



EVALUACIÓN DE DAÑO POR CARGAS SÍSMICAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE LA TÉCNICA DE EMISIÓN ACÚSTICA

DAMAGE EVALUATION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO EARTHQUAKES USING THE ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

Autores / Authors: A. Gallego, A. Benavent-Climent, C. Infantes, L. Morillas, F. Sagasta, A. Sánchez-Parejo, E. Suárez, J.L. Torné
Grupos de Investigación SNADS y TEP-167, Universidad de Granada / Research groups SNADS and TEP-167, University of Granada

RESUMEN

El trabajo presenta los resultados de aplicar el método de Emisión Acústica (EA) a dos modelos a escala de estructuras de hormigón armado (HA) de diferente tipología, sometidas a cargas dinámicas mediante la mesa sísmica uniaxial MTS 3 m x 3 m del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Granada. El objetivo final de esta línea de investigación es el desarrollo de índices de daño fiables que permitan evaluar en tiempo real el daño de la estructura mediante la medición y análisis de las señales de EA

generadas durante los procesos de fractura del hormigón. Para ello, dos estructuras (una losa de hormigón armado con pilares de acero, y una estructura porticada de HA), se sometieron a diferentes simulaciones sísmicas de diferente nivel de aceleración, hasta su colapso. El trabajo muestra la existencia de una fuerte correlación entre la energía de deformación plástica disipada por la estructura y la energía de las señales de EA, resultado prometedor para el objetivo final anteriormente comentado.

ABSTRACT

This paper presents the results of applying the acoustic emission (AE) technique to two specimens representing reinforced concrete (RC) structures of two different typologies subjected to seismic loads by the uniaxial shaking table MTS 3 m x 3 m of the Laboratory of Dynamics of Structures of the University of Granada. The final objective is the development of a reliable damage index that enables the permanent evaluation of the structural damage in real time through the measurements of

the AE signals generated during cracking process of concrete. For this, two structures (a RC slab supported on 4 steel columns and a RC frame structure), were subjected to different seismic simulations with different acceleration levels, until collapse. The paper shows that there is a strong correlation between the plastic strain deformation energy dissipated by the structure and the energy of the acoustic emission signals emitted, promising result to get the final objective.



Introducción

Terremotos como los de Northridge (EEUU, 1994), Kobe (Japón, 1995) o Chile (2010) han puesto de manifiesto que las edificaciones constituyen un entorno muy sensible a los mismos, incluso en países desarrollados. Esto afecta no sólo a los países situados en zonas de alta sismicidad como Japón, sino también a otros de sismicidad más moderada como Italia o España. En Italia, el reciente terremoto de L'Aquila (2009) provocó 306 víctimas, 1.500 heridos y daños severos o el colapso de cerca de 15.000 edificios (casi el 70% de la ciudad). Muchos de estos edificios estaban contruidos con estructuras modernas de hormigón armado. España tampoco escapa de este peligro, aunque, afortunadamente, los terremotos destructivos tienen períodos de recurrencia relativamente largos (el último había sido en Arenas del Rey en 1884). No obstante, terremotos como el de L'Aquila son perfectamente esperables en el sur de España, cuyos niveles de peligrosidad sísmica son comparables a los de Italia, Portugal o Grecia (Figura 1). Buena prueba de ello es el reciente terremoto de Lorca de mayo de 2011.

Introduction

Earthquakes such as Northridge (USA, 1994), Kobe (Japan, 1995) or Chile (2010) have shown that the buildings are very sensitive to the earthquakes, even in developed countries. Not only countries located in regions of high seismicity such as Japan are affected by earthquakes, but also others in moderate seismic areas, such as Italy or Spain. In Italy, the recent earthquake of L'Aquila (2009) caused 306 victims, 1500 people were injured, caused severe damages, and around 15000 buildings (about the 70% of the city area) collapsed. Spain is also and earthquake-prone area, but fortunately the destructive earthquakes have relatively long return periods (the last one was in Arenas del Rey, 1884). Earthquakes such as L'Aquila can be expected in the south of Spain, because its seismicity level is similar to Italy, Portugal or Greece (Figure 1). A good example is the recent earthquake in Lorca in May of 2011.

RC structures located in earthquake-prone areas are susceptible to damage caused by the cyclic

