

Definition and Characterization of a historical building by using Digital Photogrammetry and Operational Modal Analysis. San Juan de los Caballeros Church (Cádiz, Spain)

Pachón, Pablo¹; Compán, Víctor²; Rodríguez, Esperanza³; Jiménez-Alonso, Javier F.⁴; Pinto, Francisco⁵

ABSTRACT

Nowadays, the preservation of the architectural heritage is a fundamental aspect in the cultural development of modern cities. This heritage has to be preserved and different technical analysis are usually necessary to ensure its proper preservation. The main problem is that the greatest difficulty for the analytical analysis of kind of buildings is the high level of uncertainty associated with many factors [1]. For example, slight modifications of the geometry or the mechanical properties of the structural materials can be the cause of great differences between the results obtained from an analytical analysis and others estimated experimentally. Due to this fact, before performing these analysis, non-destructive techniques are usually an indispensable tool to provide information about the current geometry and the structural behaviour of the building. Thus, the use of photogrammetric techniques [2] and ambient vibration tests allows the right definition of the current geometry and the dynamic characterization of the building, respectively.

Keywords: Historical structures, Photogrammetric technique, Ambient Vibration Tests.

1. INTRODUCCIÓN

Estudiar el comportamiento estructural de las construcciones históricas se presenta como un hecho fundamental a la hora de preservar nuestro patrimonio arquitectónico. Para ello, hoy en día, es habitual el uso de modelos numéricos que caractericen fielmente el comportamiento de dichas construcciones. Sin embargo, el mayor problema reside precisamente en caracterizar dichos modelos numéricos para que presente un comportamiento estructural similar al real. Las mayores dificultades suelen estar relacionadas tanto con el levantamiento geométrico del modelo, como con la caracterización de los elementos que definen el mismo. Pequeñas modificaciones de alguno de estos elementos conducen a resultados muy dispares, resultando por tanto fundamental su correcta definición. En este sentido, encontramos técnicas no destructivas que resultan de gran utilidad para reducir considerablemente las diferencias entre el comportamiento estructural del modelo numérico y el real de la estructura, tanto estáticas como dinámicas. Entre estas técnicas, la fotogrametría y las pruebas de vibración ambiental

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

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

³ Dep. of Continuum Mechanics and Structural Analysis. University of Seville (SPAIN). espe@us.es.

⁴ Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (SPAIN). iffjimenez@us.es.

⁵ Dep. of Architectural Graphic Expression. University of Seville (SPAIN). fspp@us.es

aparecen como técnicas de gran utilidad para definir fielmente la geometría del objeto de estudio y caracterizar dinámicamente el mismo, respectivamente. A partir de las propiedades dinámicas de un objeto, los valores característicos 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 presente estudio se presenta el uso de técnicas fotogramétricas y pruebas de vibración ambiental sobre la capilla de la Jura, situada en la Iglesia de San Juan de los Caballeros (Fig. 1). Se llevará a cabo un recorrido por el objeto de estudio, tanto por los aspectos históricos más importantes como por su configuración arquitectónica. Posteriormente nos centraremos en el uso de la técnica fotogramétrica para el levantamiento geométrico del modelo, para continuar con la caracterización dinámica de la capilla a través de pruebas de vibración ambiental. Se presentará de igual forma el tratamiento de dichos datos mediante la técnica de Análisis Modal Operacional. Finalmente se discutirán los resultados obtenidos y se presentarán las principales conclusiones a los que dichos resultados nos han conducido.



Figura 1. Vista exterior de la Iglesia de San Juan de los Caballeros.

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 Comisario (Fig. 2).

