

## **CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DE PASARELA PEATONAL A TRAVÉS DE REGISTROS DE VIBRACIONES**

Juan P. Ascheri<sup>1</sup>, Oscar Möller<sup>2</sup>, Germán Lucero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Civil; <sup>2</sup>Doctor en Ingeniería, Ingeniero Civil

<sup>1,2</sup>Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs. Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, Rosario, Argentina.  
e-mail: jascheri@fceia.unr.edu.ar

### **RESUMEN**

La correcta identificación de los parámetros dinámicos es de vital importancia para el monitoreo de la salud estructural y la detección de daños de una estructura. Entre dichos parámetros podemos resaltar las frecuencias naturales de vibración, las relaciones de amortiguamiento y los vectores de formas modales. En ese contexto se construye un modelo paramétrico de una pasarela peatonal existente, que une dos bloques de la Facultad de Arquitectura dentro del Centro Universitario de Rosario. Se realizan mediciones de vibraciones en varios puntos de la estructura generadas por el salto de una persona, registrándose aceleraciones en distintos puntos de la estructura que van variando dejando siempre un punto fijo de medición de referencia. Dichas mediciones permiten obtener frecuencias y formas modales utilizando técnicas clásicas de análisis de los registros en el dominio de las frecuencias. Además, se desarrolla un modelo numérico paramétrico del puente, calculándose modos y frecuencias para diferentes combinaciones de los parámetros. Los resultados discretos son aproximados por una función continua mediante redes neuronales. Los parámetros se optimizan para ajustar las frecuencias propias, que permitirán a través de futuros monitoreos evaluar el progreso de su salud estructural.

### **ABSTRACT**

*The correct identification of dynamic parameters is of real importance for monitoring the structural health and detecting damage to a structure. Among these parameters we can highlight the natural vibration frequencies, the damping ratios and the mode shape vectors. In this context, a parametric model of an existing pedestrian walkway that joins two blocks of the Faculty of Architecture within the Rosario University Center. Vibration measurements are made at various points of the structure produced by a person jumping, to obtain modal shapes and frequencies. To do this, classical techniques are used for analyzing records in the frequency domain. With the identified dynamic characteristics, the parameters of the finite element numerical model are adjusted using experimental design techniques and neural network approaches.*

Organiza:

## INTRODUCCIÓN

Las predicciones analíticas de un modelo de elementos finitos a menudo difieren de los resultados de una estructura real. Estas diferencias se originan por las incertidumbres originadas en la simplificación de la geometría, de los materiales, así como en las condiciones de contorno.

La importancia de contar con modelos calibrados es clave en la identificación de daño, así como en la detección y diagnóstico temprano de posibles fallas, lo cual es el objetivo principal en el proceso de monitoreo de salud estructural.<sup>1, 2</sup>

En las últimas décadas, se han publicado una gran cantidad de trabajos relacionados con métodos dinámicos y estáticos para el diagnóstico e identificación de daño, utilizando distintas estrategias de calibración de modelos de elementos finitos. En general, todas estas técnicas convergen en un problema de optimización donde se minimiza cierta función objetivo basada en la diferencia entre los datos medidos y la predicción del modelo. En algunos casos se utilizan métodos de calibración del modelo de elementos finitos basados en un modelo paramétrico de una estructura y en otros, un metamodelo alternativo, que funciona más rápidamente utilizando menos parámetros involucrados.

Los parámetros del modelo se definen en una cantidad reducida, con límites físicamente posibles, y para los cuales el resultado de las variables a optimizar sea sensible a la variación de dichos parámetros. Los valores discretos calculados a partir de las combinaciones aleatorias de dichos parámetros, son aproximados por una superficie de respuesta adecuadamente ajustada que se utiliza como sustituto de la verdadera respuesta estructural<sup>3</sup>. Se han estudiado diferentes formas para las superficies de respuesta<sup>4</sup>, encontrándose que las redes neuronales tienen ventajas en flexibilidad y adaptabilidad, y son utilizadas en este trabajo.

El proceso de optimización de los parámetros consiste para este trabajo, en minimizar una función objetivo definida como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de las frecuencias medidas experimentalmente y las predichas por el modelo numérico paramétrico.

En este trabajo se utiliza un algoritmo heurístico de búsqueda aleatoria sin cálculo de gradiente que ha sido desarrollado en trabajos previos<sup>5,6,7,8</sup>. A partir de valores iniciales, los parámetros a optimizar se perturban aleatoriamente dentro de una zona de búsqueda que se va desplazando dentro de los límites de los parámetros hasta localizar el mínimo de la función objetivo.

