

Dynamic identification of historical and singular baroque vaults designed by Balthasar Neumann: Basilica of the fourteen holy helpers and Chapel of the Würzburg Residence (Germany).

Pachón, Pablo¹; Compán, Víctor²; Cámara, Margarita³; Rottner, Mathias⁴

ABSTRACT

Balthasar Neumann was a German Baroque architect with a wide experience on the design and construction of geometrically singular masonry vaults. Understanding the complex behaviour of this masonry vaults appears as a fundamental aspect to ensure its proper preservation. It is well known that historical heritage has to be preserved and different technical analysis are usually necessary to achieve it. Before performing these analyses, non-destructive techniques are usually an indispensable tool to provide information about the current structural behavior of the building. The use of ambient vibration tests and operational modal analysis method are widespread as a process to identify dynamic properties of historical constructions from a global point of view, but not to identify these dynamic properties of specific elements. In this paper, these techniques are used to characterize dynamically concrete parts of the Basilica of the Fourteen Holy Helpers and Chapel of the Würzburg Residence, specifically its roofs.

Keywords: Ambient vibration testing, Operational modal analysis, historical construction, non-destructive technique, masonry structures.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento estructural de construcciones históricas se presenta como un hecho fundamental a la hora de preservar el patrimonio arquitectónico. Dicha afirmación se acentúa aún más en elementos estructurales de mayor singularidad arquitectónica, como las cubiertas históricas que nos ocupan en el presente caso de estudio. En este tipo de edificaciones es habitual el uso de complejos modelos numéricos para caracterizar fielmente su comportamiento estructural. Sin embargo, el mayor problema reside precisamente en caracterizar los elementos que definen dichos modelos numéricos. Pequeñas modificaciones de algunos de estos elementos conducen a resultados muy dispares, resultando por tanto fundamental su correcta definición [1]. En este sentido, encontramos técnicas no destructivas como las pruebas de vibración ambiental que resultan de gran utilidad para reducir considerablemente las diferencias entre el comportamiento estructural del modelo numérico y el real de la estructura [2]. A partir de las propiedades dinámicas de un objeto, los valores característicos de

¹Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). ppachon@us.es. (Corresponding author)

²Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). compan@us.es.

³Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). mcamara@us.es.

⁴Ins. of Building Design and Construction. Uni. of Stuttgart (Germany). Matthias.rottner@iek.uni-stuttgart.de.

los elementos que definen el modelo numérico del mismo pueden ser actualizados de forma que el comportamiento dinámico de ambos sea similar. De esta forma, una vez que los parámetros modales de la construcción histórica han sido identificados experimentalmente, los errores existentes en el modelo de elementos finitos de la estructura pueden ser corregidos.

En el estudio se presenta el uso de pruebas de vibración ambiental sobre las cubiertas de dos construcciones barrocas diseñadas por el afamado arquitecto alemán Balthasar Neumann: La Basílica de Vierzehnheiligen (de los 14 Santos), y la Capilla del Palacio de Würzburg (Fig. 1). Se llevará a cabo un recorrido por los objetos de estudio para continuar con la caracterización dinámica de dichas construcciones mediante la obtención de datos con el uso pruebas de vibración ambiental, y el posterior tratamiento de los mismos a través de la técnica de Análisis Modal Operacional (OMA). Finalmente se discutirán los resultados obtenidos y se presentaran las principales conclusiones a los que dichos resultados nos han conducido.

