

Análisis Modal Operacional en estructuras complejas con sensores multi-tipo: estudio de pasarela peatonal

Operational Modal Analysis in complex civil engineering structures with multitype sensors: a steel footbridge case study

Antonio S. López-Cuervo^a, Emilio Daroch Salazar^b, Juan Chiachío Ruano^c, Enrique García Macías^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Investigador Predoctoral FPU. antonioluis@ugr.es

^b Ingeniero Naval. MSc en Estructuras, Universidad de Granada. Investigador Predoctoral. edaroch@ugr.es

^c PhD Ingeniería Civil. Universidad de Granada. Profesor Titular. jchiachio@ugr.es

^d PhD Ingeniería Civil. Universidad de Granada y Universidad de Perugia. Profesor Titular. enriquegm@ugr.es

RESUMEN

La aplicación del Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en inglés) a partir de medidas de deformación es especialmente atractiva en el ámbito de la monitorización estructural, debido a su capacidad de detección de daño local. Su aplicación práctica en estructuras reales está bastante extendida con sensores de fibra óptica, que, no obstante, presentan un elevado coste y requieren de sofisticados sistemas de aislamiento térmico. En este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitorización basado en galgas extensiométricas, y se ha aplicado con éxito a una pasarela peatonal real, mostrando la viabilidad de obtener parámetros modales con sensores de deformación de bajo coste.

ABSTRACT

The application of strain-based Operational Modal Analysis (OMA) is particularly attractive in the field of Structural Health Monitoring (SHM) due to its high sensitivity to local damage detection. Its practical implementation in real structures is widely established using fiber optic sensors which, however, are costly and require sophisticated thermal insulation systems. In this study, a monitoring system based on strain gauges was developed and successfully applied to a real pedestrian footbridge, demonstrating the feasibility of obtaining modal parameters with low-cost strain sensors.

PALABRAS CLAVE: Galgas Extensiométricas, Modos de Vibración en Deformaciones, OMA, OSP, SHM.

KEYWORDS: Strain Gauges, Strain Mode Shapes, OMA, OSP, SHM.

1. Introducción

Las infraestructuras civiles enfrentan un deterioro continuo debido al envejecimiento de los materiales, el incremento en cargas de uso y a la exposición a eventos extremos ligados al cambio climático. Ante esto, la monitorización de la salud estructural (SHM, por sus siglas en

inglés) está tomando cada vez más relevancia en la comunidad científica y en la industria, como medio para garantizar la seguridad y durabilidad del patrimonio construido.

Entre las técnicas de SHM, el Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en

inglés) permite identificar, como características sensibles al daño de estructuras en servicio, las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, modos de amortiguación y ratios de amortiguamiento) a partir de datos de vibraciones ambientales.

Mientras que los enfoques tradicionales de OMA utilizan predominantemente mediciones de acelerómetros, el OMA basado en deformaciones destaca por su alta sensibilidad a daños locales y su menor dependencia de las condiciones ambientales en los modos de vibración obtenidos [1, 2]. En particular, se han aplicado con éxito sensores de fibra óptica para la identificación de daño, demostrando el potencial de esta tecnología en la detección de defectos locales. Algunos ejemplos de aplicación en estructuras reales pueden encontrarse en la literatura [3, 4]. Sin embargo, su elevado coste y la necesidad de aislamiento y del empleo de sistemas sofisticados de compensación térmica suponen aún un obstáculo para su aplicación generalizada.

Este trabajo presenta la implementación de un sistema de monitorización de bajo coste que utiliza galgas extensiométricas para realizar OMA en una estructura real. La metodología combina un OMA convencional basado en acelerómetros con un OMA basado en deformaciones, empleando para ello ocho galgas extensiométricas convencionales. Este enfoque dual ha permitido caracterizar la respuesta dinámica de la estructura, logrando identificar con las galgas los dos primeros modos de vibración que involucran a la celosía principal.

El sistema desarrollado no sólo pone de manifiesto el potencial de las galgas extensiométricas para mejorar la capacidad de detección de daños en estructuras, sino que también demuestra la viabilidad de realizar OMA con un sistema de bajo coste, contribuyendo de esta forma al desarrollo de soluciones más

económicas y efectivas para la monitorización estructural.

2. Metodología

2.1 Descripción de la estructura

El caso de estudio consiste en una pasarela peatonal metálica tipo celosía situada en el P.K. 121/835 de la línea ferroviaria Bobadilla-Granada, en Granada, mostrada en la Figura 1.

