

Predicción de la estabilidad estructural mediante Análisis Modal Operacional. Teatro Romano de Cádiz.

Pachón García, Pablo; Rodríguez Mayorga, Esperanza; Jiménez Alonso, Javier F.; Compán Cardiel, Víctor; Sáez Pérez, Andrés; Yanes Bustamante, Emilio.

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla.
{ppachon, espe, jjjimenez, compan, andres}@us.es*

Resumen

El presente artículo expone la caracterización dinámica de un grupo de edificios situados sobre el Teatro Romano de Cádiz a través de pruebas de vibración ambiental. Con los datos obtenidos de estas pruebas se calibraron los modelos de elementos finitos (EF) necesarios para realizar el control de las obras que se están ejecutando actualmente en esta área y predecir el efecto final de las mismas sobre el conjunto estructural.

Palabras clave

Teatro Romano de Cádiz, Elementos Finitos, Paraguas de inyección, Análisis Modal Operacional, Ensayo de Vibración ambiental.

I. Introducción:

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 [1, 2, 3]. Las pruebas de vibración ambiental han demostrado ser especialmente adecuadas para sistemas flexibles, siendo innumerables los casos de aplicación de OMA en el mundo ingenieril y presentando en la mayoría de ellos óptimos resultados [4, 5].

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 [6, 7, 8, 9, 10].

La intervención que se está desarrollando en la actualidad sobre el área del Teatro Romano de Cádiz (Fig. 1) se está controlando a través de OMA. Los resultados obtenidos a partir de pruebas de vibración ambiental han sido utilizados para calibrar modelos de EF desarrollados con anterioridad. Como resultado, se ha logrado un modelo numérico con un comportamiento dinámico similar al observado in situ. Este modelo se ha utilizado para controlar los trabajos actuales y prever el comportamiento final del conjunto. La descripción del teatro romano, la metodología de análisis seguida y los resultados obtenidos, tanto en el estado actual como en el final, son los objetivos del presente artículo.



Figura 1. Área del Teatro Romano de Cádiz.

II. Antecedentes:

El Teatro Romano de Cádiz (España), se localiza en el barrio del Pópulo (Fig. 2), junto a la Catedral Vieja (actual Iglesia de Santa Cruz) (Fig. 3). Es el más antiguo de la Península Ibérica, pues data de finales del siglo I a.C. El diámetro de su cavea es de 120 m, lo que lo hace ser uno de los mayores edificios de su clase en España. Su aforo sería alrededor de unos 20.000 espectadores, un elevado número si tenemos en cuenta que la población de Gades rondaría los 50.000 habitantes. Los materiales utilizados en la estructura fueron piedra y opus caementicium [11]. La gran resistencia de éstos hizo que el teatro fuera utilizado como base de otros edificios construidos posteriormente. En el siglo III d.C. el área del teatro comenzó a usarse para diversos fines, siendo uno de ellos un castillo. En el siglo XIII, después de la conquista de la ciudad por parte de las tropas cristianas, el castillo fue reconstruido y su uso cambió, desapareciendo toda referencia al teatro primitivo [12]. En ese momento, el barrio que actualmente es conocido como "El Pópulo", comenzó a construirse, asentándose parte de él sobre los restos del teatro.



Figura 2. Localización del Teatro Romano de Cádiz.

Desde que el teatro se descubriera en el año 1980 de forma accidental (Fig. 3), se ha seguido un proceso sistemático hacia su recuperación. Son numerosas las labores de demolición, excavación y consolidación realizadas desde entonces [13], que han dado como resultado la recuperación de una parte significativa de la cávea (Fig. 4).