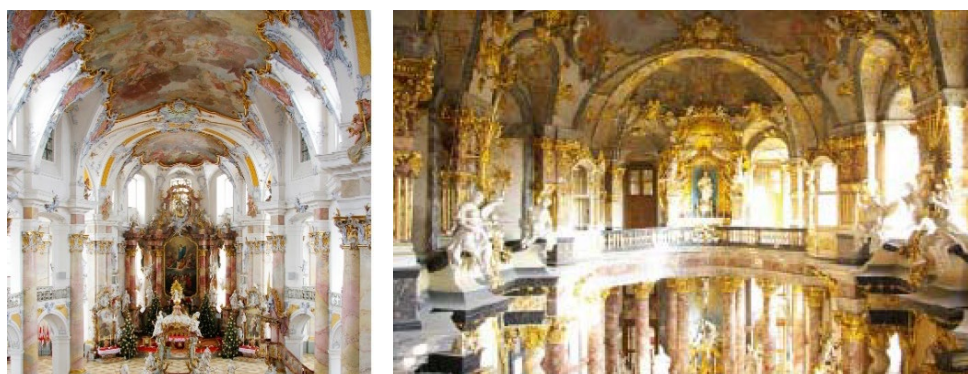


Figura 1. Basílica de Vierzehnheiligen (←) y Capilla del Palacio de Würzburg (→).

2. OBJETOS DE ESTUDIO

La Basílica de Vierzehnheiligen y la Capilla del Palacio de Würzburg, objetos de estudio, se encuentran integradas dentro de la obra diseñada por el arquitecto Balthasar Neumann [3]. Ambas construcciones se llevaron a cabo durante el s. XVIII, enmarcándose por tanto dentro del Barroco Alemán [4]. La basílica es un edificio exento situado en ciudad de Baviera, en la Alta Franconia, mientras que la capilla se inserta dentro de un complejo mayor, también diseñado y ejecutado por Neumann, el Palacio de la ciudad de Würzburg (Fig. 2).



Figura 2. Vistas exteriores de la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y del Palacio de Würzburg (→).

En lo que se refiere a la configuración arquitectónica de los objetos de estudio, tanto la basílica como la capilla presentan una lectura espacial de claro carácter longitudinal. Ambas construcciones se organizan mediante la composición de tres celdas consistentes en tres grandes cúpulas con base ovalada de eje principal longitudinal, conectadas entre sí por otras, también de planta oval, orientadas a lo largo de un eje transversal (Fig. 3).

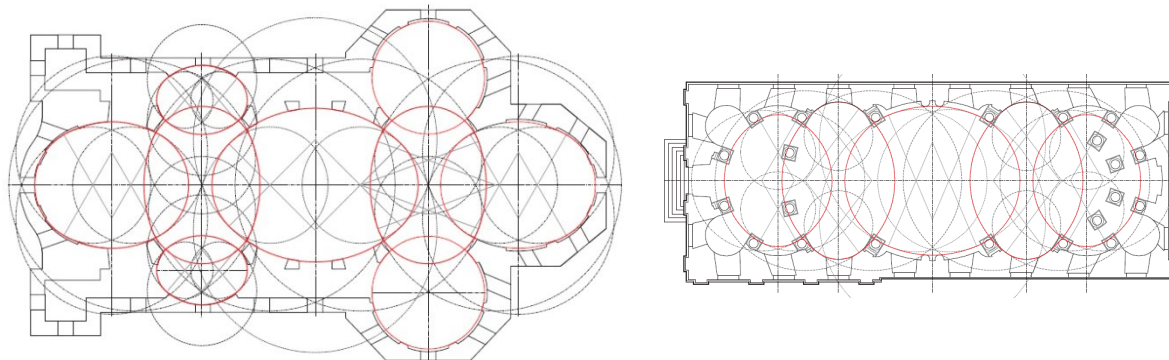


Figura 3. Estudio de la trazas de las plantas de la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y de la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

En cuanto a las cubiertas, la intersección de dichas celdas se resuelve utilizando el mismo recurso que desarrolló Christoph Dientzenhofer, es decir, según un nervio alabeado generado mediante la intersección de dos cilindros de distinto diámetro [5]. En ambos casos, se tratan, desde un punto de vista estructural, de falsos nervios de dudosa capacidad portante, ya que Neumann realiza superficies continuas sin esqueleto estructural. Sin embargo el uso arquitectónico del nervio alabeado que planteó Neumann en cada una de las iglesias es diferente. Mientras que en la basílica es simplemente un recurso constructivo, en la capilla se utiliza también como recurso compositivo, ya que organiza los espacios, marcando donde se encuentra su inicio y su final, idea de secuencia espacial que lleva a cabo mediante recrecidos de yeso (Fig. 4). Por su lado, en la basílica recurre al uso del color como elemento compositivo. El blanco utilizado en sus paredes amplifica su plasticidad y dinamismo, así como su desmaterialización (Fig. 4). Estos elementos soportan una cubierta con sombras mucho más oscuras, donde la curvatura real de la misma se pierde debido a la falta de perspectiva, lo que refuerza la idea de una cubierta que levita sobre los soportes verticales.