La pasarela consta de un tramo central de celosía tipo Warren, con una altura de 2,45 m y una longitud de 18,57 m, apoyado en dos pilares de 6,79 m de altura. El acceso a este se realiza mediante rampas y escaleras, ambas con un ancho libre de 1,38 m.

Los materiales empleados son acero A-42¹ para toda la estructura metálica y hormigón armado H-25² para las cimentaciones de los pilares y el pavimento de la pasarela. Las armaduras de acero utilizadas son B500S, con diámetros entre 8 y 32 mm.



Figura 1. Vista general de la pasarela

2.2 Sistema de Monitorización

Se han llevado a cabo dos campañas de monitorización de vibraciones ambientales.

La primera de ellas ha consistido en una monitorización basada en aceleraciones, empleando para ello el siguiente equipo:

¹ Conforme a la nomenclatura de la norma NBE-EA-95. Corresponde a un límite elástico de 260 MPa.

² Conforme a la nomenclatura de la norma NBE-EA-95. Corresponde a un hormigón HA-25 en Código Estructural.

- 8 acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad (10 V/g), Figura 2.
- Sistema de adquisición de datos cDAQ-9184, con 3 módulos NI9230.

Esta primera campaña se ha llevado a cabo mediante 8 configuraciones de acelerómetros (setups), manteniendo dos acelerómetros, denotados como “referencias”, en la misma posición en todas ellas.



Figura 2. Acelerómetro instalado.

La segunda campaña ha consistido en una monitorización basada en deformaciones, empleando para ello el siguiente equipo:

- 8 galgas extensiométricas de 120 Ω , tipo FLAB-6-11, Figura 3 (a).
- Sistema electrónico, consistente en un módulo HX711 y un puente de Wheatstone conectado a cada galga, Figura 3 (b).
- Sistema de adquisición de datos, constituido por una placa controladora Arduino Mega.



Figura 3: (a) Galga extensiométrica. (b) Circuito electrónico asociado a cada galga.

Esta segunda campaña se enfocó exclusivamente en la monitorización de la celosía central.

2.3 Modelo de Elementos Finitos

Basado en el proyecto constructivo [5] de la pasarela, se ha realizado un Modelo de Elementos Finitos (MEF), utilizando para ello el programa de cálculo SAP2000, mostrado en la Figura 4.

Con objeto de reducir la cantidad de modos de vibración locales obtenidos por el MEF, se ha desarrollado una formulación para la obtención de vigas equivalentes a celosías. De esta forma, se ha evitado la modelización exhaustiva de las celosías que constituyen las barandillas de rampas y escaleras, y que confieren una gran rigidez vertical a estos elementos.

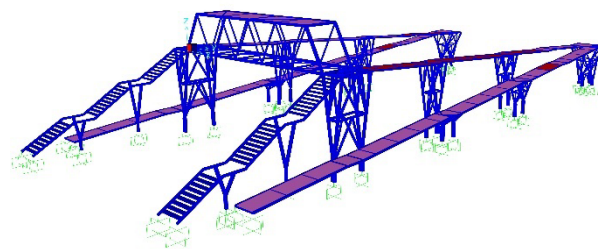


Figura 4. Modelo de Elementos Finitos en SAP2000.

2.4 Posicionamiento de sensores

Las posiciones de los sensores utilizados (acelerómetros y galgas extensiométricas) se han determinado mediante un algoritmo de posicionamiento óptimo de sensores (OSP, por sus siglas en inglés). Concretamente, se ha empleado el algoritmo de independencia efectiva (Efi, por sus siglas en inglés), propuesto por Kammer [6]. Este método optimiza la configuración de sensores maximizando la independencia lineal de un subconjunto de modos de vibración, denominado modos objetivo.

Dados N posibles grados de libertad (GDL) en los que ubicar los sensores, m modos de vibración objetivo y k posiciones para los sensores, el Efi evalúa la contribución de cada GDL a la independencia lineal mediante la descomposición de la matriz de información modal:

$$Q = \Phi^T \Phi \quad (1)$$

Donde Φ es la matriz de modos de vibración objetivo ($N \times m$ al inicio). En cada iteración, se elimina el GDL con menor contribución a la independencia lineal de los sensores, repitiendo este proceso hasta terminar con k posiciones finales.

Mediante este método se ha determinado la posición óptima de los acelerómetros para cada setup (incluyendo las dos referencias), mostrada en la Figura 5, así como la posición óptima de las galgas en la celosía, mostrada en la Figura 6.

