

ESTUDIO DEL DAÑO LOCAL EN UN NUDO VIGA-PILAR EN UN PÓRTICO DE HORMIGÓN ARMADO USANDO EL ÍNDICE B-VALUE OBTENIDO POR LA ENERGÍA DE EMISIÓN ACÚSTICA Y LA TRANSFORMADA WAVELET

Francisco Sagasta¹, Miguel E. Zitto², Rosa Piotrkowski^{2,3}, Antolino Gallego³, Amadeo Benavent-Climent⁴

¹ DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA, UNIVERSIDAD DE GRANADA, España.

² DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, Argentina.

³ ESCUELA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE SAN MARTÍN, Argentina.

⁴ DEPARTAMENTO DE MECÁNICA ESTRUCTURAL Y CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES, UNIVERSIDAD DE MADRID, España.

sagasta@ugr.es, ezitto@gmail.com, rosap46@gmail.com, antolino@ugr.es, benavent@ugr.es

1. RESUMEN

La técnica de Emisión Acústica (EA) ha demostrado ser eficaz para el seguimiento y la caracterización del daño en el hormigón armado. En este trabajo ha sido posible identificar las escalas (frecuencias) asignadas a la fractura del hormigón a través de la aplicación de la transformada wavelet continua (CWT) para evaluar el daño local en conexiones viga-columna de un pórtico de hormigón armado sometido a pruebas de tipo dinámicas (acciones sísmicas) con la mesa sísmica de la Universidad de Granada. Un nuevo índice de daño fue definido, denominado b-value energético a través de la Energía de Emisión Acústica calculada con la transformada wavelet. Esta energía fue obtenida mediante la reconstrucción de las señales de EA en las escalas (frecuencias) asignadas a la fractura del hormigón; de este modo, las fracturas macroscópicas en una unión viga-columna pudieron ser evaluadas en un pórtico de hormigón armado.

2. ABSTRACT

The technique of Acoustic Emission (AE) has proven to be effective for monitoring and characterization of damage in reinforced concrete. In this work, it has been possible to identify scales (frequencies) assigned to the fracture of concrete through the application of the continuous wavelet transform (CWT), to assess local damage in beam-column connections. The dynamic loads (seismic actions) were carried out on a reinforced concrete frame with the seismic table of the University of Granada. A new damage index was defined, called Wavelet Energy b-value through the Acoustic Emission Energy calculated with the CWT. This energy was obtained by reconstructing AE signals in the scales (frequencies) assigned to the fracture of concrete; thus, macroscopic fractures in a beam-column connection could be evaluated in a reinforced concrete frame.

Palabras clave: señales de Emisión Acústica, b-value, índice de daño local, hormigón armado, transformada wavelet continua

3. INTRODUCCIÓN

La evaluación del daño es una cuestión importante en la validación de los códigos de diseño sísmico de edificios en busca de evitar el colapso local o global cuando las edificaciones son sometidas a terremotos [1]. De acuerdo al código español NCSE-02 [2], los pórticos de hormigón armado están diseñados con el criterio de columna fuerte – viga débil; usando este criterio se espera que el daño estructural se produzca, básicamente, en las rótulas plásticas. La técnica de EA se ha aplicado a elementos de hormigón armado, tanto en el propio material (hormigón) como en elementos estructurales individuales (vigas, columnas) [3-8].

En general, las señales de EA registradas durante eventos sísmicos están altamente contaminadas por el ruido procedente de diferentes fuentes. Las fuentes más comunes son la fricción entre diferentes partes de la estructura, el ruido electrónico e incluso la fricción interna entre las caras de las macro fisuras y micro fisuras ya existentes. Las diferentes medidas aplicadas para evitar este tipo de fuentes de ruido (fuentes secundarias de EA) son generalmente insuficientes. Por esta razón, las técnicas de post-procesamiento de señales son especialmente necesarias para extraer la información pertinente de las señales de EA (fuentes primarias).

En trabajos anteriores [9-10], las frecuencias comprendidas entre 45 y 64 kHz pudieron ser asignadas a procesos de fractura en señales de EA que se generaron en una losa de hormigón armado sometida a varias simulaciones de eventos sísmicos (terremotos) de distinta intensidad. En el trabajo actual, la transformada wavelet continua, tomando como base la wavelet de Morlet compleja [11] fue aplicada a las señales de EA registradas durante los distintos eventos sísmicos con la finalidad de estudiar el daño en los nudos de unión viga-columna de hormigón armado. El objetivo del presente estudio es detectar y determinar el nivel de daño local a través de las fracturas en el hormigón en las conexiones viga-columna en una estructura, específicamente en este trabajo se presentan los resultados para la unión externa de la viga-columna número 3 (ver C3 en la Figura 1).

La amplitud de la señal de EA es ampliamente utilizada para evaluar la aparición de macrofisuras en materiales frágiles usando los índices b e ib [12-15]. En el presente trabajo la energía de EA obtenida a través de CWT permite definir un nuevo índice de daño en el hormigón armado.

4. DESCRIPCIÓN DEL ESPÉCIMEN, SIMULACIÓN SÍSMICA E INSTRUMENTACIÓN

El espécimen sometido a ensayos proviene de un prototipo a escala de un edificio situado en el municipio de Granada. A partir de este prototipo y aplicando factores de escala, fue proyectado el modelo de ensayo que se muestra en la Figura 1. El espécimen está formado por cuatro zapatas aisladas, unidas entre sí por zunchos de acero. De ellas arrancan cuatro pilares solidarizados en un forjado unidireccional a través de los nudos de cuatro vigas. Tiene una altura de 2.11 m, desde la base inferior de la zapata hasta las rótulas. Alberga una superficie de 3x3 m² en planta. Las placas apoyadas en el forjado simulan las cargas de las demás plantas y las sobrecargas de uso. Una descripción más detallada puede ser vista en [16].

Con la mesa sísmica se reprodujo la componente NS del evento de Campano Lucano (Italia, 1980), medido desde la estación de Calitri, con un factor de escala en el tiempo de $\lambda = 0.4^{1/2}$. Se realizaron cinco simulaciones uniaxiales con aceleración máxima creciente. El acelerograma que se utilizó en todas las simulaciones fue el mismo, solo cambiaba el factor de escala de la aceleración máxima (PA), el factor fue aproximadamente 50%, 100%, 200% y 300% del original (Tabla 1).

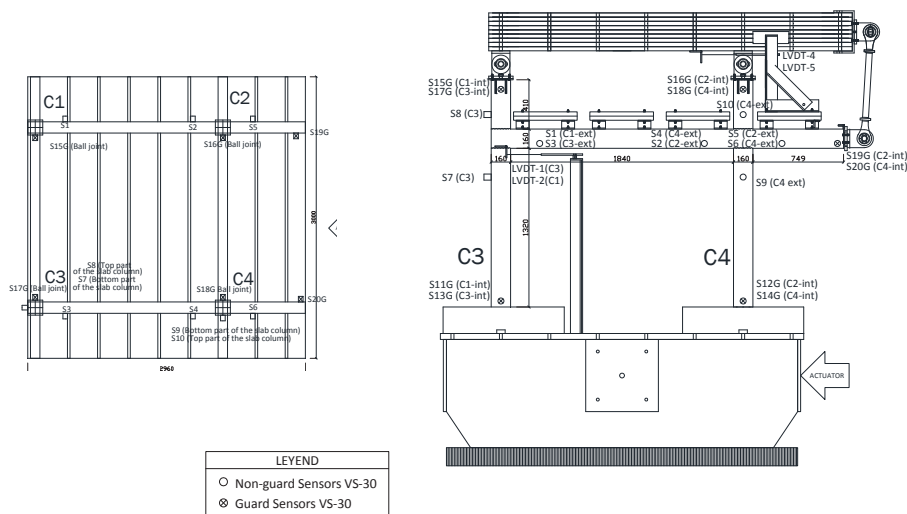


Figura 1. Posición de los sensores de EA colocados en el espécimen. Izqda.: vista en alzado; Dcha.: vista en planta.

Las señales de EA fueron registradas con el sistema de adquisición AMSY-5 de Vallen Systeme. En el espécimen se colocaron veinte sensores VS30 de baja frecuencia (con un ancho de banda comprendido entre 25 y 80 kHz). Durante la adquisición se utilizó una frecuencia de muestro de 2.5 MHz, con un número de muestras de 2048, lo que nos proporciona una muestra cada 0.4 μ s. Se utilizó un pretrigger de 200 muestras antes de que las señales pasasen el umbral de

detección de 50 dB. Por lo tanto la duración de la ventana de registro fue $t_{\max} = 819.2 \mu\text{s}$. Los filtros utilizados para la adquisición de datos de EA estaban subordinados a la sensibilidad del sensor, siendo el filtro de paso banda de 25 kHz y el filtro de paso baja de 180 kHz. De este modo se evitan los ruidos de baja y alta frecuencia, respectivamente. Durante la adquisición se usó en cada canal un preamplificador de 34 dB de ganancia. Antes de cada ensayo se midió el ruido eléctrico en el laboratorio y se hizo una prueba de calibración de los sensores usando la fuente estandarizada Hsu-Nielsen, según la norma EN 1330-9:2009.

Los sensores se colocaron en la estructura de HA con un sistema de abrazadera con el fin de que no se desprendiesen durante los ensayos sísmicos. Los sensores con los que se adquirieron y se monitorearon las señales de EA de la unión viga-columna exterior C3, objeto de este trabajo, fueron los sensores S7, S8, S13 y S17 (véase la Figura 1). Los sensores S7 y S8 fueron configurados como sensores "normales" y los sensores 13 y 17 como sensores "guarda". Estos sensores guarda se colocaron para filtrar las señales procedentes de fuentes ruidosas. Debido a la complejidad de los ensayos apareció una gran cantidad de ruido de fricción del espécimen con la mesa sísmica y de ruido mecánico procedente del flujo de aceite en el actuador. El nivel de ruido estaba por encima de 100 dB en el actuador y alrededor de 70 dB en las zapatas de los cuatro pilares. Por esta razón se colocaron los sensores guardas al pie de los pilares, próximos a la zapata, para filtrar el ruido generado por la fricción que se genera entre las zapatas y la propia mesa sísmica así como el procedente del actuador. La elección de la ubicación de los sensores fue en base a la experiencia de los ensayos realizados anteriormente [6, 8]. La Tabla 1 muestra los principales parámetros de los ensayos realizados sobre el espécimen; la aceleración máxima (AP) se mide en unidades de la aceleración de la gravedad.

Tabla 1. Historia de carga aplicada al espécimen

Simulación	AP (g)	Duración (s)
C50	0.110	50
C50B	0.083	50
C100	0.180	50
C200	0.345	50
C300	0.580	50

5. PROCEDIMIENTO

5.1 *Carácter local de las mediciones*

El objetivo de este trabajo es obtener información sobre el daño local debido a la fractura del hormigón en puntos críticos de la estructura a través de mediciones de EA; estos puntos críticos son las rótulas plásticas que se forman en las uniones viga-columna [1]. El software *EventBuilder* de *Vallen Systeme* [17] basado en la identificación del primer sensor de llegada de la onda mecánica que forma un evento, fue usado para garantizar la localización de las señales en las zonas de estudio (puntos críticos).

5.2 La amplitud del índice *b-value* como indicador de la intensidad de daño

El índice *b-value* basado en amplitudes fue definido originalmente en sismología. La ley de Gutenberg-Richter expresa la relación entre la magnitud y el número total de terremotos {de por lo menos esa magnitud}, que ocurren en cualquier región y en un período de tiempo. Se calcula utilizando la distribución de la frecuencia de las magnitudes, es decir:

$$\text{Log}_{10} N(M) = a - bM, \quad (1)$$

donde N representa la recurrencia sísmica anual con una magnitud mayor a M , y a y b son constantes determinadas por la naturaleza sísmica de la región, siendo b la pendiente de la recta que nos da la proporción de sismos grandes frente a pequeños.

En la técnica de EA, el índice *b-value* es ampliamente utilizado para evaluar los procesos de fractura. Este índice cambia sistemáticamente durante las diferentes etapas del proceso de formación y crecimiento de las grietas y por lo tanto se puede utilizar para estimar la evolución y el desarrollo de la misma. Valores altos obtenidos en el índice *b-value* se relacionan con un gran número de señales de EA de pequeña amplitud, a su vez éstas están relacionadas con la aparición de micro-fisuras o un lento crecimiento de las grietas. Por el contrario, valores pequeños en el índice *b-value* indican un crecimiento más rápido de las grietas o una formación de grietas más inestables, y pueden ser causadas por ejemplo, por la rotura del hormigón entre las corrugas de las barras de acero de refuerzo, o por un aumento repentino en el ancho. La fórmula habitual en EA está definida por:

$$\text{Log}_{10} N(A_{dB}) = a - b \frac{A_{dB}}{20}, \quad (2)$$

donde N es el número total de eventos de EA con una amplitud mayor a A_{dB} (medida en decibelios), a es una constante y b es el índice *b-value* que está directamente relacionado con la magnitud de la fractura.

5.3 Energía de EA obtenida con CWT

La transformada wavelet es utilizada ampliamente para analizar series de tiempo que contienen energía no estacionaria en diferentes escalas (frecuencias). La CWT de una función $f(t)$ se define como la integral de la ecuación (3) [10]:

$$(Wf)(s, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi_{s,b}(t)} dt, \quad s \neq 0, \quad \text{with } \psi_{s,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-b}{s}\right), \quad (3)$$

donde b es una traslación en el tiempo y s es una dilatación de la función ($|s| > 1$), o una compresión ($0 < |s| < 1$). Para que $\psi(t)$ sea admisible como una ondita, esta función debe tener un valor medio cero y ser localizada tanto en espacios de tiempo y de frecuencia. Un ejemplo es la wavelet Morlet compleja, que consiste en una onda plana modulada por una función gaussiana (4):

$$\psi(\eta) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\frac{\eta^2}{4}}, \quad (4)$$

donde ω_0 es una frecuencia no dimensional y toma un valor de 6 para satisfacer la condición de admisibilidad, de este modo se consigue un error menor que el redondeo.

La CWT de una secuencia discreta $x(n\delta t)$ es definida como la convolución de $x(n\delta t)$ con una versión escalada y trasladada de $\psi(t)$ (5):

$$(Wx)(s, n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m\delta t) \overline{\psi\left[\frac{(m-n)\delta t}{s}\right]}. \quad (5)$$

Una vez que se calculó la CWT para cada s y n se pudo reconstruir la serie de tiempo original teniendo en cuenta el carácter no ortogonal de la base empleada. La reconstrucción pudo ser realizada usando una función delta. Para una serie en tiempo real se cumple que (6):

$$x_n = \frac{\delta_j \delta t^{\frac{1}{2}}}{C_\delta \psi(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\Re\{(Wx)(s_j, n)\}}{s_j^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

donde \Re es la parte real y el índice j corresponde a la escala $s_j = s_0 2^{(j-1)\delta_j}$, con $j=1, 2, \dots, J$, con $J(\delta_j)^{-1} \log_2(N\delta t \frac{\square}{\square})$ y $s_0 = 2\delta t$. Se usó en la reconstrucción de la serie original (filtrada a determinadas escalas) el factor $C_\delta = 0.776$. Luego, la energía de las señales reconstruida (nombrada como AEE) se calculó como:

$$AEE = \sum_{i=1}^N x_i^2 \delta t. \quad (7)$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Amplitud del *ib-value*

La figura 2 muestra los valores del índice *b-value* calculado con las amplitudes obtenidas a partir de las señales que han pasado los sensores guarda y unfiltrado adicional basado en el cálculo del valor RMS de las señales de EA [15]. Básicamente estos dos filtros separan las señales continuas de EA procedentes de mecanismos de fricción y ruido (señales de naturaleza estacionaria), de señales impulsivas y de corta duración que proceden de la fisuración del hormigón. Es posible observar una tendencia a la baja (observar cómo evolucionan los mínimos) cuando la intensidad de carga fue aumentando

progresivamente de un ensayo a otro, es decir, al incrementarse el daño el índice *b-value* fue descendiendo. Pero cuando el mismo análisis se realizó para las señales reconstruidas en la banda de frecuencias asignada a la fisuración del hormigón, después de aplicar el filtrado de sensores guardas y wavelet, se pudo comprobar que los resultados fueron erráticos, es decir, no existía una tendencia a la baja cuando la intensidad de carga aumentaba.

La tendencia a la baja (que se traduce como un aumento de daño progresivo) no apareció porque el filtro wavelet introduce un proceso de suavizado en la amplitud modificándola. Esto podría ser debido al hecho de que la wavelet Morlet es no ortogonal, por lo tanto devuelve valores de amplitudes absolutas inexactos. Pero, como es bien conocido [10], la wavelet Morlet es muy apropiada para extraer características de la señal tales como la distribución de energía en las bandas de frecuencia. Se puede observar en la Figura 3 la correcta extracción de la energía en una banda de frecuencia.

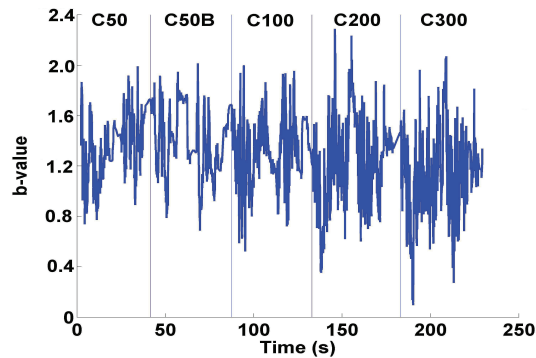


Figura 2. *b-value* calculado usando las amplitudes de las señales que pasaron los sensores guardas y el filtro RMS, unión viga-columna exterior C3.

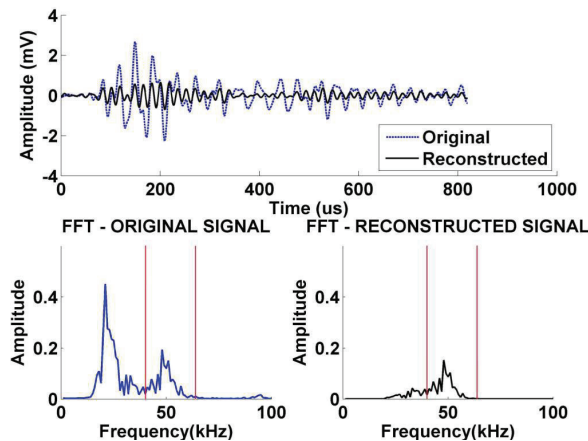


Figura 3. Señal original y reconstruida en la banda de 45-64 kHz. Ensayo C50B, unión viga-columna exterior C3.

La figura 3 muestra la amplitud de la señal original y la señal reconstruida en la banda de frecuencia correspondiente a la fractura del hormigón [9]. Esta señal se adquirió durante el ensayo C50B. Se puede observar el efecto de suavizado del filtro de wavelet en las amplitudes de las señales. Por el contrario, la FFT de ambas señales en la banda de frecuencia correspondiente son notablemente similares. Esta es una idea muy clara de por qué se obtienen resultados correctos cuando se trabaja con la energía wavelet en vez de las amplitudes de las señales reconstruidas como se muestra en la sección 3.2.

6.2 Definición y obtención del Wavelet Energy b-value (b_{WE} -value)

La figura 4 muestra un ejemplo de la evolución de la Energía de EA de las señales reconstruidas en la banda de frecuencias de interés para el ensayo C50B. La Energía acumulada y normalizada de EA se muestra para hacer hincapié en la claridad y se incluye el acelerogramacorrespondiente para su comparación. Se puede observar que los picos de la energía de EA no están distribuidos uniformemente, sino que hay un número mayor de picos de relativamente baja amplitud y menor número depicos de alta amplitud. Más adelante, en esta misma sección, se muestra que estas características se hacen más evidentes a medida que aumenta el nivel de daño.

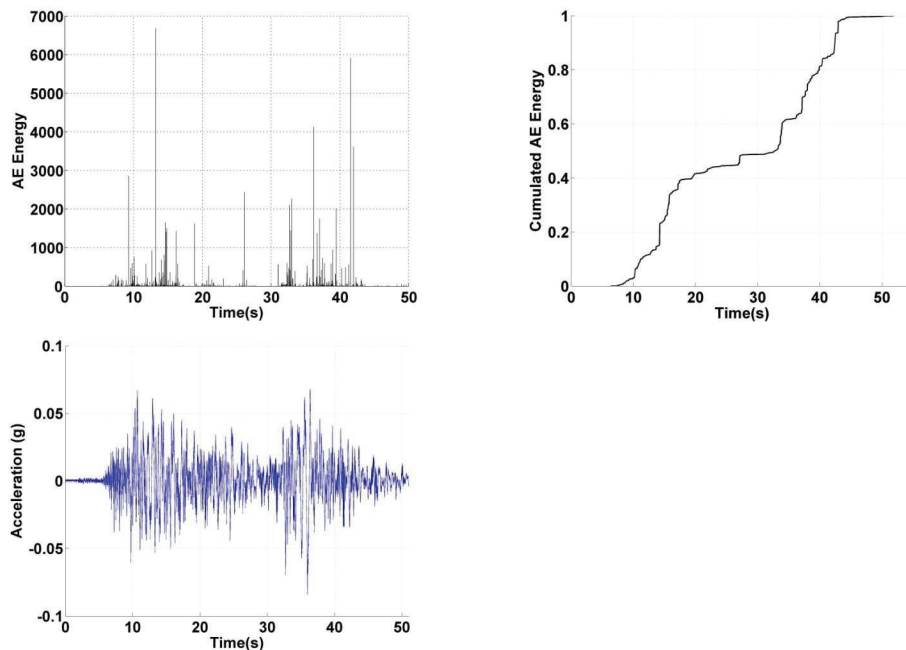


Figura 4. Energía de EA calculada sobre la reconstrucción de las señales para la simulación C50B en la unión viga-columna C3. Izqda.: Energía de Emisión Acústica en unidades arbitrarias; Dcha.: Energía de Emisión Acústica acumulada y normaliza; Inferior: acelerograma del ensayo C50B.

Como se ha explicado anteriormente, el índice b -value calculado con amplitudes no es adecuado debido al efecto de suavizado que introduce el filtro wavelet en las amplitudes de las señales reconstruidas. Es conocido que la energía de la señal de EA es otro parámetro relacionado con el proceso de fractura. Siguiendo la definición del b -value expresado en las ecuaciones 1 y 2 y con el fin de eludir el efecto de suavizado y obtener un parámetro no basado en amplitudes, se definió un nuevo índice de daño obtenido con la energía de las señales reconstruidas de EA (AEE) después de aplicar el filtro de CWT. Este nuevo parámetro fue nombrado *Wavelet Energy b-value* (b_{WE} -value) y se expresa en la ecuación (8). Una evolución de este índice para todos los ensayos se muestran en la figura 5.

$$\log_{10} N(AEE) = a - b_{WE} \log_{10}(AEE). \quad (8)$$

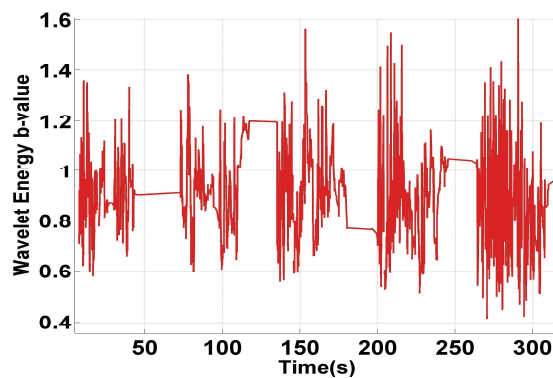


Figura 5. *Wavelet Energy b-value* calculado sobre las señales reconstruidas en la banda de 45-64 kHz del nudo de unión viga-columna C3.

En la Figura 5 se puede observar el b -value calculado con las energías de las señales de EA que han pasado el filtro CWT. Al igual que el índice b -value tradicional calculado sobre las amplitudes, este nuevo índice decrece cuando la intensidad de carga (el daño) aumenta (observar la evolución de los mínimos).

Los límites usados para calcular el nuevo índice b_{WE} -value para cada ensayo fueron 3 y 4. Estos límites se determinaron teniendo en cuenta el último tramo lineal de la representación del número acumulado de señales de EA frente a la energía wavelet, que se corresponde con mayor grado de daño (relacionado con grietas macroscópicas), como puede ser observado con cruces de color negro en la Figura 6. Los resultados del nuevo índice b_{WE} -value obtenidos en este trabajo a través de la Energía de EA (AEE) y CWT son muy significativos. Si lo comparamos con los resultados del b -value tradicional obtenido a través de las amplitudes de las señales, ambos índices muestran tendencias y valores muy similares. Valores de b_{WE} -value inferiores a 1 (desde la simulación C100 en

adelante) indicaron la aparición de macro-fisuras en el hormigón en la unión viga-pilar exterior C3.

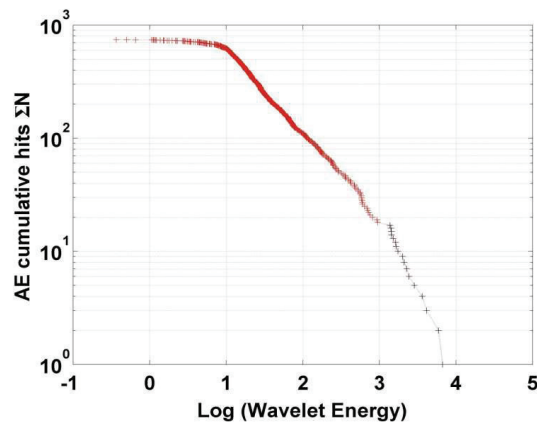


Figura 6. Representación de los límites usados para calcular el nuevo índice *Wavelet Energy b-value* (b_{WE} -value) para el ensayo C50B. Macrofisuras asignadas a las cruces de color negro en el nudo de unión viga-columna C3.

La Figura 7 muestra el índice b_{WE} -value representado frente al pico de aceleración (PA) para todas las simulaciones sísmicas que se llevaron a cabo. Los valores del índice b_{WE} -value disminuyen cuando la aceleración aumenta, esta disminución es mucho más abrupta al principio anunciando la aparición de daños graves en la unión viga-columna C3. Los autores obtuvieron en [15] que el valor crítico del b value tradicional, que indica el inicio de las macro-fisuras, en el caso de simulaciones sísmicas o ensayos dinámicos es menor que el valor 1 obtenido para ensayos cuasiestáticos. El trabajo actual arroja los mismo resultados para el b_{WE} -value.

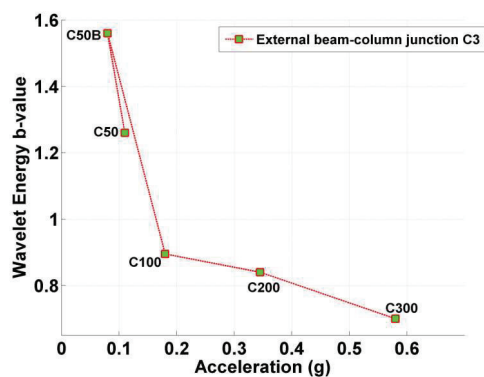


Figura 7. Representación del índice *Wavelet Energy b-value* (b_{WE} -value) frente a la aceleración del nudo de unión viga-columna C3.

7. CONCLUSIONES

La fractura local en el hormigón fue evaluada en una unión viga-columna de un pórtico de hormigón armado sometido a ensayos dinámicos (terremotos) con la mesa sísmica de la Universidad de Granada (España). Se definió un nuevo índice de daño, llamado *Wavelet Energy b-value* (b_{WE} -value) a través de una fórmula similar a la que corresponde al *b-value* tradicional en términos de amplitudes de las señales de EA, pero teniendo en cuenta la energía de EA en la banda de frecuencia correspondiente a la fisuración del hormigón 45-64 kHz.

Un b_{WE} alrededor de 0,8 corresponde a la iniciación de macro-grietas en la zona cercana a las uniones viga-columna; cuanto menor es el índice, mayor es el nivel de daño. El valor límite para el inicio de la macro-fisuras en el caso de cargas dinámicas (terremotos) es consistente con los resultados previos de los autores y es menor que el valor 1 establecido por otros autores en ensayos estáticos.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al soporte económico del gobierno local de España, Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología, Proyecto P12-TEP-2429, el Programa FPU del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Ministerio de España, la Unión Europea (*FondsEuroéen de DéveloppementRégional*) y el Ministerio de Educación de Argentina (Fortalecimiento de Redes Interuniversitarias V) y el Programa UBACyT 2013-2016.

REFERENCIAS

- [1] Benavent-Climent, A., Escolano-Margarit, D. and Morillas, L., Shake-table tests of a reinforced concrete frame designed following modern codes: seismic performance and damage evaluation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. doi: 10.1002/eqe.2372. 2013.
- [2] Ministry of Construction of Spain, Spanish Seismic Code NCSE-02, Madrid. 2002.
- [3] Grosse, C. and Ohtsu, M., *Acoustic emission testing*, Ed., Springer. 2008.
- [4] Yuyama S., Li ZW., Yoshizawa M., Tomokiyo T., Uomoto T., *Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission*, *NDT&E International*, 34, 6, 381–387. 2001.
- [5] Benavent-Climent, A., Castro, E., Gallego, A., Evaluation of low cycle fatigue damage in RC exterior beam-column subassemblages by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, 24, 1830– 1842. 2010.
- [6] Sagasta, F., Torné, J.L., Sánchez-Parejo, A., Gallego, A., *Discrimination of Acoustic Emission signals for damage assessment in a reinforced concrete slab subjected to seismic simulations*. *Archives of Acoustics*, 38, 3, 303-310. 2013.

- [7] Carpinteri, A., Lacidogna, G., Pugno, N., *Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring*, Engineering Fracture Mechanics, 74, 1-2, 273-289. 2007.
- [8] Benavent-Climent, A., Gallego, A., Vico, J.M., *An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads*, Structural Health Monitoring, 11, 1, 69-81. 2011.
- [9] Zitto, M.E, Piotrkowski, R., Gallego A., Sagasta F., *AE wavelet processing in dynamical tests of a reinforced concrete slab*, Journal of Acoustic Emission, 30, 64-75. 2012.
- [10] Zitto, M.E, Piotrkowski, R., Gallego A., Sagasta F., Benavent-Climent A., *Damage assessed by Wavelet scale bands and b-value in dynamical tests of a reinforced concrete slab monitored with acoustic emission*, Mechanical Systems and Signal Processing 2015, DOI:10.1016/j.ymssp.2015.02.006.
- [11] Torrence, C., Compo, G., *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, Bulletin of the American Meteorological Society. 1998.
- [12] Rao, M. V. M. S., Prasabba Lakshmi, K. J., *Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture*, Current Science, 89, 9, 1577-1582. 2005.
- [13] Shiotani, T., Yuyama, S., Li, Z. W., Ohtsu, M., *Application of the AE improved b-value to qualitative evaluation of fracture process in concrete materials*, Journal of Acoustic Emission, 19, 118-132. 2001.
- [14] Colombo, S., Main, I. G., Forde, M.C., *Assessing damage of reinforced concrete beam using "b-value" analysis of acoustic emission signals*, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, 3, 280-286. 2003.
- [15] Sagasta F., Benavent-Climent A., Fernández T., Gallego A., *Modified Gutenberg-Richter Coefficient for Damage Evaluation in Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Simulations on a Shaking Table*, Journal of Nondestructive Evaluation, 33, 616-631 2014, DOI 10.1007/s10921-014-0256-6.
- [16] Sagasta F., Benavent-Climent A., Fernández T., Suárez E., Gallego A., *b- and ib- of Acoustic Emission values for damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to earthquakes* 31 EWGAE, Dresden. 2014.
- [17] Vallen, H., *Acoustic emission testing: fundamentals, equipment, application*, Castell Publication Inc. 2006.