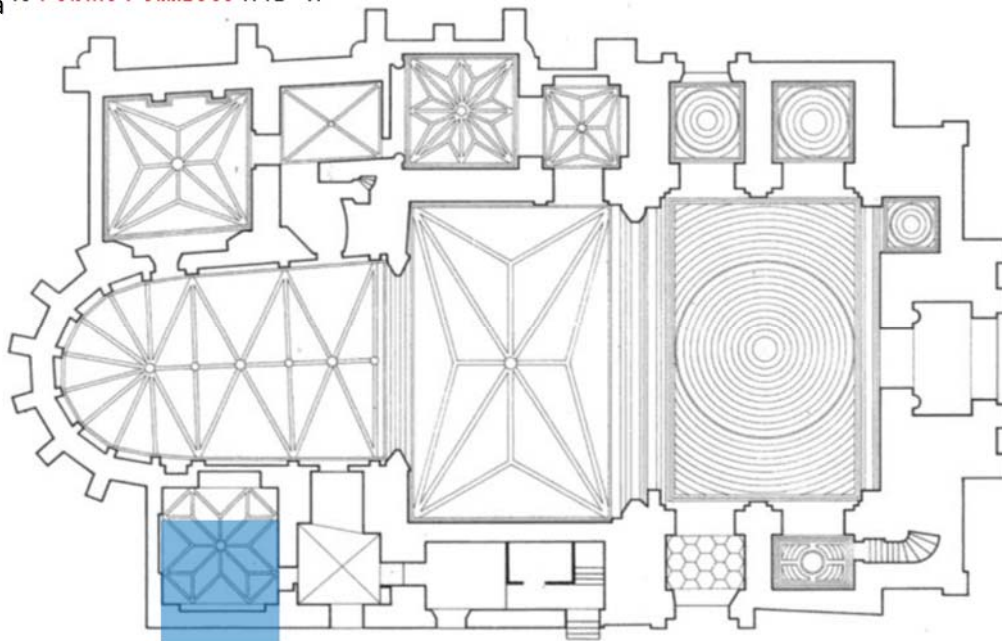


Figura 2. Situación de la Capilla de la Jura.

El recinto posee planta cuadrada, se levanta en cantería y se cubre con una bóveda estrellada cuyos plementos son de ladrillo (Fig. 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 (Fig. 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 se llevó a cabo un estudio geométrico de la misma (Fig.4). Sin embargo, una vez llevado a cabo dicho levantamiento geométrico observamos la necesidad de recurrir a técnicas fotogramétricas para reflejar fielmente la geometría actual de la bóveda, la cual no se ha podido ser reflejada mediante un levantamiento teórico. Dicha imposibilidad es tal debido a los desplazamientos, grietas y desplomes que han sufrido algunos de los elementos constituyentes del conjunto. Dichas lesiones pueden ser fácilmente observadas en la figura 5.

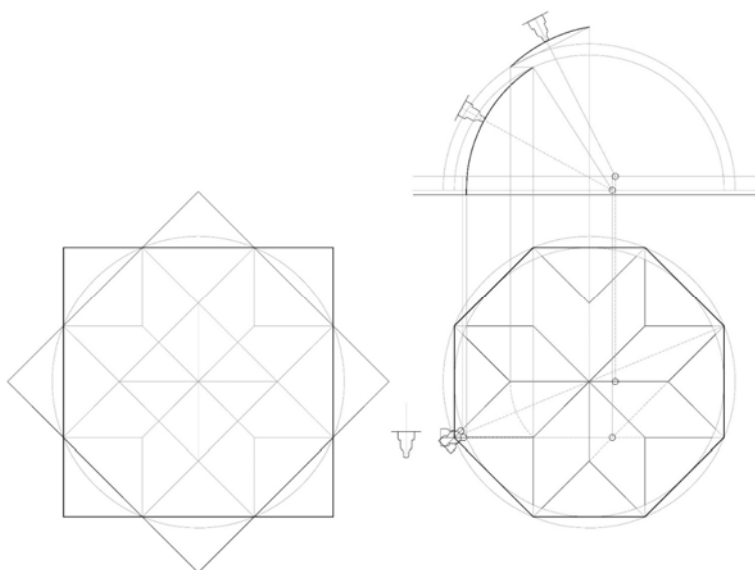


Figura 4. Estudio geométrico de la bóveda.



