

DETECCIÓN DE DAÑO EN UN TABLERO DE PUENTE DE HORMIGÓN PRETENSADO MEDIANTE LA TRANSFORMADA WAVELET

DAMAGE DETECTION IN A BRIDGE BOARD OF PRESTRESSED CONCRETE BY MEANS OF THE WAVELET TRANSFORM

Germán D. Ercolani^{a, b} *, Daniel H. Felix^a y Néstor F. Ortega^{a, c}

^a*II-UNS, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CIC
Avda. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina, german.ercolani@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar,
<http://www.uns.edu.ar>*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar>*

^c*Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires, Argentina,
<https://www.gba.gob.ar/cic>*

Palabras clave: hormigón pretensado, detección de daño, transformada *wavelet*.

Resumen. Uno de los desafíos más importantes en el monitoreo de la salud estructural, es la posibilidad de detectar la presencia de daños en la estructura, en un estado poco avanzado. La transformada *wavelet* es una herramienta matemática que permite el análisis de señales y en los últimos años ha tenido numerosas aplicaciones en la detección de daño en estructuras de Ingeniería Civil. En este trabajo, se muestra la implementación de la transformada *wavelet* continua, para la detección de daño en un modelo numérico, de un puente losa de hormigón pretensado, analizado con el Método de los Elementos Finitos. Los datos procesados son los correspondientes a los desplazamientos verticales de la estructura, bajo la acción de cargas estáticas. Se evalúan distintas hipótesis de daño introducido en el modelo estructural y se demuestra la utilidad de la transformada *wavelet* para la detección de los mismos.

Keywords: prestressed concrete, damage detection, wavelet transform.

Abstract. One of the most important goals in monitoring of structural health is the possibility of early detection of damage in the structure. The wavelet transform is a mathematical tool that allows, by analysis of signals, to achieve this purpose, and in recent years it has been used in numerous applications of damage detection in civil engineering structures. In this work, the implementation of the continuous wavelet transform has been shown, for detection of damage in a numerical model of a prestressed concrete slab bridge, constructed with the finite element method. The primary data processed are those corresponding to the vertical displacements of the structure, under the action of static charges. Different hypotheses of damage introduced in the structural model are evaluated and the usefulness of the wavelet transform for this detection is demonstrated.

INTRODUCCIÓN

Es frecuente, en señales medidas en el dominio tiempo, el uso de la transformada de Fourier a fin de obtener las amplitudes de la señal en el dominio de las frecuencias. De esta manera es posible distinguir, por ejemplo, las frecuencias naturales del sistema. Sin embargo, la transformada de Fourier no provee ninguna información respecto al momento en el cual ocurren dichas frecuencias. La transformada *wavelet*, resuelve este problema ya que es capaz de describir la señal en dos dominios: tiempo (t) y escala (a). En este caso, la escala está relacionada con la frecuencia.

De igual manera, si la señal a procesar se encuentra en el dominio del espacio (x), la aplicación de la transformada de *wavelet* permite obtener dicha señal en los dominios de espacio y escala. Esta situación puede ser habitual en detección de daño en estructuras, cuando por ejemplo, la señal corresponde a desplazamientos en distintos puntos de la estructura. En dicho caso, en el dominio de la escala, se pondrá de manifiesto cualquier discontinuidad provocada por el daño.

La principal ventaja obtenida mediante el uso de *wavelets*, es la capacidad de realizar análisis localizados de una señal, es decir, “hacer zoom” en cualquier intervalo de tiempo (o espacio). De esta manera, el análisis con *wavelets* es capaz de revelar algunos aspectos ocultos de los datos, que otras técnicas de análisis de señales pueden no haber detectado (Ovasenova y Suarez, 2004). Esta característica ha permitido a la transformada *wavelet* exitosas aplicaciones para la detección de daño, tal como puede verse en numerosos trabajos, entre los cuales se distinguen los de Douka et al. (2003), quienes utilizan la transformada *wavelet* continua para la detección de daño en una viga cantilever, a partir de los modos de vibración; Ovasenova y Suarez (2004) la aplican a partir de análisis dinámicos y estáticos en estructuras planas; Chang y Chen (2004) aplican *wavelets* para la detección de daño en una placa rectangular, a partir de sus desplazamientos o formas modales; Rucka y Wilde (2006a) emplean *wavelets* en modelos de vigas y placas a partir de las amplitudes de vibración; Rucka y Wilde (2006b) realizan aplicaciones experimentales en vigas cantilever, analizando las deflexiones estáticas; Montejo y Suarez (2007) detectan el instante en que se produce el daño en un sistema de dos grados de libertad; Solis et al. (2013) utilizan el análisis *wavelet* experimentalmente, para la detección de daño a partir de cambios en las formas modales de vigas de acero; Abdulkareem et al. (2016) utilizan la transformada continua *wavelet* en dos dimensiones, en modelos numéricos de placas de acero; Andreaus et al. (2017) también realizan aplicaciones experimentales en vigas simplemente apoyadas, metálicas, con fisuras múltiples, basándose en las respuestas estáticas.