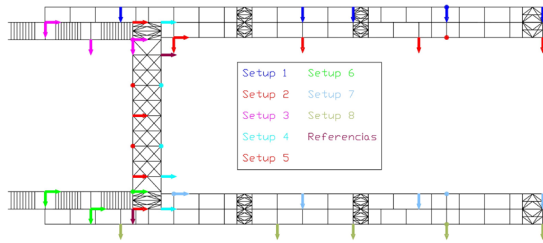


Figura 5. Posición de acelerómetros en cada setup.

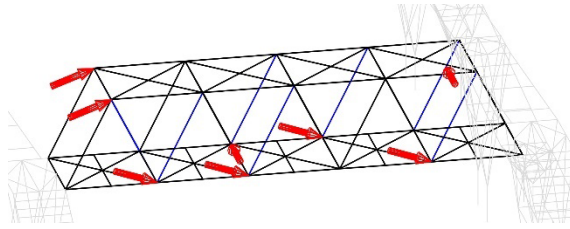


Figura 6. Posición de galgas extensiométricas. En azul se indican los elementos sobre los que hay galgas; las flechas señalan en perpendicular al elemento el punto exacto en que se colocan.

2.5 Análisis Modal Operacional

Sea un sistema lineal invariante en el tiempo de N grados de libertad:

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + K y(t) = x(t) \quad (2)$$

Donde M, C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez (dimensiones $N \times N$), respectivamente, y los vectores $x(t)$ e $y(t)$ (longitud N) representan las fuerzas y los desplazamientos del sistema.

Los desplazamientos del sistema pueden obtenerse a partir de sus propiedades modales como:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N (\Phi_i e^{\lambda_i t} + \Phi_i^* e^{\lambda_i^* t}) \quad (3)$$

Donde $(*)$ denota el complejo conjugado; Φ_i, λ_i son, respectivamente, los modos de vibración y los polos i -ésimos, que permiten obtener las frecuencias naturales y las ratios de amortiguamiento como:

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda_i \lambda_i^*}}{2\pi} \quad (4)$$

$$\xi_i = -\frac{Re(\lambda_i)}{2\pi f_i} \quad (5)$$

El Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite identificar parámetros dinámicos, como las frecuencias naturales, los modos de vibración y las tasas de amortiguamiento. Para ello, se basa en la medición de vibraciones, generalmente aceleraciones, en un conjunto discreto de grados de libertad de la estructura.

Cuando los datos de vibraciones de los que se parte son deformaciones en lugar de aceleraciones, las formas modales obtenidas mediante OMA corresponden con los modos de vibración en deformaciones (Ψ_i), relacionados con los modos de vibración (Φ_i) a partir de la expresión:

$$\Psi_i = S \Phi_i \quad (6)$$

Donde S es la matriz que permite obtener las deformaciones $\varepsilon(t)$ en una serie de puntos dados los desplazamientos $y(t)$ en los mismos, es decir:

$$\varepsilon(t) = S y(t) \quad (7)$$

En este trabajo se ha empleado el algoritmo *Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (COV-SSI)* [7], que permite obtener los

parámetros modales mediante un análisis en el dominio del tiempo.

3. Resultados

3.1 OMA basado en aceleraciones

Se han realizado registros de aceleraciones de 13 minutos de duración para cada uno de los 8 setups planteados, con una frecuencia de adquisición de 1600 Hz, realizando un pretratamiento básico de las señales (eliminación de valores anómalos, eliminación de tendencias y aplicación de filtro de *Butterworth*). Las series temporales tratadas para el primer setup se muestran en la Figura 7.

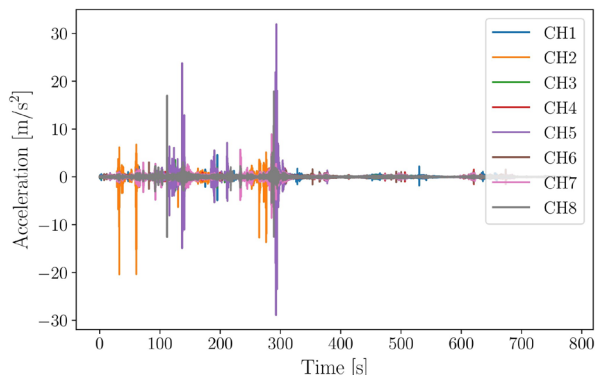


Figura 7. Serie temporal (setup 1).

