

UPDATING MODELS OF FINITE ELEMENTS BY MODAL OPERATIONAL ANALYSIS AND GENETIC ALGORITHMS. APPLICATION TO ARCHITECTURAL HERITAGE BUILT

Estefanía A. Chaves¹, Pablo Pachón², Víctor Compán³, J. Ramón Baeza⁴

¹Gerencia de ingeniería y Edificación, Departamento de Estructuras. Tragsatec (España).
achaves1.ext@tragsa.es

²Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla (España). ppachon@us.es

³Dpto. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla (España). compan@us.es

⁴Dpto. de Construcciones Arquitectónicas II. Universidad de Sevilla (España). jbaeza@us.es

ABSTRACT

The use of Operational Modal Analysis is establishing as an acceptable tool to estimate the dynamic properties of heritage buildings as a non-destructive technique. Through its application, mechanical properties of structural elements, as stiffness or mass, can be obtained with great accuracy. The information obtained can be used to update finite element models, however this process is complicated due to presently it is made manually. This work wants to develop a technique which expects improve the effort and the time invert in this process.

The genetic algorithms are going to be used to update tow finite element models of tow patrimonial buildings, the Pavilion of Charles V and the San Jeronimo Monastery both located in Seville, in which variables like elasticity module or boundary conditions are going to be updating in order to have a real behaviour model to carry out the structural assessment of the buildings.

Keywords: OMA, FEM, updating, algorithms, heritage

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la preservación del patrimonio arquitectónico es una cuestión de relevante interés en nuestra sociedad, por lo que es imprescindible que el estado de sus estructuras sea óptimo. Para ello hay que realizar análisis estructurales adecuados y así poder contar con información fiable que nos ayude a establecer los distintos planes de conservación o rehabilitación [1]. El estudio de este tipo de edificaciones presenta un gran desafío debido a que conlleva el análisis de numerosas variables, las cuales presentan un elevado grado de incertidumbre [2].

La importancia de estas edificaciones, y el estado en el que algunas se encuentran, hace inviable el uso de técnicas invasivas para llevar a cabo el análisis estructural. Actualmente se está desarrollando una técnica basada en el empleo de la respuesta dinámica que presenta la estructura ante la vibración ambiental. Hablamos del análisis modal operacional [03, cap. 6], una técnica no destructiva mediante la que obtenemos las propiedades dinámicas reales de la estructura, las cuales dependen de parámetros como la masa, la rigidez y la capacidad de disipación de energía.

Hoy en día existen numerosas aplicaciones para esta técnica dentro del campo de las estructuras. Una de las más importantes es la realización de modelos numéricos en base a la información obtenida con este método. En este caso se va a trabajar con algoritmos de tipo genético [4] para la optimización del error entre los valores reales y los valores numéricos.

Para aplicar la metodología se han elegido dos edificios de gran valor patrimonial con peculiaridades concretas que los hacen interesantes para este tipo de estudio. En primer lugar, contamos con el Cenador de Carlos V [5], que se encuentra ubicado en el Alcázar de Sevilla y se caracteriza por ser un edificio exento que está constituido por elementos con propiedades dinámicas muy diferentes.

Por otro lado, vamos a trabajar con el claustro del Monasterio de San Jerónimo [6], ubicado también en Sevilla. De este edificio se ha tomado un fragmento de una de las cuatro crujías que forman parte del claustro. En este caso contaremos con una pieza monolítica donde las condiciones de contorno serán el objeto principal de análisis.

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo de elementos finitos

Una vez analizado constructivamente el edificio caso de estudio se desarrolla el modelo numérico de elementos finitos. Para ello se modeliza la geometría y los volúmenes según los diferentes materiales y se introduce en el programa ICEM donde se realiza la malla [7].

2.2. Análisis modal operacional

2.2.1. Planificación de la campaña experimental

Una buena práctica es realizar un primer análisis del comportamiento dinámico de la estructura para obtener información sobre las formas modales y cuáles son los puntos que aportarán más información en la medición. En base a ellos se definen los puntos a medir y cuáles son los puntos de referencia más adecuados para poder unir las diversas mediciones.

2.2.2. Toma de datos

El equipo de medición que se ha empleado está compuesto por un sistema de adquisición de datos, modelo Granite de doce canales, de la compañía Kinometrics, y por acelerómetros de fuerza balanceada caracterizados por poseer un sistema de masa-resorte que, bajo excitación, transforman la aceleración en una señal diferencial eléctrica proporcional.

Un parámetro importante que definir es la duración de cada medida ya que de ello depende obtener información suficiente y que esta sea fiable. Para la realización de las campañas de nuestros casos de estudio el tiempo definido para cada medición se estima suficiente en 12 minutos [8].

2.2.3. Tratamiento de datos

Los datos obtenidos se han de analizar y filtrar, en este caso se ha programado este proceso con Matlab, para obtenerlo de manera más automática. Los datos tratados se analizan con Artemis, que es el

programa que usamos para la identificación modal. Este programa trae implementado varios métodos, en nuestro caso aplicaremos los dos que presentan resultados más fiables y que actualmente son los más destacados en este campo de la investigación para el rango de frecuencias en el que trabajamos. En primer lugar, vamos a utilizar el método de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia, EFDD [9]. Este establece los parámetros modales mediante la aplicación de la transformada de Fourier. En este caso el programa analiza los picos de la gráfica, ya que estos son los que nos darán los valores de las frecuencias de cada modo. Por otro lado, tenemos el método de identificación en el subespacio estocástico (SSI) [10] que se diferencia del anterior porque se realiza la identificación en el dominio del tiempo.

La validación de estos métodos se realiza mediante el Modal Assurance Criterion (MAC) Eq. (1), proceso con el que se comparan los desplazamientos modales que identifican los dos modos, de manera que si la correlación es perfecta obtendremos un valor 1, mientras que, si no existe correlación, cosa que ocurre cuando los desplazamientos son perpendiculares, el valor es cero.

$$MAC(\rho_a, \rho_b) = \left\{ \frac{(\rho_a^t, \rho_b^t)^2}{(\rho_a^t, \rho_a^t)(\rho_b^t, \rho_b^t)} \right\} \quad (1)$$

Tras estos procedimientos tendremos ya la información modal correspondiente a las frecuencias, formas modales y amortiguamientos reales de la estructura analizada que se usará para realizar la actualización del modelo de elementos finitos.