Figura 4. Vistas interiores de la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y de la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

Los espacios interiores de ambas iglesias son piezas que se diseñan independientemente de su embalaje. Esto provoca un desconocimiento total de lo que se aloja en el interior de esa caja hasta que

no pasamos el umbral. El nexo de unión se realiza a través de las ventanas, elementos cuya disposición está dominada por la composición de fachada. Llama la atención la importante desmaterialización de los muros, aspecto unido al innovador concepto sobre el tratamiento de la luz que incluye Neumann en sus obras.

Por último, destacar que las bóvedas de ambas iglesias son superficies de mampostería que con solo 30 cm de espesor desarrolladas en una única capa, llegan a cubrir grandes luces. En el caso de la basílica las superficies que conforman las bóvedas están conformada por fábrica de piedra y se presentan sin refuerzo alguno, mientras que en la capilla dichas superficies son de fábrica de ladrillo y se ven reforzadas en su base por medio del aumento del espesor en 15 cm, refuerzo que también se hace presente en nervios radiales, los cuales presentan una sección de 45x45 cm (Fig. 5).



Figura 5. Vistas de las bóvedas de la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y de la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

3. PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y 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 [6, 7]. En los últimos años son numerosas las aplicaciones de pruebas de vibración ambiental que podemos encontrar asociadas al mundo de la arquitectura. Los buenos resultados obtenidos de estas aplicaciones, 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, son algunos de los motivos que han hecho que éstas sean muy populares en los últimos años. Sin embargo, 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. Aun menos extendida es la aplicación de la técnica OMA sobre elementos concretos [8, 9].

A continuación, se presenta las pruebas de vibración ambiental llevadas a cabo tanto en la Basílica de Vierzehnheiligen, entre el 25 y 29 de julio de 2016, como en la Capilla del Palacio de Würzburg, entre el 14 y 17 de julio de 2014.

3.1. Modelos de Elementos Finitos Iniciales

Como primer punto en el proceso de aplicación del análisis modal operacional se generó para cada una de las iglesias un modelo geométrico con el fin de decidir la situación de los acelerómetros [2, 9]. Estos modelos tridimensionales fueron generados eliminando todos los componentes ornamentales y considerando únicamente la parte estructural (Fig. 6). En ambas iglesias, este modelo de elementos finitos se construyó utilizando el software Abaqus / CAE 6.13 [10]. Los modelos se constituyeron principalmente con dos componentes, paredes y bóvedas, modelados con elementos sólidos. Las propiedades de los materiales, se estimaron inicialmente a partir de bibliografía [3, 11]. Para la mampostería de ladrillo de las bóvedas, las propiedades adoptadas fueron: densidad, 1980 kg / m³; Módulo de Young, 1100 MPa; Relación de Poisson, 0.2. De igual forma, se consideraron los siguientes valores para la mampostería de piedra: densidad, 2100 kg / m³; Módulo de Young, 2200 MPa; Relación de Poisson, 0.2. Además, el peso de la cubierta de madera que se sitúa sobre las bóvedas en ambos casos se tuvo en cuenta en los modelos de EF.