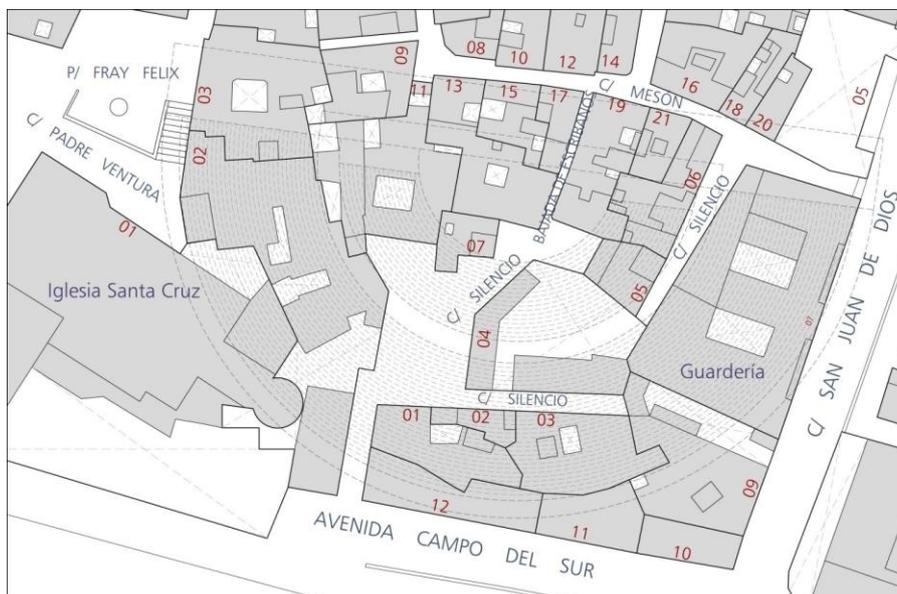


Figura 3. Estado del parcelario superpuesto a las trazas del Teatro. Año 1980.



Figura 4. Estado del Teatro Romano de Cádiz. Año 2010.

Siguiendo la línea marcada con las intervenciones anteriores, la Junta de Andalucía se enfrentó al dilema de hacer compatible la recuperación del teatro con la conservación de los edificios que gravitan sobre él, piezas relevantes del barrio del "Pópulo". En 2010 se inició una importante intervención consistente en la consolidación de las cimentaciones de los edificios y la construcción de bóvedas bajo los mismos mediante el método de los paraguas de inyección [14, 15] (Fig. 5). El resultado final será la creación de un nuevo espacio abovedado debajo de los edificios desde el cual se pueda contemplar el resto del teatro (Fig. 6).

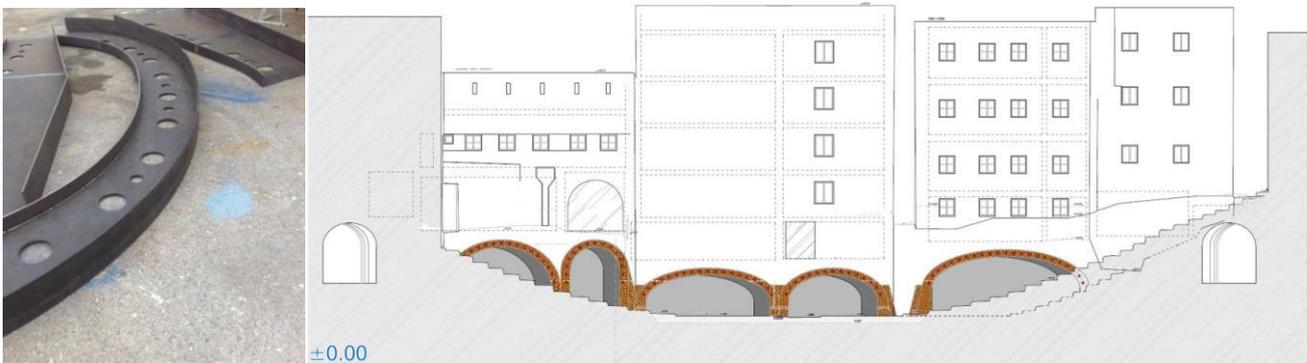


Figura 5. Arcos para la ejecución de los paraguas de inyección y alzado esquemático tras la extracción de tierras.

