



**XIV SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS,  
GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN  
ESTRUCTURAS 2025  
XIV COLOQUIO DE ANÁLISIS, DISEÑO Y MONITOREO  
ESTRUCTURAL**

**Análisis Modal a una Estructura en distintos estados de daño y en condiciones controladas de laboratorio.**

*Modal Analysis of a structure in different damage states and under controlled laboratory conditions.*

**Arniela Arocha Mora<sup>1</sup>, Ernesto Luciano Chagoyen Méndez<sup>2</sup>, Jorge O. Hernández<sup>3</sup>,  
Rachel Rodríguez Álvarez<sup>4</sup>, Maylen Alfonso González<sup>5</sup>, Daniela Gutiérrez Díaz<sup>6</sup>.**

1- Arniela Arocha Mora. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, e-mail: [arnielaarocha@gmail.com](mailto:arnielaarocha@gmail.com)

2- Ernesto Luciano Chagoyén Méndez, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, e-mail: [elchagoyen@gmail.com](mailto:elchagoyen@gmail.com)

3- Jorge O. Hernández. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, e-mail: [johernandez@uclv.cu](mailto:johernandez@uclv.cu)

4- Rachel Rodríguez Álvarez. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, e-mail: [rralvarez@uclv.cu](mailto:rralvarez@uclv.cu)

5- Maylen Alfonso González. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, e-mail: [maaaalfonso@gmail.com](mailto:maaaalfonso@gmail.com)

6- Daniela Gutiérrez Díaz. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

**Resumen:**

El Análisis Modal (MA) constituye una herramienta esencial en la caracterización dinámica de estructuras de Ingeniería Civil, permitiendo estimar parámetros como frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento. En Cuba, su aplicación en condiciones controladas de laboratorio es incipiente, y aún más escasa en estructuras con daño inducido. Este estudio tuvo como objetivo aplicar el MA a una estructura metálica de cuatro niveles, primero en estado sano y luego introduciendo daño



progresivo en diferentes niveles, con el propósito de evaluar la sensibilidad del método ante alteraciones estructurales localizadas.

La investigación se desarrolló en el Laboratorio VIBRAS de la UCLV, combinando modelación numérica (FEM, SBM), adquisición experimental de datos mediante acelerómetros y procesamiento con softwares especializados como MATLAB, LabView, SAP2000 y MACEC. Se enfocó en modos globales no rotacionales y se aplicaron técnicas de identificación del sistema basadas en el subespacio combinado (CSI/ref).

Los resultados evidenciaron una alta correlación entre las formas modales experimentales y las simuladas ( $MAC > 0.98$ ), y una desviación de hasta  $\pm 5$  Hz entre frecuencias medidas y modeladas. Se observaron cambios modales relevantes vinculados a la localización del daño, lo que confirma la viabilidad del MA como herramienta diagnóstica.

Se concluye que el análisis modal, complementado con una metodología rigurosa de adquisición y procesamiento de datos, permite no solo caracterizar estructuras sino también detectar y localizar daños con alta precisión. Los resultados fortalecen su uso potencial en evaluación estructural, calibración de modelos y mantenimiento predictivo.

**Abstract:**

*Modal Analysis (MA) is an essential tool for the dynamic characterization of Civil Engineering structures, allowing the estimation of parameters such as natural frequencies, mode shapes, and damping ratios. In Cuba, its application under controlled laboratory conditions is still emerging, and even less common when dealing with structures with induced damage. This study aimed to apply MA to a four-story steel structure, first in an undamaged state and then by progressively introducing damage at different levels, in order to evaluate the method's sensitivity to localized structural alterations.*

*The research was carried out at the VIBRAS Laboratory of UCLV, combining numerical modeling (FEM, SBM), experimental data acquisition using accelerometers, and signal processing with specialized software such as MATLAB, LabView, SAP2000, and MACEC. The study focused on non-rotational global modes, and system identification techniques based on combined subspace methods (CSI/ref) were applied.*