2.3. Actualización del modelo de elementos finitos

Es necesario establecer cuáles son las variables que más influyen sobre los resultados del cálculo. Para ello se realiza un ajuste manual para obtener una base para la actualización automática.

Para la actualización automática hay que determinar qué información modal de la campaña vamos a utilizar y cuáles van a ser las variables. Además, se ha de establecer un rango dentro del cual se van a encontrar los posibles valores de estos parámetros de actualización.

Para actualizar el modelo se establece la función objetivo, que es la que define el error que existe entre los valores experimentales y reales, y para ello se usa el método de mínimos cuadrados Eq. (2) [11].

$$y = (f_{FEM}^2 - f_{exp}^2 / f_{exp}^2)^2 \quad (2)$$

2.3.1. Algoritmo genético

En este trabajo se ha optado por un método de optimización basado en algoritmos genéticos [4]. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica como cruces y combinaciones genéticas, así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados. En este caso hemos usado la herramienta de optimización del programa Matlab para desarrollar los cálculos [12].

Uno de los conceptos base a definir es el número de individuos que forman la población en cada generación. Es importante definir bien este parámetro ya que mientras mayor sea el tamaño de la

población, el algoritmo podrá buscar dentro de un mayor espacio, de manera que se reduzcan las posibilidades de encontrar un mínimo local, pero el coste computacional será mayor. En este caso vamos a trabajar con una población de 50 individuos ya que el número de variables no es mayor a cinco.

Por otro lado, hemos de elegir el tipo selección de los individuos que van a ser los padres de los individuos de la nueva generación. Aunque para el caso del algoritmo genético, el programa trae implementados cinco tipos diferentes, vamos a tomar la selección por torneo ya que es la única opción para el caso de los algoritmos genéticos multiobjetivo que es el objetivo de los futuros trabajos. La idea principal de este tipo consiste en escoger a los individuos genéticos en base a comparaciones directas entre sus ajustes.

Tras la selección pasamos al proceso de reproducción. Cuando los individuos son recombinados para producir la descendencia que se insertará en la siguiente generación hablamos de cruce, es un tipo de reproducción sexual y es la más relevante generando, en nuestro caso, el 80% de la siguiente población. La otra estrategia reproductiva para la obtención de una nueva generación es la copia y dentro de ella encontramos el tipo llamado elitismo, que se basa en copiar siempre los mejores individuos de una generación en la generación siguiente, estableciendo en nuestro caso para ello un coeficiente de 0,05.

Hablamos ahora de la mutación, que consiste en realizar pequeños cambios aleatorios en los individuos de la población, en nuestro caso, debido a que tenemos un problema con restricciones, el tipo aconsejable es Adaptive Feasible que trae implementado el programa Matlab.

3. CENADOR DE CARLOS V

El Cenador de Carlos V es una edificación que forma parte de los Reales Alcázares de Sevilla. Se encuentra dentro de lo que se denominaba la huerta de la Alcoba, espacio que fue intervenido a partir del 1542. El jardín se encuentra centrado en el Pabellón de Carlos V, remodelación posiblemente de una qubba (oratorio musulmán) que presidía el cementerio real, de donde derivaría el nombre de Huerta de la Alcoba [13].



Figura 1. Imagen exterior del Cenador de Carlos V.

3.1. Descripción del edificio

El edificio está formado por el núcleo central compuesto por muros de fábrica y veinte columnas, presentando doble simetría. La plataforma queda delimitada por un muro de un metro aproximado de altura que separa el área del pabellón del resto del jardín. La puerta de acceso se encuentra en la cara sur, que es por donde atraviesa el canal de la fuente el edificio.

Tanto el espacio interior como la galería quedan delimitados superiormente por una cubierta inclinada de tejas. En la parte de la galería, bajo la cubierta inclinada, tenemos un paño vertical y en el volumen interior central, bajo la cubierta inclinada, se encuentra una cúpula de 6 metros de diámetro. Esta genera una disminución de sección en el muro perimetral de unos 12 cm en cada lado. En este caso la altura libre, de más de nueve metros en la zona central, se impone sobre la dimensión horizontal que supera por poco los 5,70 metros en cada dirección.

Exteriormente se crea una galería que se desarrolla en todo el perímetro, con una dimensión de poco más de dos metros desde el muro hasta la basa de las columnas. Estas columnas soportan una arcada con luces de 2,30 metros aproximadamente, quedando un espacio de paso entre ellas de dos metros. Por último, tenemos el espacio que está entre las columnas y el murete que delimita la plataforma, donde se genera un espacio, no cubierto, de un metro y medio de ancho aproximadamente.

Con lo que respecta a las soluciones constrictivas, el edificio se resuelve con elementos masivos y monolíticos, para los que se usa la fábrica y la piedra. Junto a estos elementos aparecen las cubiertas, que contrastan con el resto por tratarse de un elemento ligero ya que se resuelven con un entramado de vigas de madera de sección esbelta. Junto a estas soluciones de cubierta aparece la cúpula de madera que, junto a la cubierta inclinada, remata el espacio interior [5].

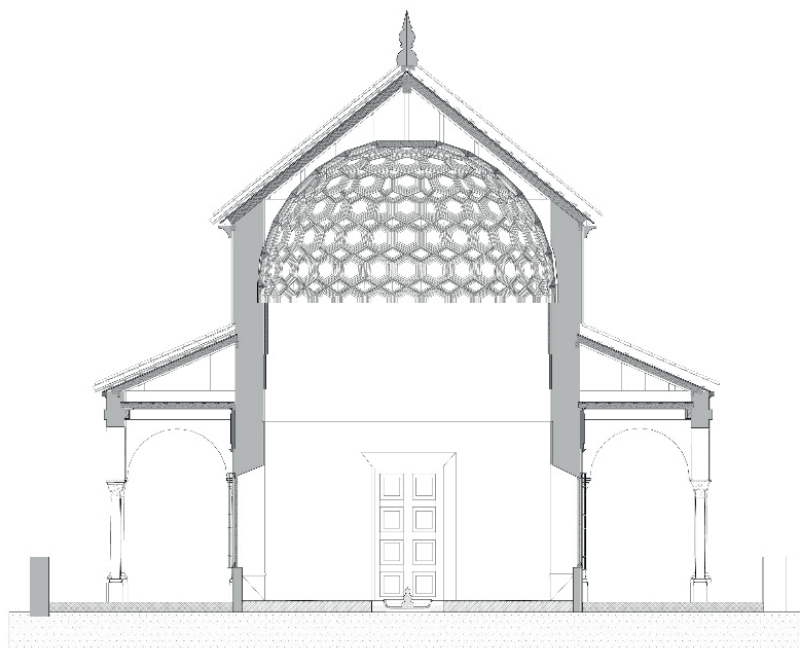


Figura 2. Sección del Cenador de Carlos V.