Figura 5. Grietas y desplazamientos en los nervios.

3. FOTOGRAMETRÍA

El uso de la técnica fotogramétrica se presenta en el objeto de estudio como una herramienta interesante para poder llevar a cabo el levantamiento geométrico del mismo, debido a la imposibilidad de llevar a cabo dicho levantamiento de forma teórica por los motivos expuestos en el apartado

anterior. En nuestro caso de estudio para llevar a cabo la técnica fotogramétrica se ha utilizado el software PhotoScan [3] (Fig. 6).



Figura 6. Levantamiento fotogramétrico del trasdós de la bóveda. Con un total de 5E6 caras y con un error del orden de 2 píxeles.

PhotoScan es un software diseñado para procesar imágenes digitales y, mediante técnicas de fotogrametría digital, genera una reconstrucción 3D del objeto, todo ello con un error del orden de 2 píxeles. Funciona generando nubes de puntos editables a partir de múltiples imágenes, utilizando siempre sistemas de referencia cartográficos estándar (Fig. 7). En nuestro caso de estudio, dichas nubes de puntos fueron tratadas con el software Catia V5 [4], con el fin de editar y completar el modelo tridimensional para realizar el posterior mallado tridimensional de EF. (Fig. 7).

El escalado y orientación del modelo tridimensional se realizó mediante tres puntos de referencia en el espacio. La identificación de las coordenadas de los puntos de referencias se realizó mediante una estación total. Una vez escalado y orientado el modelo 3D el error entre el levantamiento topográfico y el modelo generado en PhotoScan es del orden de 1 cm.



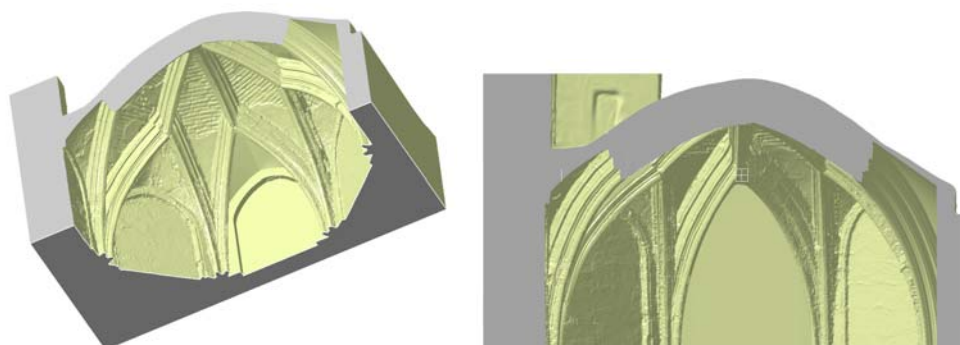


Figura 7. Levantamiento fotogramétrico del intradós y posterior tratamiento en CATIA V5.

Son numerosas las ventajas que ha presentado la utilización de esta técnica en nuestro caso de estudio. Entre ellas, su bajo coste económico comparándolo con el coste que supone hacer un escaneado tridimensional, el hecho de simplificar el levantamiento topográfico permitiendo la medición rápida de entornos complejos cuando dispone de un buen punto de vista, minimizar los tiempos de medición. Por último, señalar la ventaja que supone el modelar fielmente la geometría actual del conjunto, puesto que a la hora de actualizar el modelo numérico los parámetros de actualización no tendrán que absorber los errores provocados por una inexacta definición geométrica. Por otro lado, también señalamos algunos de los inconvenientes detectados. Entre ellos destacan la necesidad de utilizar dianas para barridos en diferentes días y el elevado coste computacional en lo relativo al tamaño del archivo generado, compuesto por millones de puntos.