*The results showed a high correlation between the experimental and simulated mode shapes ( $MAC > 0.98$ ), and a deviation of up to  $\pm 5$  Hz between measured and modeled*



*frequencies. Significant modal changes associated with damage location were observed, confirming the feasibility of MA as a diagnostic tool.*

*It is concluded that modal analysis, when complemented by a rigorous methodology for data acquisition and processing, enables not only structural characterization but also the accurate detection and localization of damage. The results support its potential use in structural assessment, model calibration, and predictive maintenance.*

**Palabras Clave:** identificación estructural; vibraciones ambientales; ensayo experimental; modelación numérica; daño localizado; evaluación dinámica.

**Keywords:** *structural identification; ambient vibrations; experimental testing; numerical modeling; localized damage; dynamic assessment.*

## 1. Introducción

El análisis modal, concebido inicialmente a finales de la década de 1940 para aplicaciones militares y aeroespaciales, ha evolucionado hasta consolidarse como una herramienta fundamental para la caracterización dinámica de sistemas estructurales. Su auge, particularmente en la década de 1960, estuvo asociado a proyectos de alta complejidad tecnológica, como la carrera espacial y el desarrollo de la industria automotriz, donde se utilizó para optimizar el diseño, aumentar la seguridad y mejorar el desempeño mecánico. Actualmente, su aplicación se extiende a múltiples sectores industriales —desde la microelectrónica hasta la ingeniería civil— gracias a su capacidad para estimar parámetros como frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento, aportando información crucial para el diagnóstico y la prevención de fallos estructurales. En el ámbito de la ingeniería civil, el análisis modal se ha consolidado como una técnica eficaz para determinar las características dinámicas de puentes, edificios y otras infraestructuras, a partir de mediciones de vibraciones inducidas o ambientales. Estos parámetros modales, obtenidos mediante la identificación experimental, no solo permiten la calibración de modelos numéricos de elementos finitos, sino también la detección y localización de daños, el seguimiento de la evolución estructural a largo plazo y la evaluación del desempeño frente a acciones extremas como sismos o vientos.



En Cuba, sin embargo, la implementación de análisis modal, sigue siendo incipiente. Si bien se dispone de equipamiento especializado, como el adquirido mediante el proyecto TEAM-VLIR "Evaluación de Estructuras de Ingeniería Civil basadas en Vibraciones" (VIBRAS), persiste la necesidad de contar con procedimientos metodológicos claros y estandarizados para la correcta adquisición, procesamiento e interpretación de datos. La ausencia de guías unificadas y la dispersión de la información en la literatura técnica dificultan la reproducibilidad y limitan la aplicación sistemática de la técnica en el contexto nacional.

En este marco, la presente investigación se plantea como un esfuerzo integrador para evaluar, en condiciones controladas de laboratorio, la respuesta modal de una estructura metálica de cuatro niveles, analizada en cuatro escenarios distintos:

- Estado sin daño.
- Daño localizado en el cuarto nivel.
- Daño localizado en el tercer nivel.
- Daño localizado en el segundo nivel.

El **objetivo general** del trabajo es aplicar el análisis modal a la estructura en sus diferentes estados, utilizando procedimientos vigentes para efectuar mediciones de vibración y estimar parámetros modales, evaluando la sensibilidad de estos frente a la presencia y localización del daño.

La justificación de este estudio radica en que, a partir de su desarrollo, se obtendrá una caracterización integral de la respuesta dinámica de la estructura, generando un referente metodológico que podrá ser empleado en futuras investigaciones y aplicaciones prácticas de monitoreo estructural en el país. De este modo, la investigación no solo contribuye al avance científico en el campo de la ingeniería estructural, sino que también fortalece la capacidad técnica para el diagnóstico, mantenimiento predictivo y gestión de la seguridad de las infraestructuras civiles.