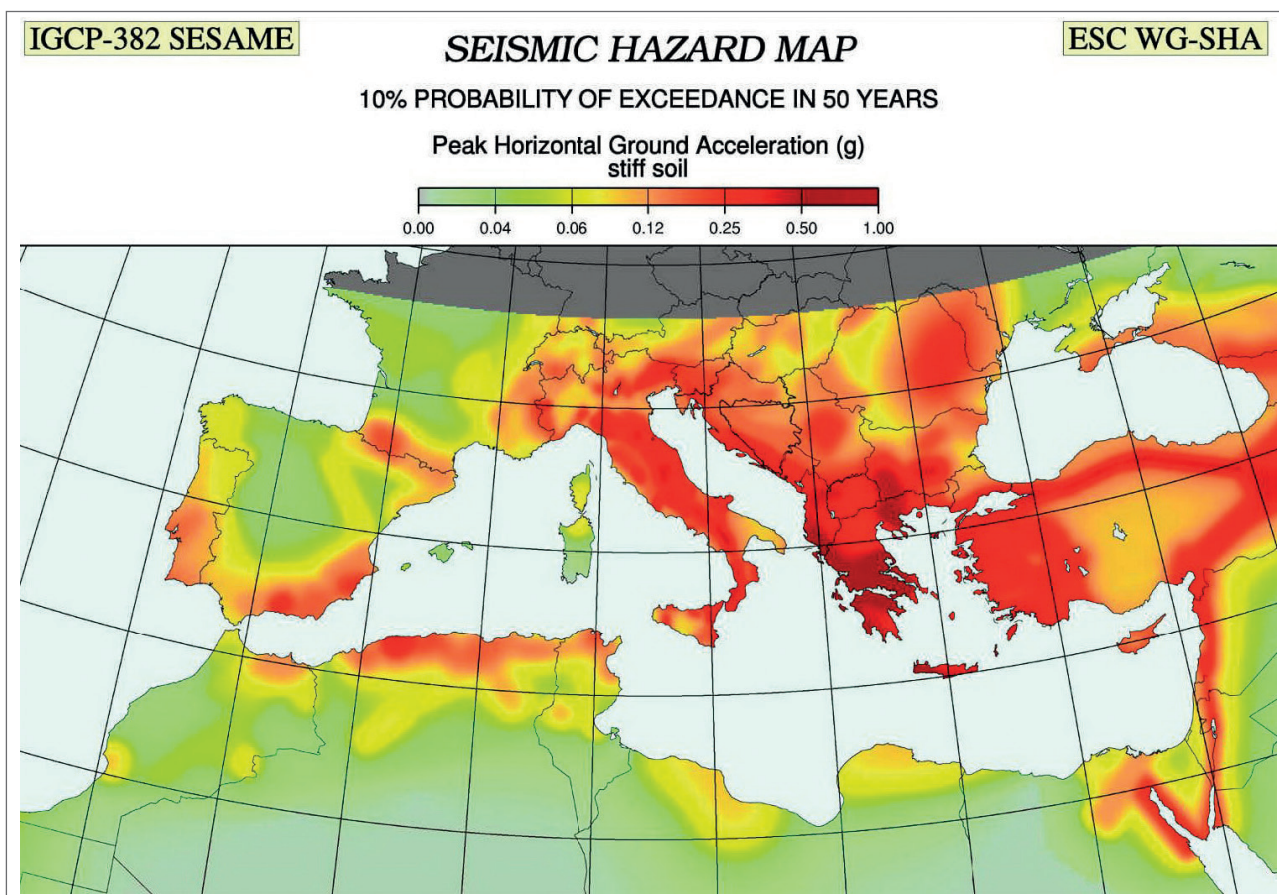


Figura 1. Mapa de riesgo sísmico (Aceleración máxima del terreno con el 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años)

Figure 1. Seismic risk map (peak ground acceleration with 10% of probability of being exceeded in 50 years)



Las estructuras de HA localizadas en zonas propensas a los terremotos son susceptibles de sufrir daños causados por las cargas cíclicas inducidas por el movimiento del suelo durante una crisis sísmica. Estas estructuras están, normalmente, envueltas con elementos no estructurales como particiones interiores y cerramientos exteriores de fábrica de ladrillo, revestimientos, enlucidos de cemento, estucos, etc., que hacen complicada una simple inspección visual. Es aquí donde las técnicas de ensayos no destructivos pueden jugar un papel importante. Entre ellas, la medida, registro y análisis de las señales de EA generadas durante ensayos previos, demuestran la eficacia de este método de ensayos no destructivos para ocuparse de partes remotas o inaccesibles de la estructura. El método de EA ha sido aplicado a elementos de HA, principalmente a nivel de material (hormigón) o de elemento estructural (vigas, columnas) [1-3]. Sin embargo, hasta la fecha se han realizado pocas investigaciones a nivel global de estructura. Además, los estudios de aplicación del método de EA a la monitorización de daño en estructuras de HA sometidas a cargas transitorias muy complejas inducidas por terremotos son muy escasos [1, 4-10].

Este artículo presenta algunos interesantes y prometedores resultados de la EA registrados por el grupo de investigación SNADS de la Universidad de Granada, durante dos series de ensayos dinámicos realizados mediante la mesa sísmica del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Granada por miembros del grupo de investigación TEP-167, en el marco de varios proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia (Plan Nacional BIA 2008 00050) y de la Junta de Andalucía (Proyecto de Excelencia P07-TEP-02610) cuyo objetivo principal era investigar el comportamiento sísmico de estructuras de HA convencionales y estructuras equipadas con sistemas de control pasivo (disipadores de energía de tipo histerético). En los últimos artículos del grupo se puede encontrar más información de esta línea de investigación [5-10].