## ESTRUCTURA ANALIZADA

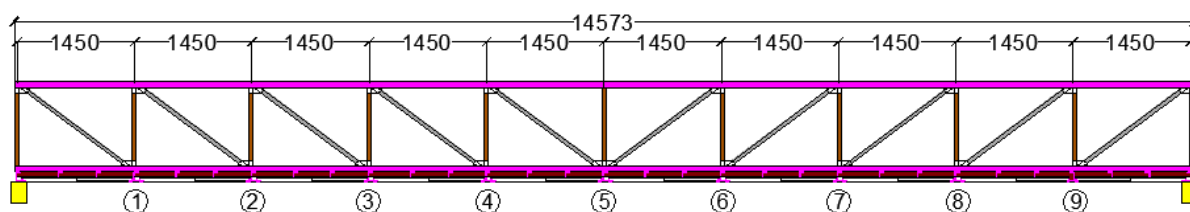
La estructura relevada, que se muestra en la Figura 1, corresponde a una pasarela peatonal que une dos pabellones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Rosario.

Organiza:

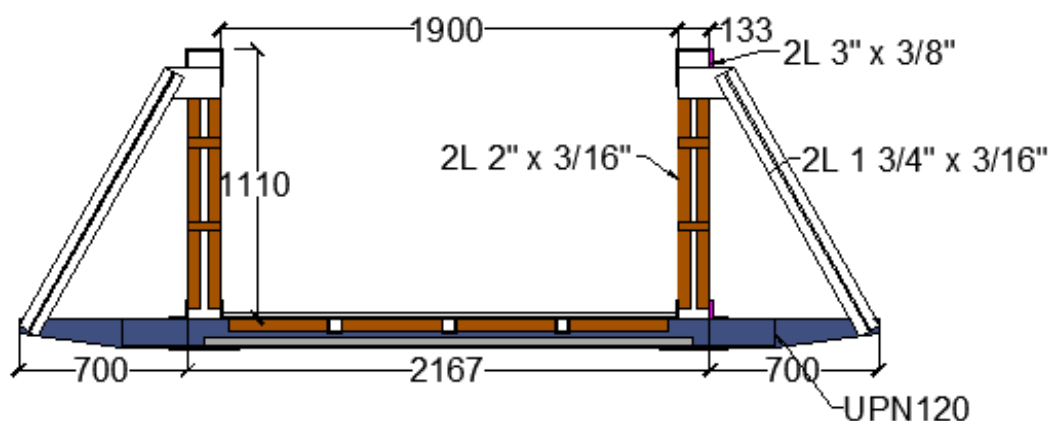


*Figura 1. Imagen pasarela analizada*

Esta materializado como una estructura reticulada metálica de aproximadamente 14,50 m de luz entre apoyos, desarrollado en 10 módulos, donde las vigas longitudinales cumplen en simultaneo la función de ser barandas.



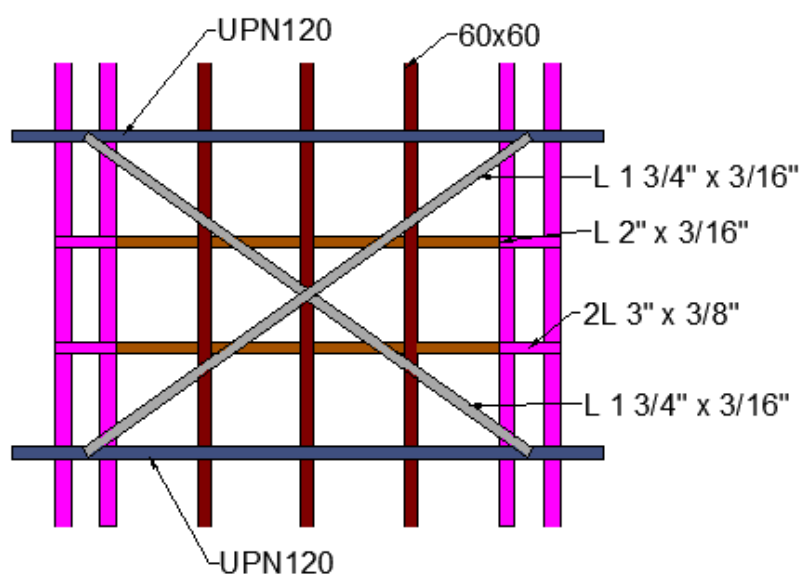
*Figura 2. Esquema viga lateral*



*Figura 3. Sección transversal*

Organiza:

Las vigas laterales que se esquematiza en la Figura 2 y se observa en corte transversal en la Figura 3, se conforman por un cordón superior e inferior compuesto por dos perfiles L de 3" x 3/8", ambos separados por una distancia de 1.11 metros, el cordón superior soldado por las alas formando una u invertida, mientras el cordón inferior cuenta con dos presillas en los tercios de luz entre vigas transversales. Los montantes están compuestos por dos perfiles L de 2" x 3/16" también empresillados al tercio de luz y diagonales compuestas por dos perfiles de 1 3/4" x 3/16", también empresilladas.



*Figura 4. Planta de un módulo del tablero principal*

El tablero se materializa en 10 módulos que se ilustran en planta en la figura 4 limitado por vigas transversales diseñadas con perfiles UPN 120, vigas secundarias transversales con perfiles L de 2" x 3/16" y tubos longitudinales de 60 mm x 60 mm x 1.20 mm.