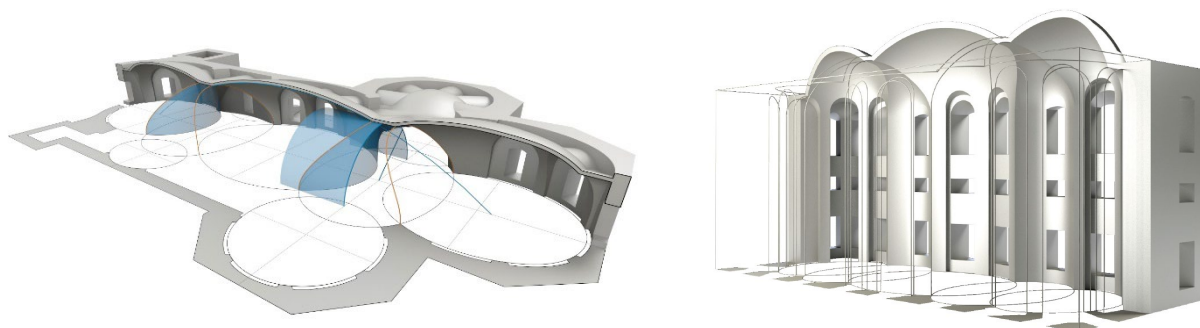


Figura 6. Modelos de Elementos Finitos de la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y de la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

Con la ayuda de los modelos de elementos finitos se localizaron los puntos más adecuados para la colocación de los acelerómetros de referencia, que fueron aquellos con mayor desplazamiento modal en los diferentes modos.

3.2. Pruebas de vibración ambiental

Siguiendo los resultados obtenidos en los modelos numéricos, la Fig. 7 muestra los esquemas representativos de cada una de las campañas experimentales realizadas. En el caso de la basílica, y debido principalmente a su gran complejidad geométrica, se desarrolló una extensa campaña basada en 276 puntos de medición, mientras que en la capilla fueron suficientes un total de 57 puntos. Todos los puntos se midieron en las tres direcciones principales, con el fin de capturar todos los modos de vibración en la dirección longitudinal, lateral y vertical de las bóvedas. Como solo tres acelerómetros uniaxiales y tres triaxiales estaban disponibles para cada una de las campañas, y considerando que los tres uniaxiales se mantuvieron fijos como acelerómetros de referencia, se necesitaron un total de series de medidas de 91 en la basílica y de 26 en la capilla. En cada una de estas configuraciones, las aceleraciones se registraron con una frecuencia de muestreo de 100 Hz y un tiempo de muestreo de 12 min.

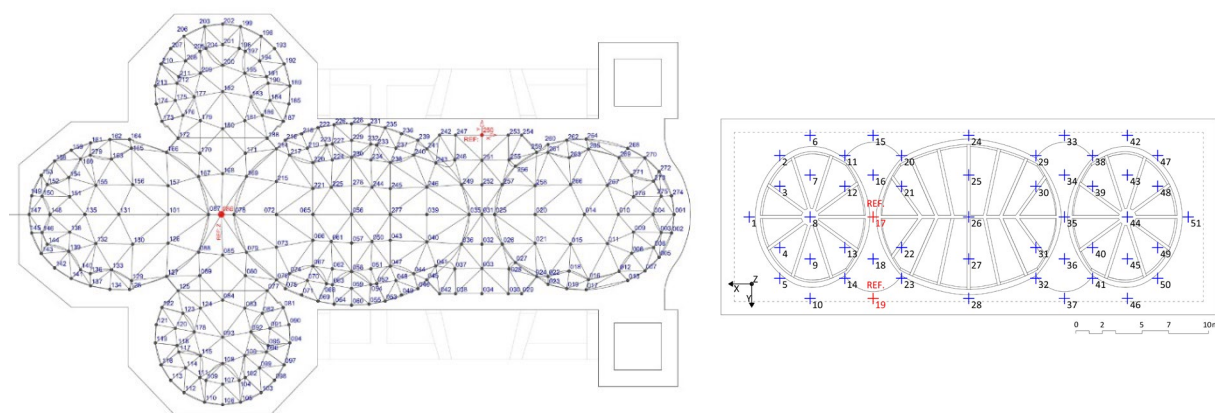


Figura 7. Situación de los acelerómetros (Referencias en rojo) en la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y en la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

Las excitaciones durante las pruebas de vibración ambiental se asociaron siempre con cargas ambientales. El equipo utilizado para estas pruebas estaba compuesto por acelerómetros de fuerza balanceada con un ancho de banda que va desde 0.01 a 200 Hz, un rango dinámico de 140 dB y una sensibilidad de 10 V / g. Estos acelerómetros se conectaron a través de ocho cables de 40 m de longitud a un sistema de adquisición de datos de doce canales con un ADC de 24 bits, provisto de filtros anti-alias (modelo GRANITE). El equipo es fabricado por la empresa KINEMETRICS (Fig. 8).



