



# ENSAYO DE VIBRACIONES PARA EVALUACIÓN DE DAÑO EN DISIPADORES DE ENERGÍA USADOS EN EDIFICACIONES SISMORRESISTENTES

Autores: A. R. Molina<sup>1</sup>, E. Suarez<sup>1</sup>, A. Benavent-Climent<sup>3</sup>, A. Roldán<sup>2</sup> y A. Gallego<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Granada

<sup>2</sup>Dpto. de Electrónica, Universidad de Granada

<sup>3</sup>Dpto. de Mecánica de Estructuras y Construcciones Industriales, Universidad Politécnica de Madrid

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una técnica de inspección de disipadores de energía WPD usados en edificaciones sismorresistentes. El objeto de estos dispositivos es liberar la energía del sismo para así mantener protegida la estructura principal del edificio. Actúan, pues, como unos "fusibles sísmicos" del edificio. En particular, se propone un índice fiable para la evaluación de daño de dichos dispositivos, con objeto de poder decidir automáticamente cuando deben ser reemplazados por unos nuevos, una vez que hayan agotado su capacidad de protección. La técnica y el nuevo índice se han evaluado en dos estructuras de hormigón armado a escala y protegidas con disipadores WPD, las cuales se sometieron a diferentes simulaciones sísmicas en la mesa vibrante de la Universidad de Granada. En concreto,

se ensayaron hasta el colapso dos pórticos de diferente tipología constructiva. Tras cada simulación sísmica a la que fue sometida cada estructura, se realizó un ensayo de vibraciones de los elementos básicos que conforman los WPD, recogiendo las señales respuesta de los mismos a una vibración de ruido blanco, y analizándose mediante la "Transformada Wavelet". Con este análisis, y extrayendo unos ciertos coeficientes en el dominio de la energía, se ha definido un nuevo índice de daño denominado "Wavelet Energy Ratio", WER. Se ha comprobado la eficacia de este índice para cuantificar el daño del WPD sufrido por plastificación originada por la carga sísmica aplicada, y también por una modificación de las condiciones de contorno entre los componentes de los disipadores.

## Introducción

A lo largo de la historia, España, con un riesgo sísmico bajo-moderado, ha sido objeto de terremotos de cierta severidad. Recientemente, la ciudad murciana de Lorca sufrió un terrible terremoto debido al cual el 80% de las edificaciones resultaron dañadas y un gran número de ellas demolidas.

Con el fin de reducir el daño que causan los movimientos sísmicos a los edificios, se viene estudiando en diferentes países la implantación de diferentes soluciones constructivas que reduzcan la vulnerabilidad

de las edificaciones en zonas de riesgo sísmico. En los últimos años ha aparecido una tendencia denominada "Proyecto Basado en Prestaciones (PBP)", el cual va ganando terreno al Proyecto Básico sismo-resistente convencional [1]. Este nuevo sistema, trata de dotar a la estructura de capacidad para la disipación de energía y, al mismo tiempo, proteger los elementos constructivos principales de la estructura frente al daño.

Uno de los elementos que conforman el PBP es la utilización de disipadores de energía en las estructuras de los edificios. Entre los distintos disipadores que existen disponibles en el mercado, este trabajo



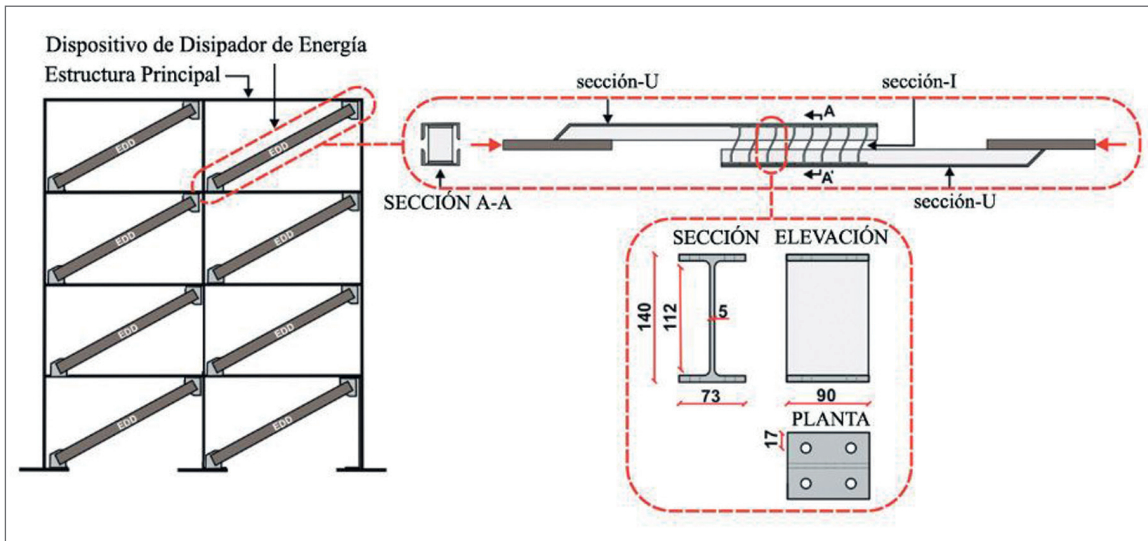


Figura 1. Funcionamiento del disipador WPD

se centra en los denominados histeréticos, los cuales están basados en la deformación plástica de metales usados tradicionalmente en la construcción (concretamente acero).

Dentro de la Universidad de Granada, el grupo de investigación dirigido por el Dr. Amadeo Benavent-Climent, ha venido desarrollando disipadores de energía histeréticos de bajo coste. Uno de los resultados de sus investigaciones ha sido la patente del disipador WPD (Web Plastifying Damper). Estos disipadores, gracias a la plastificación de sus componentes, constituyen una forma eficaz de disipar gran parte de la energía que un sismo transmite a una estructura, aprovechando las propiedades histeréticas y de deformación plástica de los perfiles de acero. En particular, los WPD están formados por varias secciones de perfil estructural IPE (secciones-I), que se ensamblan con dos segmentos de perfiles UPN, de forma que estos últimos se conectan a la estructura principal del edificio como se muestra en la Figura 1 [1-4]. Las secciones-I constituyen el elemento disipador propiamente dicho, mientras que los segmentos de UPN sólo tienen la función de conexión entre el disipador y la estructura.

En concreto, las secciones-I usadas en este trabajo se obtuvieron cortando un perfil estructural de la serie IPE, tienen una longitud de 90 mm y su sección transversal está formada por dos alas y el alma. Estas secciones se unen a los segmentos de UPN mediante 8 tornillos de alta resistencia fijados con un par de apriete fijo de 67 N·m.

En una estructura porticada los disipadores WPD se colocan de forma diagonal en el marco de la misma, sin que se precise de estructura secundaria auxiliar alguna (véase la Figura 1). Este disipador no tiene necesariamente por qué instalarse en construcciones de nueva planta, sino que puede utilizarse para reacondicionar sísmicamente edificios ya construidos, algo que resulta de enorme interés en la situación actual de la construcción en nuestro país.

Cuando el disipador WPD se somete a deformaciones impuestas en su eje longitudinal, el alma de las secciones-I se deforma a flexión, como se puede ver en la Figura 2. La energía se disipa cuando plastifica el metal al deformarse la sección-I en la zona de unión entre las alas y el alma [3].

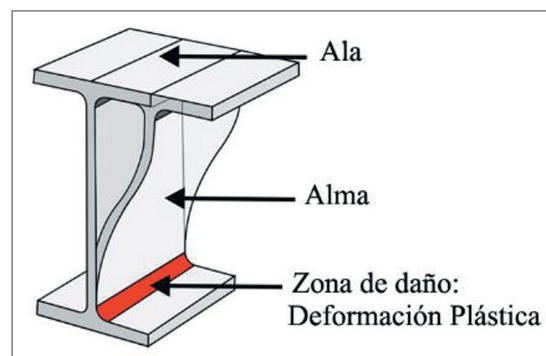


Figura 2. Zona de deformación plástica de las secciones-I

Las secciones-I pueden disipar la energía transmitida por pequeños y medianos terremotos (con una probabilidad de ocurrir en España de un 50% y un 20% cada 50 años respectivamente). Estos tipos de



temblores no suelen agotar la capacidad de disipación de los disipadores, aunque sí que producen daños en ellos. A pesar de esto, los disipadores WPD no necesitan ser reemplazados tras los pequeños, medianos o incluso tras un intenso terremoto, siempre que se asegure que su estado de salud continúe proporcionando seguridad al edificio. En caso de agotar totalmente la capacidad de deformación plástica de las secciones-I (es decir, su capacidad de disipación de energía), la estructura principal quedaría desprotegida frente a la posibilidad de que ocurriera un nuevo sismo, lo que podría derivar en su colapso y derrumbamiento.

El problema técnico que se presenta es que la evaluación del agotamiento por plastificación de las secciones-I no puede realizarse mediante el método de inspección visual, ya que el agotamiento del acero no se manifiesta visualmente hasta etapas de daño muy avanzadas, y además el acceso a los mismos sería muy complicado y costoso. Algo parecido ocurre con otros métodos tradicionales de END. Por lo tanto, se hace necesario estudiar el nivel de agotamiento de las secciones-I mediante ensayos que analicen cómo varían las características de dichas secciones al aumentar el nivel de daño en las mismas de una forma fiable y de fácil ejecución, con objeto de detectar la aparición de daño, evaluar su intensidad, y decidir sobre el consecuente reemplazo de las secciones-I dañadas.

En este trabajo se propone la realización de un ensayo de vibraciones con un sistema actuador/sensor, para evaluar el daño de las Secciones-I de los disipadores. Este ensayo se ha validado en modelos a escala de estructuras de hormigón armado con disipadores WPD sometidos a simulaciones sísmicas con distintos

niveles de intensidad mediante la mesa sísmica de la Universidad de Granada.

## Ensayo de vibraciones

El ensayo de vibraciones no necesita estar registrando datos en el momento del sismo, sino que se realiza cuando el usuario desea conocer el estado de salud de los disipadores WPD instalados en su edificio. En este sentido, su filosofía es la misma que la de otros métodos clásicos de END. Además, el coste de instrumentación para su realización es muy bajo, lo que permite extender su uso para explotación comercial en el futuro.

El objetivo es obtener la respuesta de vibración de una sección-I, cuando a ésta se le excita mecánicamente mediante un ruido blanco a través de unos transductores piezoeléctricos. Tanto la excitación como la respuesta son transmitidas (actuador) y recogidas (sensor) mediante elementos piezoeléctricos tipo parche (PZT).

Como resultado de la realización de este ensayo a distintas secciones-I, se obtienen una serie de señales de respuesta que se analizan mediante la "Transformada Wavelet". Posteriormente, se compara la respuesta de una sección-I sin daño (sección de referencia) con una sección-I de las mismas características en la que se quiere determinar el nivel de daño (sección inspeccionada), obteniéndose así el nivel de daño de la sección-I inspeccionada, a través de un índice adecuadamente desarrollado.

El esquema de flujo del ensayo de vibraciones se muestra en la Figura 3.

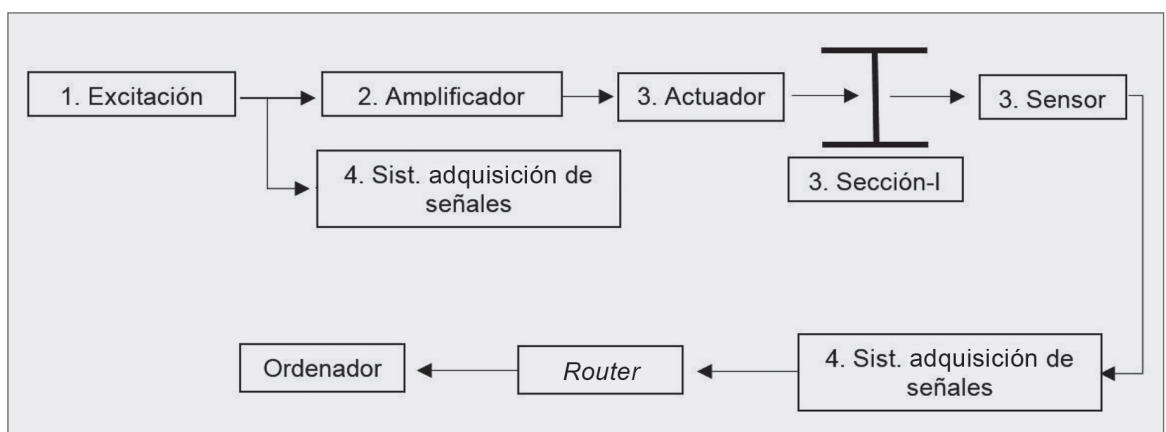


Figura 3. Esquema de flujo del ensayo de vibraciones



## 1. Excitación

Para el ensayo realizado se generaron excitaciones de tipo ruido blanco, ya que poseen toda la gama de frecuencias en un rango determinado, resultando óptimo para detectar las frecuencias de resonancia de las secciones-I. La mayoría de equipos que realizan esta función pueden también generar excitaciones con un voltaje de hasta 10 Vrms.

## 2. Amplificador

El amplificador permite hacer un control de la ganancia. En el caso del ensayo realizado, se multiplicó la señal de excitación generada hasta x20, llegando a proporcionar valores de voltaje de 200 V. El amplificador recibe la excitación directamente del equipo encargado de generarla. La señal, una vez amplificada, se transmite directamente al actuador colocado en la sección-I.

## 3. Sección-I instrumentada

La instrumentación de la sección-I consta de tres partes: cable de audio, transductores piezoeléctricos (actuador y sensor) y la propia sección-I.

**Cable de audio.** Se utiliza cable de audio tanto para realizar la conexión entre el actuador y el amplificador como para conectar el sensor con la caja de conexiones que posteriormente se conecta al equipo de registro de las señales, La Figura 4 muestra la unión del cable con el actuador piezoeléctrico (izqda.) y la conexión de 3 pines que se une a la caja de conexiones (dcha.).

**Transductores piezoeléctricos.** Cada una de las secciones se instrumentó con 2 transductores piezoeléctricos, uno ejerce de actuador y otro realiza la función de sensor [3]. En la Figura 5 se muestran los transductores utilizados como sensores a la izquierda, y a la derecha, los utilizados como actuadores.

**Sección-I.** Teniendo en cuenta que el objeto de este trabajo son los disipadores de energía tipo WPD y que estos sufren deformaciones importantes en los ensayos dinámicos de simulación sísmica, se determinó que la zona óptima para la fijación del sensor y

del actuador era la zona de la parte central del alma, enfrentados el uno con el otro, como se observa en la Figura 6.

## 4. Sistema de adquisición de señales

Es el encargado de recoger la señal del sensor y, mediante un software apropiado, realizar una exportación de datos a cualquier ordenador doméstico a formatos con los que se pueda abordar su análisis. Como sistema de adquisición se usó el equipo PULSE de Brüel&Kjaer.

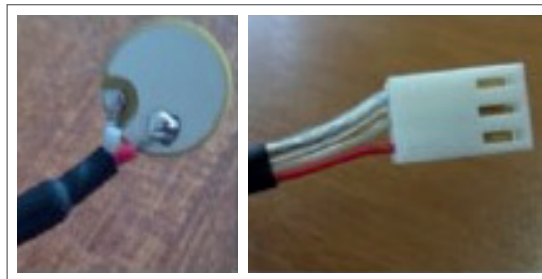


Figura 4. Unión del cable de audio con el sensor (izq.) y con la conexión de 3 pines que va unida a la caja de conexiones (dcha.)

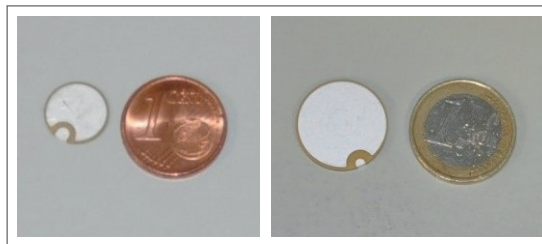


Figura 5. Sensor (izq.) y actuador (dcha.) usados en la instrumentación de los perfiles para el ensayo de vibraciones

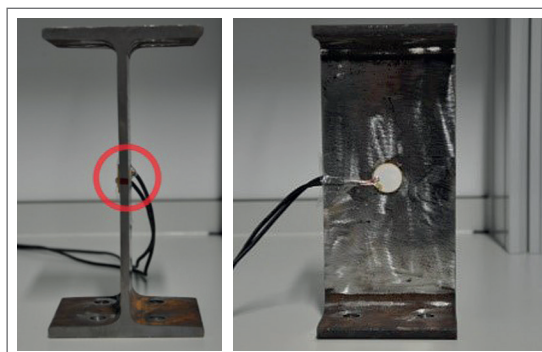


Figura 6. Zona de fijación de sensor/actuador a la sección-I para su instrumentación



## Modelos de ensayo

Los ensayos de vibraciones se realizaron sobre disipadores WPD dañados por dos causas distintas:

### 1. Agotamiento por plastificación en las secciones-I producida por cargas sísmicas

Para la evaluación de este tipo de daño en estructuras con disipadores WPD, se instalaron dichos disipadores en dos estructuras de hormigón armado que se sometieron a simulaciones sísmicas en la mesa vibrante de la Universidad de Granada. Tras cada simulación sísmica, a los disipadores se les realizó el ensayo de vibraciones anteriormente descrito, obteniéndose las señales de respuesta para cada nivel de daño.

Las simulaciones sísmicas consistieron en la reproducción del acelerograma N-S del terremoto generado en Campano-Lucano (Italia) y registrado en la estación de Calitri con una aceleración pico de 0,16 g. La primera simulación sísmica reproduce dicho terremoto con la aceleración registrada, y se ha denominado C100. El valor numérico indica el porcentaje al que se escaló la aceleración; C100 significa que la aceleración registrada en Calitri se multiplicó por 1; C200, por 2, y así sucesivamente. Posteriormente, la aceleración se fue aumentando para provocar mayor nivel de daño en la estructura, como se muestra en la Figura 7. Las Tablas

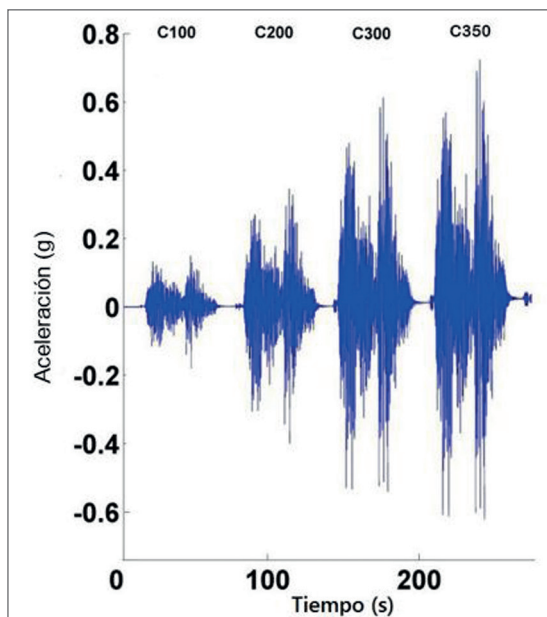


Figura 7. Aceleración de los distintos sismos aplicados a la estructura FD

1 y 2 muestran cómo cada simulación se realizó sobre la misma estructura ya ensayada anteriormente, por lo que el daño fue acumulativo.

NIVEL DE DAÑO	100%	200%	300%	350%
C100	X			
C200	X	X		
C300	X	X	X	
C350	X	X	X	X

Tabla 1. Acumulación de daño en los ensayos de simulación sísmica en la estructura porticada de HA

NIVEL DE DAÑO	100%	200%	300%	400%	500%	600%
C100	X					
C200	X	X				
C300	X	X	X			
C400	X	X	X	X		
C500	X	X	X	X	X	
C600	X	X	X	X	X	X

Tabla 2. Acumulación de daño en los ensayos de simulación sísmica en la estructura reticular de HA

Más concretamente, las estructuras ensayadas fueron las siguientes [7]:

- Estructura porticada de HA, FD (Frame with Dampers). La estructura cuenta con cuatro pilares. En ella se colocaron cuatro disipadores de energía: dos en planta baja formados por 10 secciones de IPE-140 y dos en planta primera, formados por 8 secciones del mismo tipo. En esta estructura se instrumentaron 6 secciones-I en total, sobre las que se realizaron los ensayos de vibraciones correspondientes.
- Estructura reticular de HA, SD (Slab with Dampers). Como puede verse en la Figura 8, la estructura ensayada estaba formada por tres pilares y dos disipadores, uno en planta baja y otro en planta primera. El disipador de planta baja está formado por 20 secciones IPE-140, de las cuales 3 estaban instrumentadas con sensores piezoeléctricos. En el disipador de planta alta se instrumentaron 4 secciones de las 15 que lo formaban en total.



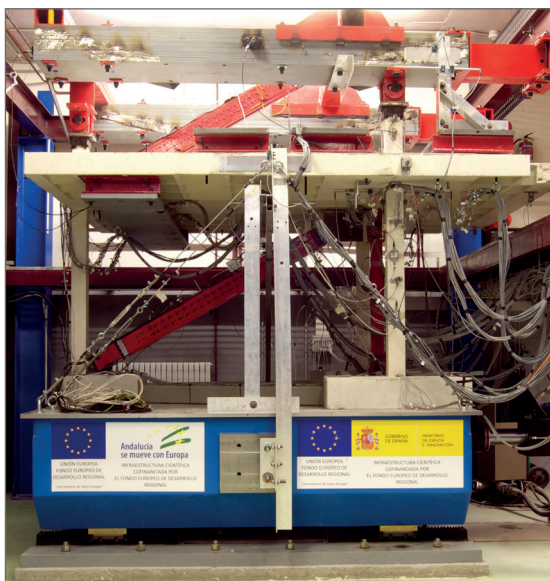


Figura 8. Estructura SD sobre la mesa sísmica

## 2. Cambio en las condiciones de contorno de los disipadores WPD

Puede ocurrir que durante un terremoto las condiciones de fijación de las secciones-I a las barras auxiliares UPN (4 tornillos con un par de apriete de 67 N·m en cada ala de la sección-I) se modifiquen, bien por la pérdida del par de apriete o bien por el deterioro de algún tornillo. Con objeto de comprobar si el cambio de las condiciones de contorno puede ser detectado mediante esta técnica, se implementaron tres condiciones de contorno diferentes:

- **BC1:** condición de contorno 1, cuyo aspecto se muestra en la Figura 9 a la izquierda. Cuatro tornillos con un par de apriete de 67 N·m en cada ala de la sección-I.
- **BC2:** fijación de las secciones-I a los segmentos UPN mediante cuatro tornillos de acero de alta resistencia en cada ala del perfil con un par de apriete de 40 N·m, como puede verse en la Figura 9 a la izquierda.
- **BC3:** fijación de las secciones-I a los segmentos UPN sólo mediante dos tornillos de acero de alta resistencia en cada ala del perfil, como se muestra en la Figura 9 derecha, con un par de apriete de 67 N·m.

## Análisis de las señales de vibraciones

### 1. Introducción sobre teoría de la "Transformada Wavelet"

La "Transformada Wavelet" es una herramienta matemática de análisis y representación de señales en tiempo/espacio - frecuencia, cuyas propiedades tienen una gran aplicación en física, ingeniería, economía, procesamiento de señales y aplicaciones matemáticas [5].

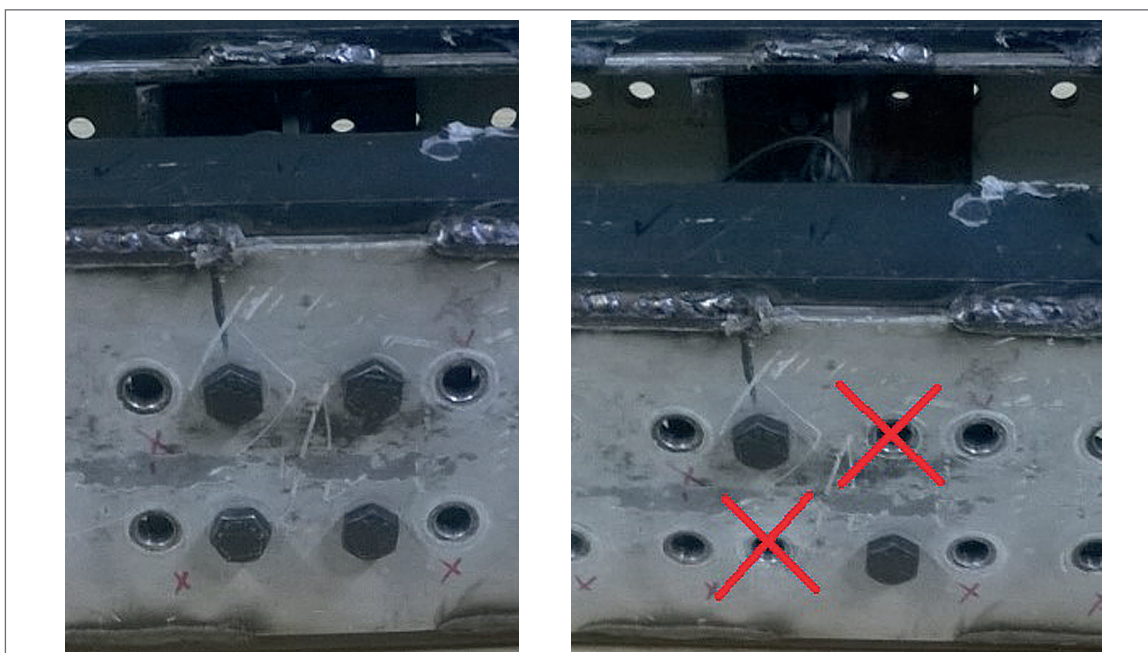


Figura 9. Condiciones de contorno 1 y 2 (a la izquierda) y condición de contorno 3 (a la derecha)



Se basa en el análisis de una señal mediante el cálculo de los "coeficientes wavelet", que se obtienen comparando intervalos de la señal a analizar con funciones preestablecidas denominadas "wavelet madre", y extrayendo el coeficiente de correlación que existe entre ambas. Las "wavelet madre" son funciones preestablecidas y normalizadas que se agrupan en familias. Existen varias familias de "wavelets madre", cada una de ellas con unas características que las hacen idóneas para un tipo de análisis u otro. Para el análisis de las señales obtenidas en el ensayo de vibraciones, mediante pruebas de ensayo y error, se determinó que la "wavelet madre" idónea para dichas señales era la familia "Daubechies", concretamente la "wavelet madre Daubechies" de orden 5 ('db5').

La aplicación de la "Transformada Wavelet" a una señal consta de los siguientes pasos:

1. Selección de una "wavelet madre".
2. Cálculo de los coeficientes  $C$  que representan el grado de correlación de la "wavelet madre" con un intervalo de tiempo determinado de la señal. Cuanto más altos sean los coeficientes  $C$ , más similares serán la "wavelet madre" y la señal a analizar.
3. Desplazar la "wavelet madre" a lo largo de la duración completa de la señal, y repetir los pasos 2 y 3 hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal.
4. Repetir el proceso anterior con el resto de las escalas, asociadas a bandas de frecuencia.

Dentro del análisis de señales usando la "Transformada Wavelet", existen dos versiones diferenciadas:

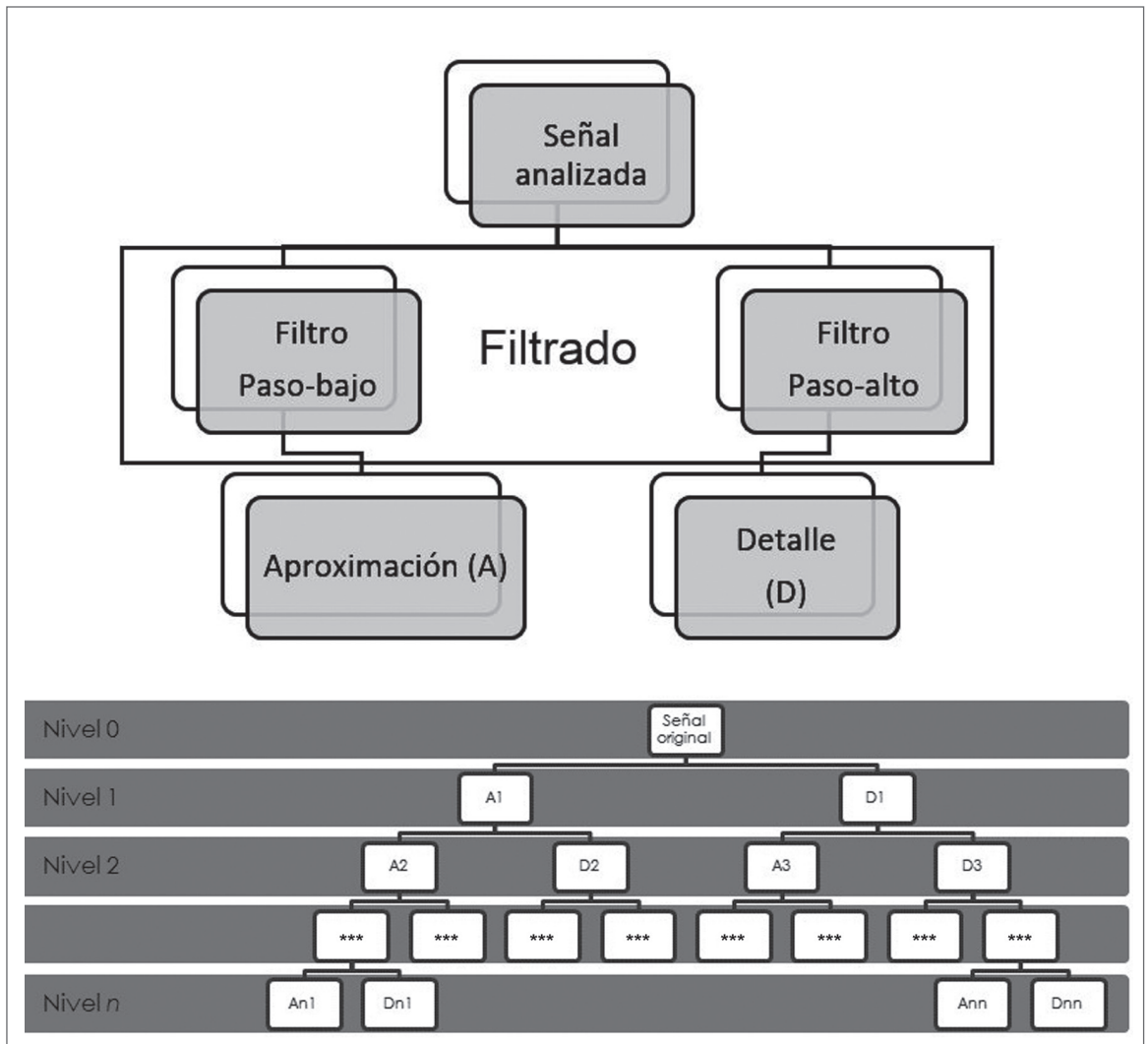


Figura 10. Proceso de filtrado de WPA



la "Transformada Wavelet Continua" (CWT), y la "Transformada Wavelet Discreta" (DWT). Véase la siguiente ecuación:

$$WT(a, b; \Psi) = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

donde:

- a: es la escala de la "wavelet madre".
  - b: es la posición de la ventana analizada.
  - $\Psi$ : es la función "wavelet madre".
  - $s(t)$ : es la señal a analizar en función del tiempo.
- En nuestro caso la señal de respuesta en el sensor.

Para la extracción del índice "Wavelet Energy Ratio" (WER) se ha usado una aplicación de la "Transformada Wavelet Discreta" denominada "Wavelet Packet Analysis" (WPA), la cual realiza una descomposición de la señal en sucesivos niveles, dando como resultado una serie de sub-señales como se muestra en la Figura 10 (abajo), obtenidas aplicando filtros paso bajo y paso alto, dando señales de Aproximación (bajas frecuencias) y de Detalle (altas frecuencias) como se puede ver en la Figura 10 (arriba).

De esta descomposición se obtienen en el nivel final una serie de sub-señales denominadas 'sub-señales finales', ordenadas por nodos. Cada nodo tiene la nomenclatura  $S_{kj}$ , donde k es el nivel de descomposición en el que se encuentra el nodo, y j es la posición de la sub-señal dentro del nivel final.

#### Extracción del índice WER

Los pasos para la extracción del índice WER de un disipador WPD cualquiera son:

- 0) Realización del ensayo de vibraciones al disipador WPD recién instalado (de referencia, sin daño). Esta fase se denomina fase de caracterización (de aquí en adelante "Fase 0").
- 1) Realización del ensayo de vibraciones al disipador WPD que se quiera inspeccionar. Esta fase se denomina fase de inspección (de aquí en adelante "Fase i").

2) Aplicación del análisis WPA, y obtención de las sub-señales finales. En este caso, mediante pruebas de ensayo y error, se determinó que el número

óptimo de niveles de descomposición es 7, por lo que el nivel final tendrá  $2^7$  sub-señales finales, es decir, 128 nodos. Dicho paso se realiza tanto para las señales adquiridas en la fase 0, como para las adquiridas en la fase i.

3) Cálculo de la energía de las sub-señales finales utilizando la siguiente expresión [6]:

$$U_{kj} = \int |S_{kj}(f)|^2 dt, \quad (2)$$

donde:

- $U_{kj}$ : es la energía de la señal situada en la posición k, j.
- $S_{kj}(f)$ : es la Transformada de Fourier de la señal  $s_{kj}(t)$ .
- $s_{kj}(t)$ : es la señal situada en la posición k, j.

4) Comparación de la energía que posee cada sub-señal resultado de aplicar el WPA a la señal obtenida en el ensayo de vibraciones en fase i, con la energía que posee la sub-señal que ocupe su misma posición (k, j) obtenida en el ensayo de vibraciones en fase 0 (3). Esta comparación da como resultado el valor  $\Lambda_j$ , donde j indica el nodo en el que se realizó la comparación [6].

$$\Lambda_j = 1 - \frac{U_{kj}^i}{U_{kj}^0}, \quad (3)$$





donde:

- $U_{kj}^i$ : es la energía de la sub-señal situada en la posición  $k, j$  en fase  $i$ .
- $U_{kj}^0$ : es la energía de la sub-señal situada en la posición  $k, j$  en fase 0.

5) Composición de un "vector de daño" formado por las variaciones de energía para todos los nodos finales.

$$\{\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{127}\}$$

6) El índice WER se obtiene extrayendo el valor máximo de dicho vector de daño:

$$WER = \text{máx}\{\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{127}\}$$

## Resultados

### 1. Agotamiento por plastificación en las secciones-I

De realizar el ensayo de vibraciones a los disipadores de las estructuras FD y SD y calcularle a las señales

registradas el índice de daño WER, los vectores de daño obtenidos se muestran en la Figura 11.

Puede verse como el aumento de la variación de energía se produce en torno a un valor característico de cada tamaño de sección-I. Este valor coincide con la frecuencia de resonancia de mayor orden dentro del rango de trabajo. En el caso estudiado, en el que las secciones-I se tratan de IPE-140, la frecuencia de resonancia de mayor orden dentro del ancho de banda de los aparatos de medida se sitúa en torno a 25.000 Hz.

En las zonas marcadas dentro de un rectángulo en la Figura 11, puede verse como al aumentar el valor de la escala del sismo aplicado, el vector de daño aumenta, es decir, la variación de energía "wavelet" de las señales respuesta de las secciones-I con daño y las secciones-I sin daño, aumenta. Se deduce, por lo tanto, que el daño se manifiesta claramente de manera cuantitativa a través de este vector de daño, a través de la variación de energía.

Para contrastar si el índice WER permite evaluar el nivel de daño de una forma fiable, se comparó con otro índice de daño, ID, bien establecido en la literatura y desarrollado por el Dr. Amadeo Benavent-Climent [1,3]. Como se puede ver en la Figura 12, la correlación entre ambos índices es prácticamente lineal, lo que permite asegurar que el nuevo índice WER posee una alta fiabilidad. Debe tenerse en cuenta que la obtención del índice ID requiere de una instrumentación de elevado coste (medidores de desplazamiento y acelerómetros) y que requiere estar midiendo en el momento en que se está produciendo

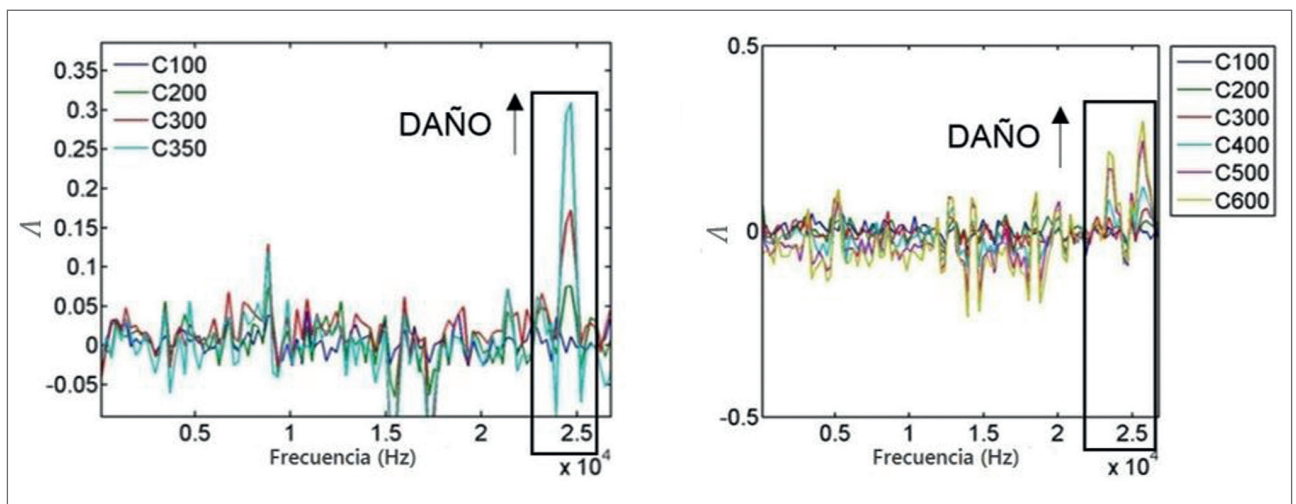


Figura 11. Vector de daño para las estructuras FD (a la izquierda) y SD (a la derecha) frente a la frecuencia



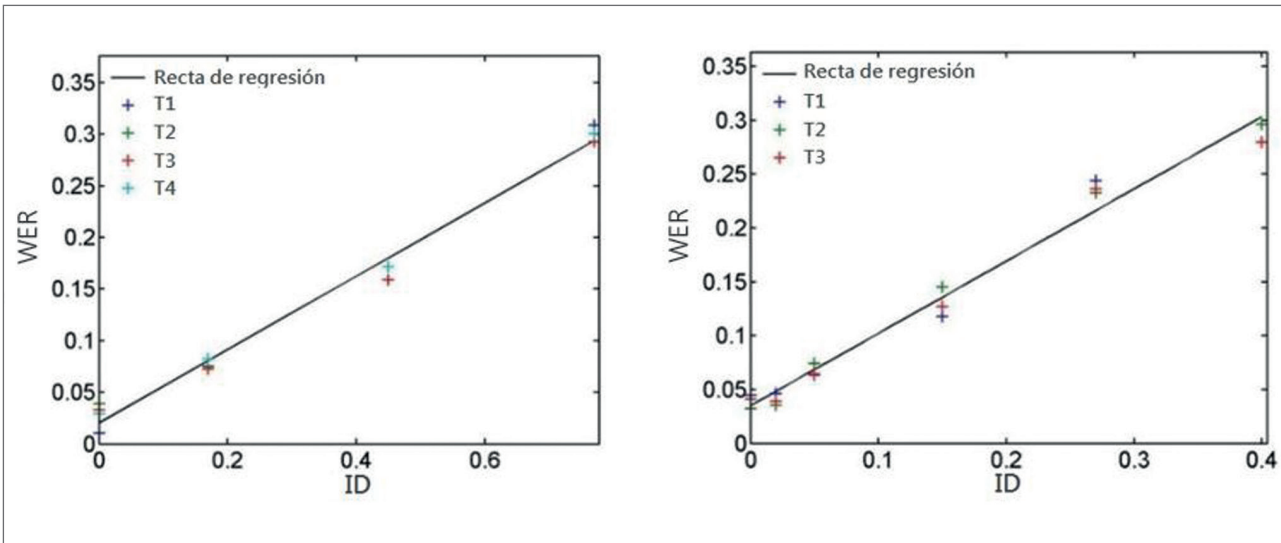


Figura 12. Recta de regresión de WER sobre ID para las estructuras FD (izquierda) y SD (derecha)

el sismo, por lo que su utilidad para evaluación de disipadores instalados en edificaciones reales resulta inviable. De ahí que, como idea básica de este trabajo, se proponga el desarrollo de un índice de daño indirecto, WER, que proporcione alta fidelidad (bien correlacionado con el índice ID) y que requiera de instrumentación de bajo coste.

## 2. Daño por cambio en las condiciones de contorno de los disipadores WPD

Al aplicar el índice WER a las diferentes condiciones de contorno analizadas el vector de daño obtenido se muestra en la Figura 13.

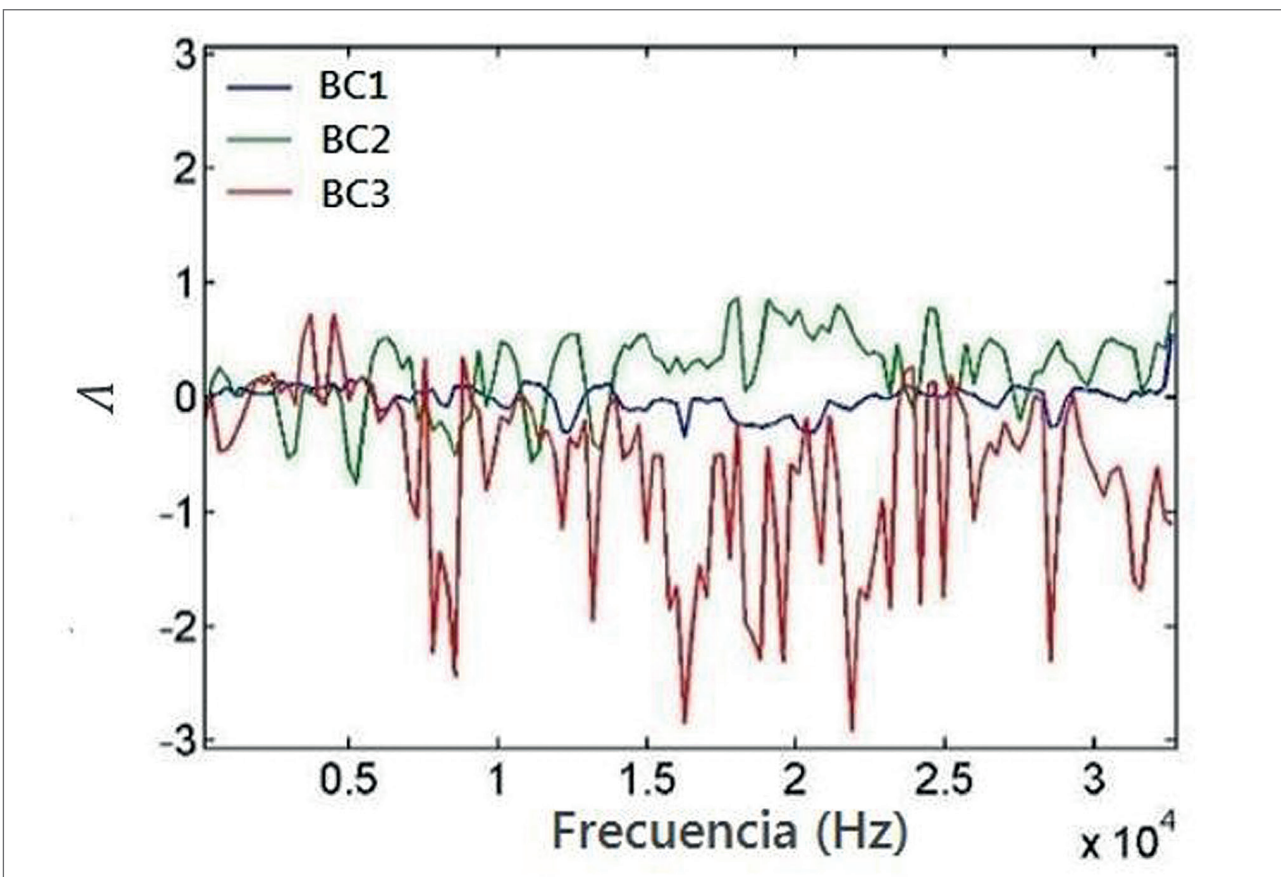


Figura 13. Índice WER para cambio en condiciones de contorno



Como puede verse, para la condición BC1 el vector de daño toma valores cercanos a 0 a lo largo de todo el ancho de banda, puesto que las señales obtenidas del ensayo de vibraciones para fase 0 y para la fase i son las mismas, ya que se considera que el disipador recién instalado tiene esa condición de contorno.

Para las condiciones BC2 y BC3, sin embargo, se observa una alta variación de energía, es decir, elevados valores del vector de daño, el cual muestra que la condición más desfavorable es la BC3, es decir, cuando dos tornillos se encuentran totalmente dañados, lo cual resulta totalmente coherente.

A diferencia del vector de daño para secciones-I con daño con plastificación, la variación de energía no se concentra en torno a ningún valor de frecuencia, sino que está repartida a lo largo de todo el ancho de banda. Esto permite que en ensayos reales en campo pueda deducirse cuando el daño en el disipador WPD está producido por plastificación (producida por cargas dinámicas tipo terremotos) o por un mal estado de las fijaciones del disipador.

## Conclusiones

Como conclusiones de la aplicación del ensayo de vibraciones en disipadores de energía WPD para estructuras sísmo-resistentes se pueden resaltar las siguientes:

- El ensayo de vibraciones constituye una técnica útil, económica y alternativa a otros métodos END para la evaluación de daño en este tipo de estructuras
- La aplicación del índice WER para evaluación de daño en disipadores WPD a partir de señales obtenidas de la realización del ensayo de vibraciones constituye una herramienta potente, fiable y contrastada para decidir cuando los disipadores deben reemplazarse por unos nuevos y, por lo tanto, dotar de un alto nivel de seguridad a las estructuras principales de las edificaciones frente a acciones externas como terremotos o viento
- En futuras inspecciones en campo a edificios con disipadores WPD, aplicando el índice WER podría determinarse si estos se encuentran dañados por plastificación del alma de las secciones I, o bien, por pérdida de sus fijaciones a las barras soporte

## Bibliografía

- [1] L. Morillas. *Proyecto sismorresistente basado en prestaciones utilizando métodos energéticos aplicado a pórticos con sistemas de control pasivo*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, 2013.
- [2] L. Romo. *Diagnóstico de daño en disipadores de energía histeréticos tipo WPD para el control pasivo en estructuras sísmo resistentes mediante análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, 2012.
- [3] A. Benavent-Climent, L. Morillas, J. Vico. *A study on using wide-flange section web under out-of-plane flexure for passive energy dissipation*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(5):473-490, 2011.
- [4] L. Romo-Melo, A. Benavent-Climent, L. Morillas, D. Escolano, A. Gallego. *Health monitoring of a new subjected to earthquakes in a shaking table*. *Earthquakes and Structures*, in press, 2014.
- [5] I. Daubechies, *Ten lectures in wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [6] Y.J. Yan, L.H. Yam. *Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis*. *Elsevier, Composite Structures* 58: 29-38, 2002.