Por debajo del tablero existen cruces entre cada módulo de L de 1 3/4" x 3/16". Sobre dicha estructura se dispone de un tablero fenólico de 18 mm de espesor revestido con un piso de goma.

Módulo de por medio, en los numerados como 2, 4, 6 y 8, según la Figura 2, la viga transversal se prolonga como se observa en la sección transversal de la Figura 3 generando una rigidización torsional que se completa con dos L de 1 3/4" x 3/16".

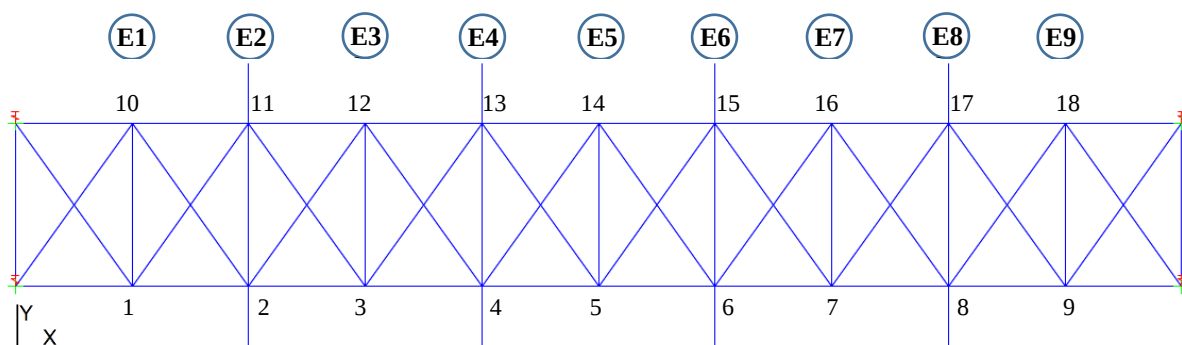
Organiza:

## REGISTRO DINÁMICO

Se registran aceleraciones en función del tiempo en nueve configuraciones distintas dejando en cada configuración siempre un punto fijo de medición.

Para cada configuración se realizan cinco impactos generados por el salto de una persona siempre en el mismo lugar. El lugar de impacto es elegido de forma tal que el efecto sobre la estructura excite varios modos de vibración previamente identificados en los modelos numéricos preliminares.

En la Figura 5 se observa el esquema de la pasarela en planta donde se enumeran los nodos donde se ubicaron los sensores a nivel de cordón inferior.



*Figura 5. Esquema de ubicación de sensores*

El nodo 4 corresponde al sensor fijo, mientras que los impactos se generaron sobre la proximidad del nodo 3. En la Figura 6 se muestra una imagen del momento cuando se registraron los datos, la masa de las personas que generaron las acciones fue tenida en cuenta en el modelo numérico.

En la tabla 1 se describen las nueve configuraciones utilizadas para la toma de registros describiendo la posición de los sensores en cada configuración dejando un sensor siempre fijo en la posición número 4.

Se utilizaron períodos de muestreo de 500 muestras por segundo y se registraron aceleraciones en los tres ejes, a pesar de ello solo se utilizaron en el análisis los registros de aceleraciones verticales.

Organiza:



*Figura 6. Ubicación de masas y zonas de impacto.*

| Configuración | Punto fijo | Puntos de registro |    |
|---------------|------------|--------------------|----|
| 1             | 4          | 1                  | 10 |
| 2             | 4          | 2                  | 11 |
| 3             | 4          | 3                  | 12 |
| 4             | 4          | -                  | 13 |
| 5             | 4          | 5                  | 14 |
| 6             | 4          | 6                  | 15 |
| 7             | 4          | 7                  | 16 |
| 8             | 4          | 8                  | 17 |
| 9             | 4          | 9                  | 18 |

*Tabla 1 – Configuraciones de registro*

Con los registros procesados se realiza el análisis en el dominio de la frecuencia denominado peak picking, dicho procedimiento permite vincular las múltiples mediciones a través de la obtención de la función de densidad espectral de potencia por medio de la conversión de los registros de aceleraciones. Se analiza la relación que existe entre la respuesta de un sensor cualquiera y el de referencia.