## 2. Metodología

El estudio se concibió como un experimento controlado de laboratorio orientado a contrastar la respuesta dinámica de una misma estructura metálica de cuatro niveles en cuatro situaciones claramente definidas: estado sin daño y estados con daño localizado en el cuarto, tercer y segundo nivel. En todos los casos se combinó análisis modal



experimental (EMA), mediante excitación por impacto, con análisis modal operacional (OMA) cuando fue pertinente, de modo que la estimación de parámetros modales descansara tanto en respuestas a un estímulo conocido como en vibraciones ambientales. La estructura de ensayo reproduce un pórtico arriostrado de cuatro plantas (altura total aproximada 1,6 m), con losas rígidas en su plano de  $600 \times 400 \times 6$  mm. Cada losa se apoya en cuatro columnas y en arriostramientos diagonales en la dirección de la luz X, configuración que privilegia la rigidez alrededor del eje Y y minimiza el acoplamiento torsional en los primeros modos. La placa base ( $520 \times 800 \times 6$  mm) y las placas de conexión soldadas en las esquinas aseguran la transmisión de esfuerzos; la rigidez a flexión de las losas se refuerza con perfiles en L  $40 \times 40 \times 6$  mm, todo ello ensamblado con tornillería M8 (108 tornillos en total). Las columnas y diagonales son secciones planas de  $60 \times 6$  mm (longitudes típicas 400 mm en columnas y 659 mm en diagonales), lo que proporciona una geometría sencilla y repetible para el contraste modal.

Los estados de daño se introdujeron como fisuras o pérdidas de sección en arriostramientos diagonales, situadas en el nivel correspondiente a cada escenario. De este modo, el efecto de la localización del deterioro se aísla del resto de variables, manteniendo inalterada la geometría y las conexiones.

La instrumentación que se utilizó logró una cobertura espacial sin penalizar la masa añadida. Se emplearon acelerómetros IEPE PCB 353B34 (sensibilidad nominal 100 mV/g, banda 1–4000 Hz, masa  $\sim 27$  g) y un martillo modal LW38674 con célula de carga integrada para la excitación en EMA. La adquisición se realizó con un módulo NI-9234 alojado en chasis cDAQ-9188, configuración que permite el acondicionamiento IEPE y la lectura simultánea de canales.

Para maximizar el número de grados de libertad observados se implementó una estrategia de múltiples setups con grados de referencia. En cada setup se dispusieron ocho acelerómetros —cuatro de referencia y cuatro móviles— y un canal adicional para el martillo, totalizando nueve canales activos. Los móviles se orientaron en dos direcciones dentro del mismo nivel, mientras las referencias permanecieron fijas a lo largo de todos los ensayos, lo que habilitó posteriormente la función “combine setups” en MACEC. Cada setup incluyó dos posiciones de impacto y noventa golpes por posición, aplicados con intensidad y separación temporal uniformes para asegurar repetibilidad y una adecuada relación señal-ruido.



El procesamiento siguió una secuencia común para todas las campañas. En EMA se calcularon funciones de respuesta en frecuencia (FRF) a partir de los registros de fuerza y aceleración; las matrices resultantes de los distintos setups se integraron mediante los grados de referencia. En OMA se aplicó el método de Subespacio Combinado (CSI/ref), seleccionando modelos estables a partir de diagramas de estabilización. En ambos enfoques se estimaron de forma consistente las frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento, utilizando MACEC (v. 3.0) y MATLAB para la identificación y el posprocesado.