1 FUNDAMENTOS DE LA TRANSFORMADA WAVELET

La transformada *wavelet*, descompone la señal en una serie de pequeñas ondas u “ondículas”. En términos simples, las *wavelets* son ondas localizadas, o sea señales que descienden rápidamente a cero después de unas pocas oscilaciones, y que tienen un valor promedio nulo. Las *wavelets* pueden ser funciones reales o complejas y existe una familia de *wavelets* disponibles. Para cada aplicación, una cierta *wavelet* puede resultar más adecuada que otras, pero en general, para hallarla, se requiere un proceso de prueba y error. La *wavelet* seleccionada ψ , es llamada “*mother wavelet*” y puede ser función del espacio (x) o el tiempo (t). En este trabajo se considera que la variable independiente es x . Luego la ψ puede trasladarse si se desea centrarla en un valor distinto de cero, que llamaremos b y también puede escalarse a través de un factor a , si interesa ampliar o reducir el intervalo de tiempo en que la función tiene valores no nulos significativos. De esta manera se tiene:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

donde a y b son números reales y $a \neq 0$. Luego la transformada *wavelet* continua (CWT) es la suma en el tiempo, del producto de la señal $f(x)$ por la $\psi_{a,b}(x)$ (Rao y Boparadikar, 1998):

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

El resultado de la transformada es la descomposición de la señal en una serie de coeficientes $C(a,b)$. Las transiciones bruscas en $f(x)$ crean coeficientes con grandes amplitudes y esto precisamente, es la base del método de identificación de daño.

Además, la CWT tiene una inversa, la cual permite reconstruir la señal a partir de sus coeficientes $C(a,b)$ y se define como:

$$f(x) = \frac{1}{K_\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} C(a,b) \psi_{a,b}(x) db da \quad (3)$$

donde la constante K_π depende de la “*mother wavelet*” seleccionada.

La CWT puede resultar altamente redundante, en el sentido de que no es necesario usar el dominio completo de $C(a,b)$ para reconstruir $f(x)$. Por lo tanto, en lugar de utilizar un continuo de escalas y traslaciones, es posible utilizar valores discretos de dichos parámetros. En este caso, se definen como $a=2^j$ y $b=k 2^j$, con $(j,k) \in Z$ y de esta manera se obtiene la transformada *wavelet* discreta (DWT).

2 APLICACIONES SOBRE MODELO NUMÉRICO

En el presente trabajo, la aplicación de la transformada *wavelet*, como herramienta para la detección de daño estructural, se llevó a cabo sobre un modelo numérico, de un tablero de puente losa de hormigón pretensado. Los detalles del modelo, así como las hipótesis del daño consideradas, se especifican a continuación.

2.1 Características del modelo

El modelo analizado consiste en un puente losa alivianado, simplemente apoyado, pretensado a través de 6 cables rectos no adherentes. Las características geométricas de la sección transversal, con sus dimensiones, se muestran en la Figura 1. La longitud total del puente es de 28,00 m.