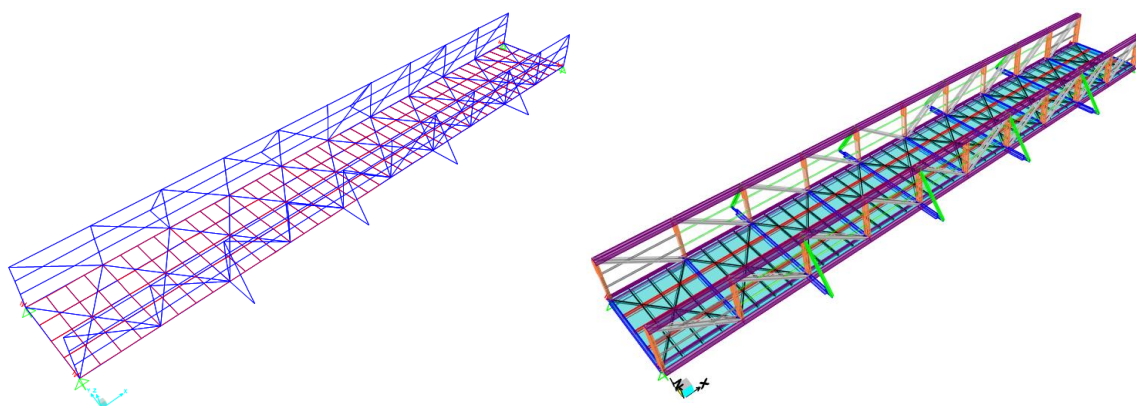
Se puede demostrar, como se muestra en la ecuación 1, que la relación entre la función de densidad espectral de potencia cruzada entre p y q y la autoespectral (q y q) es aproximadamente igual al cociente.

Organiza:

$$\frac{S_{pq}(\omega)}{S_{qq}(\omega)} \approx \frac{\phi_p^{r_o}}{\phi_q^{r_o}} \quad (1)$$

## MODELO NUMÉRICO

Para la modelización numérica se utiliza el software SAP, en las Figuras 7 se muestra el modelo desarrollado a partir de lo relevado.



*Figura 7. Esquema del modelo numérico.*

Sobre dicho modelo se definen siete parámetros a optimizar en calibración del modelo, el módulo de elasticidad del acero, las restricciones al giro de los apoyos a nivel del piso del puente, las masas concentradas de 2 personas, la masa del piso de fenólico, un coeficiente de incremento de masa en el cordón inferior por chapas de nudos y accesorios, un coeficiente de incremento de masa en el cordón superior también debido a chapas de nudos y accesorios y el módulo de elasticidad del piso de fenólico.

Los valores límites inferiores y superiores definidos para cada parámetro se observan en la Tabla 2.

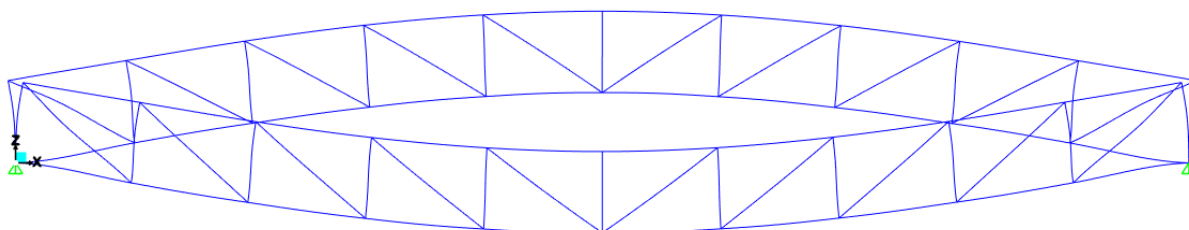
Se generaron aleatoriamente 400 combinaciones de valores de los parámetros, dentro de los límites inferior y superior adoptados para cada uno, aplicando la técnica de diseño de experimentos<sup>9</sup>. Para cada combinación se evaluaron los valores propios del modelo, y se obtuvieron las formas modales y sus respectivas frecuencias.

Se ordenaron dichos valores en función de las formas modales detectadas experimentalmente obteniendo en cada combinación las frecuencias para las formas modales de las figuras 8, 9, 10 y 11 correspondiente a los cuatro primeros modos de vibración.

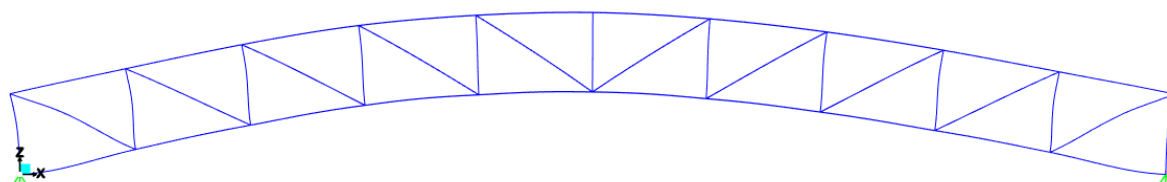
Organiza:

| Parámetro         | Unidad            | Límite Inferior | Límite Superior |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| E. acero          | MPa               | 180.000         | 220.000         |
| Rig. resorte emp. | KNm/rad           | 1               | 5.000           |
| Masa personas     | Kg                | 80              | 100             |
| Masa fenólico     | Kg/m <sup>3</sup> | 400             | 1.100           |
| Coef. masa C.I.   | -                 | 1,05            | 1,20            |
| Coef. Masa C.S.   | -                 | 1,05            | 1,20            |
| E. fenólico       | MPa               | 1               | 10.000          |