Como apoyo numérico, se desarrollaron dos representaciones complementarias. En SAP2000 se modelaron columnas y arriostramientos como elementos tipo viga, mientras que las placas de conexión se idealizaron con rigidez equivalente y conexiones rígidas; la base se consideró empotrada. En paralelo, se elaboró un modelo simplificado de edificio de corte (SBM) para captar con bajo costo computacional las primeras frecuencias globales. La correspondencia experimento–modelo se evaluó mediante el índice MAC — admitiendo valores  $\geq 0,98$  como indicativos de buena concordancia— y el error relativo en frecuencia por modo, garantizando trazabilidad en la comparación.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Identificación modal por estado de la estructura

Se identificaron modos globales no rotacionales para cuatro estados: sin daño, daño en 4.º nivel, daño en 3.º nivel y daño en 2.º nivel. En todos los casos, la identificación EMA (impacto con martillo instrumentado) permitió estimar con claridad los primeros cinco modos; adicionalmente, en los estados con daño se registró OMA para contrastar la robustez de la estimación bajo excitación ambiental.

La Tabla 3-1 resume las frecuencias naturales obtenidas (EMA/OMA) para los modos 1–5. Se observa una tendencia decreciente de las frecuencias al aproximar el daño a la base (del 4.º al 2.º nivel), coherente con la pérdida de rigidez global que producen las fisuras/pérdidas de sección en arriostramientos diagonales. El efecto es más pronunciado en los modos superiores (3.º–5.º), donde la participación de los arriostres es mayor.

Modo	1	2	3	4	5	8
S/daño f EMA (Hz)	4.69	14.14	22.38	28.31	36.48	-
S/daño T EMA (Hz)	0.213	0.071	0.045	0.035	0.027	-



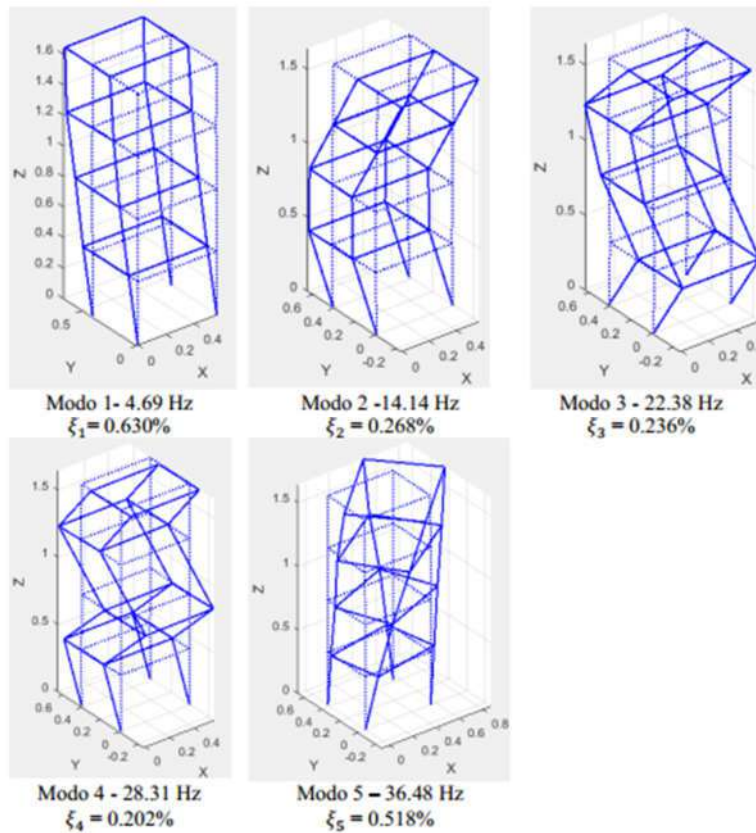
C/daño 4to lvl f EMA (Hz)	4.14	12.69	20.13	25.58	31.24	-
C/daño 4to lvl T EMA (Hz)	0.242	0.079	0.05	0.039	0.032	-
C/daño 3er lvl f EMA (Hz)	4.09	12.57	19.97	25.37	31.5	33.94
C/daño 3er lvl T EMA (Hz)	0.244	0.08	0.05	0.039	0.032	0.029
C/daño 3er lvl f OMA (Hz)	4.07	12.57	19.97	25.37	31.5	33.94
C/daño 3er lvl T OMA (Hz)	0.246	0.08	0.05	0.039	0.032	0.029
C/daño 2do lvl f EMA (Hz)	4.07	12.59	16.21	21.53	24.57	-
C/daño 2do lvl T EMA (Hz)	0.246	0.079	0.062	0.046	0.041	-
C/daño 2do lvl f OMA (Hz)	4.1	16.59	16.21	21.53	24.57	-
C/daño 2do lvl T OMA (Hz)	0.244	0.06	0.062	0.046	0.041	-

Tabla 3-1. Frecuencias naturales (Hz) identificadas por EMA y OMA en los cuatro estados de la estructura.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos experimentales.