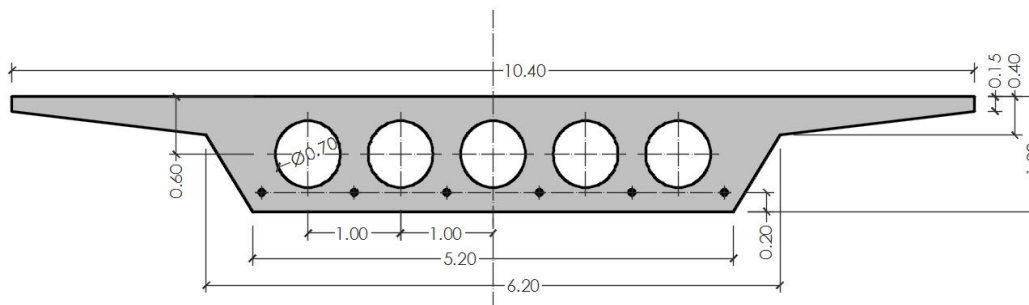


Figura 1: Sección transversal del modelo analizado.

El acero de pretensado tiene una sección total de 332.51 cm^2 , mientras que la fuerza total de pretensado es de 33.25 MN. Cabe mencionar que la geometría del tablero, así como la

cuantía de la armadura pretensada, responden a valores medios extraídos de un relevamiento de este tipo de puentes, realizado por [Yepes et al. \(2009\)](#). Además, la distribución del acero de pretensado, se concentró en un total de 6 cables, a los fines de la simplificación del modelo.

La estructura fue analizada para dos estados de cargas. El primero, indicado como estado de cargas “1”, corresponde a las cargas de peso propio del puente; mientras que el segundo, indicado como estado de cargas “2”, adiciona al anterior una sobrecarga de ensayo. Ambas cargas se consideraron uniformemente distribuidas en la superficie de la estructura, con los siguientes valores: cargas de peso propio: 23000 N/m^2 / sobrecarga: 3000 N/m^2 .

El modelo, analizado con el Método de los Elementos Finitos, se realizó mediante el software “Comsol Multiphysics” ([COMSOL, 2010](#)). Se trabajó con un modelo tridimensional, con un mallado formado por elementos tetraédricos para ambos materiales, hormigón y acero ([Jason et al., 2010](#); [Yapar et al., 2015](#)). Dicho mallado se muestra en la [Figura 2](#). Para simular el efecto del pretensado, se aplicó una deformación inicial a dichos cables.

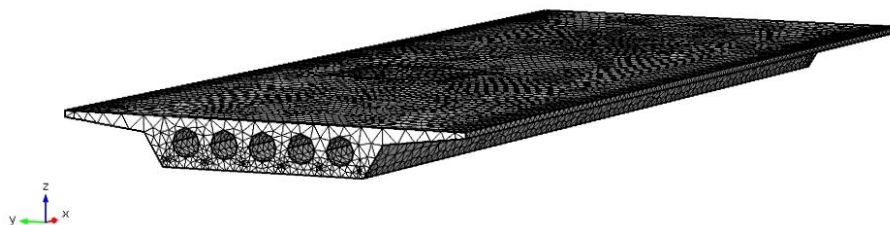


Figura 2: Vista tridimensional del mallado del puente.

Los análisis estructurales realizados en esta instancia fueron lineales, tanto geométrica como constitutivamente. En cuanto a los materiales del modelo, se los consideró homogéneos, continuos e isótropos, con las siguientes propiedades: módulo de elasticidad del hormigón: $E_H=25 \text{ GPa}$; coeficiente de Poisson del hormigón: $\nu_H=0.20$; módulo de elasticidad del acero: $E_A=200 \text{ GPa}$ y coeficiente de Poisson del acero: $\nu_A=0.30$.

2.2 Hipótesis de daño

En primer lugar se modeló y analizó la estructura sin daño alguno. Luego se introdujo una zona que representa un daño en el material, dado por una reducción en el valor del módulo de elasticidad del hormigón del 50%. Se consideraron distintas ubicaciones del daño, definidas por x/L e y/B , siendo x/L e y/B las posiciones relativas en longitud y ancho del tablero del puente, respectivamente, con: $0 \leq x/L \leq 1$ y $-0.5 \leq y/B \leq 0.5$. La dimensión del daño se definió de longitud y ancho a y una altura coincidente con la altura total del tablero. En la [Figura 3](#) se muestra la vista superior del tablero con los parámetros de definición de la zona dañada.

