

### Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca

G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés y A.H. Barbat  
*Universidad Politécnica de Cataluña*

#### Resumen

*Se describe un procedimiento para la caracterización del comportamiento dinámico de grandes edificios históricos, así como su aplicación particular al caso de la estructura de la catedral de Mallorca en España. La catedral de Mallorca es una de las estructuras de mayor envergadura construidas en Europa durante la Edad Media y se encuentra ubicada en una zona de sismicidad moderada (Islas Baleares).*

*La caracterización del comportamiento dinámico se ha realizado a partir de la medida de vibraciones ambientales en varios puntos ubicados sobre las capillas, nave principal y naves laterales. Las propiedades medidas experimentalmente fueron utilizadas para calibrar un modelo 3D detallado de la construcción. Ello permitió estimar de forma aproximada algunas de las propiedades mecánicas de los elementos estructurales (como, en particular, su módulo de deformación). Tras la calibración, el modelo está siendo utilizado para evaluar el comportamiento y la vulnerabilidad sísmica del edificio a partir de análisis estructurales detallados.*

#### Summary

*An approach to dynamically characterize large historical buildings is presented with its application to the study of Mallorca Cathedral, in the island of Mallorca, Spain. Mallorca Cathedral, one of the largest medieval structures built in Europe, is located in a moderate seismic hazard region (the Balearic Islands).*

*The dynamic characterization of the structure includes a set of ambient vibration measurements in several points on the chapels, principal nave and lateral naves. The dynamic properties of a detailed FEM model were calibrated using the experimental results. This procedure afforded an experimental estimation of some of the mechanical properties of the structural components (such as the stiffness). After the calibration process, the model is now used to carry out a more exhaustive research aimed at evaluating the seismic behavior and vulnerability of the building.*



G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés, Al.H. Barbat



Figura 1. Vista de la catedral de Mallorca

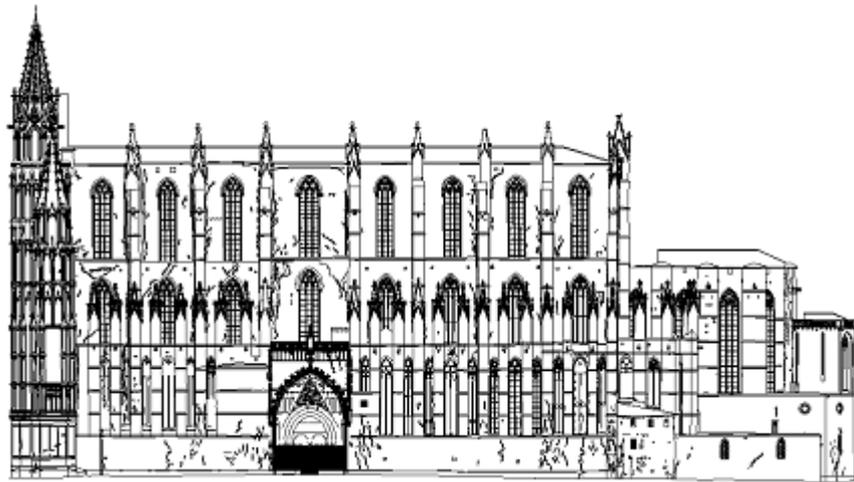


Figura 2. Patrón de fisuración existente en la fachada sur

## 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de la catedral de Mallorca (Figura 1) se inicia en la segunda mitad del siglo XIII, y continúa a lo largo de los siglos XIV y XV. A lo largo de la vida del edificio la isla de Mallorca ha experimentado algunos eventos sísmicos. De acuerdo con revisiones realizadas a catálogos sísmicos (Mézcua y Martínez



### *Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca*

Solares, 1983), la isla de Mallorca ha sido afectada por tres terremotos con intensidad mayor a VI en los últimos 400 años: Campos-Palma (1660), Selva (1721) y Palma-Marratxí (1851).

El único terremoto que, de acuerdo con la información disponible, afectó a la catedral ocurrió el 15 de mayo de 1851. A este evento se le asigna una intensidad máxima de VIII para el área de Palma y Marratxí (Mézcua y Martínez-Solares, 1983), por lo que puede ser considerado como el mayor de los terremotos percibidos en Mallorca en los últimos cuatro siglos.

Aunque la estructura presenta un estado de conservación satisfactorio en términos generales, es posible observar cierta fisuración y deformación en muros, pilares y bóvedas. En la figura 2 se muestra el patrón existente en la fachada sur (ó del mar) de la estructura. Por otra parte, y como se comenta posteriormente, la estructura se distingue por sus grandes dimensiones y por la esbeltez de sus elementos estructurales (en particular, de los pilares).