Figura 8. Equipo de medida facturado por la casa KINEMETRICS.

3.2. Análisis Modal Operacional

Una vez llevadas a cabo las pruebas de vibración ambiental, se procedió al tratamiento de los datos en cada una de las iglesias (Fig. 9). Para ello se utilizaron dos métodos de identificación modal: el método de Descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFFD) [12] y el método de Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI) [13].

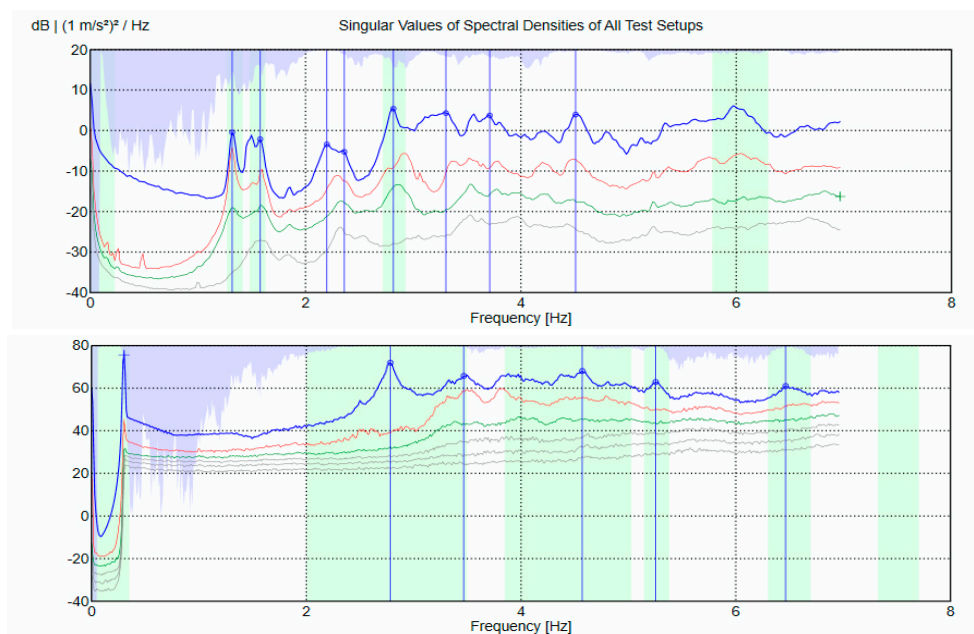


Figura 9. Espectros de respuesta. Parámetros modales identificados mediante el método EFDD en la Basílica de Vierzehnheiligen (↑) y en la Capilla del Palacio de Würzburg (↓).

En la basílica se identificaron con ambos métodos de identificación modal (EFDD y SSI) un total de 8 modos de vibración en un rango de frecuencias de 0 a 7 Hz, mientras, que dentro del mismo rango, en la capilla del palacio se identificaron un total de 5 modos de vibración. En ambas iglesias, 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 [14].

Tabla 1. Resultados OMA: Frecuencias naturales (f) y *Modal Assurance Criterion* (MAC).

| | Basílica de Vierzehnheiligen | | | | Capilla del Palacio de Würzburg | | | |
|---------------|------------------------------|---------------|-------|------|---------------------------------|---------------|-------|------|
| | SSI f (Hz) | EFDD f (Hz) | Error | MAC | SSI f (Hz) | EFDD f (Hz) | Error | MAC |
| Modo 1 | 1.47 | 1.49 | 1,3% | 0.82 | 2.77 | 2.77 | 0,0% | 0.99 |
| Modo 2 | 1.56 | 1.57 | 0,6% | 0.81 | 3.28 | 3.30 | 0,6% | 0.87 |
| Modo 3 | 2.22 | 2.19 | 1.3% | 0.88 | 4.52 | 4.46 | 1.4% | 0.88 |
| Modo 4 | 2.35 | 2.36 | 0.4% | 0.80 | 5.26 | 5.25 | 0.2% | 0.90 |
| Modo 5 | 2.79 | 2.79 | 0.0% | 0.95 | 6.48 | 6.48 | 0.0% | 0.82 |
| Modo 6 | 3.39 | 3.28 | 3.3% | 0.89 | - | - | - | - |
| Modo 7 | 3.81 | 3.69 | 3.2% | 0.87 | - | - | - | - |
| Modo 8 | 4.60 | 4.52 | 1.7% | 0.76 | - | - | - | - |