Estas series temporales se han servido de entrada para el algoritmo COV-SSI de identificación dinámica, permitiendo así obtener los modos de vibración en cada setup.

Debido a la complejidad de la estructura, algunos de estos modos se manifiestan de forma muy local, afectando sólo a una parte concreta de la estructura (por ejemplo, la vibración localizada de las rampas). Como consecuencia, no todos los modos identificados aparecen en todos los setups.

La combinación de los modos entre setups se ha llevado a cabo mediante el algoritmo de clusterización DBSCAN, utilizando una métrica combinada de distancia en frecuencias y similitud de coordenadas modales de las referencias.

Se muestran a continuación los modos de vibración combinados en más de un setup, con interpretación física:

Tabla 1. Modos de vibración identificados con acelerómetros.

Modo	Frecuencia (Hz)	Setups implicados
1	2.817	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
2	3.763	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8
3	4.144	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
4	5.107	1, 2, 4, 5, 6, 8
5	5.437	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
6	6.240	2, 7, 8
7	6.649	3, 4
8	7.178	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
9	7.753	2, 3, 4, 6, 7, 8
10	8.657	1, 2
11	9.762	7, 8
12	11.299	1, 2
13	12.601	7, 8
14	12.737	1, 2, 3
15	16.045	4, 5

Asimismo, la Figura 8 recoge la comparación de estos modos con los resultados modales del modelo de elementos finitos:

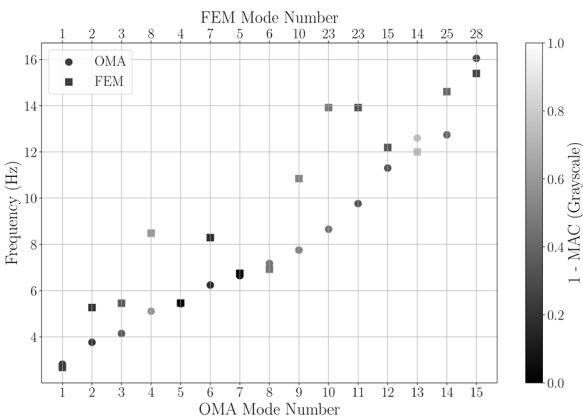


Figura 8. Comparación de modos de vibración: OMA y MEF

A modo de ejemplo, la Figura 9 y Figura 10 comparan las formas modales obtenidas por OMA (representadas con el software MOVA [8]) con las obtenidas por el MEF de SAP2000.

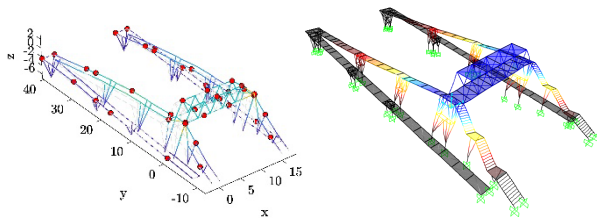


Figura 9. Primer modo de vibración. (a) Modo identificado en OMA. (b) Modo obtenido en SAP2000.

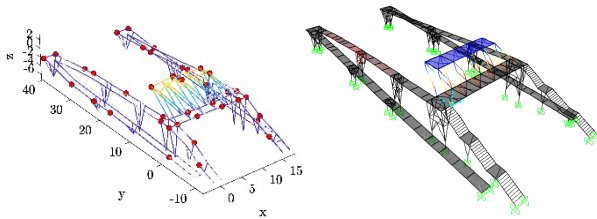


Figura 10. Quinto modo de vibración. (a) Modo identificado en OMA. (b) Modo obtenido en SAP2000.

3.2 OMA basado en deformaciones

Se ha realizado un registro de medidas de deformaciones mediante 8 galgas durante 13 minutos, con una frecuencia de adquisición de 79.19 Hz. Las series temporales tratadas se muestran en la.

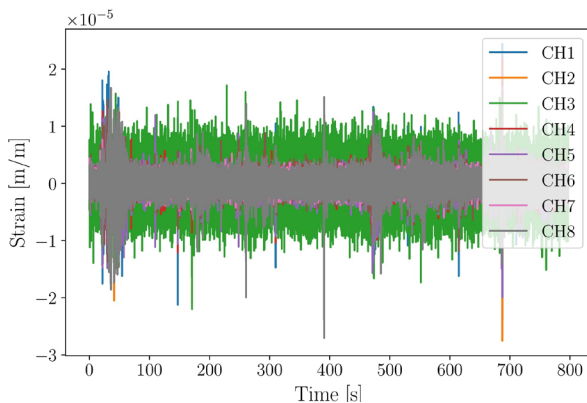


Figura 11. Serie temporal de de deformaciones.