Por todo ello, y aún cuando la sismicidad local produce terremotos de baja magnitud y corta duración, no puede en principio descartarse que la estructura pueda experimentar cierto grado de daño ante futuros eventos sísmicos. Resulta de ello la necesidad de llevar a cabo un estudio del comportamiento sísmico de la estructura orientado a caracterizar su respuesta ante el terremoto y su vulnerabilidad ante esta acción.

## 2. OBJETIVOS

El estudio que se presenta tiene por objetivo caracterizar en lo posible el comportamiento sísmico de la construcción y de esta forma contribuir a identificar la vulnerabilidad real del edificio ante nuevos sismos. A través del estudio de la Catedral de Mallorca se desea asimismo proponer una metodología para la evolución sísmica de construcciones históricas de obra de fábrica que presenten, como en el caso de esta catedral, una estructura compleja y de grandes dimensiones.

Uno de los elementos fundamentales de la aproximación que se propone reside en el análisis estructural mediante modelo estructural global y detallado, el cual debe ser calibrado mediante resultados obtenidos de la medición de vibraciones ambientales en diferentes puntos de la estructura.



G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés, Al.H. Barbat

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La construcción de la catedral de Mallorca se inició en el año 1300 y se concluyó en 1606. El edificio tiene 120 m de longitud y 55 m de ancho, y una altura libre hasta la clave de las bóvedas de la nave principal de 44 m. El punto más alto de la estructura son las torres de la fachada Oeste, de 64 m de altura.

El cuerpo principal está formado por tres naves y capillas laterales ubicadas entre los contrafuertes. Los pilares de la nave central son de sección transversal octagonal y están contruidos mediante sillería de bloques de gran tamaño. Los arcos de las naves son diafragmáticos y a su vez están conectados a una doble batería de arbotantes. El edificio presenta un falso transepto que conecta las puertas Norte y Sur. En la zona norte del edificio se encuentra ubicado el claustro y una torre campanario de planta cuadrada. El ábside está conformado por dos cuerpos adicionales de menor altura (la capilla Real y la capilla de la Trinidad)

La estructura ha experimentado importantes trabajos de reparación a lo largo de su historia y en particular durante el siglo XVIII, cuando se intervinieron un número significativo de bóvedas en la nave principal, siendo algunas de ellas incluso parcialmente o totalmente reconstruidas (Miralles, 1936).

### 4. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS PARA LA ESTRUCTURA

Uno de los principales problemas para la modelación analítica de edificios históricos, es el conocimiento de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales que los conforman, los cuales, además de presentar grandes variaciones en su resistencia (debido a que los períodos de construcción eran muy largos y los materiales por su naturaleza no son homogéneos), muchos presentan un cierto grado de deterioro (como fisuración o degradación por agentes ambientales). Existen diferentes técnicas experimentales para intentar determinar las características de los materiales. Algunas de éstas implican procedimientos de tipo destructivo, situación que conviene evitar sobre en miembros que soportan cargas importantes. En el contexto de este estudio se ha optado por estimar algunas de las propiedades indirectamente a partir de mediciones de la vibración ambiental. Para ello se procedió midiendo la aceleración en diferentes puntos ubicados sobre las bóvedas de las capillas, naves laterales y nave principal como se muestra en las figuras 3 y 4.



*Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca*

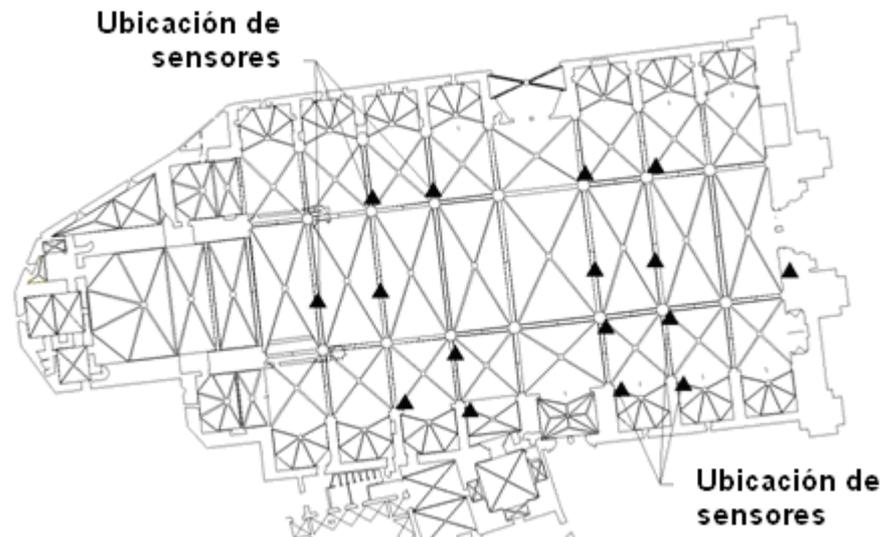


Figura 3. Puntos de medición sobre la planta de la estructura

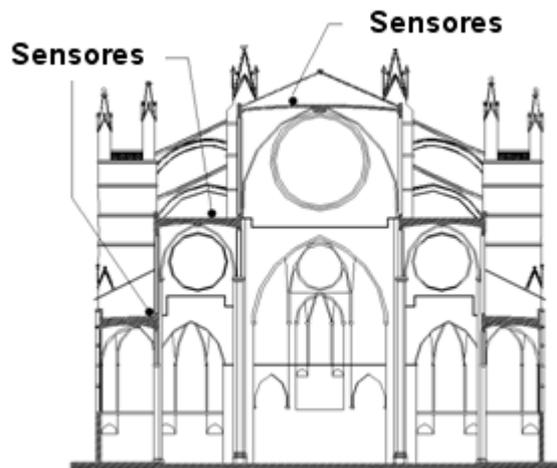


Figura 4. Puntos de medición en elevación

En cada uno de los puntos indicados en la figura 3, se realizaron mediciones independientes con una duración de 3 minutos a 255 muestras por segundo cada una. Utilizando el método *Peak Picking* (Bendat & Piersol, 1993) bajo la suposición de amortiguamiento bajo y modos de vibración bien separados, se obtuvieron las frecuencias correspondientes a los primeros cinco modos de vibración.



G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés, Al.H. Barbat

En la figura 5 se muestra un segmento de registro obtenido sobre la nave principal y su autoespectro de aceleraciones, donde se identifica una frecuencia fundamental de 1,28 Hz.

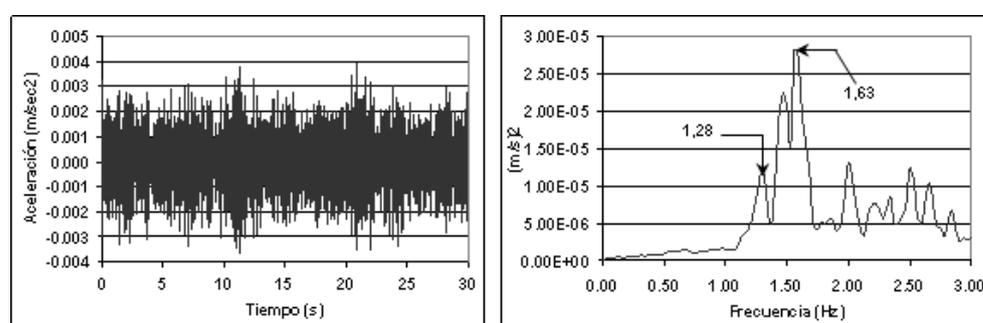


Figura 5. Segmento de registro medido (izquierda) y autoespectro de aceleraciones (derecha)

Del autoespectro de aceleraciones se puede apreciar un mayor contenido energético para el tercer modo de vibración, al cual le corresponde una frecuencia de 1,63 Hz tal y como se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Frecuencias medidas para los primeros cinco modos de vibración

Modo	Frecuencia medida (Hz)
1	1,28
2	1,47
3	1,63
4	1,84
5	2,03

## 5. GENERACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO

Se desarrolló un modelo tridimensional de elementos finitos formado por 491.851 elementos tetraédricos isoparamétricos de 4 nodos el cual se muestra en la figura 6. La malla se construyó utilizando el programa GID (CIMNE, 2006) sobre un modelo importado de CAD. La geometría generada se exportó al programa DIANA (TNO DIANA, 2005) donde se determinaron las frecuencias y formas modales (figura 7). La información experimental obtenida fue utilizada para identificar mediante un procedimiento iterativo la distribución de rigidez en la estructura.



*Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca*

Concretamente, se procedió identificando el valor de los módulos de deformación de los distintos tipos de elementos estructurales. El ajuste de frecuencias resultante y los valores obtenidos para los módulos de deformación se indican en las tablas 2 y 3. La forma de los modos de vibración obtenidos numéricamente se describe en la figura 7.