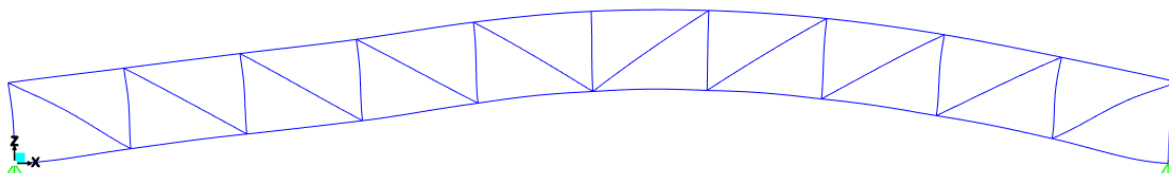
*Tabla 2 – Entornos de parámetros utilizados*



*Figura 7. Primer modo de vibración - torcional.*

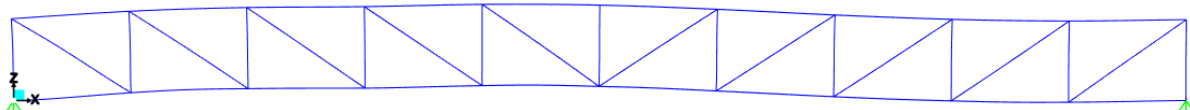


*Figura 8. Segundo modo de vibración - flexional.*



*Figura 9. Tercer modo de vibración - flexional.*

Organiza:



*Figura 10. Cuarto modo de vibración - flexional.*

## CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS Y RESULTADOS NUMÉRICOS

A partir de las 400 simulaciones procesadas con las combinaciones de valores de los parámetros elegidos, se obtienen los valores discretos de las cuatro frecuencias de vibración compatible con las formas modales analizadas.

Los 400 valores discretos, se aproximan con una función continua utilizando redes neuronales<sup>3</sup>. Las redes neuronales fueron “entrenadas” con la técnica de “backpropagation”. Esta técnica se aplica a las cuatro frecuencias cuyas formas modales son similares a los modos identificados de las mediciones experimentales. La correlación entre los valores discretos y las predicciones de las redes neuronales se presentan en la Figura 11 para cada una de las frecuencias analizadas.

El proceso de optimización de los parámetros  $\gamma$  consiste en minimizar la función  $F(\gamma)$ , ecuación (2), suma de los cuadrados de las diferencias entre los  $NF$  valores de las frecuencias experimentales  $\omega_{exp}$  y las predicciones del modelo paramétrico  $\omega(\gamma)$ . Se utiliza el método de búsqueda aleatoria sin cálculo de gradientes<sup>8 10</sup>.

$$F(\gamma) = \sum_{i=1}^{NF} (\omega(\gamma) - \omega_{exp})^2 \quad (2)$$

Los valores óptimos de los parámetros se presentan en la tabla 3. En la tabla 4 se muestran los valores registrados de frecuencias de vibración, utilizados como objetivos utilizados para la optimización de los parámetros, los resultados del proceso de optimización y los obtenidos del modelo numérico alimentado con los valores óptimos de los parámetros para cada modo analizado.

Las Figuras 12 a 15, grafican las formas de los cuatro modos de vibración registrados en comparación con los modos resultantes del modelo numérico alimentado con los parámetros descritos optimizados. En cada uno puede observarse los modos correspondientes a la viga norte tanto para la solución numérica (Num Norte) como experimental (Exp Norte) así como para la viga sur (Num Sur y Exp Sur)

Organiza:

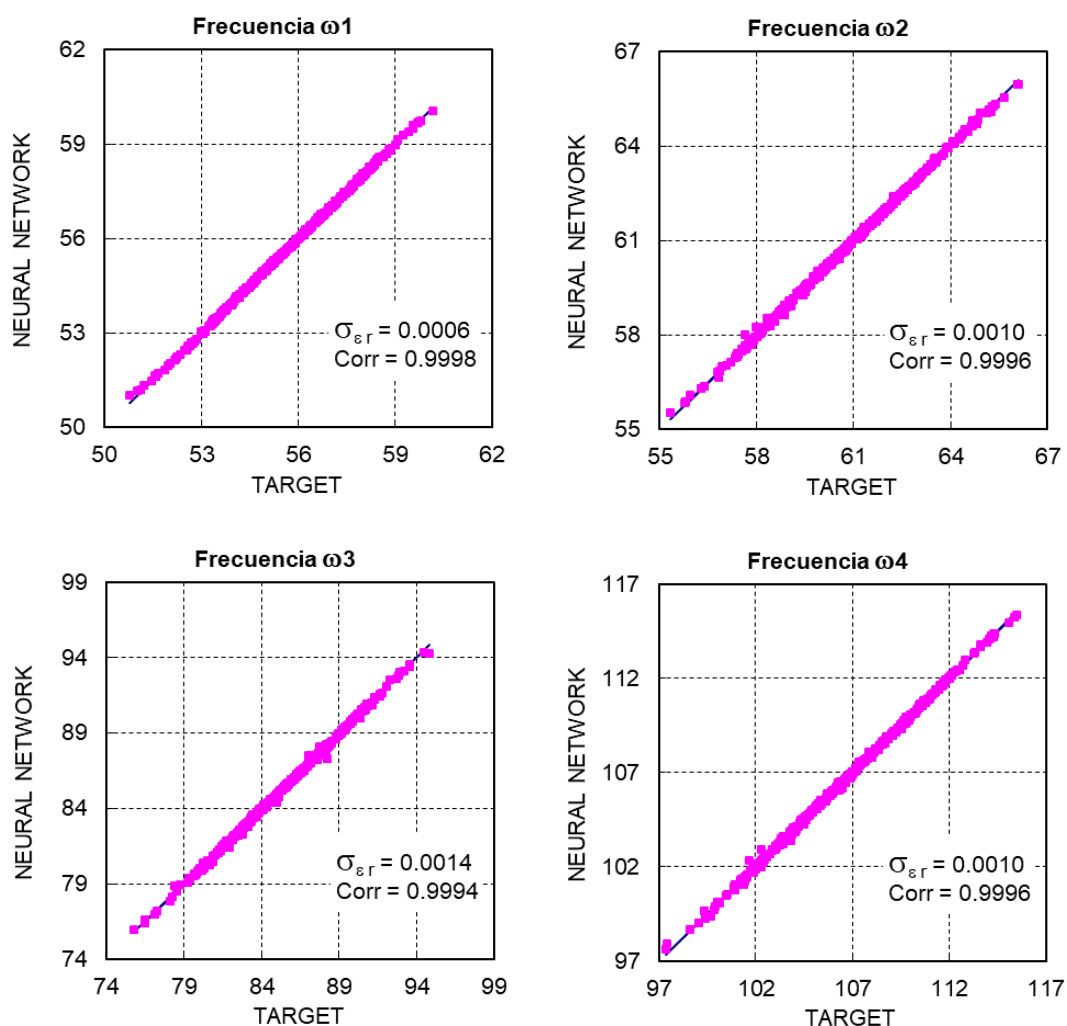


Figura 11. Aproximación por redes neuronales de las frecuencias calculadas con el modelo numérico paramétrico.

| Parámetro         | Unidad            | Valor óptimo |
|-------------------|-------------------|--------------|
| E. acero          | MPa               | 199.270      |
| Rig. resorte emp. | KNm/rad           | 4479,3       |
| Masa personas     | Kg                | 99,56        |
| Masa fenólico     | Kg/m <sup>3</sup> | 447,85       |
| Coef. masa C.I.   | -                 | 1,1805       |
| Coef. Masa C.S.   | -                 | 1,0505       |
| E. fenólico       | MPa               | 4.536        |

Tabla 3 – Valores óptimos de variables analizadas

Organiza:

|      | Frecuencia rad/s |              |         |
|------|------------------|--------------|---------|
| Modo | Registrada       | Optimización | Modelo  |
| 1    | 53,689           | 54,372       | 54,382  |
| 2    | 61,359           | 59,231       | 58,255  |
| 3    | 78,233           | 80,774       | 79,407  |
| 4    | 107,38           | 106,73       | 105,510 |

Tabla 4 – Resultados de frecuencia naturales de vibración

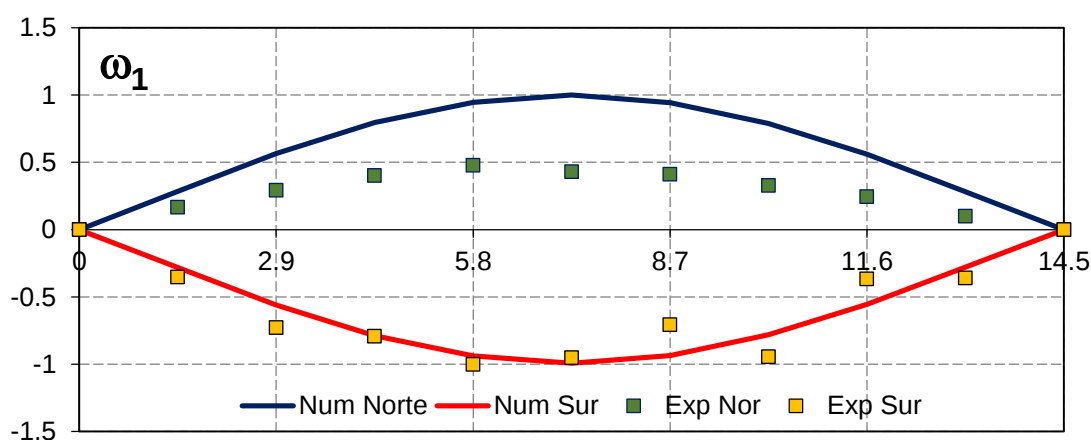


Figura 12. Forma del primer modo de vibración del modelo numérico optimizado para la viga norte (Num Norte) y sur (Num Sur) y del registro experimental respectivamente (Exp Norte) (Exp Sur)