4. ANALISIS 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 [5, 6]. En los últimos años son numerosas las aplicaciones de las 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 [7, 8]. Aun menos extendida es la aplicación de la técnica OMA sobre elementos concretos.

A continuación, se presenta brevemente la aplicación del análisis modal operacional como técnica para identificar experimentalmente las propiedades dinámicas de la cubierta de la capilla de la Jura. Son consideradas tanto la fase de toma de datos como la fase de tratamiento de los mismos.

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 el modelo generado previamente a partir de la técnica fotogramétrica con un mallado constituido por elementos solidos de 8 nodos. Como podemos ver en la figura 8, y tras realizar un primer cálculo modal de dicho modelo, 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, de forma que fue necesario realizar 11 medidas de 10 minutos cada una de ellas.

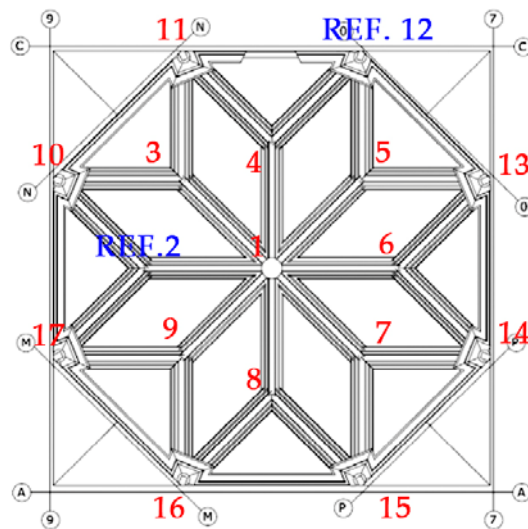


Figura 8. Puntos de medida. Acelerómetros de referencia en los puntos 2 y 12.

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 (Fig. 9).



Figura 9. Equipo de medida.

Tras llevar a cabo la campaña experimental se procedió al tratamiento de los datos. Para ello se utilizó el software [9] (Fig. 10), el cual tiene implementado los dos métodos de identificación modal utilizados: el método de Descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFDD) y el método de Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI).

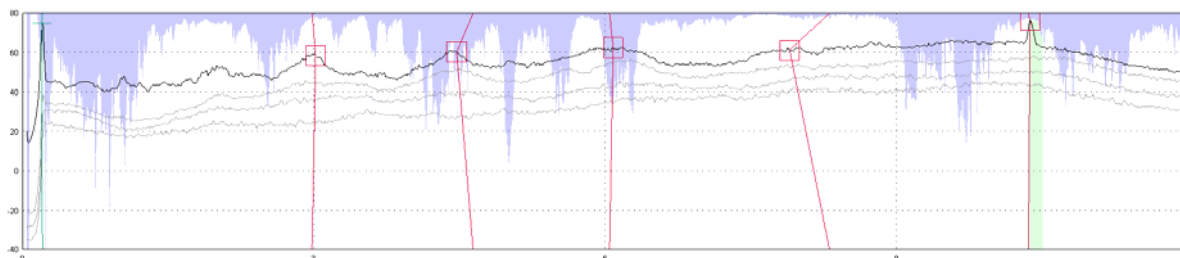


Figura 10. Espectro de respuesta. Identificación de los parámetros modales mediante el método EFDD.