Tabla 2. Comparación entre frecuencias experimentales y numéricas obtenidas tras el proceso de identificación

Modo	Frecuencia medida	Frecuencia analítica calibrada	Diferencia
	(Hz)	(Hz)	(%)
1	1,28	1,28	0,00
2	1,47	1,60	8,84
3	1,63	1,70	4,29
4	1,84	1,86	1,09
5	2,03	1,93	5,18

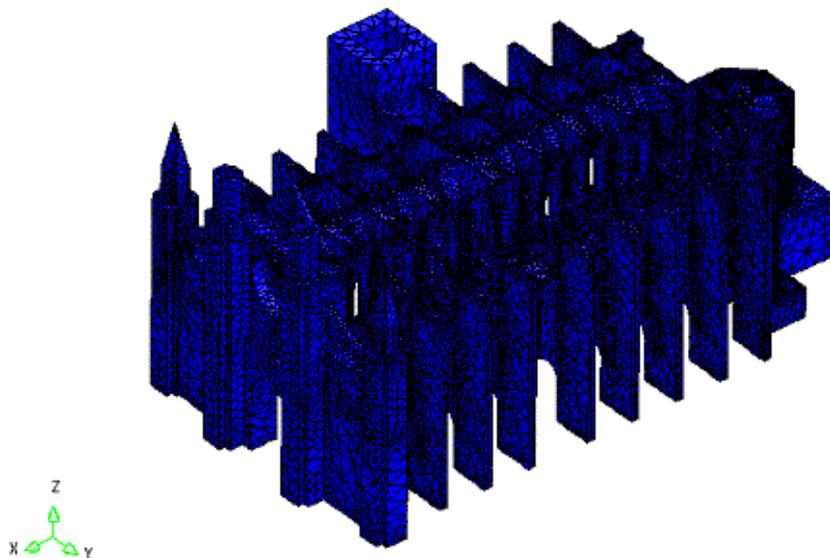
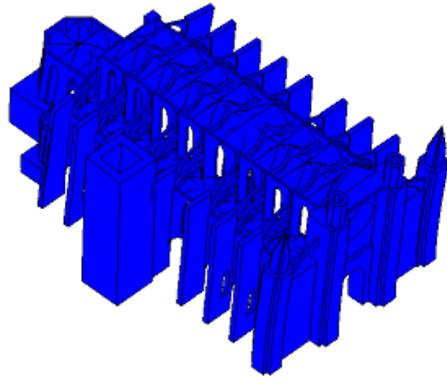


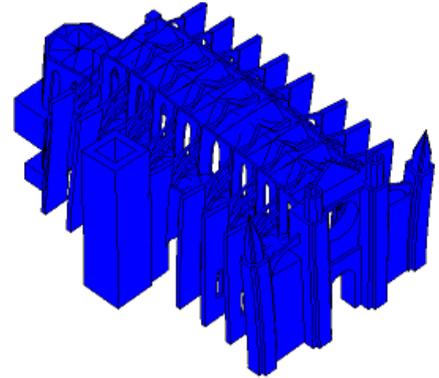
Figura 6. Malla de elementos finitos



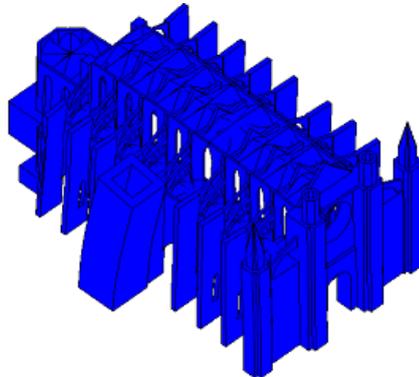
G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés, Al.H. Barbat



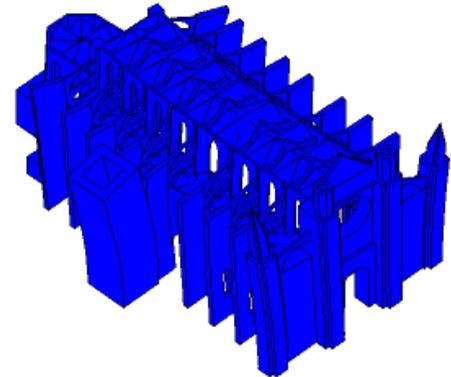
Modo 1



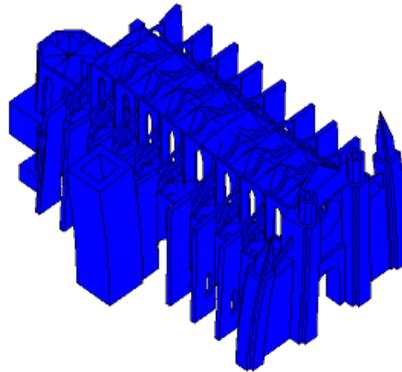
Modo 2



Modo 3



Modo 4



Modo 5

Figura 7. Modos de vibración para la catedral



*Determinación experimental y analítica de las propiedades dinámicas para la Catedral de Mallorca*