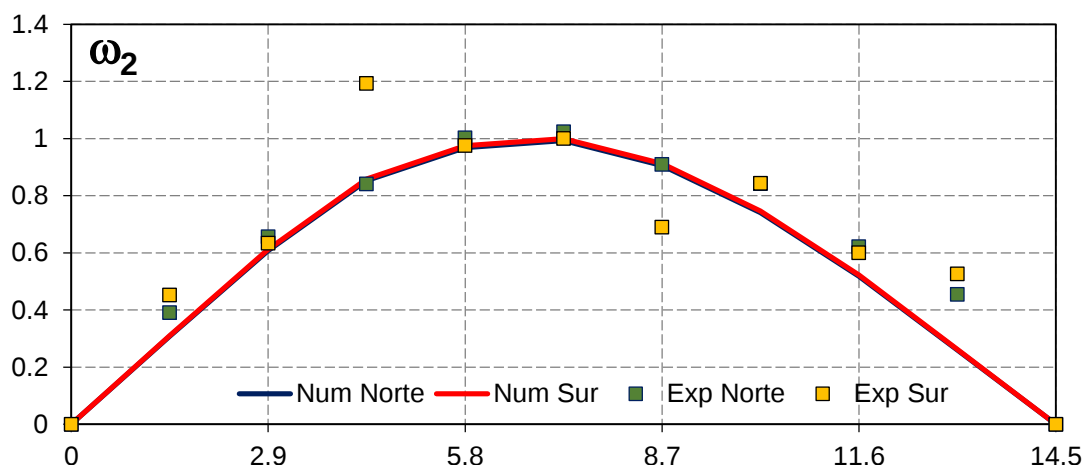


Figura 13. Forma del segundo modo de vibración del modelo numérico optimizado para la viga norte (Num Norte) y sur (Num Sur) y del registro experimental respectivamente (Exp Norte) (Exp Sur)

Organiza:

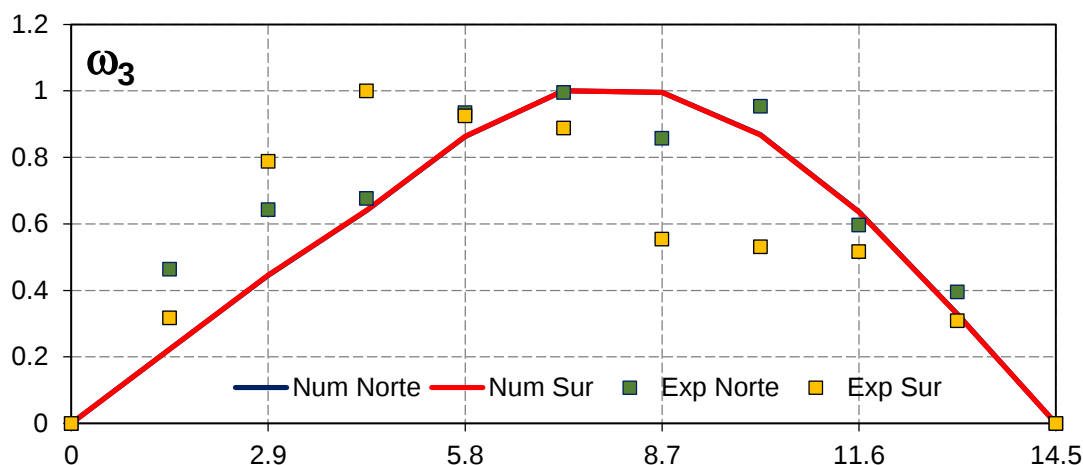


Figura 14. Forma del tercer modo de vibración del modelo numérico optimizado para la viga norte (Num Norte) y sur (Num Sur) y del registro experimental respectivamente (Exp Norte) (Exp Sur)

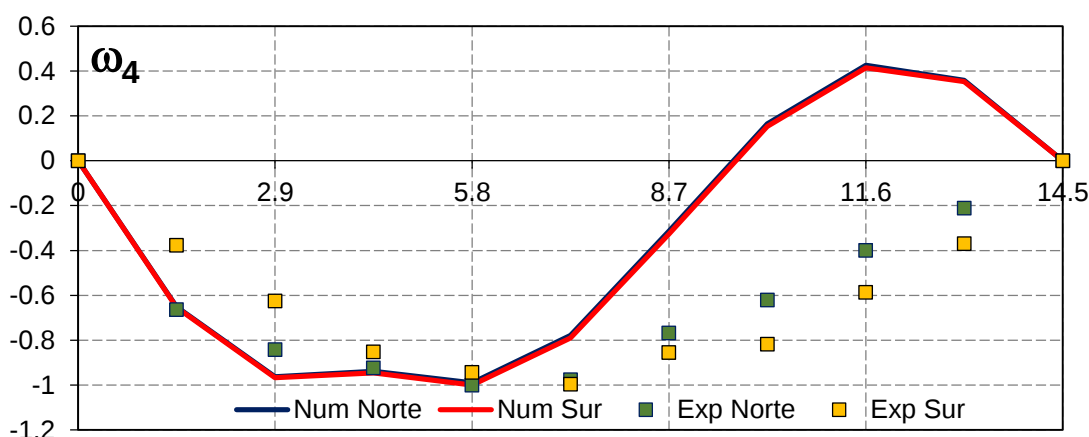


Figura 15. Forma del cuarto modo de vibración del modelo numérico optimizado para la viga norte (Num Norte) y sur (Num Sur) y del registro experimental respectivamente (Exp Norte) (Exp Sur)

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de optimización de los parámetros del modelo, basado en las cuatro primeras frecuencias naturales de vibración identificadas de las mediciones experimentales, resulta satisfactorio con diferencias de 1.27%, 3.47%, 3.25% y 0.61% entre los valores identificados y los optimizados.