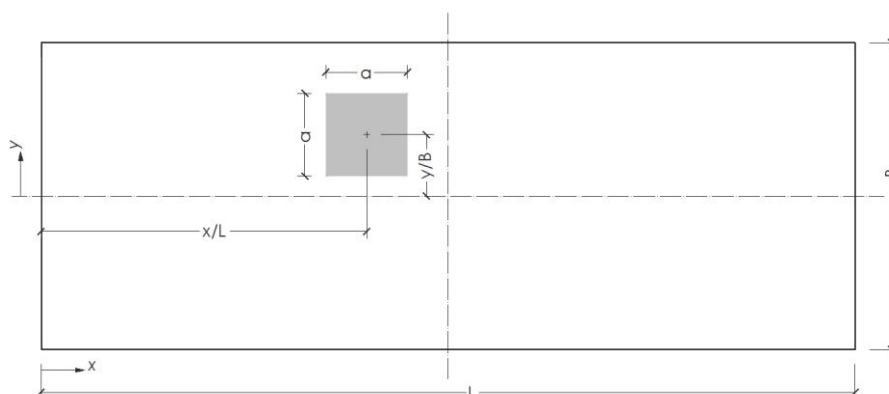


Figura 3: Vista superior del tablero con los parámetros de la zona afectada.

2.3 Aplicación de la transformada *wavelet*

En esta sección, se muestra la aplicación de la transformada *wavelet* sobre el puente losa en estudio, lo cual se efectúa mediante el software “Mathematica” (Wolfram, 2015).

Los datos de partida para la aplicación de la transformada *wavelet*, corresponden a los desplazamientos verticales de la estructura, provocados al pasar del estado de cargas “1” al estado de cargas “2”. Dichos datos, se obtuvieron en el modelo numérico, sobre una rejilla de puntos distribuidos en un total de 9 perfiles longitudinales, equidistantes entre sí. Debido a que en este caso se tiene una superficie de datos, la aplicación de la CWT, se realizó para cada perfil longitudinal y luego se representó la superficie de resultados. De la misma manera, se podría aplicar la transformada *wavelet* sobre los datos obtenidos para cada perfil transversal, aunque para el caso en estudio, por la tipología estructural, son mucho más determinantes las alteraciones en las respuestas evaluadas longitudinalmente.

Entre la variedad de *wavelets* disponibles en el software, se seleccionó la *wavelet Mexican Hat* de primer orden, la cual responde a la Ec. (4) y se representa en la Figura 4. La adecuada selección de una transformada *wavelet*, para la detección de daño, ha sido discutida por otros autores (Rucka y Wilde, 2006b). En general, la *wavelet Mexican Hat* de primer orden, la cual coincide con la derivada de segundo orden de la *wavelet Gaussian*, muestra buenos resultados en identificación de daño.

$$\psi(x) = -\frac{2e^{-x^2/2}(-1+x^2)}{\sqrt{3\pi}^{1/4}} \quad (4)$$

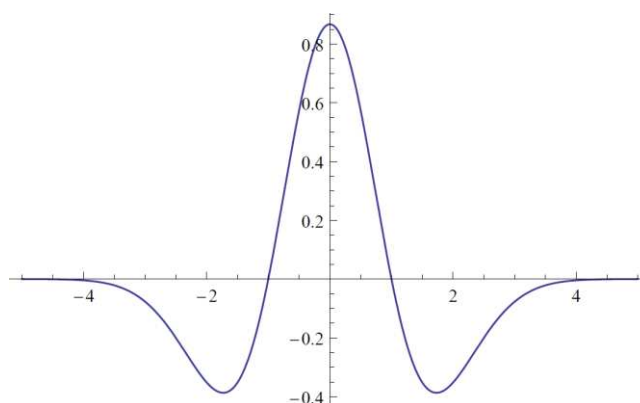


Figura 4: Función $\psi(x)$ correspondiente a la *wavelet Mexican Hat*.

Cabe mencionar que para el procesamiento de los datos, la precisión de las mediciones utilizada fue de 1×10^{-5} m; mientras que para la distancia entre dos puntos sucesivos de medición, se trabajó con $L/25$. Es importante tener en cuenta estos parámetros, ya que para la aplicación de la metodología sobre una estructura real, habrá que definirlos y pueden condicionar el equipamiento necesario a utilizar.