Tabla 3. Propiedades mecánicas para el modelo calibrado

	<b>Módulo de Young</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Densidad</b>
	<b>(MPa)</b>	<b>-</b>	<b>(Kg/m3)</b>
<b>Columnas y Arbotantes</b>	15.264	0,20	2.400
<b>Bóvedas, muros y contrafuertes</b>	3.816	0,20	2.100
<b>Rellenos en bóvedas</b>	1.908	0,20	2.000

De la tabla 2 se aprecia que la mayor diferencia conseguida es la correspondiente al segundo modo de vibración (el cual corresponde a una torsión generalizada del edificio), atribuible a que en el modelo analítico no se está involucrando la fisuración existente en las bóvedas y muros longitudinales, situación que impacta con mayor dramatismo en el comportamiento global a torsión, aunque cabe resaltar que dicha diferencia no excede del 10% entre los valores reportados.

## 6. CONCLUSIONES

De los resultados anteriores se observa que la metodología empleada para la caracterización dinámica de edificios históricos, recurriendo al uso de la medición y procesamiento de vibraciones ambientales sobre la estructura es satisfactoria, ya que permite de una manera simple calibrar un modelo analítico complejo, para de esa manera estar en condiciones de contar con propiedades mecánicas para los diferentes materiales, que servirán como punto de partida para la realización de análisis estructurales en el rango de comportamiento no lineal, considerando acciones sísmicas adecuadas para el sitio.

La técnica de medición de vibraciones ambientales constituye un método de identificación no destructiva relativamente económico y de fácil aplicación. En particular, este método no requiere excitar artificialmente la estructura, lo cual resultaría prácticamente imposible para un edificio histórico de grandes dimensiones. Sin embargo, una de las grandes desventajas de la metodología experimental empleada radica en que no se cuenta con información adecuada para la obtención de las propiedades dinámicas de la estructura ante vibraciones de gran amplitud o grandes niveles de deformación (como las inducidas por un terremoto de gran intensidad). Con todo, se considera que la información resultante puede contribuir significativamente a identificar ciertas propiedades (particularmente, la rigidez) de los elementos constructivos y su distribución en el conjunto de la estructura. El modelo presentado está siendo en la actualidad efectivamente utilizado para la realización de estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.



G. Martínez, P. Roca, O. Caselles, J. Clapés, Al.H. Barbat

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada dentro del proyecto “Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings” funded the European Commission through the Heritage Buildings EU-INDIA Economic Cross Cultural Programme (contract ALA/95/23/2003/077-122).

### Referencias

1. Bendat, J.S. & Piersol, A.G. (1993), Engineering Applications of correlation and spectral analysis. 2<sup>nd</sup> Ed., Wiley Interscience.
2. International Center for Numerical Methods in Engineering (2006), GID *The personal pre and postprocessor*, Barcelona, España.
3. Meli R. (1998), Ingeniería estructural de los edificios históricos, *Fundación ICA, México D.F.*
4. Meli, R., Rivera, D. and Miranda, E. (2001), Measured seismic response of the Mexico City Cathedral, *Proceedings, 3th International Seminar on Historical Constructions 2001*, In: Paulo Lourenço and Pere Roca (eds.), p. 877–886. Universidade do Minho, Guimarães.
5. Mezcuca, J. and Martínez Solares, J.M. (1983), “Sismicidad del área Ibero-Magrebí”, *Presidencia del Gobierno, IGN*, Publicación 203, 299 p.
6. Miralles Sbert, J. (1936-1943), “Catálogo del Archivo Capitular de Mallorca, Palma”, 3 volúmenes.
7. Roca, P. (2001), Studies on the structure of Gothic cathedrals, *Structural Analysis of Historical Constructions III*, Guimaraes: Universidade do Minho.
8. Roca, P. (2005), Considerations on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions. *Structural Analysis of Historical Constructions IV*, Padova: University of Padova.
9. TNO DIANA BV (2005), *DIANA-Finite Element Analysis*, The Netherlands.