De forma análoga a las mediciones con acelerómetros, se ha llevado a cabo un pretratamiento de la señal, con especial atención a la eliminación de valores anómalos (registrados con asiduidad en estas señales). Posteriormente se ha ejecutado el algoritmo COV-SSI de OMA, cuyo resultado se muestra en la Figura 12.

Como puede observarse en dicha figura, se han identificado dos modos de vibración,

correspondientes a los modos 1 y 5 identificados con acelerómetros.

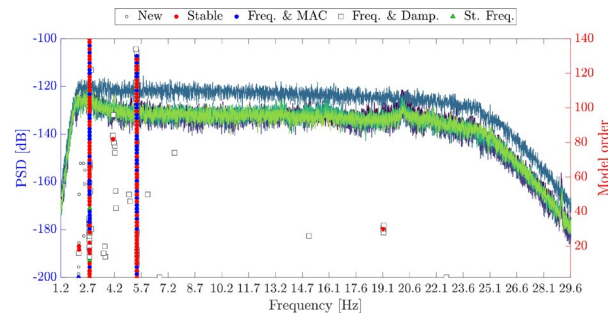


Figura 12. COV-SSI en las medidas de deformación.

Sus frecuencias se recogen en la Tabla 2, y las formas modales en las Figura 9 y Figura 10.

Tabla 2. Modos de vibración identificados con galgas extensiométricas.

Modo	Frecuencia (Hz)
1	2.830
5	5.459

4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la viabilidad de utilizar galgas extensiométricas para realizar OMA basado en deformaciones en estructuras de ingeniería civil reales. Con este objetivo, se ha desarrollado un sistema de monitorización de bajo coste, y se ha implementado con éxito en una pasarela peatonal metálica.

Los datos obtenidos mediante el sistema propuesto han sido contrastados con los resultados de un OMA convencional basado en acelerómetros, mostrando una notable concordancia en la identificación de los modos de vibración principales en la celosía. Esto refuerza la validez del enfoque planteado y subraya el potencial de las galgas extensiométricas como una alternativa económica para la monitorización estructural.

5. Referencias

Agradecimientos

El primer autor querría expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, por la beca FPU22/03667.

Asimismo, esta investigación ha sido parcialmente financiada por el proyecto BUILDCHAIN Horizon Europe. BUILDCHAIN ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 101092052.

Finalmente, los autores querrían expresar su agradecimiento a D. Santiago Díaz Osuna, técnico del Laboratorio de Estructuras de la ETSICCP de Granada, por su ayuda incondicional en las campañas de monitorización de vibración ambiental llevadas a cabo en la pasarela.

Referencias

- [1] Anastasopoulos, D., Reynders, E., De Roeck, G. (2020) *Structural Health Monitoring Based on Operational Modal Analysis from Long Gauge Dynamic Strain Measurements*. Tesis doctoral.
- [2] Anastasopoulos, D., Reynders, E.P.B. (2023) Modal strain monitoring of the old Nieuwebrugstraat Bridge: Local damage versus temperature effects, *Engineering Structures* 296: 116854. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116854>.
- [3] Anastasopoulos, D., De Roeck, G., Reynders, E.P.B. (2021) One-year operational modal analysis of a steel bridge from high-resolution macrostrain monitoring: Influence of temperature vs. retrofitting, *Mechanical Systems and Signal Processing* 161: 107951. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107951>.
- [4] Anastasopoulos, D., Reynders, E.P.B. (2023)

Modal strain monitoring of the old Nieuwebrugstraat Bridge: Local damage versus temperature effects, *Engineering Structures* 296: 116854. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116854>.

- [5] Socran Ingenieros S.L. (2002) Proyecto constructivo de pasarela peatonal en el P.K. 121/835 de la línea Bobadilla-Granada, marzo 2002, *Archivo de las oficinas de Urbanismo y Medio Ambiente*, Ayuntamiento de Granada.
- [6] Kammer, D. (1991) Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14: 251–259, doi: 10.2514/3.20635.
- [7] Juang, J.-N. (1994) Time-Domain Models, en: *Applied System Identification*, Prentice-Hall, Inc., USA.
- [8] García-Macías, E. & Ubertini, F. (2020) MOVA/MOSS: Two integrated software solutions for comprehensive Structural Health Monitoring of structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143: 106830, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106830>.