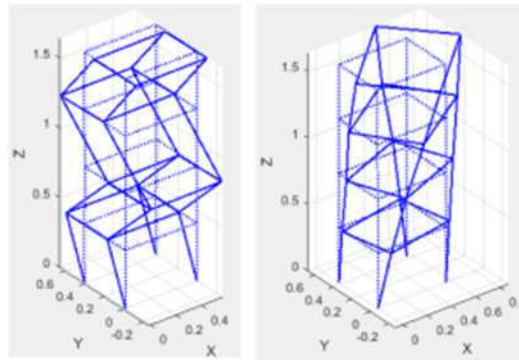
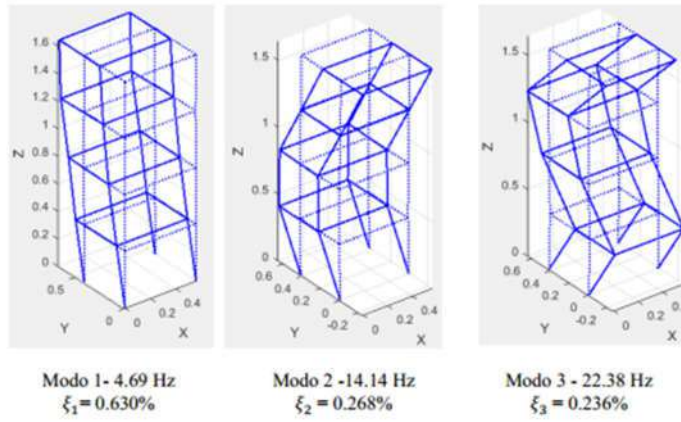
**Formas modales identificadas**

Estructura sin daño EMA



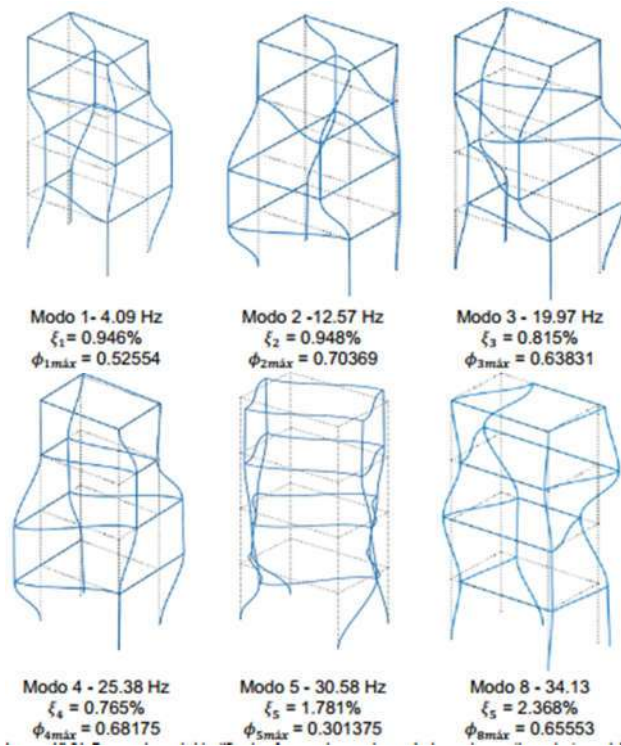


Estructura con daño en el 4to nivel EMA

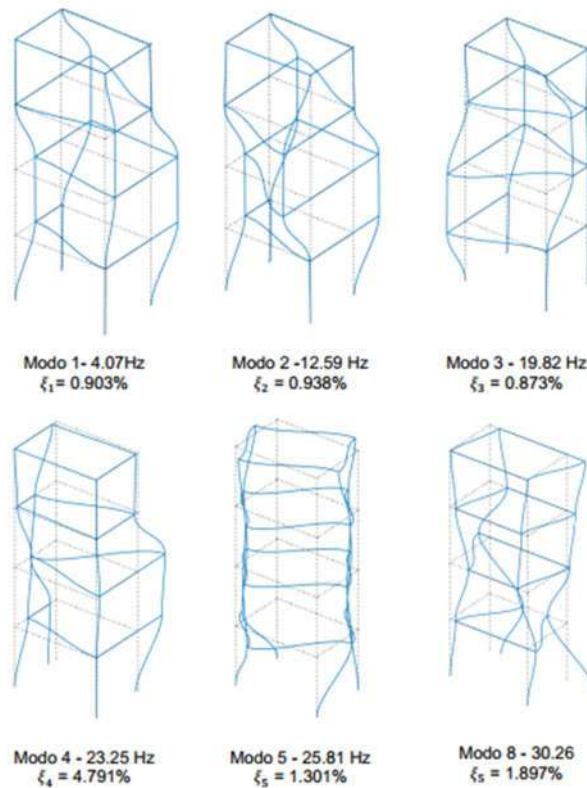


Estructura con daño en el 3er nivel EMA



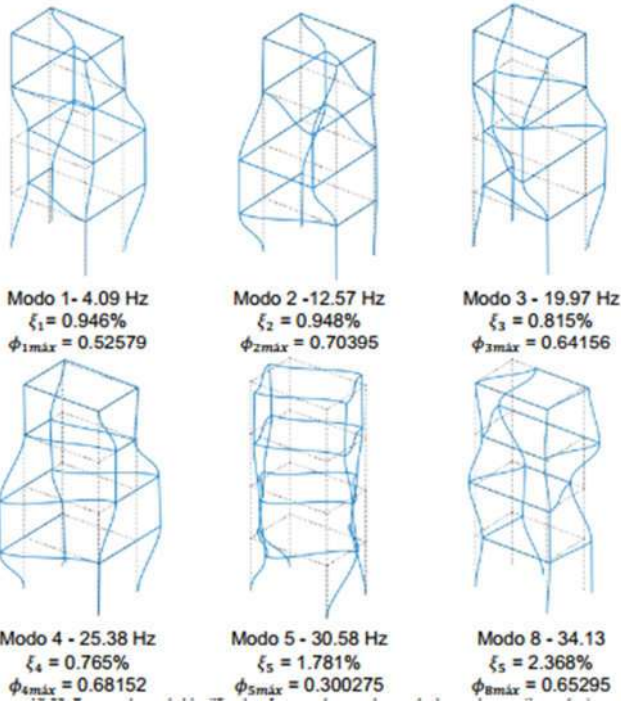


Estructura con daño en el 2do nivel EMA

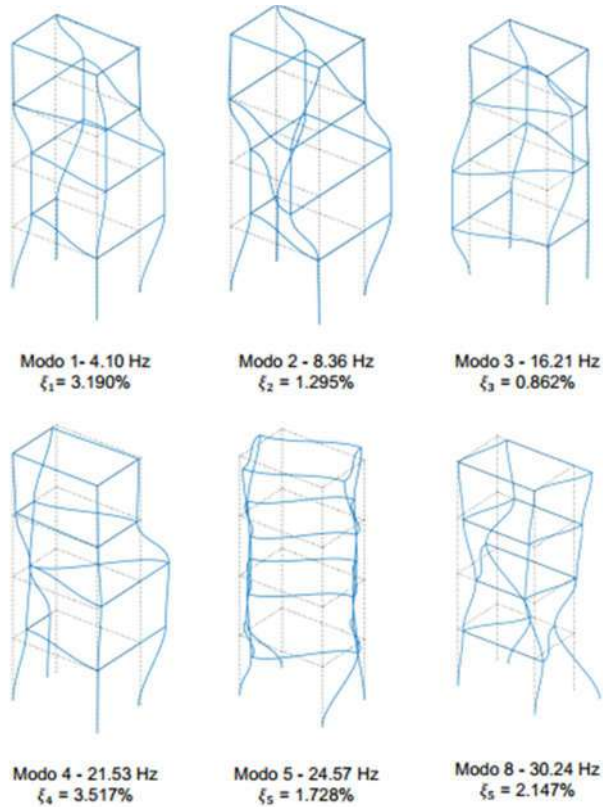




Estructura con daño en el 3er nivel OMA



Estructura con daño en el 2do nivel OMA





Figuras 3-1 a 3-6. Formas modales identificadas para cada estado de daño.  
Fuente: elaboración propia (a partir de MACEC).

### 3.2 Comparación EMA vs OMA

En los estados con daño se constató coincidencia modal entre EMA y OMA en los modos dominantes (1.º y 3.º), con desviaciones puntuales en el modo 2 del caso “daño en 2.º nivel” (OMA identifica una frecuencia ligeramente mayor). Esta diferencia es atribuible a (i) el contenido espectral de la excitación ambiental, (ii) variaciones de colocación y sensibilidad direccional de los sensores móviles y (iii) la cercanía de polos con participación torsional. Aun así, el orden modal y la tendencia de reducción de frecuencias con el descenso del nivel del daño se mantienen invariables entre EMA y OMA, validando la consistencia de ambos enfoques de identificación.

### 3.3 Correlación experimento–modelo

La correlación entre las formas modales experimentales y las numéricas arrojó valores  $MAC \geq 0,98$  en los modos globales, con MAC muy altos ( $\approx 0,98-1,00$ ) en el estado sin daño para los primeros cuatro modos. El modelo de elementos finitos (FEM) reproduce adecuadamente dichos modos, mientras que el modelo simplificado de edificio de corte (SBM) ofrece buen ajuste en las primeras cuatro frecuencias, pero subestima/omite la influencia de grados de libertad rotacionales, lo que limita su capacidad para modos superiores y torsionales.

En términos de error relativo en frecuencia, las diferencias EMA–FEM para los primeros cuatro modos se sitúan típicamente en el rango 2–15 %, incrementándose en modos altos (p. ej. primer torsional), lo que es consistente con las hipótesis de rigidez equivalente adoptadas para placas y uniones.

### 3.4 Sensibilidad modal a la localización del daño

El análisis comparado evidencia que:

- Daño en 4.º nivel: reducciones moderadas de frecuencia, principalmente en modos flexionales; la afectación global es limitada por la distancia a la base.
- Daño en 3.º nivel: reducciones adicionales y más visibles en modos 3.º–4.º, señalando mayor participación modal de los arriostres intermedios.
- Daño en 2.º nivel: caídas marcadas en las frecuencias 3.º–5.º y ligeras en los modos 1.º–2.º; la proximidad del daño a la región de mayor cortante del pórtico intensifica la pérdida efectiva de rigidez y el acoplamiento flexión–torsión.



Estas tendencias son compatibles con los diagramas de modos obtenidos: los modos superiores muestran mayores deformadas en los arriostramientos dañados, y por tanto mayor sensibilidad diagnóstica para localización de daño.

#### 4. Conclusiones

El trabajo confirma la idoneidad del análisis modal para caracterizar y diagnosticar una estructura metálica de cuatro niveles en laboratorio. Al contrastar el estado íntegro con escenarios de daño localizado en los niveles 4.º, 3.º y 2.º, se observó una reducción sistemática de las frecuencias naturales a medida que el daño se aproxima a la base, con mayor impacto en los modos superiores. Este patrón responde a la pérdida efectiva de rigidez asociada a fisuras o disminución de sección en los arriostramientos diagonales, cumpliendo así el objetivo central de evaluar la sensibilidad modal frente a la localización del deterioro.