Como resultados de la aplicación de la transformada *wavelet*, se obtuvieron los coeficientes *wavelet* sobre los nueve perfiles longitudinales de mediciones considerados. Un típico perfil de los resultados obtenidos, se muestra en la Figura 5. En la misma, puede notarse claramente la discontinuidad que se genera en coincidencia con la zona afectada. Esta discontinuidad no es distinguible en los desplazamientos tomados como datos de entrada, tal como puede verse en la Figura 6, para el mismo caso.

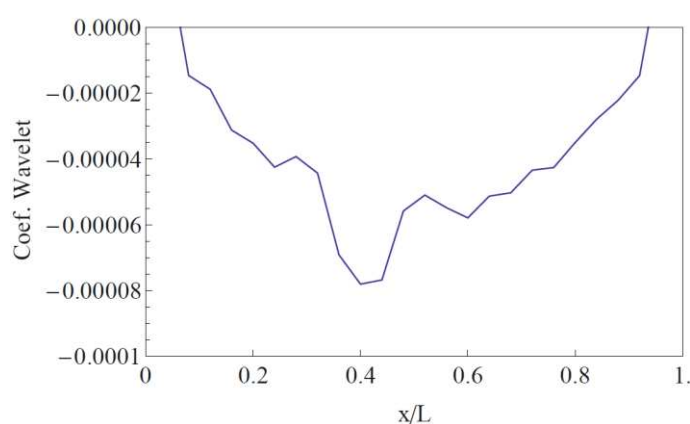


Figura 5: Coeficientes *wavelets* para el modelo con daño en $x/L=0.40$ e $y/B=0.20$, con $a=0.10L$. Perfil de datos en $y/B=0.25$.

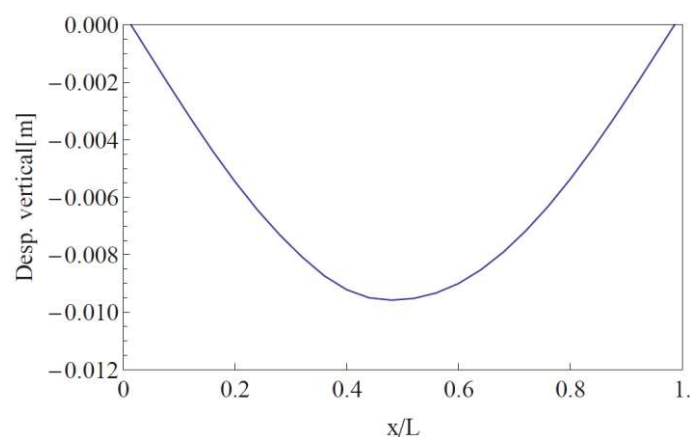


Figura 6: Desplazamientos verticales para el mismo caso presentado en la Figura 5.

Por otro lado, en la Figura 7, pueden verse las superficies de resultados conseguidos con la transformada *wavelet*, para el caso de daño de dimensión $a=0.10L$, ubicado en diversas posiciones. Puede notarse que el daño se pone de manifiesto notoriamente. En dicha figura, se aprecia que, cuando la zona afectada se encuentra centrada en $y/B=0.00$, existe una marcada diferencia de los coeficientes para todo el ancho del tablero, con un máximo en coincidencia con la zona afectada. Por otro lado, cuando la zona dañada se desplaza hacia la posición $y/B=0.20$, la repercusión de los resultados se da, principalmente, en el borde libre cercano.

Esto último tiene que ver con las características irregulares de la sección transversal del modelo.