3.2. Modelo de elementos finitos

3.2.1. Modelado

Para realizarlo de una forma adecuada se ha utilizado el programa de modelado paramétrico CATIA. Aquí se han generado volúmenes para los diferentes elementos de fábrica y piedra, y elementos de tipo superficial para las partes de madera de la cubierta y la cúpula del espacio central y sus pechinas.

3.2.2. Mallado

El modelo de elementos finitos se genera usando el programa comercial ICEM perteneciente a la casa ANSYS. Se han usado elementos de tipo shell para las superficies correspondientes a las cubiertas y a la cúpula. Estos elementos superficiales se definen mediante 3 nodos, sin nodos intermedios y 6 grados de libertad (Ux, Uy, Uz, Rot x, Rot y, Rot z). Por otro lado, al resto de elementos, columnas, arquería y muro interior, que se han modelado como sólidos, se les asocia un elemento de tipo volumétrico, de 4 nodos, sin nodos intermedios y 3 grados de libertad (Ux, Uy, Uz).

La densidad de la malla se ha establecido por elementos según la geometría de cada elemento, obteniendo un modelo final de 586642 elementos, 128090 nodos y 405321 grados de libertad.



Figura 3. Modelo de elementos finitos del Cenador de Carlos V y especificación de materiales.

3.3. Campaña experimental

3.3.1. Toma de datos

Para obtener la información modal del pabellón han utilizado tres acelerómetros triaxiales y dos acelerómetros uniaxiales. El punto de referencia se sitúa en la sección superior de una de las columnas, en la zona de contacto de la fábrica de ladrillo con la arquería.

La campaña se realizó durante siete días, en los que se realizaron más de 30 medidas de 12 minutos de duración, obteniéndose información de 98 puntos, definidos en la fig. 4.



Figura 4. Izquierda: definición de los puntos de medición. Derecha: imágenes de la campaña de toma de datos del Cenador de Carlos V.

3.3.2. Tratamiento de datos

Cada fichero obtenido en cada medición se filtra y se analiza la señal gráficamente con el programa Matlab; eliminando la tendencia lineal y aplicando filtros para reducir el ruido de la señal.

Para realizar la identificación modal se van a utilizar dos métodos, el método de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFDD) y el método de identificación en el subespacio estocástico (SSI), y su comparativa mediante el Modal Assurance Criterion (MAC) implementados todos en Artemis. Para este caso se han obtenido seis modos registrando todos ellos por debajo de los 10 Hz.

Nos encontramos con dos modos de flexión simple, uno en la dirección del eje X y otro en el eje Y. Como tercer modo encontramos un movimiento de torsión en el que tanto la galería exterior como el núcleo interior, giran en la misma dirección.

Nos encontramos ahora con un salto de casi tres hercios de frecuencia hasta obtener el cuarto modo. Esto puede deberse a la aparición de modos locales de los elementos de madera, cuya medición no era posible. En este cuarto modo el edificio tiene un movimiento diagonal donde dos de las esquinas opuestas se abren y las otras dos se desplazan hacia el punto central.

Los dos siguientes modos se han identificado mediante los dos métodos con frecuencias muy próximas, 0,2 Hz de diferencia. Nos encontramos con dos modos que corresponden a una flexión cruzada, entre la galería y el núcleo central, uno en el eje X y otro en Y. El valor MAC en este caso vuelve a ser demasiado bajo, pero se cree que es debido a que la identificación mediante el método EFDD no ha sido del todo precisa ya que al analizar las formas modales observamos bastante ruido en los desplazamientos.