La comparación entre EMA y OMA resultó coherente en los modos dominantes, con discrepancias puntuales explicables por el contenido espectral de la excitación ambiental y por variaciones de instrumentación. La triangulación con modelos numéricos respaldó estas observaciones: se alcanzaron valores altos de MAC ( $\geq 0,98$ ) entre formas modales medidas y calculadas; el modelo FEM reprodujo con fidelidad los modos globales, mientras que el modelo simplificado tipo edificio de corte ofreció una referencia útil para las primeras frecuencias aunque, como se esperaba, no capta efectos rotacionales de orden superior. Los errores relativos de frecuencia se mantuvieron dentro de rangos compatibles con las hipótesis de rigidez equivalente adoptadas, lo que avala la confiabilidad del procedimiento de adquisición y procesamiento (setups con grados de referencia, combinación de setups y criterios de estabilización).

Más allá del caso de estudio, el trabajo aporta una metodología replicable — instrumentación, disposición de sensores, patrón de impactos y criterios de validación— y un conjunto de datos comparables para una misma estructura en distintos estados, útiles para calibración de modelos y mantenimiento predictivo. Como proyección, conviene avanzar hacia la actualización de modelos para cuantificar pérdidas de rigidez por nivel, enriquecer la representación con grados torsionales o esquemas híbridos, extender la metodología a ensayos in situ basados en OMA y profundizar en el análisis de incertidumbre y en indicadores avanzados (curvaturas modales, métricas derivadas del



MAC o técnicas de clasificación) que mejoren la localización y la estimación de la severidad del daño en aplicaciones reales.

## 5. Referencias bibliográficas

1. Allemang, R. (1980). Investigation of some multiple input/output frequency response function experimental modal analysis techniques (Tesis doctoral). University of Cincinnati, Department of Mechanical Engineering, USA.
2. Allemang, R., & Brown, D. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. Proceedings of the International Modal Analysis Conference, 110–116.
3. Allemang, R. (2003). The modal assurance criterion—Twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, 14–21.
4. Computers and Structures, Inc. (2014). Manual de referencia de análisis CSI para SAP2000®, ETABS®, SAFE® y CSIBridge®. Berkeley, CA, EE. UU.
5. Del Sol Companioni, F. (2016). Análisis modal operacional en estructuras mediante el empleo de acelerómetros (Trabajo académico). Recuperado de <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/>
6. Di Paolo Emilio, M. (2013). *Data acquisition systems: From fundamentals to applied design*. Springer.
7. Dooms, D., Jansen, M., De Roeck, G., Degrande, G., Lombaert, G., Schevenels, M., & François, S. (2010). *StaBIL: A finite element toolbox for MATLAB. Version 2.0. User's guide*. Leuven, Belgium: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Structural Mechanics.
8. Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice and application* (2nd ed.). Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press.
9. He, J., & Fu, Z.-F. (2001). *Modal analysis*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
10. Maes, K., & Lombaert, G. (2018). *Measurement techniques for system identification in civil engineering*. Leuven.
11. National Instruments. (2015, noviembre). NI 9234 (Manual 374186a\_02). Recuperado de [http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf)
12. National Instruments. (2020). What is LabVIEW? Recuperado de <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>



13. PCB Piezotronics. (2022). 353B34 [Hoja de producto]. Recuperado de <https://www.pcb.com/products?model=353b34>
14. Reynders, E., & De Roeck, G. (2014). System identification and parameter estimation in civil engineering. Santa Clara.
15. Structural Mechanics (KU Leuven). (2020, mayo 12). MACEC: A MATLAB toolbox for experimental and operational modal analysis. Recuperado de <https://bwk.kuleuven.be/bwm/macec>