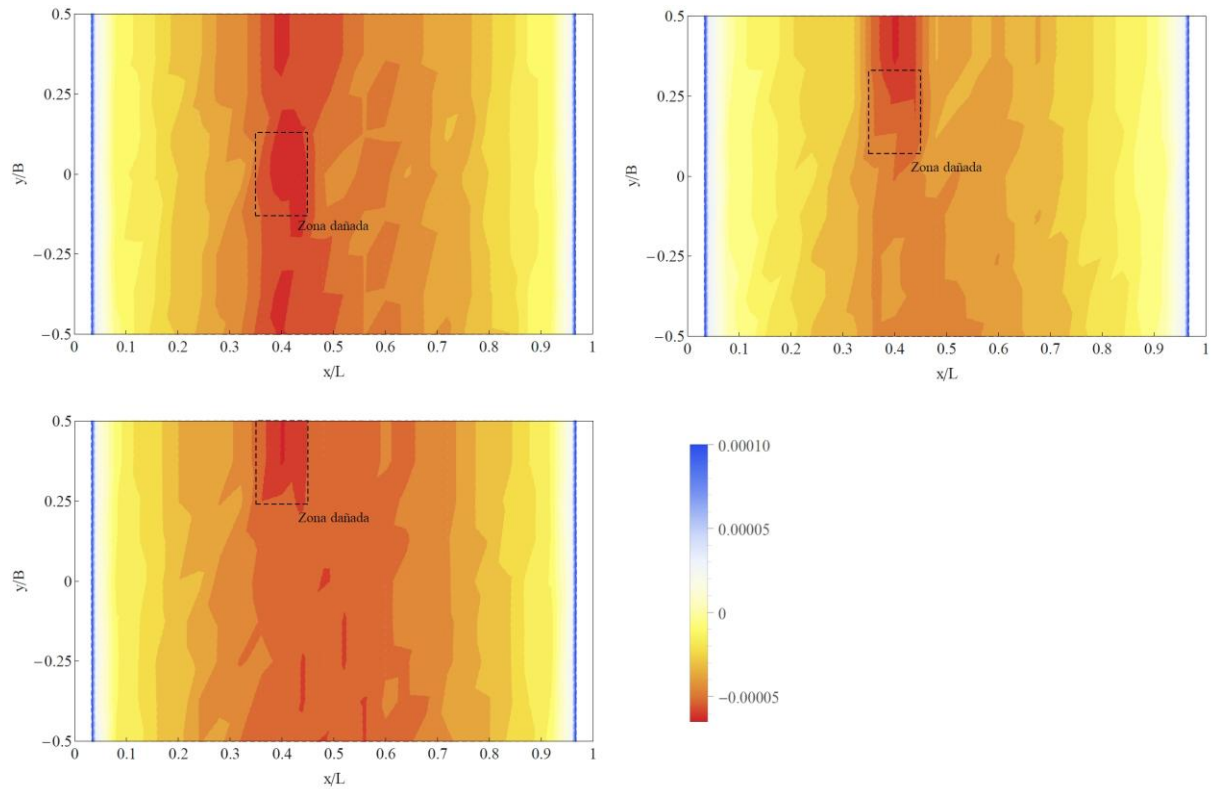


Figura 7: Superficies de coeficientes *wavelet*, para el modelo con distintas posiciones del daño. Caso $a=0.10L$.

Continuando con los estudios, se analizó el caso de una menor dimensión de la zona dañada, conservando la misma reducción en el módulo de elasticidad del hormigón. En la [Figura 8](#) se muestran los resultados para una dimensión $a=0.05L$. Puede verse que la zona afectada continúa siendo detectable con la metodología de la transformada *wavelet*.