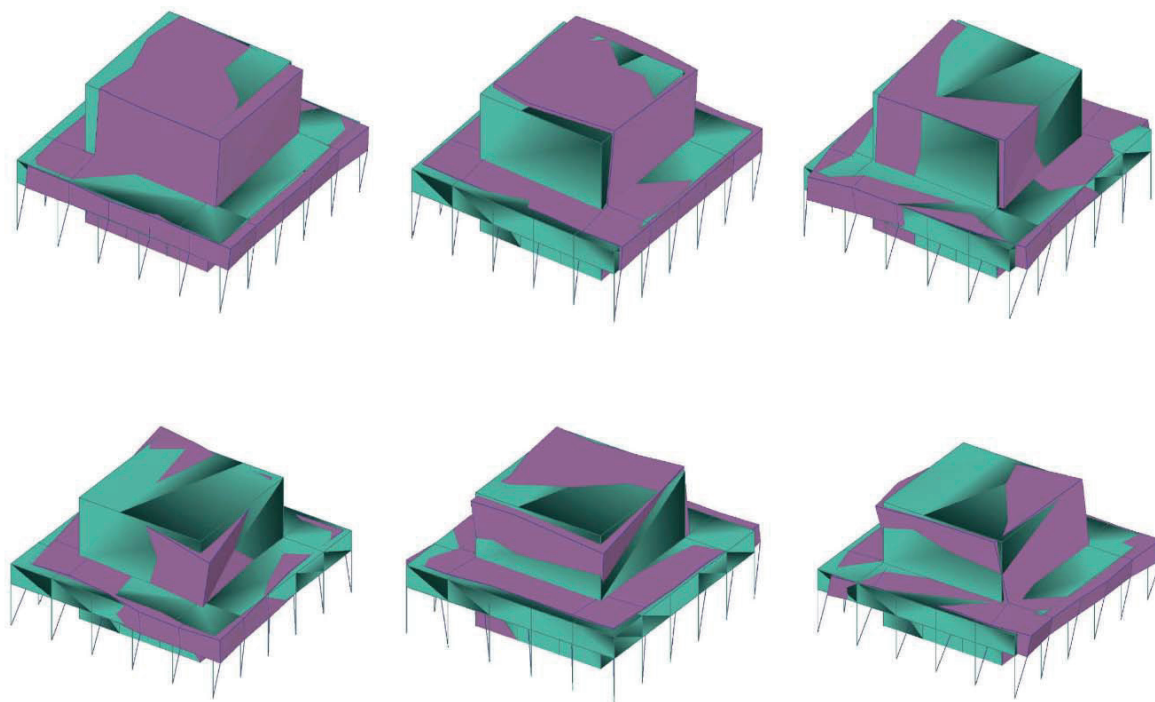


Figura 5. Formas modales experimentales del Cenador de Carlos V, modos del 1 al 6 por orden. Geometría base morada, geometría deformada verde.

3.4. Actualización

Comparando los valores reales y los numéricos observamos como todos los modos obtenidos de la medición realizada son modos generales del edificio, mientras que con Abaqus las cubiertas presentan modos propios que se intercalan entre los modos globales. Esto es debido a la imposibilidad de colocar acelerómetros en las cubiertas ya que habría que haber colocado los acelerómetros de referencia en las distintas cubiertas simultáneamente.

Mediante el análisis de sensibilidad se observa como los módulos de elasticidad cobran mayor importancia en los resultados de los cálculos, así que se definen como variables de cálculo.

3.4.1. Algoritmo genético de actualización

Tras el primer ajuste manual se define el algoritmo genético. Es aquí donde la existencia de modos locales supone un problema debido a la automatización del algoritmo. El algoritmo compara los valores de las frecuencias de manera ordenada, por lo que va a comparar valores que no definen los mismos modos ya que va a asimilar los modos locales que se intercalan con los modos globales que hemos introducido nosotros.

La solución que se plantea es utilizar los tres primeros modos, que Abaqus si respeta, y actualizar tres valores. Se establecen valores máximos y mínimos para las variables, que definan un rango dentro del cual no aparezca ningún modo local entre los tres primeros.

Se realiza un primer cálculo tomando como valores de partida los estimados en la actualización manual y se definen unos valores límites a las variables. Tras actualizar los módulos de elasticidad de las cubiertas inclinadas y la fábrica de ladrillo, se obtiene un valor 0,002566 como resultado de la función objetivo, reduciendo notablemente el valor inicial de 0,16.

A continuación, se realiza una serie de actualizaciones consecutivas basadas en los valores actualizados de las anteriores cuyos resultados quedan reflejados en la *Tabla 1*. En el Algoritmo 4 se dividen los dos paños de la cubierta de la galería para intentar obtener valores más precisos. El error del último cálculo supone una reducción del error entorno al 13% con respecto al valor del primer algoritmo, por lo que, a pesar de poder actualizar solo tres valores, con este procedimiento que ha podido ajustar aún más el error.

Tabla 1. Variables actualizadas y error final tras la finalización de cada algoritmo.

Cálculo	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Error
Algoritmo 1	Cubierta 1	Cubierta 2	Ladrillo	0.002566
Algoritmo 2	Cubierta 1	Cubierta 2	Piedra	0.002512
Algoritmo 3	Cubierta 1	Cubierta 2	Cúpula	0.002456
Algoritmo 4	Cubierta 1	Cubierta 2a	Cubierta 2b	0.002316
Algoritmo 5	Cubierta 1	Cúpula	Ladrillo	0.0022750
Algoritmo 6	Cubierta 1	Cubierta 2a	Cubierta 2b	0.0022409

Tabla 2. Valores de las variables actualizados mediante la aplicación de los algoritmos.

Material	M. de elasticidad MPa
Cubierta 1	903
Cubierta 2a	1706
Cubierta 2b	335
Cúpula	2200
Ladrillo	512
Piedra	1380

3.4.2. Modelo actualizado

Finalmente introducimos los valores de las variables actualizados en Abaqus para analizar si la actualización mediante el algoritmo se ha realizado correctamente. Para ello tomamos los tres primeros modos que son en base a los cuales se han actualizado las variables.

Tabla 3. Comparativa de los valores de las frecuencias tras la actualización mediante el algoritmo del Cenador de Carlos V.

Modo	EFDD	SSI	Numérico
Modo 1	4.614 Hz	4.823 Hz	4.807 Hz
Modo 2	5.054 Hz	4.902 Hz	4.917 Hz
Modo 3	5.854 Hz	5.834 Hz	5.834 Hz

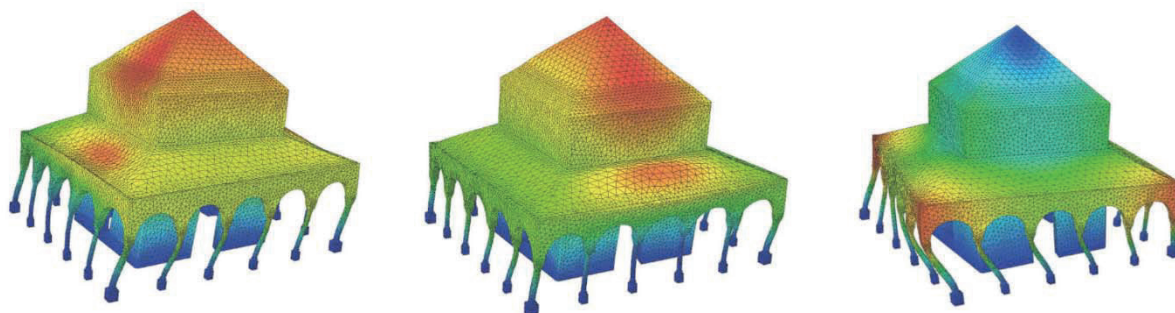


Figura 6. Modelo de elementos finitos actualizado del Cenador de Carlos V. Tres primeros modos por orden.

3.5. Conclusiones

La actualización manual se define como un método válido ya que hemos obtenido valores de frecuencias muy similares a los experimentales y se han podido actualizar los modos globales independientemente de si aparecían los modos locales de los elementos ligeros intercalados o no.

La limitación encontrada a la hora de aplicar la actualización mediante el algoritmo se ha intentado solventar mediante la realización de varios cálculos, y aunque contábamos solo con tres frecuencias, se han actualizado seis módulos de elasticidad de los materiales.

En lo referente a los valores de las variables obtenidos tras la actualización, siendo en este caso los valores del módulo de elasticidad de los materiales, podemos sacar una serie de conclusiones con respecto al estado de los materiales y a la definición del modelo de elementos finitos.

En el caso de la fábrica tenemos un valor de 512 MPa, que es bastante inferior al estimado antes de realizar las actualizaciones, por lo que suponemos que el estado de la fábrica ha degenerado. Con respecto a la piedra, también se obtiene un valor bajo. En este caso se supone que el valor viene condicionado por el modelado de la unión con la fábrica ya que no existe discontinuidad entre los dos elementos como realmente sucede por lo que el valor no llega a ser representativo del material.

En el caso de los elementos ligeros vemos como, aunque tratándose de piezas realizadas con el mismo material, la madera, los resultados son muy dispares. Se entiende que la simplificación de la geometría de estos elementos, tanto de las cubiertas como de la cúpula, invalidan la opción de obtener un resultado real en lo que respecta al valor del módulo de elasticidad.

Lo importante es entender que los valores obtenidos no son representativos de los materiales constructivos pero que si son válidos para establecer un modelo de cálculo que responda a la realidad.

4. CLAUSTRO DEL MONASTERIO DE SAN JERÓNIMO

El origen del monasterio de San Jerónimo de Buenavista de Sevilla se remonta al 1414, cuando fue fundado por fray Diego Martínez de Medina. Se levantó en su tiempo extramuros de la ciudad, muy próximo al río Guadalquivir [15]. El monasterio se diseñó en estilo gótico flamígero y su construcción se

llevó a cabo entre 1414 y mediados del siglo XVII, siendo la composición final la que se aprecia en la figura 7.

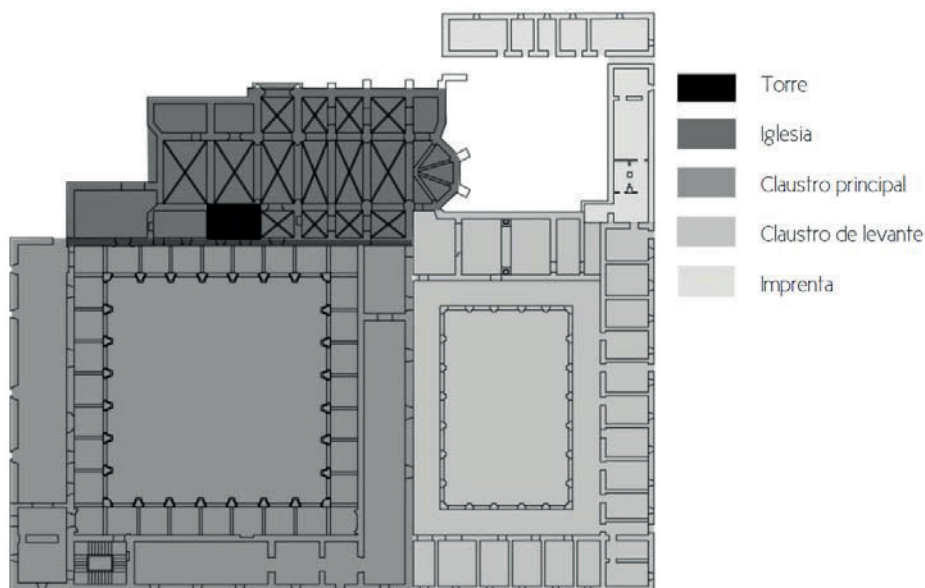


Figura 7. Planta completa del Monasterio de San Jerónimo.

4.1. Descripción del edificio

El módulo a estudiar presenta dos alturas, con una arcada cada una, en la parte inferior la geometría define un arco de medio punto y en la superior un arco carpanel. Estos arcos se apoyan en las semicolumnas que se adosan a los laterales de los pilares, que presentan planta cuadrada y que también presentan otra semicolumnas adosada en la parte frontal, esta de mayor altura que las laterales. El orden empleado es el toscano en planta baja y el jónico en la primera. Se remata la composición con un antepecho de lacería morisca en piedra martelilla [14].

Los arcos transversales del deambulatorio, al igual que los frontales, son de medio punto en la planta baja, y carpaneles en la primera y se apoyan en ménsulas con decoración diversa. En el caso de la planta baja, el módulo está cubierto por una bóveda vaída, mientras que en la planta alta no se conserva.

Este modelo se compone en su totalidad de elementos masivos, por lo que se estima que su comportamiento tenga un carácter monolítico. Básicamente consta de dos materiales principales, la piedra, que resuelve los pilares, los arcos de planta primera y las bóvedas de planta baja, y la fábrica que resuelve el revestimiento del muro perimetral. A estos hay que sumarles dos materiales más, el correspondiente al relleno del muro y el que corresponde al relleno de las bóvedas de planta baja.

4.2. Modelo de elementos finitos

4.2.1. Modelado

Se han modelado los elementos de piedra, las bóvedas de planta baja, los pilares y los arcos que se conservan en planta alta. También se ha generado un volumen el relleno de las bóvedas. Para la definición del muro perimetral se han establecido distintos volúmenes, dos exteriores que

corresponden a la fábrica de ladrillo y un volumen para el núcleo interior al que se le asociarán las propiedades del relleno. También se ha considerado importante modelar los huecos generando los volúmenes de los premarcos que están resueltos con fábrica de ladrillo.

4.2.2. Mallado

Para generar la malla de elementos se usan elementos tetraédricos para los sólidos, elementos de 4 nodos, sin nodos intermedios y 3 grados de libertad (U_x , U_y , U_z).

En este caso se ha establecido una malla con un menor tamaño de semilla para las secciones menores como son los arcos de planta primera o la sección de las bóvedas de piedra de planta baja. Se obtiene de este modo una malla con un total de 189426 elementos, 37487 nodos y 112461 grados de libertad.

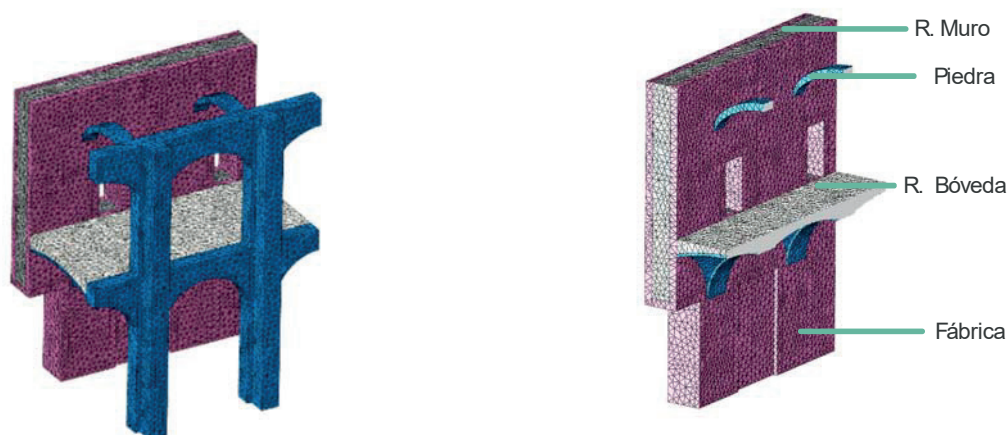


Figura 8. Modelo de elementos finitos del Monasterio de san Jerónimo.

4.2.3. Análisis dinámico previo

Se ha contado con una campaña de OMA donde se tomaron medidas de todo el claustro [6]. Esta nos va a servir como base para estimar el comportamiento del módulo de la crujía que se está estudiando.

Como trabajo previo, y gracias a la información de la campaña, se realizó una actualización del modelo completo. Gracias a esta se ha podido contar con datos bastante fiables en lo que respecta a las propiedades de los materiales.

Tabla 4. Materiales. Valores actualizados tras la campaña experimental del conjunto.

Material	Densidad kg/m^3	Elasticidad MPa	C. Poisson
Piedra	1800	1200	0,2
Fábrica	1800	950	0,2
Relleno muro	1500	500	0,2
Relleno bóveda	500	300	0,2

4.3. Campaña experimental

4.3.1. Toma de datos

Para la toma de datos se utilizaron tres acelerómetros triaxiales. Se midieron los puntos del límite de la pieza para obtener información precisa de las condiciones de contorno. Por otro lado, como los puntos más representativos estarían en cotas superiores, se estimó oportuno definir dos cotas diferentes en la planta superior tal y como se representa en la fig. 9. Los acelerómetros de referencia se colocaron en cotas diferentes y en la cara que da al patio, ya que esta parte es menos maciza que el muro y presenta mayores desplazamientos modales.

La campaña realizada supuso un total de 27 puntos de medida, dos de ellos como referencia. Cada medida se realizó durante doce minutos, completándose la campaña en un único día.

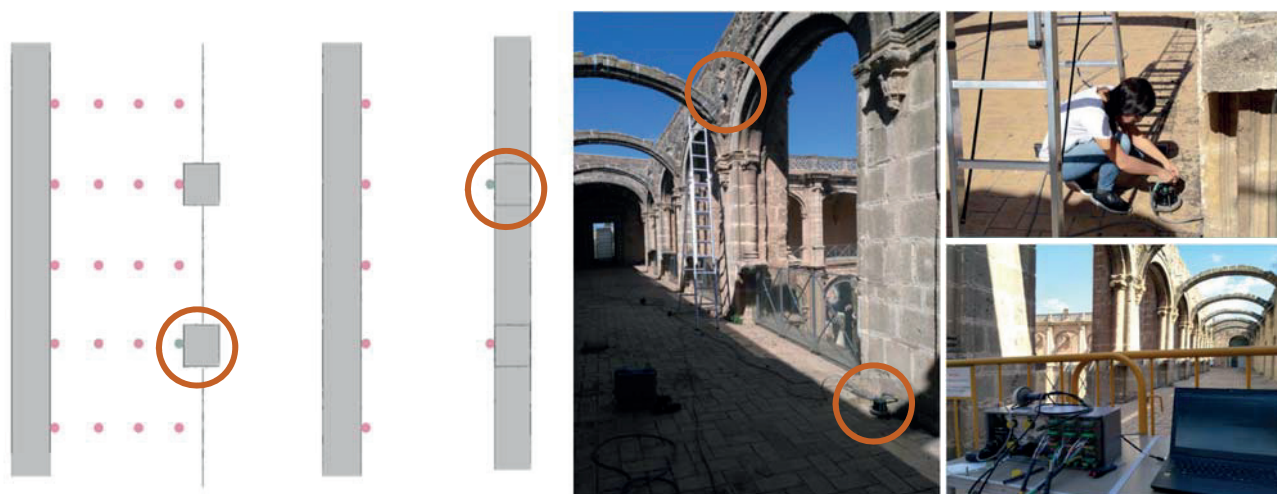


Figura 9. Izquierda: definición de los puntos de medición. Derecha: imágenes de la campaña de toma de datos del fragmento del claustro del Monasterio de San Jerónimo.

4.3.2. Tratamiento de datos

Tras tratar inicialmente la información mediante Matlab, pasamos a realizar la identificación modal y el análisis comparativo con Artemis, obteniendo un total de cinco modos con valores de frecuencias no superiores a los cinco hercios y valores MAC bastante próximos a la unidad.

El primero es un movimiento de flexión simple que corresponde al primer modo y en el segundo encontramos un movimiento de giro. En lo referente al tercer modo identificado, la forma modal presenta un movimiento de apertura de los arcos de la parte superior, lo que genera un movimiento de flexión tanto en el muro como en la arcada paralela, pero en sentido opuesto y un cuarto modo similar al anterior, donde los arcos perpendiculares al muro se abren y se cierran, pero en este caso la forma modal también presenta cierto giro por lo que no se produce una flexión simple en los dos soportes paralelos donde apoyan. Por último, ambos métodos, identifican un quinto modo con una forma modal más compleja. Por un lado, presenta un movimiento de giro muy similar al que se produce en el segundo

modo al que se le suma un desplazamiento en el eje Y que corresponde a un movimiento trasaccional de la pieza.

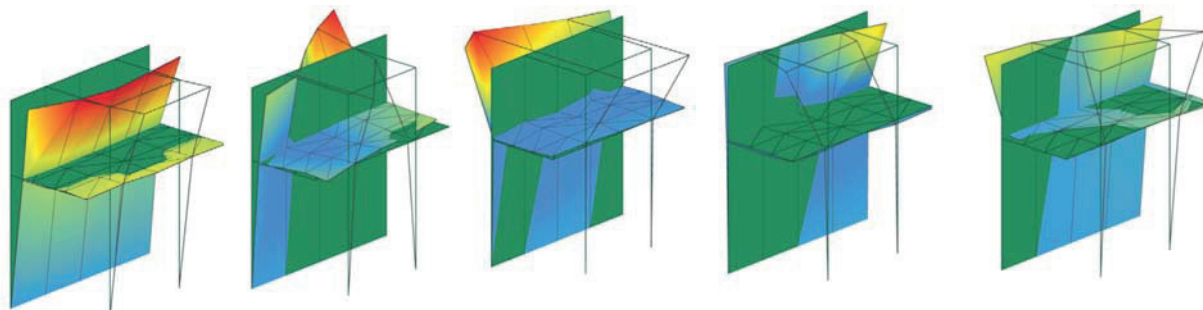


Figura 10. Formas modales experimentales del fragmento del claustro, modos del 1 al 5 por orden. Geometría base verde.

4.4. Actualización

En este modelo nos vamos a centrar principalmente en la actualización de las condiciones de contorno, ya que los valores de las propiedades de los materiales están bastante ajustados tras la actualización que se realizó del modelo global del Monasterio.

En primer lugar, introducimos los valores de las propiedades de los materiales y en segundo lugar definimos las condiciones de contorno mediante muelles en cada una de las direcciones. Tras varios cálculos, vemos como los muelles definidos para el eje Z no son muy representativos en las variaciones de los resultados. Por ello se estima oportuno trabajar con los muelles en el eje X e Y.

Tras analizar las frecuencias y las formas modales, se consigue ajustar de forma manual bastante bien los cuatro primeros modos, siendo el quinto modo el que presenta mayor diferencia en cuanto a frecuencias y a forma modal ya que el movimiento traslacional del modo registrado en la campaña no aparece en el modelo numérico. Esto es debido a que el diseño de las condiciones de contorno debería estar más detallado, pero entonces aparecerían más variables y no se podría establecer la función objetivo para la actualización mediante el algoritmo.

4.4.1. Algoritmo genético de actualización

Se van a tomar los valores de las frecuencias de los cuatro primeros modos para realizar la actualización del modelo. Las variables que se establecen van a ser los coeficientes que definen los cuatro grupos de muelles que se han definido en el modelo virtual.

Todos estos parámetros nos van a definir la función objetivo de la actualización, por lo que pasamos ahora a establecer las definiciones del algoritmo.

En primer lugar, establecemos el campo de búsqueda del algoritmo, para lo que definimos los valores límites de las variables. En este caso, como los valores que definen los muelles presentan mucha

incertidumbre se establece un rango amplio, siendo 0,2 el coeficiente del límite inferior y 3 el del límite superior.

Tras realizar el cálculo, el programa ha resuelto la ecuación de error con un valor de 0,03744 definiendo como coeficientes mayores a la unidad en la sección uno y menores a 1 en la sección dos. Esto nos sirve para validar estos resultados ya que se partía de valores simétricos para ambas secciones.

Tabla 5. Constante de elasticidad. Valores actualizados tras la optimización mediante algoritmo.

Muelle	K algoritmo
Sección 1X	169800
Sección 1Y	70515
Sección 2X	39700
Sección 2Y	36500

4.4.2. Modelo actualizado

Tras introducir las nuevas constantes en Abaqus se ha realizado el cálculo para validar el proceso de actualización mediante el algoritmo. Los resultados obtenidos son bastante buenos ya que las frecuencias, aunque ya estaban bastante ajustadas, se aproximan aún más a los valores reales.

Por otro lado, al tener valores diferentes de las constantes de los muelles en las dos secciones, las formas modales se ajustan mejor a las del modelo experimental.

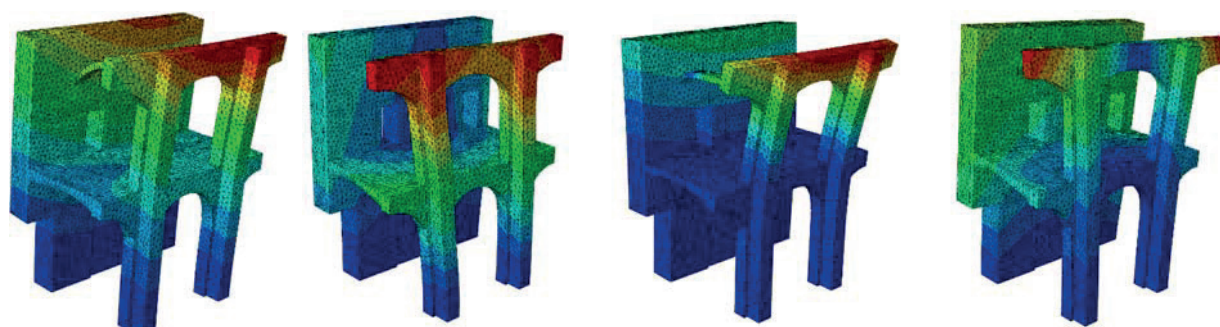


Figura 11. Modelo de elementos finitos actualizado del fragmento del claustro. Cuatro primeros modos por orden.

Tabla 6. Comparativa de los valores de las frecuencias tras la actualización mediante el algoritmo del fragmento del claustro del Monasterio de San Jerónimo.

Modo	EFDD	SSI	Numérico
Modo 1	2.346 Hz	2.346 Hz	2.389 Hz
Modo 2	3.356 Hz	3.385 Hz	3.351 Hz
Modo 3	4.036 Hz	3.907 Hz	3.744 Hz
Modo 4	4.363 Hz	4.398 Hz	4.381

4.5. Conclusiones

En este caso destacan los buenos resultados obtenidos en la campaña experimental ya que se registraron cinco modos mediante los dos métodos (EFDD y SSI) de manera bastante clara, con valores de frecuencias prácticamente idénticos y valores MAC por encima de 0,8.

Referente al modelo de elementos finitos, se puede mencionar la complejidad que supone la definición de las condiciones de contorno, sobre todo si tenemos en cuenta que en nuestro caso dos caras completas y opuestas del modelo se encuentran conectadas a un conjunto de mayor entidad referente a la crujía del claustro, que condiciona en gran medida su comportamiento estructural.

En lo que respecta a la actualización, la que se ha realizado de manera manual aproximó bastante los valores de las frecuencias experimentales y numéricas, pero mediante el algoritmo genético se han ajustado aún más los valores de las frecuencias y las formas modales de manera más precisa. Haber definido diferentes grupos para las constantes de los muelles dentro de la misma sección podría haber supuesto un mayor ajuste, pero esto habría generado un gran número de variables que no era posible actualizar simplemente ajustando en base a las frecuencias.

A pesar de haber simplificado los valores de los muelles en cuatro grupos, y de no haber introducido una masa inercial que hubiera hecho posible el análisis de movimientos transversales, los resultados tras la actualización automática han generado un modelo con un comportamiento muy similar al experimental.

5. CONCLUSIONES GENERALES

La aplicación del análisis modal experimental resulta idónea en el caso de edificaciones de carácter histórico para obtener información referente de los valores reales de la estructura mediante un procedimiento no agresivo.

Los modelos de elementos finitos generados presentan un buen ajuste tras su actualización, por lo que se concluye que las simplificaciones tomadas para su definición se han verificado como válidas.

El ajuste de los modelos de elementos finitos conseguido en base a la frecuencia ha resultado adecuado. En lo referente al ajuste basado en dos objetivos, frecuencias y formas modales no se han obtenido valores válidos debido al ruido que presentan las formas modales que se obtienen de la campaña experimental.

Establecer como variables de actualización los módulos de elasticidad ha resultado valido para el ajuste del modelo de elementos finitos. Por el contrario, estableciendo las condiciones de contorno como variables no se han conseguido resultados tan ajustados debido a que requieren una definición numérica más precisa que se ajuste mejor a la realidad.

El empleo de técnicas de actualización automáticas como las aquí expuesta, ha supuesto una herramienta bastante interesante ya que se produce una minimización del coste humano durante el

proceso y un mayor ajuste entre los valores numéricos y experimentales. Sin embargo, presentan el inconveniente de necesitar recursos computacionales bastante elevados.

REFERENCIAS

- [1] ICOMOS. Committee, Recommendations for the analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, in: ICOMOS International Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 2005.
- [2] Peña, Fernando. 2010. "Estrategias para el Modelado y el Análisis Sísmico de Estructuras Históricas" 83 (83): 43–63.
- [3] Rodríguez Súnico, Manuel. 2005. "Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica."
- [4] Gestal, Marcos, Daniel Rivero, Juan Ramón Jr Rabuñal, Julián Dorado, and Alejandro Pazos. 2010. Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética.
- [5] Nieto Julian, Juan Enrique. 2014 Generación de modelos de información para la gestión de una intervención en el patrimonio arquitectónico. Tesis Doctoral.
- [6] Compán, Víctor, Pachón, Pablo, Cámara, Margarita, Sáez, Andrés. 2014. "Análisis Estructural Del Monasterio De San Jerónimo De Buenavista. Sevilla" REHABEND 2014 Abr. Santander, Spain.
- [7] Pachón, Pablo, Víctor Compán, Esperanza Rodríguez Mayorga, and Andrés Sáez. 2015. "Control of Structural Intervention in the Area of the Roman Theatre of Cadiz (Spain) by Using Non-Destructive Techniques." Construction and Building Materials 101: 572–83. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.141.
- [8] Gentile, Carmelo, Antonella Saisi, and Alessandro Cabboi. 2014. "Structural Identification of a Masonry Tower Based on Operational Modal Analysis." International Journal of Architectural Heritage 9 (2): 98–110. doi:10.1080/15583058.2014.951792. Freire Obregón, Cristina. 2011.
- [9] Implementación y validación del método mejorado de descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD) para la identificación de los parámetros modales de estructuras genéricas utilizando ruido ambiente. Estudio del rango de aplicabilidad en función del modelo estructural y las condiciones de uso.
- [10] Castillo, A E, and R L Boroschek. 2002. "Uso Del Método De Frecuencia No Parametrica Y SSSI Para La Identificación De Propiedades."
- [11] Zordan, Tobia, Bruno Briseghella, and Tao Liu. 2014. "Finite Element Model Updating of a Tied-Arch Bridge Using Douglas-Reid Method and Rosenbrock Optimization Algorithm." Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) 1 (4): 280–92. doi:10.1016/S2095-7564(15)30273-7.
- [12] "Optimize Using Genetic Algorithm - MATLAB & Simulink - MathWorks España." n.d. <https://es.mathworks.com/help/gads/performing-a-genetic-algorithm-optimization.html>.
- [13] Marín Fidalgo, Ana, Carlos 1983- Plaza, and Antonio 1948- Almagro Gorbea. 2015. Los Jardines Del Real Alcázar de Sevilla: Historia Y Arquitectura Desde El Medioevo Islámico Al Siglo XX. [Sevilla]: Patronato del Real Alcázar de Sevilla y de la Casa Consistorial.
- [14] Riau Arenas, Belén. 2012. "La Arquitectura Monacal y la Bóveda Tabicada. Reconstrucción de la sala Capitular del Monasterio de San Jerónimo de Buenavista."
- [15] "Patrimonio Inmueble de Andalucía. Antiguo Monasterio de San Jerónimo de Buenavista". <http://www.iaph.es/patrimonio-inmueble-andalucia/resumen.do?id=i4572>

