

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET EN LA DETECCIÓN DE FISURAS EN UNA ESTRUCTURA APORTICADA

APPLICATION OF THE CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM TO THE DETECTION OF CRACKS IN A FRAME STRUCTURE

Alejandro R. Ratazzi^a, Diana V. Bambill^{a,b}, Carlos A. Rossit^{a,b} y Santiago Maiz^a

^a *Departamento de Ingeniería (UNS), Instituto de Ingeniería (II-UNS), Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. alejandro.ratazzi@uns.edu.ar, dbambill@criba.edu.ar, carossit@criba.edu.ar*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Bahía Blanca, Argentina.*

Palabras clave: Pórtico, fisura, vibraciones, sujeción elástica, daño.

Resumen. La aplicación de la Transformada Wavelet (TW) al proceso de señales e imágenes es una herramienta, muy reciente en el tiempo, que permite la detención temprana de fisuras en una estructura. Se basa en un análisis tiempo-frecuencia que proporciona información más detallada acerca de las señales no estacionarias que el tradicional análisis de Fourier, éste sólo brinda una representación de las frecuencias. En la presentación se hace el análisis dinámico de una estructura, mediante la transformada continua wavelet (CWT) con diferentes funciones wavelets madres, con el objeto de caracterizar el daño de un semi-pórtico en L de acero, obteniendo así la localización y magnitud de una fisura. Los resultados del método aplicado se corroboran con valores determinados de manera experimental en un modelo construido en laboratorio. Se obtiene la primera frecuencia natural del semi-pórtico fisurado, modelado en el laboratorio. Se excita al modelo por medio de una bobina y se lo lleva a su primera frecuencia natural. Se obtienen los valores de desplazamientos de un número de puntos del pórtico en L, por medio de una técnica de medición óptica. Luego se construye la curva de deflexión que es analizada mediante la transformada de wavelet.

Keywords: Frame structure, crack, vibrations, elastic hinge, damage.

Abstract. The application of the Wavelet Transform (TW) to the process of signals and images is new tool, very recent in time, for the early arrest of cracks in a structure. It is a time-frequency analysis that provides more detailed information about non-stationary signals than the traditional Fourier analysis, which only provides a frequency representation. In the presentation, the dynamic analysis of a structure is carried out by means of the continuous wavelet transform (CWT) with different mother wavelet functions, with the object of characterizing the damage of a steel semi-gantry in order to obtain the location and magnitude of a fissure. The efficiency of the applied method is compared by values determined experimentally in a model constructed for this purpose. The first natural frequency of the cracked semi-porch, modeled in the laboratory, is obtained. The model is excited by means of a coil and taken to its first natural frequency. The displacement values of a number of points in the frame are obtained by means of an optical measurement technique. Then the deflection curve is constructed, which is analyzed by the wavelet transform.

1 INTRODUCCIÓN

La detección temprana de una fisura en estructuras mecánicas o civiles, es un tema de continuo interés en la ingeniería. Existen una amplia variedad de métodos para detectar daño estructural: Un grupo de estos métodos involucra las características dinámicas de las estructuras. El empleo de las vibraciones para analizar posibles fisuras siempre resultó de interés, debido a que cualquier defecto en la estructura afecta a la rigidez y al amortiguamiento del sistema, pero sin influir significativamente sobre su masa. Esto presupone que varíen las frecuencias naturales, por lo que el análisis modal fue una de las primeras herramientas usadas para detectar daño en estructuras. Sin embargo, los resultados de esas predicciones no han sido los mejores en todos los casos por un conjunto de factores que van desde poca sensibilidad, influencias ambientales hasta dificultades prácticas en las mediciones de frecuencias.

Una herramienta de aplicación reciente es la que se basa en la utilización de la Transformada Wavelet para el procesamiento de señales e imágenes, y se aplica en la detección temprana de fisuras en una estructura.

En el campo de las vibraciones mecánicas, (Newland, 1994) fue uno de los primeros en aplicar TW. (Wang and Deng, 1999), aplican el análisis de la transformada wavelet a la señal de la deflexión de una viga fisurada. (Loutridis, Douka and Trochidis, 2004) y (Douka, Loutridis and Trochidis, 2003), analizan analítica y experimentalmente una viga cantiléver por medio de la TW. (Ovanesova and Suárez, 2004), estudian marcos planos fisurados aplicándoles la TW. (Rucka and Wilde, 2006) analizan vigas y placas fisuradas por medio de una Gaussian Wavelet.

(Xiang and Liang, 2012) desarrollaron un método para detectar fisura basado en la forma modal y las frecuencias de la estructura. (Andreus et al., 2017). En este trabajo se estudia de forma experimental el comportamiento dinámico de una viga cantiléver con el objetivo de detectar una fisura en una posición intermedia genérica. (Mardasi et al., 2017) presentan una detección de grietas altamente sensibles se realiza experimentalmente y se presenta en un haz bajo cierta deflexión mediante la optimización del análisis de wavelet espacial.

En el presente trabajo, por medio de una bobina y un generador de señales se hace vibrar la estructura en su primera frecuencia natural. La estructura corresponde a un semi pórtico metálico fisurado, para distintas profundidades de la fisura. Se obtiene de la forma modal, por medio de una herramienta óptica, y se le aplica la Transformada de Wavelet a la señal producida por las deformaciones de la estructura para identificar las características del daño en cada caso.

2 MODELO EXPERIMENTAL

Se construyeron modelos estructurales experimentales en el Laboratorio de vibración del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur. Se analizaron dos casos correspondientes a dos semi-pórticos confeccionados por una planchuela de acero de 5/8 "x 1/8" ($b=15,875mm$, $h=3,175mm$), cuya sección transversal es de $4,064 \times 10^{-5} m^2$. El empotramiento se materializó por medio de una mordaza, construida con dos planchuelas de acero, sujeta a una mesa de trabajo como vemos en la [Figura 1](#).

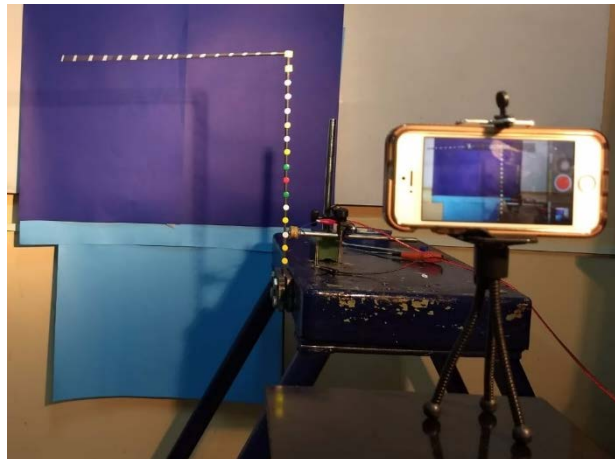


Figura 1: Modelo de la estructura del semi pórtico y el mecanismo de medición.

Se provocó una fisura en la planchuela por medio de un corte con una hoja de sierra de 1mm de espesor. Para poder lograr con mayor precisión la profundidad y uniformidad en el corte, se utilizó una pieza construida de acero duro con una hendidura que nos sirvió de tope de profundidad del corte como vemos en la [Figura 2](#).

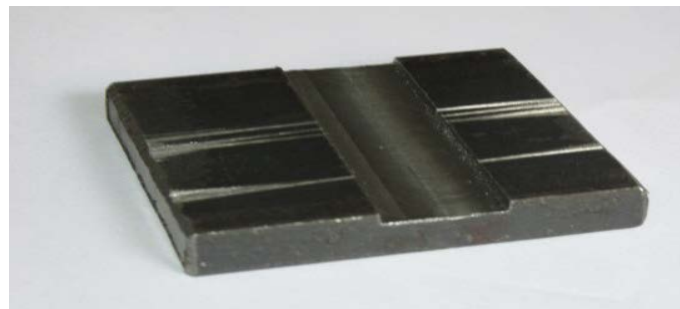


Figura 2: Pieza de acero para generar la fisura.

La planchuela del modelo estructural se encastró en la hendidura y se cortó se produjo el corte transversal hasta la profundidad requerida por el modelo de fisura. En el análisis las hendiduras practicadas en las planchuelas fueron tres diferentes, y representaron en un caso el 25 % de profundidad con respecto al espesor de la planchuela: $h=3,175mm$, en otro caso el 50 % de del espesor y finalmente en el último caso la profundidad es el 75 % del espesor h .

3 DETECCIÓN DE FISURAS POR TRANSFORMADA ESPECIAL DE WAVELET

Como las señales transitorias son más complejas que las señales estacionarias. Para el análisis de las primeras, se utiliza la Transformada de Wavelet. Para el caso de las segundas se analizan a través de la conocida Transformada de Fourier (TF). La Transformada Wavelet permite variar el tamaño de la ventana de análisis. Al igual que la Transformada de Fourier por Intervalos, la TW puede medir las variaciones en tiempo-frecuencia de las componentes espectrales, pero posee una resolución diferente. El análisis por medio de la wavelet permite el uso de intervalos grandes de tiempo en aquellos segmentos en los que se requiere mayor precisión en baja frecuencia, y regiones más pequeñas en donde se requiere información en alta frecuencia. La forma de comprender cómo opera esta transformada es pensar en una señal temporal pasando por varios filtros que dividen a ésta en porciones de alta y baja frecuencia. En la TW aparece un parámetro de escala este es similar a la escala utilizada en los mapas, las escalas grandes pertenecen a vistas globales y las chicas a detalles más refinados.

Comparando en términos de frecuencia, la frecuencia baja corresponde a información global de la señal, mientras que la alta frecuencia corresponde a una información detallada de patrones ocultos de la señal. La TW descompone la señal en pequeñas ondas. Éstas son ondas localizadas, es decir son señales que tienden a cero en un corto tiempo. En resumen, las wavelets son funciones que tienen dos propiedades importantes: oscilación y corta duración.

Una función $\psi(x)$ es una función wavelet si y solo si su transformada de Fourier $\Psi(\omega)$ satisface:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < +\infty. \quad (1)$$

Esta condición implica que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0. \quad (2)$$

El valor de la función $\psi(x)$ localizada en los dominios de tiempo y frecuencia es usada para crear la familia de wavelets de la forma:

$$\Psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{u-x}{s}\right), \quad (3)$$

en donde s y u son números reales que se identifican como los parámetros de escala y traslación respectivamente.

La función original $\psi(x)$ sin escalar ni trasladar se denomina la función wavelet madre. En tanto la función $\Psi_{u,s}(x)$ será la función de comparación que reemplazan a las exponenciales complejas de la transformada de Fourier.

Si tenemos la señal $f(x)$, en donde la variable x es el tiempo o el espacio, podemos definir a la transformada continua de wavelet como la integral del producto de la señal y la función wavelet, tal como sigue:

$$W_f(u,s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{u-x}{s}\right) dx. \quad (4)$$

en donde los $W_f(u,s)$ son los coeficientes de wavelet.

3.1 Adquisición experimental de la línea de deflexión del pórtico fisurado.

El modelo estructural del pórtico descrito, puede verse en la [Figura 1](#), posee marcas equidistantes $5mm$ entre ellas, tanto en el tramo vertical como en el dintel. A esa estructura se le provocó una fisura ubicada a $200mm$ del empotramiento, sobre el parante vertical.

El procedimiento utilizado para poder encontrar la deflexión del pórtico consiste en dos etapas. La primera etapa fue realizada en el laboratorio, se excitó el pórtico con su primera frecuencia natural ($5,25Hz$) por medio de un generador de señales y una bobina, como se muestra en el esquema de la [Figura 3](#). Esta etapa se filmó.

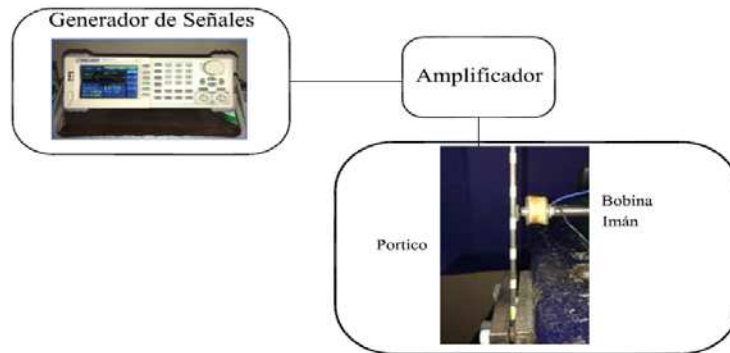


Figura 3: Esquema de distribución de equipamiento para obtener de la deflexión del pórtico en el laboratorio.

La filmación fue en cámara lenta, realizada por un dispositivo que permitió capturar imágenes con una resolución de 1080p HD a 120 cuadros por segundo. La filmación del procedimiento fue analizada con el software Tracker 5.0.5 (Copyright (C) 2018 Free Software Fundación, Inc. <<http://fsf.org/>>). De este video fue posible determinar los máximos desplazamientos de los puntos equidistantes en el pórtico.

En la segunda etapa, por medio de los desplazamientos máximos hallados, se obtiene la elástica del pórtico a través de un algoritmo del software Mathematica 10.0.1.0 por medio de una unión de polinomios de grado tres.

En las Figuras 4, 5 y 6 se presentan las funciones que representan la deflexión del parante vertical del pórtico, para una profundidad de fisura de 25% (0,78mm), 50 % (1,5 mm) y 70 % (2,2mm) del espesor de la planchuela respectivamente.

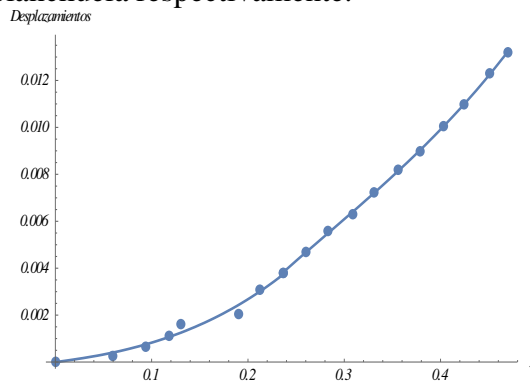


Figura 4: Desplazamientos máximos. Fisura del 25%.

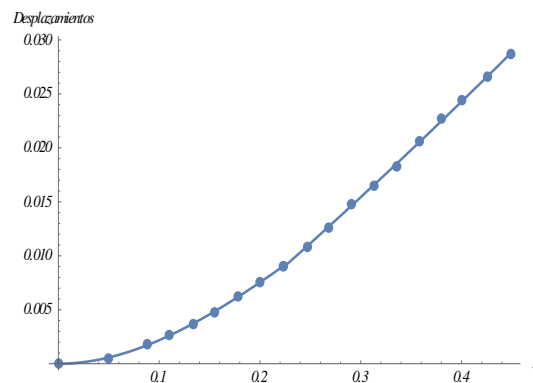


Figura 5: Desplazamientos máximos. Fisura del 50%.

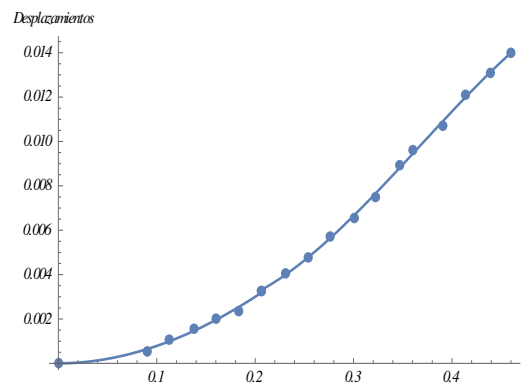


Figura 6: Desplazamientos máximos. Fisura del 70%.

4 APLICACION DE LA TRANSFORMADA CONTINUA DE WAVELET.

Dadas las características de las wavelet con respecto a los parámetros de escala y tiempo, éstas tienen la propiedad de detectar cambios sutiles en una señal. Los máximos desplazamientos del parante vertical del modelo experimental fisurado pueden ser tomados como una señal a la cual podemos aplicarle la TCW. Los cambios repentinos en los coeficientes de wavelet analizados pueden significar la presencia de una grieta o fisura en la estructura.

En el análisis y detección de una singularidad, los momentos de fuga tienen un protagonismo fundamental. Una wavelet tiene n momentos de fuga teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx = 0, \quad k = 0, 1, \dots, n-1. \quad (5)$$

Una wavelet con n momentos nulos es ortogonal a los polinomios de grado $n-1$. Si tenemos una señal que tiene una singularidad en un punto determinado u , esto significa, que la señal no es diferenciable en ese punto, y que los coeficientes de la transformada continua de wavelet toman un valor muy alto.

El tipo de wavelet seleccionada y el número de momentos nulos es fundamental para realizar el análisis por medio de wavelet.

En este trabajo analizamos el pórtico fisurado por medio de la TCW utilizando dos clases de Wavelet Madres.

4.1 Gabor Wavelet

En las Figuras 7, 8 y 9, podemos ver las funciones que representan los coeficientes de la transformada continua y el parámetro de longitud del parante vertical del pórtico, utilizando la función Gabor como Wavelet madre. En la Figura 7 se aplicó la TCW para el pórtico con una impronta de fisura del 25 % del ancho de la planchuela, a pesar de la poca profundidad de la fisura podemos apreciar un cambio sutil en el valor de los coeficientes en el lugar de la fisura. En las Figuras 8 y 9 vemos cómo se incrementa el valor de los coeficientes a medida que aumenta la profundidad de la fisura un 50 % y un 70 % respectivamente.

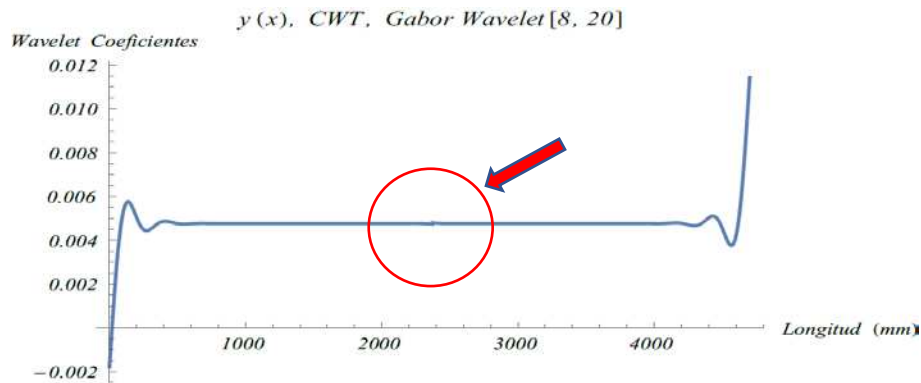


Figura 7: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 25%.

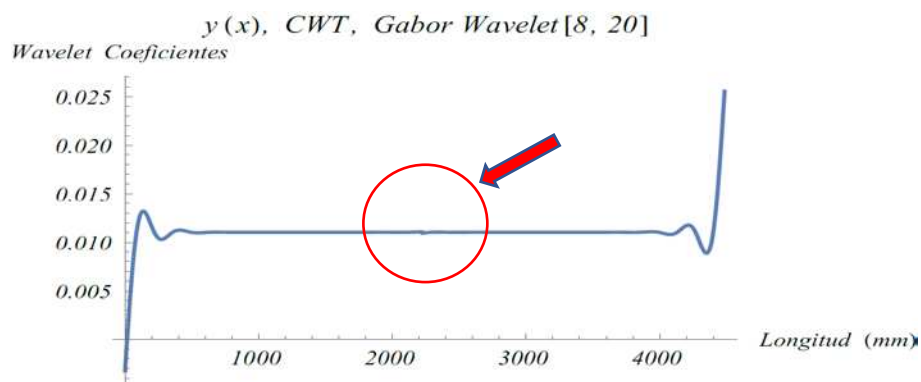


Figura 8: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 50%.

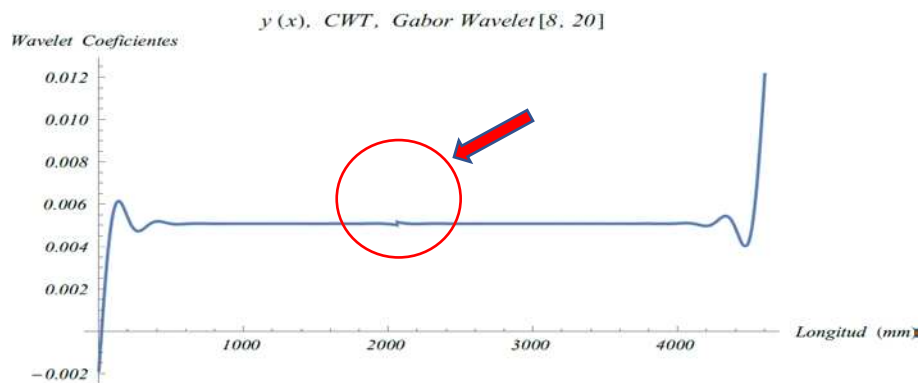


Figura 9: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 70%.

4.2 DGaussian Wavelet

En las Figuras 10, 11 y 12, podemos ver las funciones que representan los coeficientes de la transformada continua y el parámetro de longitud del parante vertical del pórtico, utilizando la función DGaussian como Wavelet madre. La transformada fue aplicada para las tres diferentes profundidades de fisura: 25 %, 50 % y 70 %. Los resultados obtenidos son similares a los expresados para la transformada aplicada con la función Gabor L

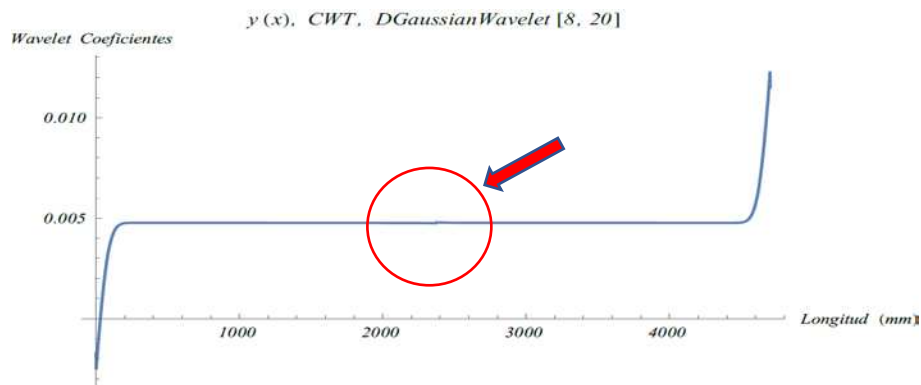


Figura 10: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 25%.

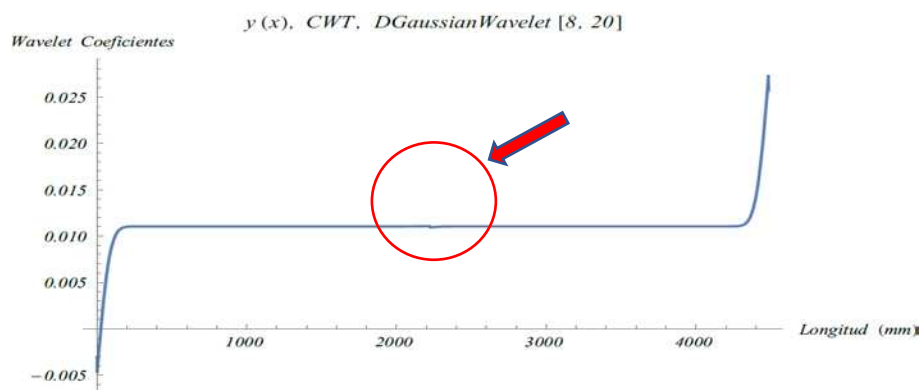


Figura 11: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 50%.

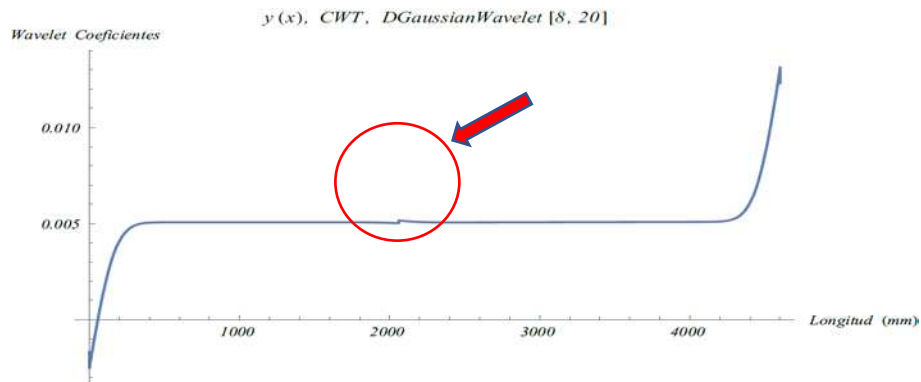


Figura 12: Transformada continua de wavelet de la elástica. Fisura del 70%.

4.3 Análisis de la profundidad de fisura por medio del trazado del escalograma.

El escalograma traza los coeficientes de transformación como filas de rectángulos coloreados, en los que los valores absolutos grandes se muestran más oscuros y cada fila subsiguiente corresponde a especificaciones de índice de las wavelets diferentes. En este gráfico se representa en el eje horizontal la posición longitudinal (mm), en el eje vertical la escala. Los diferentes colores para cada punto representan la magnitud de los coeficientes de Wavelet.

A continuación, en las Figuras 12, 13 y 14, se puede identificar el punto en donde está la fisura en el modelo, por medio del pico que se produce en el escalograma. La wavelet madre

utilizada para realizar los escalogramas fue la Gabor wavelet. Este gráfico nos da información más clara de los diferentes grados de profundidad de la fisura.

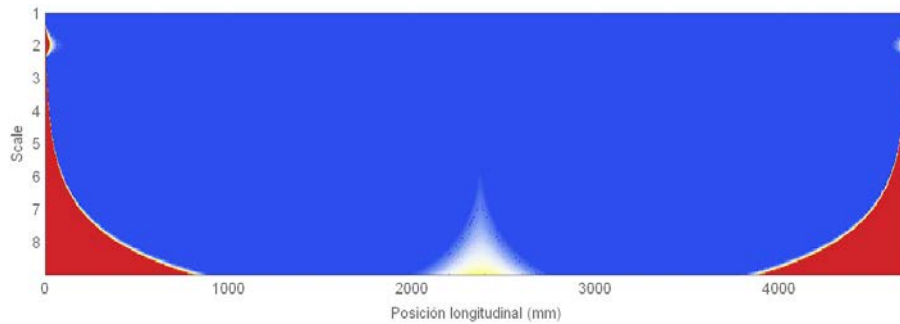


Figura 12: Escalograma Transformada Wavelet. Fisura del 25%.

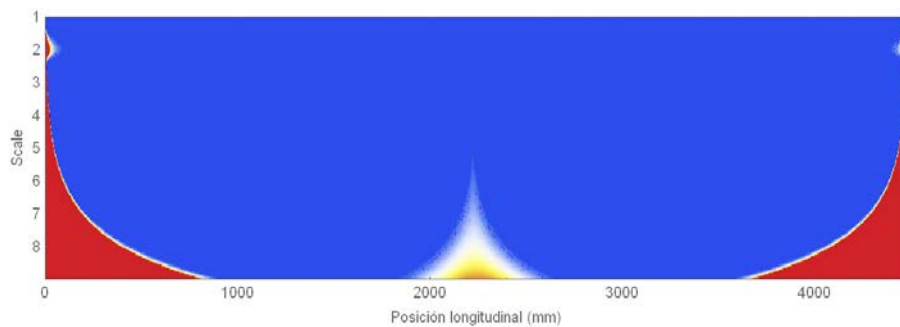


Figura 13: Escalograma Transformada Wavelet. Fisura del 50%.

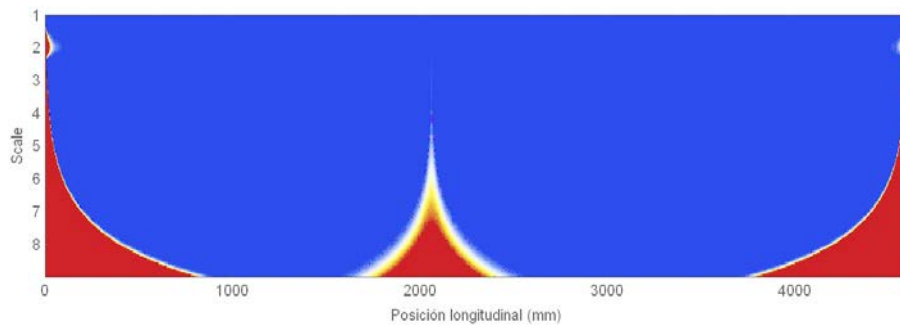


Figura 14: Escalograma Transformada Wavelet. Fisura del 70%.

5 CONCLUSIONES

En el trabajo se detectó la fisura por el método basado en las transformadas continuas de wavelet. La transformada fue aplicada a la forma modal de la primera frecuencia natural de un semi pórtico fisurado de antemano. La señal de la deformada se obtuvo por medio de un método óptico, combinado con un algoritmo desarrollado en el software Mathematica.

Se utilizaron las funciones Gabor y DGaussian como wavelets madres. Analizando los resultados obtenidos, por medio de los gráficos de los coeficientes de la transformada en las curvas y en los escalogramas, vemos que el método da un buen resultado para detectar la posición de una fisura, inclusive para fisuras de poca profundidad (25 % del espesor de la

planchuela: 0,7 mm). También vemos que, los resultados obtenidos con la función Gabor y la función DGaussian, dan respuestas muy similares.

Con respecto al tamaño de la profundidad de la fisura podemos decir que el escalograma de la transformada nos da una idea de la profundidad, aunque no es posible determinar de manera cuantitativa el valor de la misma.

AGRADECIMIENTOS

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.

6 REFERENCIAS

- 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. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(4):1–16, 2017. DOI: 10.1002/stc.1902.
- Douka, E., Loutridis, S., and Trochidis, A., Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 40(13–14):3557–3569, 2003. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00147-1.
- Loutridis, S., Douka, E., and Trochidis, A., Crack identification in double-cracked beams using wavelet analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 277(4–5):1025–1039, 2004. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.09.035.
- Mardasi, A. G., Wu, N., and Wu, Ch., High Sensitivity Crack Detection and Locating with Optimized Spatial Wavelet Analysis. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 11(5):852–857, 2017.
- Newland, D. E., Wavelet Analysis of Vibration, Part I: Theory 1. *Journal of Vibration and Acustics*, 116:409–416, 1994.
- Ovanosova, A. V., and Suárez, L. E., Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Engineering Structures*, 26(1):39–49, 2004. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.08.009.
- Rucka, M. and Wilde, K., Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles. *Engineering Structures*, 28(2):279–288, 2006. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.07.009.
- Wang, Q., and Deng, X. M., Damage detection with spatial wavelets. *International Journal of Solids and Structures*, 36:3443–3468, 1999. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00152-8.
- Xiang, J., and Liang, M., Wavelet-Based Detection of Beam Cracks Using Modal Shape and Frequency Measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(6):439–454, 2012. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2012.00760.x.