

Análisis de señales sísmicas mediante Wavelets y su aplicación para el diagnóstico y rehabilitación del palacio de Riva-Herrera, Santander.

J. P. Fernández¹, P. Gómez², I. Lombillo², A. García-Lengomín¹

¹ Unidad de Modelización Geofísica, Universidad de Oviedo.

² Dpto. de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.
www.gtcd.unican.es

Resumen. El presente estudio se centra principalmente en el análisis de algunas señales sísmicas mediante la transformación por ondículas (wavelet transform, en inglés) para la caracterización estructural del palacio de Riva-Herrera (Santander, Cantabria). En particular, se aplica la denominada CWT (continuous wavelet transform) empleando la ondícula de Morlet para este caso particular, tanto en modo real como en versión compleja. La transformación arroja luz sobre la zonación interna del muro y, por tanto, puede considerarse como una herramienta complementaria a otros tipos de ensayos.

1. Introducción

La herramienta matemática empleada fundamentalmente en el análisis de señales es la transformada de Fourier. Se trata de una herramienta especialmente orientada al análisis de señales estacionarias y que ofrece una resolución total en frecuencias. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes importantes.

El principal problema es que la transformada de Fourier ofrece información de la señal con resolución infinita en términos de frecuencias, pero absolutamente deslocalizada en el tiempo. Es decir, no informa sobre en qué zonas de la señal están presentes o ausentes ciertas frecuencias. Si la señal es estacionaria entonces, por definición, todas sus características (entre ellas el contenido frecuencial) permanecen constantes a lo largo del tiempo y la transformación de Fourier es adecuada. Sin embargo, si la señal presenta fuertes transitorios, como en el caso de pulsos analizados aquí, las características espectrales de la señal pueden cambiar mucho en diferentes porciones de la misma [1].

La transformada continua de ondículas (CWT) es una herramienta que permite caracterizar el contenido espectral de una función, dando información, simultáneamente, del tiempo en el que están presentes estas frecuencias. Para ello, en lugar de expresar la señal como combinación lineal de armónicos puros (senos y

cosenos), la descompone en términos de funciones oscilantes, denominadas ondículas (wavelets), de duración limitada.

Para que una función oscilante sea considerada como ondícula debe cumplir ciertas condiciones de admisibilidad [2]. Así como los armónicos puros en el análisis de Fourier varían en función de la frecuencia las diferentes ondículas empleadas para expresar la información de la señal cambian dependiendo de dos parámetros: Un parámetro de localización, b , y otro de escala, a . De este modo, cualquier ondícula se puede obtener por traslación y escalado de una ondícula de referencia que se suele denominar ondícula madre.

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

Los parámetros a y b representan la escala y la posición temporal respectivamente. Para valores grandes de a , la ondícula es más “ancha” y se “comprime” para valores pequeños de la escala. Por tanto, para escalas grandes, la ondícula es capaz de captar bien el comportamiento de la señal a baja frecuencia, mientras que a escalas pequeñas, quedan bien definidas las frecuencias altas. Existe una relación inversa entre la denominada frecuencia central de la ondícula y su escala.

El contenido frecuencial de cada ondícula se asigna al tiempo b , que es el parámetro de localización de la información dentro de la señal.

La CWT de una señal $f(t)$ se obtiene mediante la correlación de la función en el dominio de tiempo $f(t)$ con todas las ondículas $\psi_{a,b}(t)$ según la siguiente expresión:

$$Wf(a,b) = \langle f, \psi(a,b) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

Los coeficientes así obtenidos contienen la misma información de la señal temporal, pero la muestran separada por situaciones y escalas. La señal puede reconstruirse a partir de la CWT mediante la formula de reconstrucción:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Wf(a,b) \psi_{a,b}(t) da \frac{db}{b^2} \quad (3)$$

Seguidamente se empleará un tipo de ondícula denominada ondícula de Morlet. Su uso ha sido recomendado en varias publicaciones [3,4]

2. Metodología

El palacio de Riva-Herrera en Santander es el edificio civil más antiguo de la ciudad y esta construido fundamentalmente por roca caliza, presentando también en determinados elementos constructivos Arenisca Blanca y Arenisca Roja.

Se ha procedido a la realización de ensayos acústicos, fundamentalmente en la modalidad de impacto eco [5], sobre la superficie de algunos de los muros del Palacio, con la intención de valorar la utilidad preliminar del método para este tipo de estructuras.

Uno de los puntos de ensayo, sobre cuyas señales se trabaja en este artículo, se ilustra en la Fig. 1.



Fig. 1: Ilustración de uno de los muros del Palacio. Véase el operario a la izquierda sujetando el sensor apoyado en la superficie y el martillo en la mano derecha. A la derecha, otro operario sujeta el gel de acoplamiento y coordina el trabajo.

La técnica de Impacto-Eco se basa en la propagación de pulsos transitorios en un medio (considerado como) elástico. El pulso energético, introducido mediante el emisor, se propaga por el medio hasta una posible intercara o discontinuidad, dónde parte de la energía es reflejada y vuelve nuevamente a la superficie de partida. El contraste de impedancia con el aire ocasiona un nuevo rebote y el ciclo se repite (con dispersión y amortiguamiento) varias veces hasta que energía asociada al pulso se extingue, véase esquema en la Fig. 2.

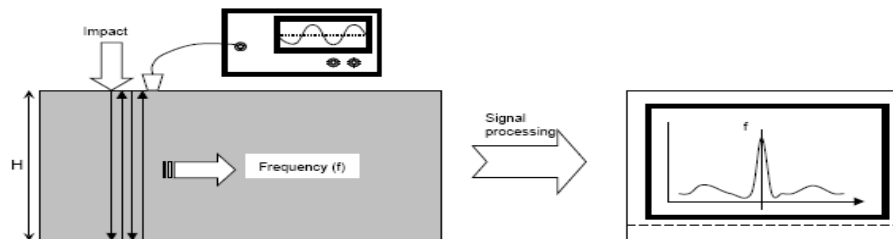


Fig. 2: Impact-Echo. Basics.

El ensayo efectuado ha producido una señal digitalizada a una frecuencia de muestreo de 200 kHz. El muro presenta un grosor de 73 ± 1 cm (puede medirse a través de la ventana). La distancia de impacto entre el martillo y el receptor es de aproximadamente 15 cm.

Una de las señales obtenidas puede verse, en el dominio del tiempo, en la Fig. 3.

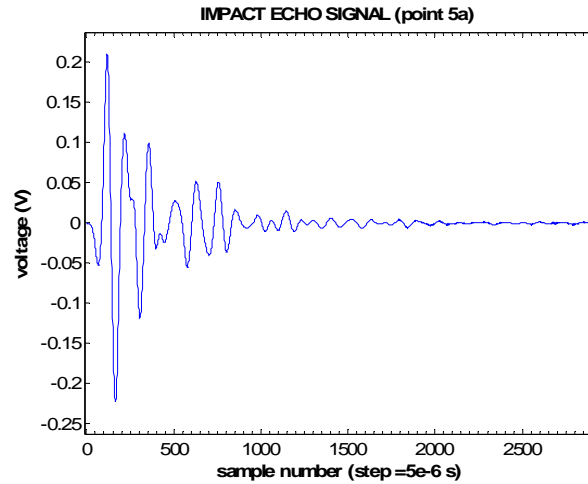


Fig. 3: Ilustración de la señal en el dominio del tiempo. Esta señal se analiza mediante ondículas. Puede verse la onda superficial así como los primeros rebotes del eco.

Para el análisis se empleará la transformada continua en ondículas. La ondícula elegida es la ondícula de Morlet. Se trata de una ondícula que tiene por expresión:

$$\psi(s) = e^{i\eta s} \frac{e^{-s^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \quad (4)$$

Donde los parámetros η y σ son, respectivamente, la frecuencia central de análisis y la escala de la envolvente.

Inicialmente se realiza un análisis continuo con la versión real de la ondícula proporcionada por MATLAB® en la herramienta denominada continuous wavelet analysis. Se obtienen resultados interesantes en términos de zonación y de identificación de frecuencias de resonancia.

A continuación se complementa el análisis con la realización de la transformada compleja continua. La amplitud informa sobre la distribución en tiempos y escalas de la energía y la fase informa sobre las llegadas de pulsos, independientemente de la energía. Es decir, en el diagrama de fase, la intensidad de las llegadas no depende de la energía de la onda y, por eso, incluso llegadas débiles son visibles.

Los dos análisis producen resultados similares, como se verá en la siguiente sección, compatibles con el obtenido mediante análisis de Fourier.

3. Resultados y discusión.

La realización de la transformada continua de ondículas (con Morlet, en versión no compleja) a la señal mostrada en la Fig. 3 produce el escalograma que puede verse completo en la Fig. 4.

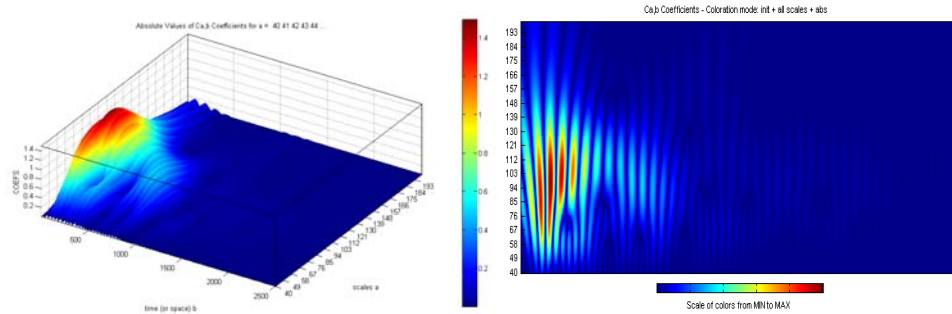


Fig. 4: Ilustración del escalograma de la señal donde puede observarse la concentración de la energía en un determinado rango de escalas y al principio de la señal. A la izquierda, vista tridimensional.

Básicamente se deduce del mismo la acumulación de la energía recibida por el sensor al principio de la señal (aproximadamente hasta la muestra número 1000) y en el rango de escalas comprendido entre 50 muestras y 130. Esto implica longitudes de onda temporales de entre 0.25 y 0.75 ms.

La Fig. 5 presenta un zoom de la zona de la Fig. 4 que concentra máxima energía, para realizar una interpretación más detallada.

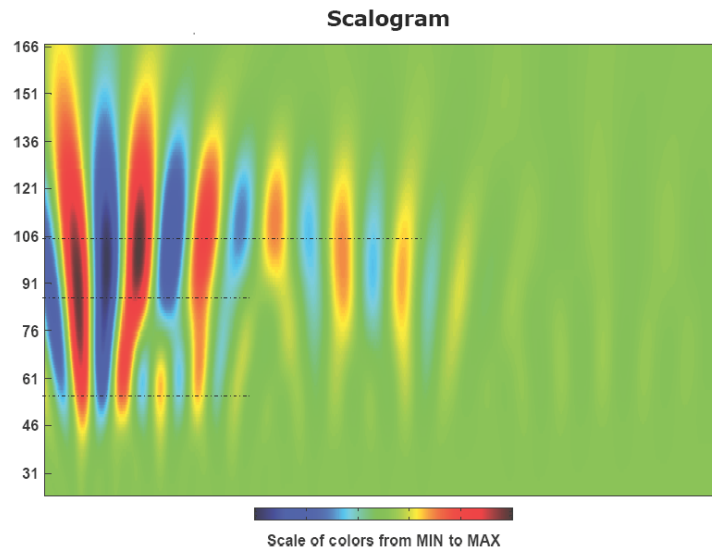


Fig. 5: Obsérvese la periodicidad aparente de las llegadas. Se han señalado tres niveles de escala (o frecuencias) diferentes donde la periodicidad cambia.

Las bandas verticales del escalograma deberían ser interpretadas como zonas de alta correlación entre la señal y la forma de la ondícula. Se utilizarán aquí, por tanto, para identificar la llegada de pulsos al receptor. Los colores contienen información de fase, de manera que las periodicidades deben ser observadas empleando bandas verticales del mismo color (por ejemplo, rojo-anaranjado).

La primera banda roja indica la llegada del primer pulso. Se observa que el primer eco contiene básicamente información de todas las frecuencias mostradas en la imagen.

La primera línea horizontal indicada en la Fig. 5 muestra una escala de ondícula (anchura temporal de la misma) de unas 60 muestras aproximadamente que corresponde a frecuencias del orden de 2620 Hz. Un pico a estas frecuencias aparece igualmente en la transformada de Fourier. Se observan cuatro rebotes con estas características.

La siguiente línea se traza a una escala del orden de 87 muestras, que corresponde a una frecuencia central de unos 1890 Hz. En este nivel, la periodicidad se hace más espaciada y las longitudes de onda son mayores. Dura algo más que las ondas de alta frecuencia del primer nivel y podrían representar reflexiones de un nivel inferior. Las frecuencias detectadas son compatibles con el análisis de Fourier y sugieren que la profundidad es algo mayor.

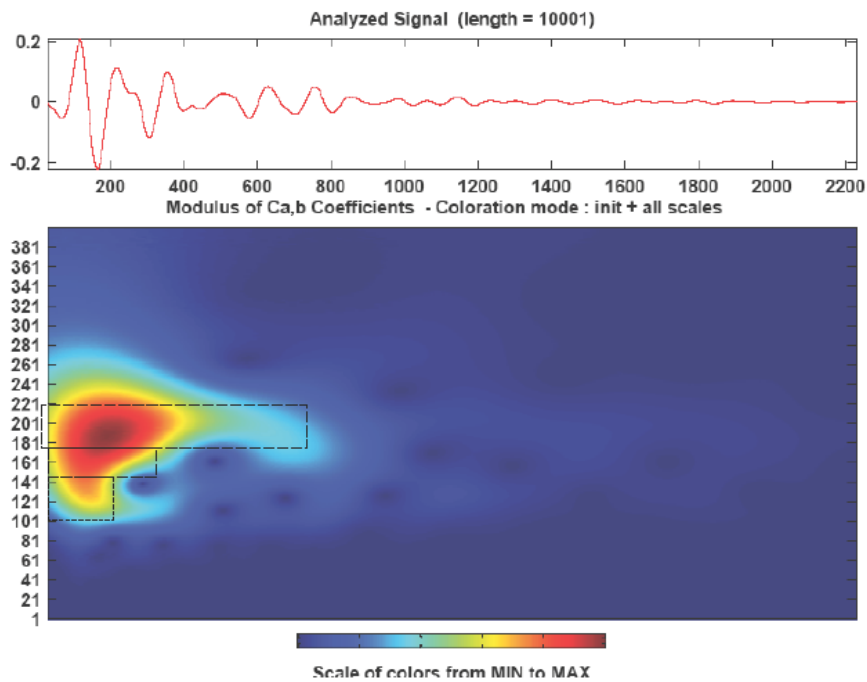


Fig. 6: Arriba, señal procesada. Abajo, escalograma de amplitudes. Obsérvese la concentración de la energía en la zona rojo-amarillenta. Se han identificado tres niveles de diferente duración.

El escalograma, por lo tanto, sugiere una zonación en tres niveles. Los dos más profundos estarían más cercanos entre sí que el primero, suponiendo una cierta homogeneidad en las velocidades.

El tratamiento de la señal mediante la ondícula compleja de Morlet confirma y amplía estas intuiciones. La transformación proporciona el escalograma de amplitudes y el de fases. El escalograma de amplitudes puede visualizarse en la Fig. 6. Contiene información sobre la distribución de la energía en el tiempo y en las escalas. Debe tenerse en cuenta que, dado que la ondícula es diferente, las escalas no son idénticas a las anteriores. Pero en términos de frecuencia, los resultados sí son comparables.

El escalograma de amplitudes informa sobre la concentración de la energía constructiva en la señal recibida. Se ha identificado un rango entre las escalas 101 y 241 fuera del cual la energía que llegue, aunque pueda poseer periodicidad, no contribuiría en términos interpretativos. Asimismo se han identificado tres zonas diferenciadas por su distinta duración en el tiempo. Los resultados son compatibles con el análisis anterior y muestran que las tres frecuencias identificadas están presentes en intervalos de distinta duración.

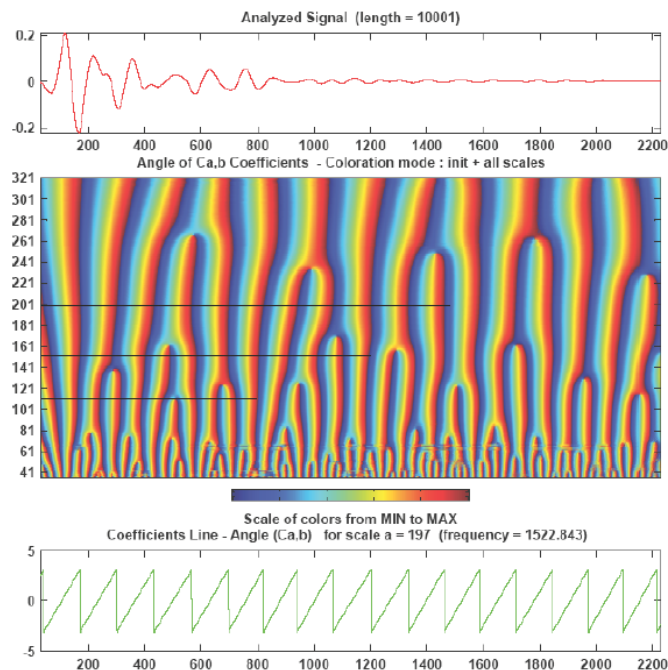


Fig. 7: Arriba, señal procesada. Medio, escalograma de fases. El valor cero corresponde a una coloración de transición entre verde y azul. Véase que bandas verticales con esa coloración aparecen con profusión. Abajo, corte a la frecuencia 1522, que permite el cálculo más preciso de dicha periodicidad.

En la Fig. 7 se muestra el escalograma de fases. La idea es la siguiente: la llegada de ecos consistentes al receptor en un instante determinado implica la llegada EN FASE al receptor de todas las frecuencias relevantes en ese momento. El problema de identificación de llegadas se transforma en un problema de localización de instantes donde la fase se anule en un rango apreciable de frecuencias. Se formarían así, nuevamente, bandas verticales cuya periodicidad podría emplearse para calcular la extensión temporal de las diferentes capas.

Aunque la Fig. 7 no permite la realización de los cálculos de viso, sí la ilustración de la metodología. La energía relevante se halla entre las escalas 101 y 241, como antes se ha mencionado. Sin embargo, la información de fase se presenta con igual intensidad independientemente del nivel energético, lo cual permite considerar llegadas débiles.

Restringiéndose a la zona relevante se pueden identificar tres niveles, caracterizados por tres frecuencias diferentes (Tabla 1). A frecuencias intermedias ocurren convergencias entre bandas verticales lo cual debe interpretarse como interferencia desfasada hasta que se llega a un nuevo nivel donde nuevamente se entra en fase.

Tabla 1: Identificación de niveles.

Escala	Frec. (Hz).	Período temporal en número de muestras (promedio)
108	2770	70
155	1935	110
201	1515	130

Los períodos temporales pueden ser convertidos en tiempo multiplicando por el tamaño de paso: 5 microsegundos. Asumiendo correcta la identificación de tres niveles, el primero, más superficial tendría un tiempo de tránsito simple de entre 0.18 y 0.20 ms de media; la segunda capa de 0.1 ms y la tercera, más profunda de 0.05-0.08 ms. Por tanto estarían en la proporción 2:1:0.8.

Si se considerase una desviación pequeña de la homogeneidad, la proporción temporal podría traducirse en proporción espacial y obtendríamos una lámina externa gruesa y dos internas más delgadas y aproximadamente iguales.

Una inspección en otro muro similar del palacio, ilustrada en las Fig. 8 y 9, muestra cómo estas conclusiones son sensatas.

4. Conclusiones.

En este estudio se ha visto como la transformada CWT puede representar una alternativa al clásico análisis de Fourier corroborando y ampliando sus conclusiones, cuando se pretenden estudiar estructuras construidas por el método de impacto eco.

El campo de actuación abierto es grande. Los materiales ensayados son complejos y será imprescindible el desarrollo de herramientas de modelización para afinar la interpretación. Sin embargo, las aportaciones del método en términos de zonación parecen relevantes y ponen las bases para otros estudios realizados en modo diferencial, esto es, comparación entre diferentes puntos de una línea o área de estudio.

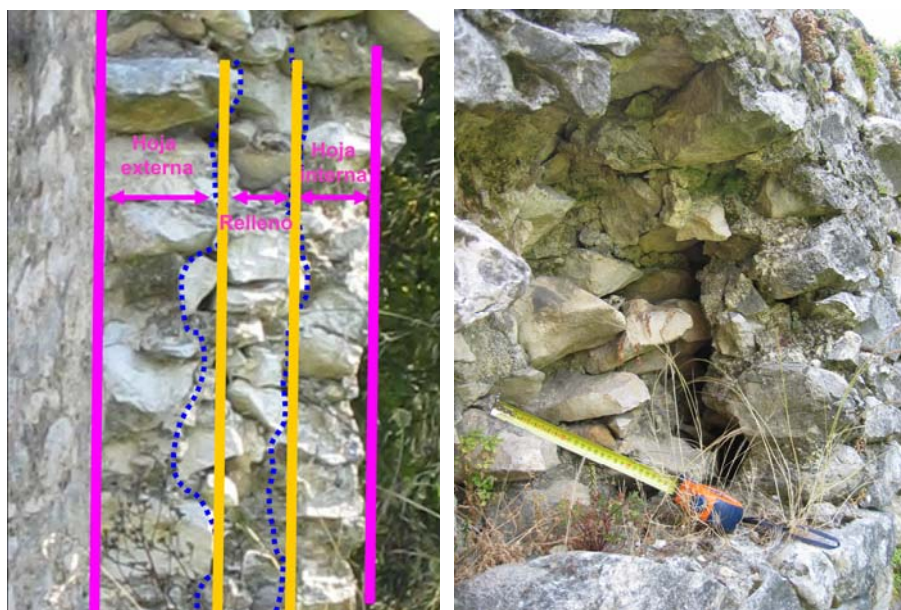


Fig. 8 y 9: Esquema de distribución interna de materiales en uno de los muros.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Excmo. Ayuntamiento de Santander la buena disposición mostrada en relación a la realización de los ensayos relacionados en el Palacio de Riva-Herrera.

Referencias

1. Fernández Álvarez, J.P., Fernández Muñiz, M.Z., Fernández Martínez, J.L., Sirieix, C., (2007), Aplicaciones de la técnica de las ondiculas a los problemas medioambientales, in 12th internacional congress on Energy and Mineral Resources.
2. Mallat, S.A;(1998). A wavelet tour of signal processing, Academic Press.
3. Xing-Gong, Li and Tadeusz, J.U., (2000) Multiscale trace decomposition and attribute analysis using the Morlet wavelet transform. Report UBC.
4. Po-Liang, Yeh, Pei-Ling, Liu., (2008). Application of the wavelet transform and the

- enhanced Fourier Spectrum in the impact echo test. NDT&E International, v.41, 382-394.
5. Sansalone & Streett. 1997. Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of concrete and Masonry, Bullbrier Press.