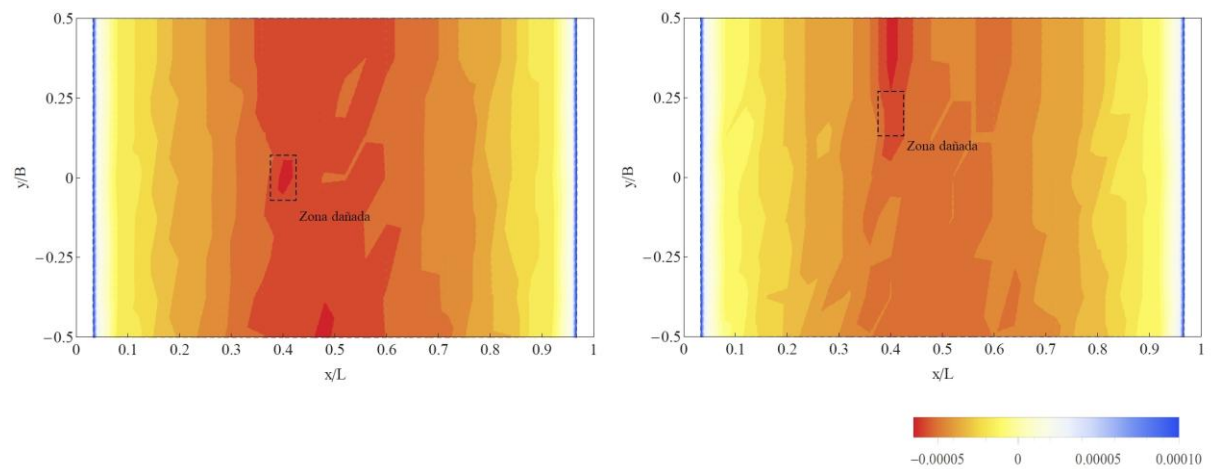


Figura 8: Superficies de coeficientes *wavelet*, para el modelo con distintas posiciones del daño. Caso $a=0.05L$.

3 CONCLUSIONES

En este trabajo, la transformada *wavelet* continua se utilizó con el fin de detectar una zona dañada predefinida, sobre un modelo numérico que simula un puente losa de hormigón pretensado.

La aplicación de la transformada *wavelet* se llevó a cabo a partir de los desplazamientos verticales del modelo, en particular del tablero del puente, al pasar del estado de cargas “1” al estado de cargas “2”. La metodología utilizada permitió evidenciar la presencia de la zona afectada y su localización, con buena efectividad.

Debe tenerse en cuenta que la elección de la función “*mother wavelet*” más adecuada para cada caso, puede requerir de un proceso de comparaciones. En este caso la *wavelet Mexican Hat* mostró buenos resultados para la localización de daño en la estructura.

Por otro lado, es importante mencionar que la metodología requiere de un cierto número de datos a procesar, los cuales a su vez, deben ser medidos con una determinada precisión. Es necesario hallar un equilibrio adecuado entre estas variables, de acuerdo con las magnitudes de los daños que se pretendan identificar y de las posibilidades de medición en la estructura a ser analizada.

4 AGRADECIMIENTO

El presente trabajo fue auspiciado/patrocinado por la Universidad Nacional del Sur (UNS), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Se desarrolló en el Departamento de Ingeniería y en el Instituto de Ingeniería de la UNS.

REFERENCIAS

- Abdulkareem M., Bakhary N., Vafaei M. and Noor N.M., Wavelet-based damage detection technique via operational deflection shape decomposition. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(48):1-7, 2016.
- Andreas U., Baragatti P., Casini P. and Iacoviello D., Experimental damage evaluation of open and fatigue cracks of multi-cracked beams by using wavelet transform of static response via image analysis. *Struct. Control Health Monit.*, 24:e-1902: 1-16, 2017.
- Chang C.C. and Chen L.W., Damage detection of a rectangular plate by spatial wavelet based approach. *Applied Acoustics*, 65:819-832, 2004.
- COMSOL. *Introduction to COMSOL Multiphysics, Version 4.4*. COMSOL, Inc; Burlington, 2013.
- Douka E., Loutridis S. and Trochidis A., Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 40:3557-3569, 2003.
- Jason L., Ghavamian S. and Courtois A., Truss vs solid modeling of tendons in prestressed concrete structures: Consequences on mechanical capacity of a representative structural volume. *Engineering Structures*, 32:1779-1790, 2010.
- Montejo L.A. y Suarez L.E., Aplicaciones de la transformada ondícula (“wavelet”) en ingeniería estructural. *Mecánica Computacional*, XXVI:2742-2753, 2007.
- Ovaneso A.V. and Suarez L.E., Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, 26:39-49, 2004.
- Rao R.M. and Boparadikar A.S., *Wavelet transforms - introduction to theory and applications*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
- Rucka M. and Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration*, 297:536-

550, 2006a.

Rucka M. and Wilde K. Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles. *Engineering Structures*, 28:279-288, 2006b.

Solis M., Algaba M. and Galvín P., Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 40:645-666, 2013.

Yapar O., Basu P.K. and Nordendale N., Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 101:163-178, 2015.

Yepes V., Diaz J., Gonzalez-Vidosa F. y Alcalá J., Caracterización estadística de tableros pretensados para carreteras. *Revista de la Construcción*, 8(2):95-108, 2009.

Wolfram S., *An Elementary Introduction to the Wolfram Language*. Wolfram Media, Inc., 2015.