Las formas modales presentan mayores diferencias debido a varios factores: (a) las mediciones fueron realizadas sobre el cordón inferior de las vigas del puente y se

Organiza:

utilizaron solo las componentes verticales de las aceleraciones registradas; (b) Las formas de los modos de vibración obtenidas con el modelo numérico presentan componentes horizontales en el cordón superior acopladas con los movimientos verticales como “viga longitudinal” identificadas de las mediciones experimentales; (c) Los impactos para generar las vibraciones libres del puente fueron aplicados del lado de la viga norte, y su propagación a la viga sur pasa por el entramado de perfiles y chapa de fenólico que conforman el piso, lo que origina mayores diferencias en las componentes modales de la viga sur.

En función de este análisis de resultados de las comparaciones experimental numérico, se observa la necesidad de incorporar actualizaciones al modelo numérico, considerar componentes horizontales e incorporar mediciones sobre el cordón superior de las vigas del puente.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la calibración de un modelo numérico a través de registros de vibraciones utilizando como función objetivo a minimizar en el proceso de optimización, las frecuencias naturales de vibración de los cuatro primeros modos naturales de vibración identificados, de las mediciones experimentales.

Se utilizaron técnicas de detección de modos y frecuencias, realizando análisis en el dominio de la frecuencia para los registros experimentales. Se desarrolló un modelo numérico con parámetros que son sensibles a las predicciones de modos y frecuencias. Se generaron combinaciones aleatorias de los valores de los parámetros y los resultados discretos de las primeras 4 frecuencias se aproximaron con una función continua por redes neuronales. La optimización de los parámetros se realizó minimizando el cuadrado de las diferencias entre las predicciones del modelo y los valores del registro experimental.

Los resultados mostraron un aceptable comportamiento de la metodología empleada, obteniendo muy poca diferencia entre las frecuencias objetivos registradas y las obtenidas del modelo numérico.

Las formas modales mostraron una buena aproximación, con mejor nivel de performance en los primeros modos.

A pesar que la primera forma modal presenta la mejor aproximación, se observa en el registro experimental una asimetría no detectada en el modelo, ya que a pesar de que en ambos casos la forma descrita es la del tipo torsional, donde una viga asciende mientras que la otra desciende, en el modelo numérico los parámetros a optimizar no permitían la generación de dichas asimetrías.

Para futuros trabajos se observa la necesidad de incorporar mejoras al modelo numérico y registrar aceleraciones en el cordón superior considerando las componentes horizontales, que permitan reflejar más aproximadamente el comportamiento experimental.

Organiza:

## Referencias:

1. Farrar, C.R., Lieven, N.A., 2007. Damage prognosis: the future of structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365 (1851), 623e632.
2. Farrar, C.R., Worden, K., 2007. An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365 (1851), 303e315.
3. Hurtado, J. (2004). Structural Reliability – Statistical Learning Perspectives. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol.17, Springer Verlag.
4. Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. Seismic structural reliability using different nonlinear dynamic response surface approximations. Structural Safety, 31(5): 432-442, 2009.
5. Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Savino, F. Optimización, con requisitos de confiabilidad, a partir del diseño preliminar de pórticos sismorresistentes. Mecánica Computacional, XXIX: 1403-1421, AMCA, 2010.
6. Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Savino, F. Performance-based seismic design: a searchbased cost optimization with minimum reliability constraints, Structural Seismic Design Optimization and Earthquake Engineering: Formulations and Applications, Ed. Vagelis Plevris, Chapter 2: 23-50. IGI Global, 2012.
7. Möller, O., Ascheri, J.P., Foschi, R., Rubinstein, M., Grossman, S. Métodos numéricos para optimización de estructuras sismorresistentes incluyendo costos sociales. Mecánica Computacional, XXXII: 829-849, 2013.
8. Möller, O., Foschi, R.O., Ascheri, J.P., Rubinstein, M., Grossman, S. Optimization for performance-based design under seismic demands, including social costs, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 14(2): 315-328, 2015.
9. Zhang, J. (2003). "Performance-based seismic design using designed experiments and neural networks". PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada.
10. Aydin Hassanzadeh, S.M., Saber Moradi, A.M. and Burton, H.V. (2024) "Performance-Based Design Optimization of Structures: State-of-the-Art Review". Journal of Structural Engineering, 150(8): 03124001.

Organiza: