

## FILTRADO DE SEÑALES RUIDOSAS DE EMISIÓN ACÚSTICA (ULTRASONIDOS PASIVOS) PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDAS A TERREMOTOS EN MESA SÍSMICA

PACS 43.40.Le

Francisco A. Sagasta<sup>1</sup> y Antolino Gallego<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada (UGR).

Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la edificación

Campus de Fuentenueva

18071 Granada España

Tel: +34 958 249 508

E-mail: <sup>1</sup> fsagasta@ugr.es, <sup>2</sup> antolino@ugr.es .

### ABSTRACT

This paper shows the results of the use of windowing of Acoustic Emission (AE) signals to distinguish between noisy signals coming from mechanical friction and signals coming from concrete cracking. These signals were recorded during the last experiment carried out on a portched reinforced concrete structure subjected to seismic loads applied with the shake table of the University of Granada. The AE signals were recorded by means low frequency piezoelectric sensors placed on the specimen, in order to monitor its damage behaviour.

**Keywords:** acoustic emission, damage assessment, reinforced concrete, earthquake, RMS filtering.

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del uso del ventaneado de señales de emisión acústica para la separación entre señales ruidosas procedentes de rozamientos mecánicos y señales procedentes de la fisuración del hormigón. Estas señales se obtuvieron durante los últimos experimentos realizados con una mesa sísmica sobre una estructura porticada de hormigón armado con sensores piezoeléctricos ultrasónicos para captar la emisión acústica generada durante el proceso de daño del hormigón.

**Palabras clave:** emisión acústica, evaluación de daños, hormigón armado, terremotos, filtrado de RMS.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado (HA) ubicadas en áreas propensas a terremotos son susceptibles a sufrir daños causados por las cargas cíclicas inducidas por la aceleración del suelo durante los eventos sísmicos. En una estructura de hormigón armado el daño no se produce solo durante el terremoto severo sino que también existen temblores moderados que pueden ocurrir durante la vida útil de una estructura que también ocasionan daños en el

hormigón. La degradación del hormigón asociado con el agrietamiento causado por cientos de ciclos de deformación con el tiempo da lugar a daños acumulativos (ciclos de fatiga) en los componentes de la estructura de hormigón (vigas, pilares, zunchos). Una consecuencia importante de la degradación del hormigón bajo ciclos de carga es el deslizamiento entre las barras de acero de refuerzo y el hormigón adyacente, que se considera un daño grave en los componentes de las estructuras de HA [1].

Una estructura de HA se encuentra cubierta de elementos no estructurales, tales como tabiques de ladrillo, revestimientos, paneles, etc. Estos elementos también son objeto del daño que se produce en los terremotos. Valorar el daño con una inspección visual es muy complicado, además de que proporcionaría una información del daño aparente del hormigón según las grietas visibles, mientras que los daños estructurales que se asocian al deslizamiento entre el hormigón y las barras de acero que relacionan el daño acumulado en los numerosos ciclos [2], no se podrían analizar.

La medición, registro y análisis de las señales de Emisión Acústica (EA) generadas por el proceso de fisuración del material resulta una operación muy eficaz, jugando un papel muy importante como técnica de inspección en tiempo real en lugares de difícil acceso.

Hasta hace relativamente poco, la técnica de EA se ha aplicado solo a elementos de HA individuales (vigas, pilares) [1,2,3]. Pocos estudios se han llevado a cabo sobre conjuntos de varios elementos estructurales [4]. En este último caso, los estudios se han centrado en la EA generada por cargas relativamente simples, tales como las vibraciones producidas por el tráfico. Un ejemplo es la investigación llevada a cabo por Yuyama y colaboradores [1] que estudian el daño por fatiga de losas de HA sometidas a cargas cíclicas.

El proyecto en el que se enmarca este trabajo, investiga la aplicabilidad de la técnica de EA para evaluar el daño que se produce en estructuras de HA que se someten a una carga cíclica sísmica. En comparación con el estudio de EA que se produce en una estructura HA sometida a cargas estáticas o en estado estacionario de cargas dinámicas de bajo ciclaje, la estructura de HA sometida a cargas de tipo dinámico que se producen en un terremoto necesita de un análisis más complejo porque en estas se registran señales procedentes de una gran cantidad de falsas fuentes de ruido. Por lo tanto, el análisis de señales de EA registradas durante un evento sísmico es más complejo y su relación con el daño acumulado en la estructura requiere, posterior al evento, de un trabajo de procesamiento mucho mayor.

Este estudio se centra en la programación de un software en matlab (es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio, lenguaje M) y de un posterior criterio para el filtrado de las señales de EA obtenidas de la medición de EA generada en las estructuras de HA sometidas a cargas dinámicas sísmicas. Este criterio pretende diferenciar las señales no relacionadas con el daño en el hormigón creadas por falsas fuentes de ruido, de las señales de EA relacionadas con el daño. Bajo este criterio, se analizarán los daños cuantificados en términos de energía de EA la cual está fuertemente relacionada con la energía de deformación plástica disipada por el hormigón. Este documento presenta los resultados de EA registrados durante un ensayo que se llevó a cabo con la mesa sísmica de la Universidad de Granada, donde se investiga el comportamiento sísmico de las estructuras de HA diseñadas de acuerdo a los códigos sísmicos de España.

## 2. ENSAYOS DINÁMICOS

### 2.1. Descripción del espécimen

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 ilustra en la Figura 2.1. El espécimen está formado por cuatro

zapatas aisladas, unidas entre sí por zunchos de acero que sirven para transmitir al terreno las cargas. De ellas arrancan cuatro pilares solidarizados en un forjado unidireccional a través de los nudos de cuatro vigas. Dichas vigas se prolongan para permitir la existencia de un voladizo en uno de sus laterales. Tiene una altura de 2.11 m, desde la base inferior de la zapata hasta las rótulas. Alberga una superficie de 3x3 m<sup>2</sup> en planta. Las placas apoyadas en el forjado simulan las cargas de las demás plantas y las sobrecargas de uso.

El hormigón usado en la elaboración del espécimen es un hormigón HAC-25. Es un hormigón fluido con características autocompactantes, formulado a base de cemento blanco BL II/A-LL 52,5R, aditivos especiales y áridos seleccionados, que posee una consistencia fluida sin segregación y una óptima capacidad de relleno. La armadura longitudinal con la que se ejecutaron los pilares fue de  $\varnothing 8$ mm de diámetro y el estribado de  $\varnothing 4$ mm. En las vigas la armadura longitudinal fue de  $\varnothing 8$ mm y los estribos de  $\varnothing 4$ mm. El prototipo de las viguetas fue con nervios de  $\varnothing 6$ mm y estribos  $\varnothing 4$ mm. Se emplearon bovedillas de 29.3x47 mm de poliespan recuperables. Fue diseñada siguiendo los códigos actuales de la norma española CTE[5] y EHE-08[6].

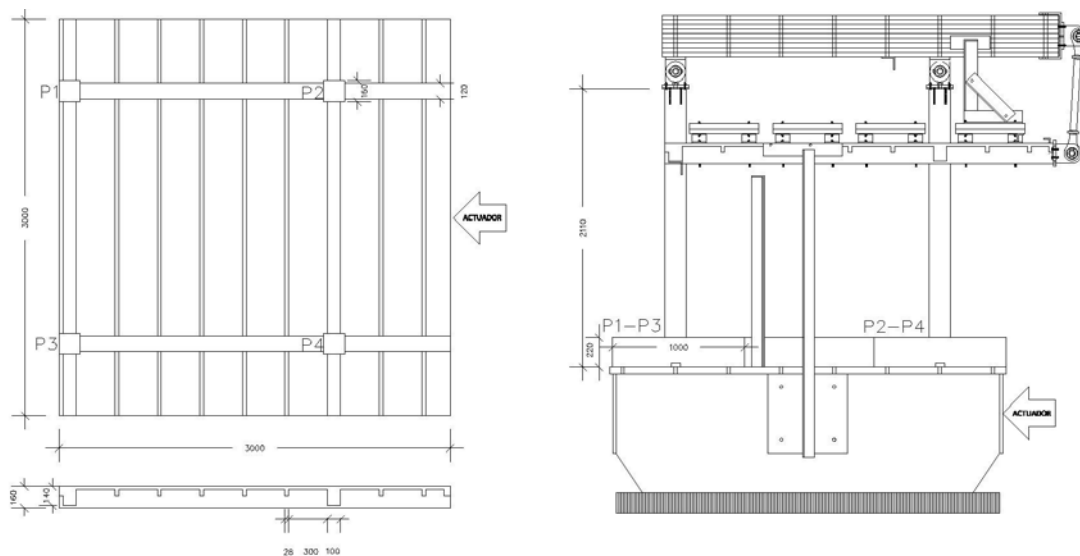
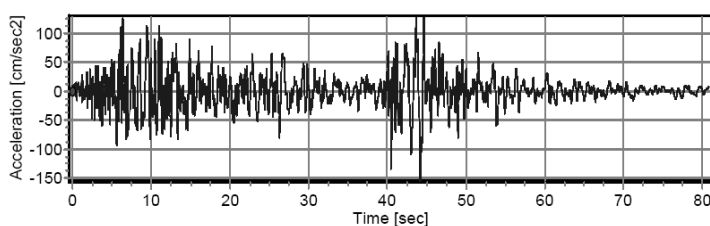


Figura 2.1: Especimen en planta, alzado y sección (cotas en mm).

## 2.2. Configuración experimental (Terremoto aplicado)

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  $\lambda = 0.4^{1/2}$ . Aunque se realizaron cuatro simulaciones sísmicas con aceleración máxima creciente, en este trabajo solo se presentan los resultados de una concreta (Calitri-100). El acelerograma que se utilizó en todas las simulaciones fue el mismo. Solo cambiaba de unos a otros el factor de escala de la aceleración máxima (PA), (véase la Figura 2.2).



Simulaciones sísmicas	Aceleración Máxima (PA)
Calitri_50	0.084 g
Calitri_100	0.18 g
Calitri_200	0.34 g
Calitri_300	0.58 g

Figura 2.2: Acelerograma de la componente del terremoto Campano Lucano aplicado. Aceleración máxima según la simulación sísmica aplicada.

### 2.3. Instrumentación para la adquisición de la emisión acústica

Para medir las señales de EA se utilizó un sistema de adquisición Vallen System ASMY-5. 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  $\mu$ s. Se utilizó un pretrigger de 200 muestras antes de que la señal pasase el umbral de detección de 50 dB. Por lo tanto la duración de la ventana de registro fue  $t_{max} = 819.2 \mu$ s. Antes de cada ensayo se midió el ruido eléctrico en el laboratorio y se hizo una prueba de calibración de los sensores rompiendo la mina de los lápices de emisión acústica (Fuente estandarizada Hsu-Nielsen) según la norma EN 1330-9:2009.

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. 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 monitorizaron las señales de EA del ensayo Calitri100 del pilar número tres, objeto de este trabajo, fueron los sensores S7, S8, S13 y S17. 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 (véase la Figura 2.3) fue en base a la experiencia de los ensayos realizados anteriormente.

EL fundamento físico del filtrado consiste en que las señales de EA se generan debido a la fisuración en el hormigón. Estas señales tienen entre sus propiedades ser de carácter impulsivo, de corta duración y transitorias. En cambio, las señales de EA por fricción son continuas y de larga duración, y por tanto, de naturaleza estacionaria.

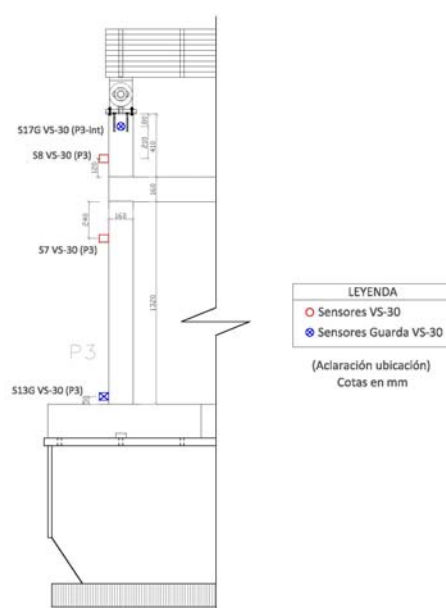


Figura 2.3: Ubicación de los sensores en el espécimen.

## 2.4. Monitorización y adquisición de las deformaciones, desplazamientos y aceleración

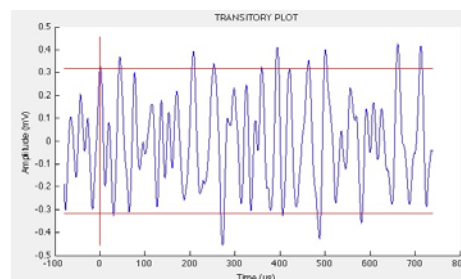
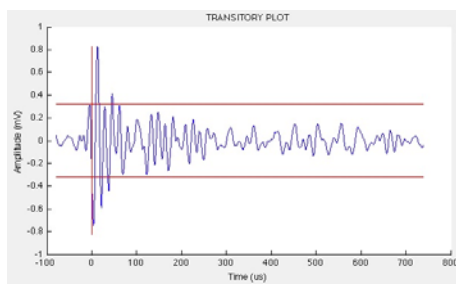
El desplazamiento, las deformaciones y la aceleración del espécimen fueron adquiridos de forma simultánea a la EA en cada simulación sísmica con una instrumentación diferente a la empleada para la EA. Esta instrumentación constó de varios LVDT (medidores de desplazamiento), acelerómetros y galgas extensiométricas (medidores de deformación unitarios). El sistema de adquisición de datos usado fue el MGCPlus de la marca Hottinger Baldwin Messtechnik. Esta instrumentación estuvo formada por ciento noventa y dos galgas extensiométricas, doce acelerómetros y ocho LVDT. Este sistema de adquisición se sincronizó con el sistema de EA, aunque la frecuencia de muestreo fue diferente para cada uno (2.5 MHz para el sistema de EA y 200 Hz para el otro).

## 3. PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA EL FILTRADO DE SEÑALES DE EA.

En primer lugar, se llevó a cabo una observación detallada de las formas de las ondas de EA registradas por los cuatro sensores en el ensayo Calitri-100. Se observaron dos tipos de señales diferentes: unas señales tipo I donde la energía se concentra principalmente al comienzo de la señal y cuya duración no fue excesivamente alta y unas señales tipo II cuya energía no se concentra al comienzo, sino que se distribuye a lo largo de toda la señal y que era de mayor duración. Estas características complican la separación por los filtros tradicionales basados únicamente en los parámetros clásicos de las señales de EA, por lo que se decidió desarrollar un procedimiento adicional de filtrado de señales.

Este procedimiento de filtrado se basa en nuestra propia experiencia previa y en base a la documentación bibliográfica mencionada, donde las señales de corta duración y cuya energía se concentra al principio de la señal, se corresponden con las fisuras del hormigón, mientras que las señales designadas de tipo II, de mayor duración y con una distribución de la energía uniforme son producidas por fuentes ruidosas ajenas a la fisuración del hormigón. El primer procedimiento implica representar la amplitud de las señales frente a su duración. Para ello se creó un software con el uso de matlab que representa cada una de las señales extraídas del programa y muestra todos sus parámetros tradicionales. El segundo paso, consistió en tomar dos ventanas temporales  $W_1$  y  $W_2$ .  $W_1$ : 0-328  $\mu$ s y  $W_2$ : 328.4-739.2  $\mu$ s, a las cuales se les calculó la media cuadrática (RMS). El criterio físico utilizado para la elección de la duración de  $W_1$  fue que al ser la mayor velocidad de onda de 3.2 mm/ $\mu$ s y la distancia máxima al centro del pilar 1050 mm, el tiempo máximo en llegar a uno de los sensores era de 328  $\mu$ s. El proceso de filtrado consistió en que el valor RMS de la ventana  $W_1$  ( $R_1$ ) fuese mayor que el valor RMS de la ventana  $W_2$  ( $R_2$ ), es decir, que  $R_1 > R_2$ . De este modo las señales que pasan el filtro son las que se consideraron tipo I y aquellas que quedan filtradas son las consideradas del tipo II.

En la columna de la izquierda de la Figura 2.4 se observa la representación de tres ejemplos de señales que han pasado el filtro, que son consideradas de tipo I. En la columna de la derecha están representada tres señales que han sido filtradas por el cálculo RMS del ventaneo creado.



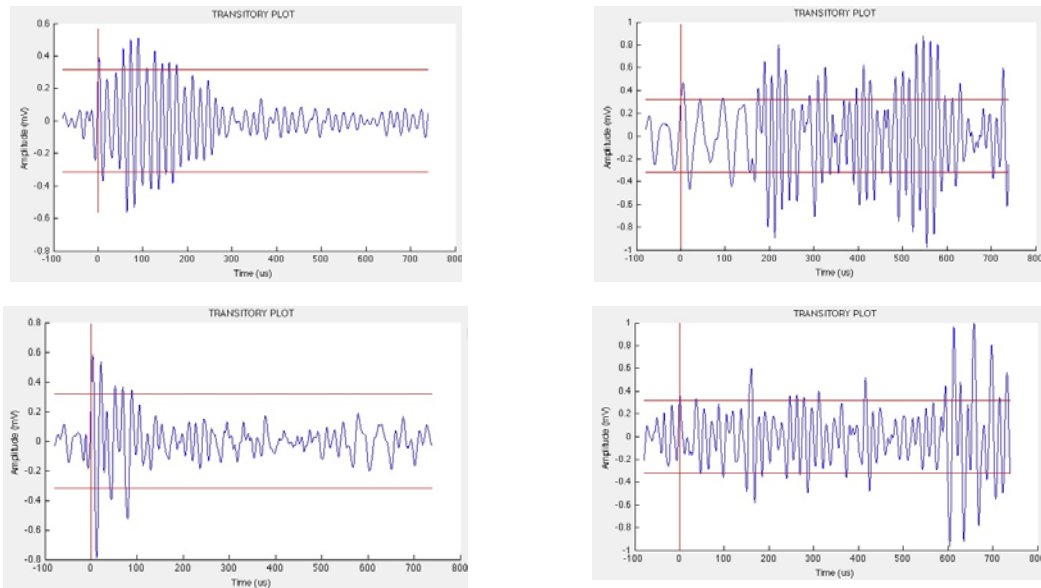


Figura 2.4: Representación de amplitud frente al tiempo de señales tipo I (columna izquierda) y tipo II (columna derecha) registradas durante el ensayo sísmico Calitri100 por sensores VS30.

#### 4. REPRESENTACIÓN DE LA ENERGÍA DE EA, LA ACELERACIÓN Y LA LOCALIZACIÓN DE LAS SEÑALES FILTRADAS

Para la representación de la energía de las señales tipo I que han pasado el ventaeado creado calculando el valor RMS de las señales y la aceleración del ensayo que produjo la mesa sísmica, se creó otro software que representa la energía acumulada y la aceleración frente al tiempo (véase la Figura 2.5). Hay que destacar cómo aumenta la energía de EA en los momentos donde hay mayor aceleración del sismo. En el ensayo se alcanzó una aceleración de 0.18 g con una energía acumulada de  $5.61 \cdot 10^6$  eu. En un trabajo anterior [7], se comprobó que la energía de EA es un buen indicador del daño en el HA ya que está fuertemente relacionada con la energía de deformación plástica del hormigón.

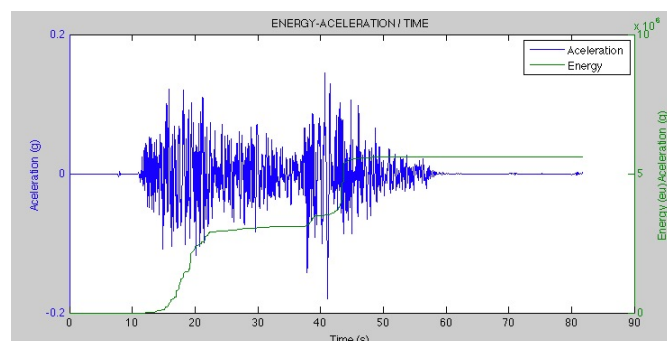


Figura 2.5: Representación de la energía y la aceleración frente al tiempo de señales tipo I registradas durante los ensayos sísmicos por los sensores VS30.

Con el software creado también se puede representar la localización de los eventos de EA como muestra la Figura 2.6. En ella se puede observar como la mayor cantidad de energía de EA estuvo localizada entre los sensores S7 y S8, donde se localizó también mayor número de eventos y donde posteriormente macrofisuró el hormigón llegando a la rotura en el nudo de unión entre el pilar y la viga (véase la Figura 2.7)

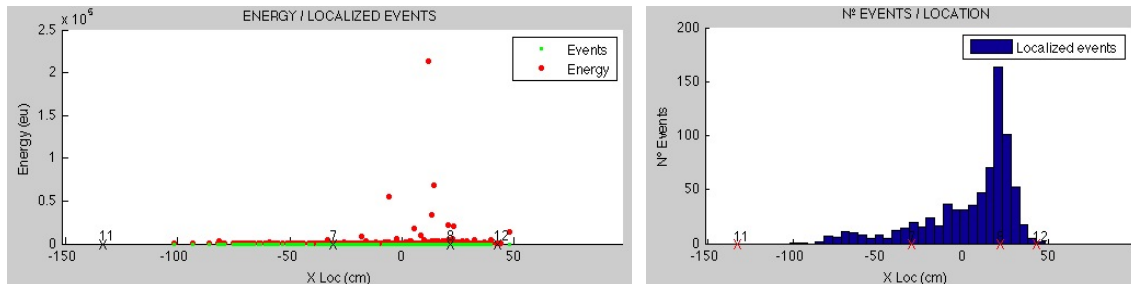


Figura 2.6: Representación de la energía de los distintos eventos localizados de las señales tipo I registradas durante los ensayos sísmicos por los sensores VS30.

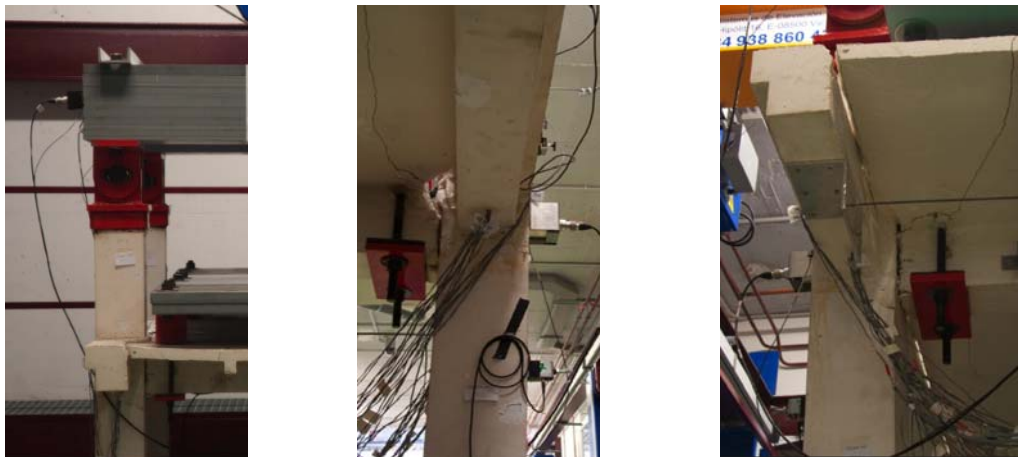


Figura 2.7: Representación de macrofisuras en el nudo de unión del pilar con la viga.

## 5. CONCLUSIONES

La técnica de emisión acústica (EA) es efectiva para evaluar los daños en estructuras de hormigón armado (HA) sometidas a cargas sísmicas. Uno de los principales desafíos de la técnica de EA es la eliminación de las señales que proceden de fuentes ruidosas y dificultan el estudio de las señales relacionadas con el daño que se produce en el hormigón. Con este fin, se propone un procedimiento sencillo para el filtrado de las señales de EA causadas por el daño de estructuras de HA. Este procedimiento se ha aplicado a las medidas de EA obtenidas de los ensayos dinámicos de movimiento de la mesa sísmica en la Universidad de Granada. El procedimiento propuesto consiste en un filtro que se basa en el cálculo de la media cuadrática (RMS) de la señal de EA de las diferentes ventanas temporales. Mediante el uso de este filtro se separaron señales de EA que concentraban su energía al comienzo de la señal y tenían un periodo de corta duración, de las señales procedentes de fuentes ruidosas que presentaban una energía uniforme y eran de mayor duración. Además se ha determinado que existe una buena relación entre la localización de la energía de EA y el daño producido en la estructura de HA. Dicha relación sugiere que con el procedimiento propuesto para el filtrado de señales de EA se pueden elaborar índices de daño basados en la energía de EA capaces de evaluar daños en estructuras sometidas a cargas sísmicas.

### Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias a la financiación del gobierno de España y la Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología de la Junta de Andalucía (Proyecto P07-TEP-02610). También recibió apoyo de la Unión Europea (Fondos Europeos de Desarrollo Regional).

### 6. REFERENCIAS

- [1] Yuyama S, Li ZW, Yoshizawa M, Tomokiyo T, Uomoto T. (2001), "Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission.", *NDT&E International*, 34 (6),381:387.
- [2] Yuyama S, Li ZW, Ito Y, Arazoe M. (1999), "Quantitative analysis of fracture process in RC column foundation by moment tensor analysis of acoustic emission.", *Construction and Building Materials*, 13 (1-2),87-97.
- [3] Benavent-Climent, A., Castro, E. and Gallego, A. (2009), "AE Monitoring for Damage Assessment of RC Exterior Beam-Column Subassemblages Subjected to Cyclic Loading.", *Structural Health Monitoring*, 8, 175-189.
- [4] Carpinteri A, Lacidogna G, Pugno N. (2007), "Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring". *Eng Frac Mech*, 74 (1-2), 273-289.
- [5] Ministerio de Ciencia e Innovación (España), Código Técnico de la Edificación CTE.
- [6] Ministerio de Fomento (España), Instrucción de hormigón estructural EHE (2008).
- [7] Benavent-Climent A, Gallego A. And Vico J.M. (2011), "An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads", *Structural Health Monitoring*, June.