En la Fig. 10 se observan las formas modales asociadas a cada uno de los modos identificados en ambas iglesias.

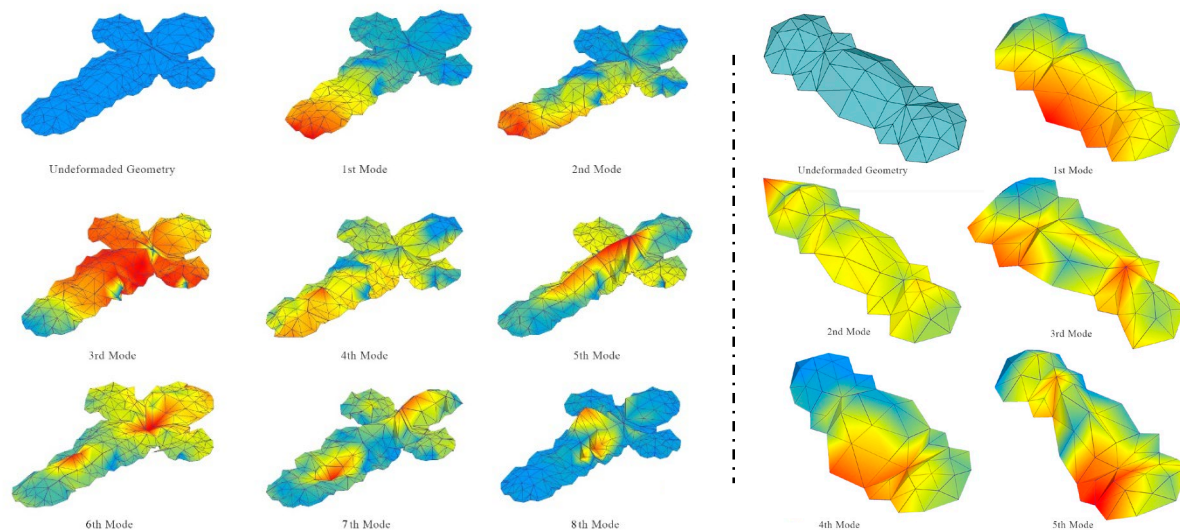


Figura 10. Formas modales identificadas en la Basílica de Vierzehnheiligen (←) y en la Capilla del Palacio de Würzburg (→).

En la basílica, los dos primeros modos identificados son causados por el efecto de las torres, elementos que por su esbeltez suelen presentar modos de vibración con frecuencias naturales asociadas bajas en relación a construcciones de fábrica (en torno a 1-1.5 Hz). El tercer y el cuarto modo muestran modos de traslación transversal y longitudinal, respectivamente, de todo el conjunto de la iglesia, mientras que el resto de los modos corresponden a modos locales de flexión de las bóvedas. Por su lado, en el caso de la capilla, el segundo modo muestra un modo de traslación longitudinal del conjunto del palacio, mientras que los otros modos corresponden a modos locales de flexión de las bóvedas.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha llevado a cabo la aplicación de pruebas de vibración ambiental sobre las bóvedas barrocas de dos construcciones históricas diseñadas y construidas por el arquitecto alemán Balthasar Neumann. El objetivo marcado fue caracterizar dinámicamente los objetos de estudio, para en fases posteriores poder actualizar nuestros modelos de elementos finitos y así analizar numéricamente el comportamiento estructural de las iglesias.

Una vez realizadas las campañas experimentales y el tratamiento de los datos obtenidos en la Basílica de Vierzehnheiligen y la Capilla del Palacio de Würzburg, ocho y cinco modos de vibración fueron identificados, respectivamente, en un rango de frecuencia de 0 a 7 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 0.75, 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 elementos concretos, es decir, con un carácter local.

A modo de comparación, se concluye cierta similitud en el comportamiento modal de las bóvedas estudiadas. Dicha conclusión se extrae de la comparación entre los modos de flexión identificados en cada una de las ellas. El primer modo de flexión identificado en cada una de las bóvedas presenta una gran similitud tanto a nivel de forma modal como por el valor de la frecuencia natural asociada. Mientras que en la basílica el valor de dicha frecuencia asociada al primer modo local de las bóvedas (modo 5) es de 2.79 Hz, en la capilla dicho valor (modo 1) corresponde a 2.77 Hz. Sin embargo, en lo que se refiere al segundo modo de flexión de las bóvedas (modo 6 de la basílica y modo 3 de la capilla), aunque la forma modal es realmente similar (fig. 10), la diferencia entre los valores de las frecuencias naturales es significativamente mayor (3.39 Hz en la basílica y 4.46 Hz en la capilla).

Como futuro trabajo, en la actualidad se están utilizando las propiedades dinámicas identificadas para actualizar los modelos tridimensionales de elementos finitos. De esta forma se minimizaría en gran medida el nivel de incertidumbre inicial que existe en las propiedades mecánicas reales de los materiales constituyentes. Una vez estos modelos estén actualizados se podrá hacer un análisis estructural exhaustivo del comportamiento estructural de las iglesias diseñadas por Balthasar Neumann, y más concretamente, se podrá estudiar la singularidad estructural de sus bóvedas de fábrica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Instituto de Diseño de Edificios y Construcción de la Universidad de Stuttgart y particularmente al Profesor Matthias Rottner la colaboración prestada para realizar el presente estudio. Este trabajo no hubiera sido posible sin su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Atamturktur, S. & Laman, J. (2012). Finite Element Model Correlation and Calibration of Historic Masonry Monuments. *Structural Design of Tall and Special Building*, 21(2), 96-113.
- [2] Ramos, L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures* (PhD Thesis). University of Minho.
- [3] Hansmann, W. Balthasar Neumann. Dumont 2003; 3-8321-7167-3.
- [4] Compán, V. (2012). Comportamiento estructural de las geometrías arquitectónicas del Barroco Centroeuropeo (unpublished PhD. thesis). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [5] Compán, V., Cámara, M. & González, F. (2015). The Geometric Principles of Warped Rib Vaults in Central European Baroque Architecture from Guarini to the Dientzenhofer Family and Balthasar Neumann. *Nexus Network Journal*, 17:183-206.
- [6] Ramos, L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures (PhD Thesis)*. University of Minho.
- [7] Ramos, L. F., Aguilar, R., Lourenço, P., Moreira, S. (2012). *Dynamic Structural Health Monitoring of Saint Torcato Church. Portugal. Mechanical Systems and Signal Processing*.
- [8] Atamturktur, S., Fanning, P. & Boothby, T. (2010). Traditional and Operational Modal Testing of Masonry Vaults. *ICE. Engineering and Computational Mechanics*, 163, 213-223.

- [9] Calik, I., Bayraktar, A., Turker, T. & Karadeniz, H. (2015), Structural Dynamic Identification of a Damaged and Restored Masonry Vault Using Ambient Vibrations. *Measurement*, 55, 462-472.
- [10] Users manuals. Dassault Systemes (2015), SIMULIA, ABAQUS v.6.13-3.
- [11] Augenti, N., Parisi, F. & Acconcia, E. (2012). MADA: online experimental database for mechanical modelling of existing masonry assemblages. *In Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon (Portugal).
- [12] Brincker, R., Ventura, C. & Andersen, P. (2001). Damping estimation by frequency domain decomposition, *in: 19th International Seminar on Modal Analysis, IMAC*, Kissimmee, USA.
- [13] Overschee, P. & De Moor B. (1996). Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications. London: *Kluwer Academic Publishers*.
- [14] Allemang R. J. & Brown D. L. (1983). A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis. *Proceedings, International Modal Analysis Conference*, 110-116.