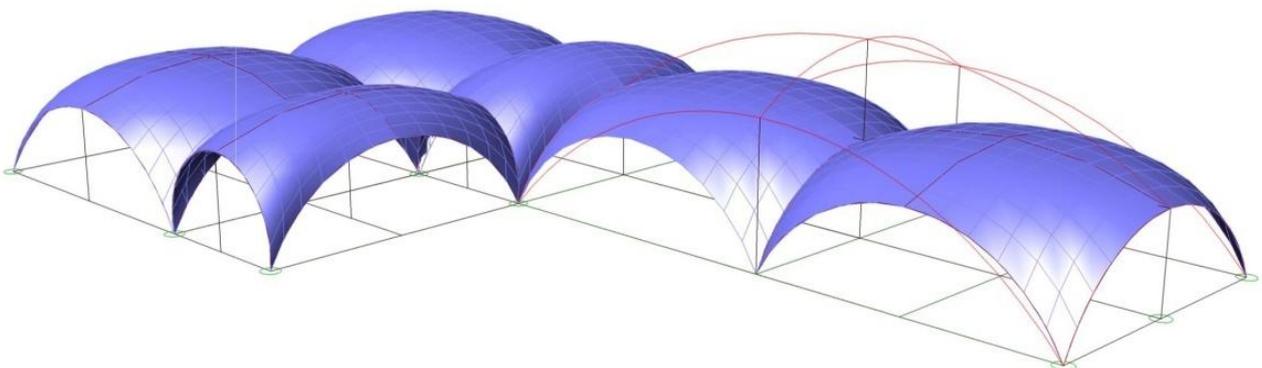


Figura 6. Perspectivas esquemáticas del revestimiento interior de las bóvedas.

III. Análisis Modal Operacional (OMA)

III.1 Toma de datos

El control de la intervención consiste en la obtención de los parámetros modales del conjunto estructural antes, durante y al final de los trabajos, a través de métodos numéricos y experimentales. La comparación de los mismos permite identificar las alteraciones en el comportamiento estructural si éstas tuvieran lugar.

Como primer punto en el proceso de aplicación del análisis modal operacional se generó un modelo previo para decidir la situación de los acelerómetros [1, 3]. Este modelo se constituye de dos partes fundamentales, los edificios y el terreno (vaciado del teatro), y fue modelado utilizando el programa informático ANSYS. Los edificios fueron mallados con elementos superficiales, SHELL63, mientras que para el terreno se utilizaron elementos sólidos, SOLID45, obteniendo un modelo final de 975.370 elementos y 189.585 nodos (Fig. 7). Las propiedades de los materiales de densidad, módulo de Young y coeficiente de *Poisson* se obtuvieron de la bibliografía (tabla 2) [16, 17, 18].

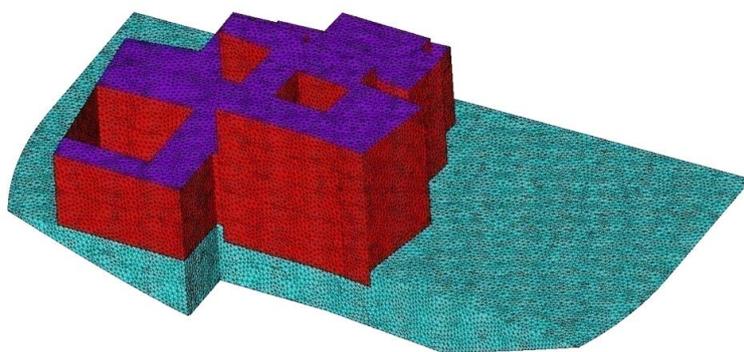


Figura 7. Modelo de EF previo. Elementos superficiales: SHELL 63. Elementos volumétricos: SOLID 45.

Con la ayuda del modelo de elementos finitos se localizaron los puntos más adecuados para la colocación de los acelerómetros de referencia, que fueron aquellos con mayor desplazamiento modal [1] (Fig. 8). Estos puntos estaban en la cubierta del inmueble número 13 de la calle Mesón, donde se situaron cuatro acelerómetros de referencia según se ilustra en la figura 9.

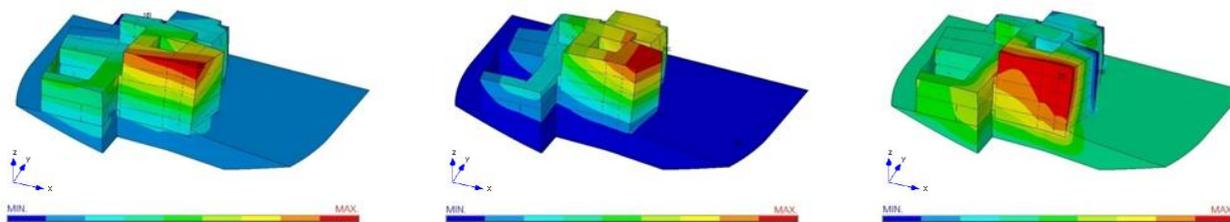


Figura 8. Desplazamientos modales del 1º Modo de vibración en direcciones X, Y y Z.



Figura 9. Situación de los acelerómetros de referencia.

La monitorización de la estructura y la toma de datos se realizó con 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 casa (Fig. 10). El software ARTEMIS se utilizó para el tratamiento e interpretación de los datos recopilados.



Figura 10. Central de Adquisición de datos, equipo informático y acelerómetro de fuerza balanceada.

Antes de comenzar la intervención sobre el área del teatro en 2010, se desarrolló la primera campaña experimental. Los acelerómetros de referencia fueron cuatro, situados según el análisis previo en la cubierta del inmueble número 13 de la calle Mesón (Fig. 9). Los otros cuatro acelerómetros se colocaron siguiendo la vertical de los anteriores en cada una de las plantas, de forma que se realizaron un total de cuatro series de medidas con ocho acelerómetros cada una, siendo la duración de cada una de ellas de quince minutos.

III.2 Tratamiento de datos

Una vez tomados y almacenados los datos, se procedió al tratamiento de los mismos (Fig. 11). Se estudió el comportamiento dinámico utilizando dos métodos de identificación modal: el método de Descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFFD) y el método de Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI), ambos implementados en el programa comercial ARTEMIS.

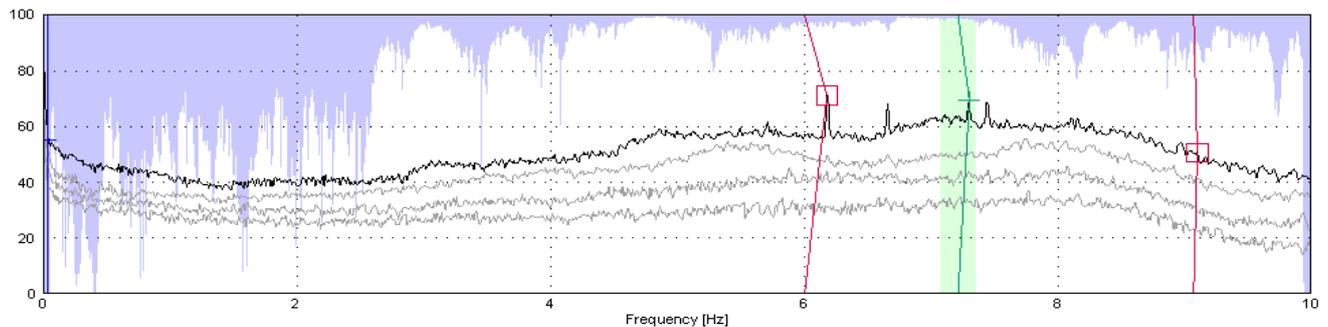


Figura 11. Espectro de respuesta. Identificación de los parámetros modales mediante el método EFDD.

Con ambos métodos se identificaron tres modos de vibración en un rango de frecuencias de 0 a 10 Hz. Los resultados obtenidos, así como la comparación del valor MAC entre ellos, están recogidos en la tabla 1.

| | Frecuencia Natural (Hz) | | % diferencia | Valor MAC |
|---|-------------------------|------|--------------|-----------|
| | EFDD | SSI | | |
| 1º Modo de Vibración (Mov. paralelo eje Y (fig.8)) | 6,09 | 6,15 | 0,76 | 0,99 |
| 2º Modo de Vibración (Mov. paralelo eje Z (fig.8)) | 7,21 | 7,22 | 0,14 | 0,99 |
| 3º Modo de Vibración (Modo de torsión) | 9,01 | 8,92 | 1,01 | 0,85 |

Tabla 1. Resultados del modelo experimental antes del comienzo de la intervención sobre el área del Teatro Romano de Cádiz.

III.3 Validación y verificación de los Modelos EF

Una vez analizado el modelo inicial de EF, se compararon los resultados obtenidos con los valores medidos in situ, en términos de parámetros dinámicos (frecuencias naturales y formas modales). Para ajustar el comportamiento dinámico del modelo inicial de EF al modelo experimental se modificaron los valores de las propiedades mecánicas de la fábrica y del terreno (tabla 2).

| | Modelo EF (inicial) | | | Modelo EF (validado) | | |
|-------------------------------|---------------------|---------|----------|----------------------|---------|----------|
| | Fábrica | Terreno | Hormigón | Fábrica | Terreno | Hormigón |
| Densidad (kg/m ³) | 1500 | 1800 | 2500 | 1500 | 1800 | 2500 |
| Módulo de deformación (MPa) | 4000 | 1500 | 21000 | 3000 | 1000 | 21000 |
| Coefficiente de Poisson | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales del modelo inicial de EF y del modelo final calibrado.

Con estos datos, y tras un nuevo análisis dinámico del modelo numérico de EF, se obtuvieron nuevas frecuencias naturales asociadas a cada uno de los modos. Estableciendo la comparación de modelos se puede observar la proximidad de los valores (diferencias máximas de frecuencias menores al 1,5%), que indican un comportamiento dinámico similar de ambos modelos (tabla 3).

| | F. Natural 1º Modo (Hz) | F. Natural 2º Modo (Hz) | F. Natural 3º Modo (Hz) |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Modelo de EF Validado. Fase Previa. | 6,14 | 7,15 | 8,97 |
| Modelo Experimental. Fase Previa. | 6,15 | 7,22 | 8,9 – 9,1 |
| % de diferencia | 0,16 % | 0,96 % | 1,44 % |

Tabla 3. Comparación de las frecuencias naturales (Hz) asociadas a los tres modos de vibración.

En marzo de 2012, una vez que los paraguas de inyección ya habían sido ejecutados (Fig. 12), se llevó a cabo una segunda campaña experimental. La toma y tratamiento de datos siguió el mismo esquema que el desarrollado con anterioridad. Los nuevos resultados obtenidos condujeron a actualizar nuevamente el modelo de EF, de forma que el módulo de deformación del hormigón adquirió un nuevo valor (tabla 2).

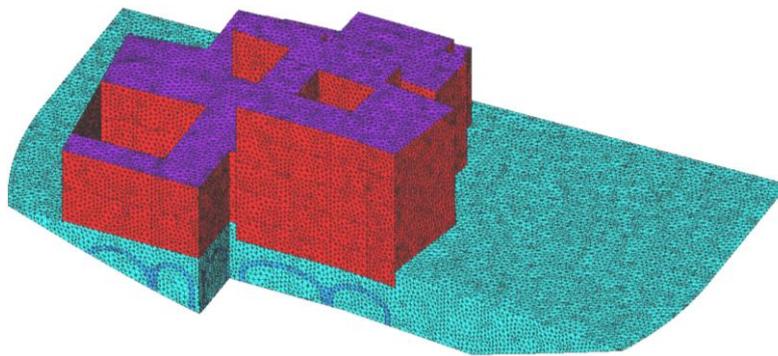


Figura 12. Modelo de EF con las bóvedas conformadas.

Los resultados obtenidos mostraron que tras la intervención en el teatro, el comportamiento dinámico del edificio no se vio alterado de manera significativa, debido a la pequeña modificación en las frecuencias antes y después de la inyección de la lechada (diferencias siempre menores al 1%) (tabla 4).

| Modo | Fase previa | | Fase bóvedas | | Dif. Max. Frecuencia % |
|------|--------------|-----------|--------------|-----------|---------------------------|
| | Experimental | Modelo EF | Experimental | Modelo EF | |
| 1 | 6.15 | 6.14 | 6.17 | 6.15 | 0,31 |
| 2 | 7.22 | 7.15 | 7.23 | 7.16 | 0,13 |
| 3 | 8.90 | 8.97 | 8.90 | 9.04 | 0,78 |

Tabla 4. Comparación de las frecuencias naturales (Hz) asociadas a los tres modos de vibración.

III.4 Predicción de la estabilidad estructural al final de la obra

Una vez que todos los parámetros constituyentes del modelo de EF habían sido ajustados, se realizó el modelo correspondiente a la fase final de obras (Fig. 13), de forma que fuera posible estudiar el efecto global dinámico que tiene la intervención sobre el conjunto estructural.

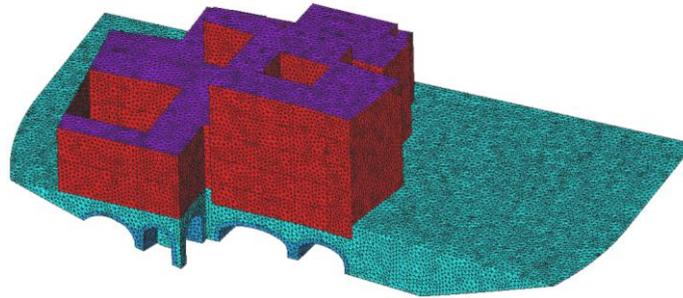


Figura 13. Modelo de EF correspondiente al estado final de la obra.

Se analizó dinámicamente el nuevo modelo de EF para establecer la comparación con el modelo inicial, ya fuera el experimental o el numérico, y estudiar así el efecto global de la intervención. Los resultados obtenidos sirvieron para predecir que la rigidez estructural del conjunto no se modificará sustancialmente tras la intervención. El comportamiento dinámico no se verá alterado de manera significativa debido a las pequeñas diferencias existentes entre los valores de las frecuencias naturales (tabla 5), y entre las formas modales (Fig. 14, 15 y 16).

| Modo | Fase previa | | Fase final | Comparación 1 y 2 % |
|------|------------------|-----------|---------------|------------------------|
| | Experimental (1) | Modelo EF | Modelo EF (2) | |
| 1 | 6.15 | 6.14 | 6.14 | 0,16 |
| 2 | 7.22 | 7.15 | 7.13 | 1,24 |
| 3 | 8.90 | 8.97 | 8.98 | 0,89 |

Tabla 5. Comparación de las frecuencias naturales (Hz) asociadas a los 3 modos de vibración.

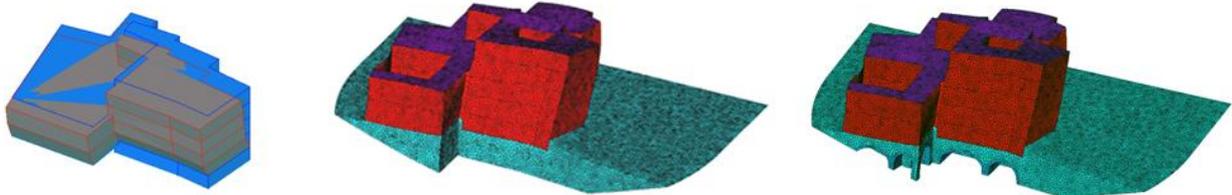


Figura 14. Forma modal del 1º modo de vibración del modelo experimental y numérico en fase previa (izquierda y centro), y del modelo numérico una vez finalizadas las obras (derecha).

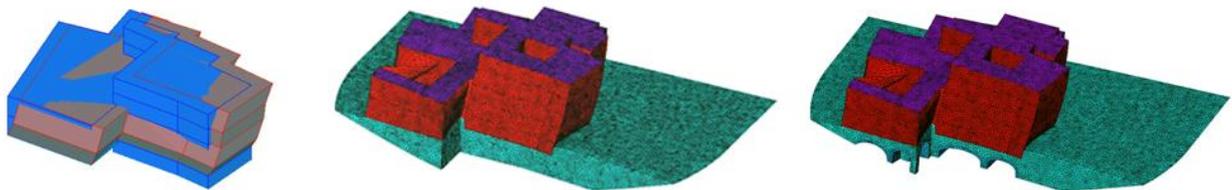


Figura 15. Forma modal del 2º modo de vibración del modelo experimental y numérico en fase previa (izquierda y centro), y del modelo numérico una vez finalizadas las obras (derecha).

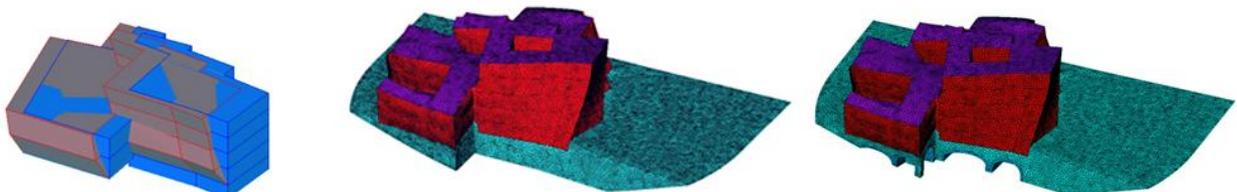


Figura 16. Forma modal del 3º modo de vibración del modelo experimental y numérico en fase previa (izquierda y centro), y del modelo numérico una vez finalizadas las obras (derecha).

III. Conclusiones

El Análisis Modal Operacional (OMA) se ha aplicado en el área del Teatro Romano de Cádiz para controlar la intervención que se está llevando a cabo sobre él, y para predecir los efectos de ésta al finalizar la obra [19]. Este control se ejecutó mediante pruebas de vibración ambiental y modelos numéricos de elementos finitos. Las propiedades mecánicas de los modelos numéricos fueron inicialmente extraídas de bibliografía, para posteriormente ser ajustadas a partir de la comparación entre el comportamiento dinámico del modelo numérico de EF y los datos recabados in situ (modelo experimental).

Una vez comparados los datos relativos a las mediciones experimentales realizadas antes y después de la ejecución de los paraguas de inyección que conforman las bóvedas (Fig. 17), se evaluó el comportamiento dinámico del complejo sin detectarse importantes modificaciones: diferencias entre frecuencias naturales siempre menores al 1 %, que indican que la rigidez estructural del conjunto no se ha visto modificada (tabla 4).



Figura 17. Área del Teatro Romano de Cádiz. Bóvedas de hormigón ya conformadas (marzo, 2012)

A su vez, los datos medidos in situ se emplearon para validar el modelo de EF, de forma que éste quedara preparado para prever el comportamiento dinámico del complejo al finalizar los trabajos. La predicción dinámica realizada a partir del modelo final indica que la rigidez estructural del conjunto no se verá afectada por las labores de excavación, lo cual proporciona la seguridad suficiente para afrontar las labores de extracción de tierras (fase final de obras). Se estimó que la rigidez del conjunto no se verá afectada por la intervención, ya que los valores de las frecuencias naturales, de los que depende directamente la rigidez estructural, permanecen prácticamente constantes (tabla 5).

Bibliografía

- [1] Ramos, L. *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. PhD Thesis, University of Minho (2007).
- [2] Jiménez, J. F. *Estudio del comportamiento dinámico de pasarelas peatonales esbeltas bajo sobrecarga de uso*. Trabajo de investigación para la obtención de estudios avanzados (DEA). Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla (2010).
- [3] Rodrigues, J. *Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. PhD Thesis, University of Porto (2004).
- [4] Čaušević, M. S. "Mathematical Modelling and Full-Scale Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Structure." *Engineering Structures* 9 (1987) 2-8.
- [5] Alonso, J. F.; Pérez, A. "Application of the Operational Modal Analysis and Modal Updating Methods for the Characterization of the Longitudinal Modulus of an Ancient Reinforced Concrete Truss Bridge in Almeria" (2012).
- [6] Ramos, L. F.; Aguilar, R.; Lourenço, P.; Moreira, S. "Dynamic Structural Health Monitoring of Saint Torcato Church." *Mechanical Systems and Signal Processing* (2012).

- [7] Votsis, R. A.; Kyriakides, N.; Chrysostomou, C.; Tantele, E.; Demetriou, T. "Ambient Vibration Testing of Two Masonry Monuments in Cyprus." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 43 (2012) 58-68.
- [8] Gentile, C.; Saisi, A. 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 (2004). Vol. 1, pp. 439-449.
- [9] Ramos, L. F.; Marques, L.; Lourenço, P.; De Roeck, P.; Campos-Costa, A.; Roque, J. "Monitoring Historical Masonry Structures with Operational Modal Analysis: Two Case Studies." *Mechanical Systems and Signal Processing* 24 (5) (2010). 1291-1305.
- [10] Foti, D.; Diaferio, M.; Giannoccaro, N.; Mongelli, M. "Ambient Vibration Testing, Dynamic Identification and Model Updating of a Historic Tower." *NDT and International* 47 (2012) 88-95.
- [11] Corzo Sánchez, R. El Teatro Romano de Cádiz. *Teatros Romanos de Hispania. Cuadernos de Arquitectura Romana, vol. 2.* (1993) 133-140.
- [12] Fresnadillo García, R.; Tabales Rodríguez, M. A.; Maya Torcelly, R.; Jurado Fresnadillo, G.; Pajuelo Sáez, M. Cádiz en la edad media. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social, RAMPAS* 10 (2008) 399-411.
- [13] Pérez Alberich, J. M. La revitalización del Teatro. De los años ochenta a la actualidad. In *El Thearum Balbi de Gades. Proc. of Seminario "El Teatro Romano de Gades. Una mirada al futuro"*, Cádiz, 18-19 November 2009. Servicio de Publicaciones Universidad de Cádiz. España (2011).
- [14] Yanes, E.; Cobo, A. Un proyecto arquitectónico singular de consolidación. La futura mirada al Teatro Romano Gaditano. *El Thearum Balbi de Gades. Actas del Seminario "El Teatro Romano de Gades. Una mirada al futuro"*, Cádiz, 18-19 Noviembre 2009. Servicio de Publicaciones Universidad de Cádiz (2011).
- [15] Williamson, C. Remedial grout injection of buildings". *Construction & Building Materials*, vol. 2, núm. 3 (1988) 145-147.
- [16] Norma EHE Instrucción de Hormigón Estructural (2008).
- [17] Augenti N., F. Parisi and E. Acconcia. MADA: online experimental database for mechanical modeling of existing masonry assemblages. Proc., 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal (CD-ROM) (2012).
- [18] CTE: Código Técnico de la Edificación (2006).
- [19] Pachón, P. *Predicción de la estabilidad estructural mediante análisis modales operacionales*. Trabajo de investigación para la obtención del Máster de Innovación en Arquitectura: Tecnología y Desarrollo. Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla (2012).