91
4	6.007	6.001	0.10	0.89
5	8.029	7.828	2.50	0.85
6	10.38	10.38	0.00	0.98

3.2. Caracterización dinámica tras la intervención

Una vez finalizadas las obras de consolidación, en septiembre de 2015 se ha llevado a cabo la segunda campaña experimental. Dicha campaña se ha llevado a cabo siguiendo exactamente la misma configuración que la presentada anteriormente, con un total de 11 medias de 10 minutos de duración cada una de ellas.

Tras llevar a cabo la campaña experimental se procedió nuevamente al tratamiento de los datos con el Software Artemis, cuyo resultado queda reflejado en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados Experimentales tras la intervención

Modo	Frecuencia Natural			MAC
	EFDD [Hz]	SSI [Hz]	Error [%]	
1	-	-	-	-
2	3.238	3.240	0.06	0.99
3	4.776	4.772	0.08	0.87
4	7.205	7.240	0.48	0.85
5	9.010	8.967	0.47	0.81
6	10.38	10.38	0.00	0.99

3.3. Análisis y comparación de los resultados

En primer lugar, cabe destacar la bondad de los resultados obtenidos en las dos campañas experimentales. Seis y cinco modos de vibración fueron identificados respectivamente 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 4%, y el valor MAC de comparación entre ellos superior a 0,8, lo cual nos asegura la existencia de los mismos.

Por otro lado, se resalta que el primer modo de vibración localizado antes de la intervención (0.2 Hz). Se trata de un modo de vibración con una frecuencia asociada realmente baja para este tipo de estructuras. La explicación a la existencia de dicho modo es la grieta existente en el nervio que podemos observar en la figura 5, la cual provoca el movimiento libre de tal nervio bajo esa frecuencia de excitación. Una vez llevadas a cabo las labores de reparación, observamos que al desaparecer la grieta, este modo de vibración local desaparece igualmente.

A continuación, en la tabla 3, podemos observar la comparativa entre las frecuencias naturales asociadas a los modos de vibración antes y después de las labores de rehabilitación de la capilla.

Tabla 3. Comparación Resultados Experimentales

Modo	Frecuencia Natural		
	ANTES_EFDD [Hz]	DESPUES_EFDD [Hz]	Diferencias [%]
1	0.198	-	-
2	2.977	3.238	+8.76
3	4.598	4.776	+3.85
4	6.007	7.205	+19.94
5	8.029	9.010	+12.21
6	10.38	10.38	+0.00

De igual forma, podemos observar en la figura 10 la comparación de las formas modales obtenidas antes y después de la intervención, donde se plasma tanto lo comentado anteriormente sobre el primer modo, como las diferencias apreciadas en el resto de ellos.

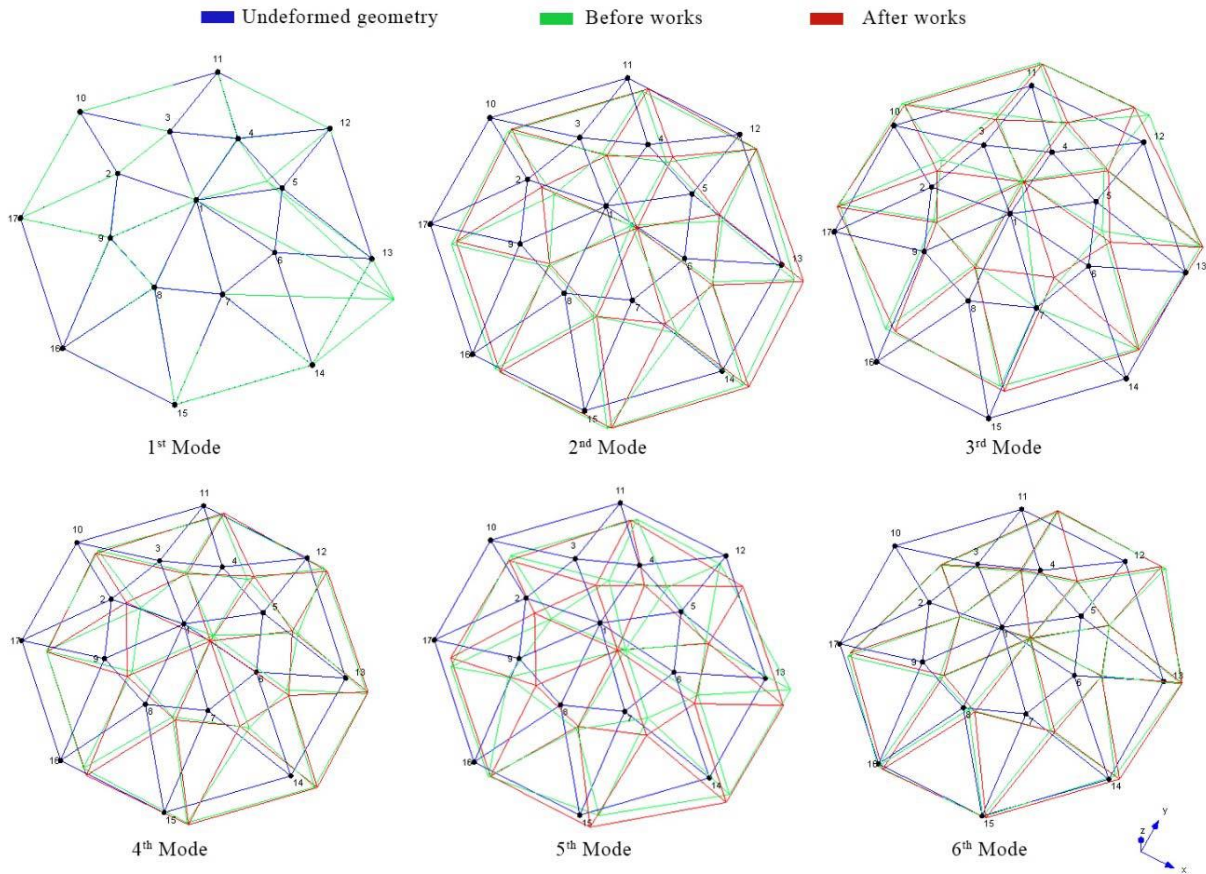


Figura 10. Formas modales obtenidas antes y después de los trabajos.

Obviando el caso del primer modo comentado anteriormente, de la comparación de los datos experimentales medidos antes y después cabe destacar el significativo aumento de las frecuencias naturales asociadas a cada uno de los modos de vibración (con la excepción del sexto modo de vibración, el cual no ve variada su frecuencia natural asociada). Este hecho nos lleva a concluir el aumento de rigidez que ha tenido la estructura de la capilla de la Jura tras las labores realizadas. En este sentido es propio recordar que las frecuencias naturales (w_n) dependen directamente de las rigideces (K_n) y de la masa estructural (m), según la expresión:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_n}{m}} \quad (1)$$

Por tanto el valor de la frecuencia natural es directamente proporcional al de la rigidez. De esta forma, los aumentos en los valores de las frecuencias naturales, medidas en distintas fases, indican un aumento de la rigidez estructural del sistema, puesto que la masa no se ha visto prácticamente modificada.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha llevado a cabo la evaluación de una intervención mediante pruebas de vibración ambiental sobre la capilla de la Jura, en Jerez de la Frontera. El objetivo marcado fue caracterizar dinámicamente el objeto de estudio, antes y después de dichas intervenciones, para analizar los posibles efectos sufridos en la estructura por la intervención realizada.

Por un lado, una vez realizadas las campañas experimentales y el tratamiento de los datos, seis y cinco modos de vibración fueron identificados respectivamente 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 4%, y el valor MAC de comparación entre ellos superior a 0,8, 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 elementos concretos, es decir, con un carácter local.

Por otro lado, se concluye que las obras de rehabilitación llevadas a cabo sobre la capilla de la Jura producen un aumento de la rigidez de la misma, puesto que los valores de las frecuencias naturales asociadas a cada uno de los modos se ven significativamente aumentadas (entre el 3 y 20%).

Como futuro trabajo, en la actualidad se están utilizando las propiedades dinámicas identificadas para actualizar el modelo tridimensional de elementos finitos, generado con la técnica fotogramétrica. 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 capilla de la Jura.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramos, L. *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures (PhD Thesis)*. University of Minho (2007).
- [2] Jiménez, J. F. *Estudio del comportamiento dinámico de pasarelas peatonales esbeltas bajo sobrecarga de uso. (DEA)*. Universidad de Sevilla (2010).
- [3] 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)
- [4] SVS. ARTeMIS Extractor 2010 release 5.0. <<http://www.svibs.com>>; 2010.