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

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

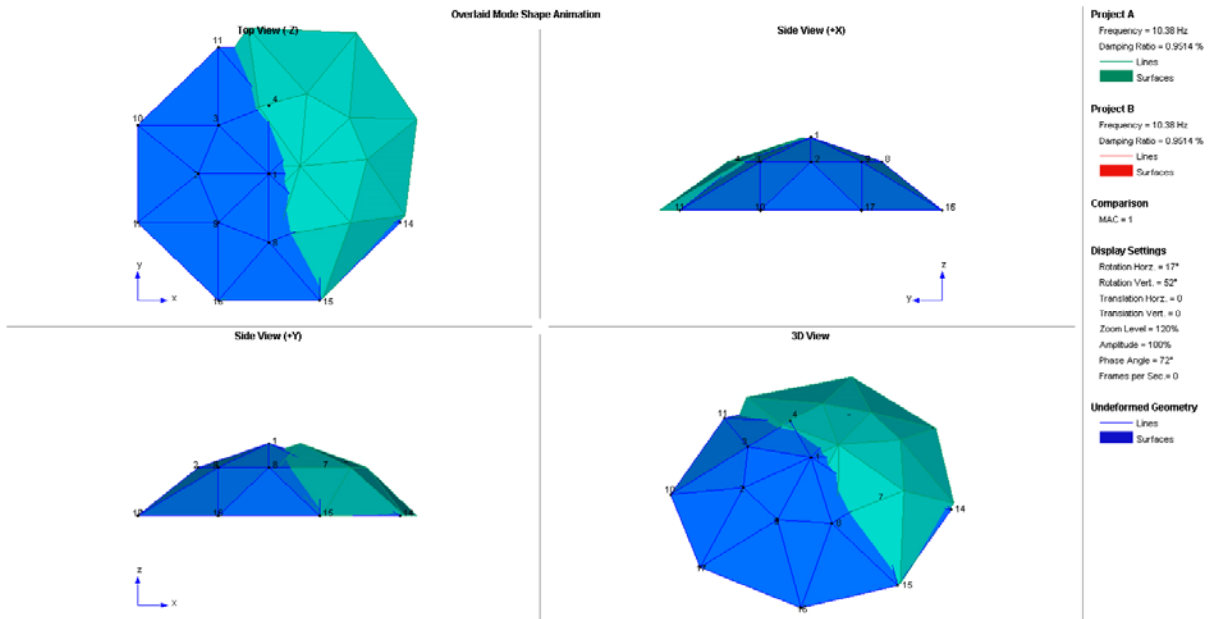


Figura 11. Desplazamientos modales relativos al modo 6 con una frecuencia de 10.38 Hz.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha llevado a cabo la aplicación de la técnica fotogramétrica y de pruebas de vibración ambiental sobre la capilla de la Jura, en Jerez de la Frontera. El objetivo marcado fue caracterizar tanto geométricamente como 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.

Por un lado, el uso de la técnica fotogramétrica nos lleva a concluir la idoneidad de utilizar dicha técnica sobre este tipo de construcciones donde parece evidente que un levantamiento teórico no proporciona un modelo fiel del objeto. Como ya se ha expuesto, son numerosas las ventajas que ha presentado la aplicación de dicha técnica, destacando el bajo coste tanto económico como temporal.

Por otro lado, 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 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.

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.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al proyecto de excelencia de la junta de Andalucía P12-TEP-2068, "Tratamiento y Recuperación del Patrimonio Edificado. La Inyección como Método de Consolidación de Estructuras de Fábrica", el apoyo proporcionado para realizar el presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] Atamturktur, S. & Laman, J. (2012). Finite Element Model Correlation and Calibration of Historic Masonry Monuments. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(2), 96-113.
- [2] Ramos, A.P. & Prieto, G.R. (2015). 3D virtualization by close range photogrammetry indoor gothic church apses. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40 (5W4), 201-206.
- [3] Agisoft PhotoScan. <<http://www.agisoft.com/>>; 2015.
- [4] Dassault Systemes, CATIA V5. <<http://www.3ds.com/productos/catia-v5>> ; 2013.

- [5] Ramos, L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures (PhD Thesis)*. University of Minho.
- [6] Rodrigues, J. (2004). *Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil (PhD Thesis)*. University of Porto.
- [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] Gentile, C., Saisi, A. (2004). *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*.
- [9] SVS. ARTeMIS Extractor 2010 release 5.0. <<http://www.svibs.com>>; 2010.