Caso 1: losa de hormigón sobre pilares de acero

En primer lugar, se presentan los resultados de un prototipo de estructura formado por una losa de hormigón armado de 4.8 x 4.8 m. de base y 125 mm de espesor, apoyada en 4 pilares de acero de 2.8 m de alto, derivado de aplicar factores de escala $\lambda_l=1/2$, $\lambda_a=1$ y $\lambda_\sigma=1$,

loading induced by the ground motion produced by seismic events. The RC structures are commonly covered up by non-structural elements such as brick veneers, casings, cement plasters, stuccos, etc., making the simple visual inspection very complicated. It is here where non-destructive techniques can play an important role. Among them, the measurement, recording and analysis of AE signals generated during a test or operation proves the efficiency of the non-destructive technique to deal with remote or inaccessible parts of a structure. The AE technique has been applied to RC elements mostly to the material (concrete) or individual elements (beams, columns) [1-3]. To date, very little research has been carried out on assemblages of several structural elements. Moreover, studies on the application of AE to monitor damage on RC structures subjected to the very complex transient loading induced by earthquakes are very rare [1, 4-10].

This paper presents some interesting and promising results of the AE recorded by the SNADS research group during two series of shaking table tests carried out by members of the research group TEP-167 of the University of Granada, in the context of several research projects sponsored by the Spanish Ministry of Education (BIA2008-00050) and the Regional Government of Andalucía (P07-TEP-02610) aimed at investigating the seismic performance of conventional RC structures and structures equipped with passive control systems (hysteretic dampers). More information can be found on the last papers of the group [5-10].

Test 1: concrete slab with steel columns

Firstly, paper shows the results of a prototype of structure consisted of RC slab with 4.8 x 4.8 m² plan and 125 mm of depth, supported on four box-type steel columns of 2.8 m height, derived by applying the following similarity laws: $\lambda_l=1/2$, $\lambda_a=1$ and $\lambda_\sigma=1$, where λ_l , λ_a and λ_σ are the scaling factors by which the geometry, the acceleration and the stress in the prototype must be multiplied to obtain the corresponding dimensions in the test model (see Figures 2 and 3). The average yield stress of the reinforced steel was 467 MPa, and the average concrete strength



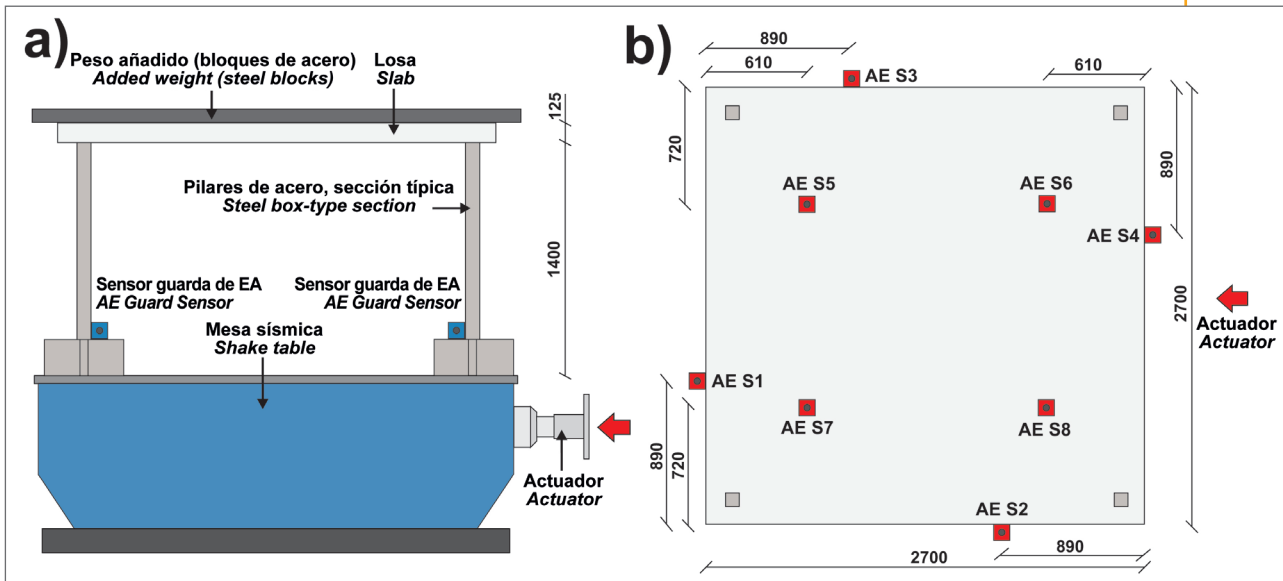


Figura 2. Ensayo 1: Izquierda: Montaje experimental. A la derecha: Modelo de ensayo: planta (vista desde abajo)
 Figure 2. Test 1: Left: Experimental set-up. Right: Test model: plan (bottom view)

para las dimensiones, aceleraciones y tensiones, respectivamente (véanse las Figuras 2 y 3). La tensión de fluencia del acero de las armaduras fue de 467 MPa, y la resistencia del hormigón, 23.5 MPa. Los especímenes se ensayaron con una mesa sísmica MTS 3 x 3 m² sometiéndolos al acelerograma registrado en Calitri 1980 NS durante el terremoto de Campano-Lucano (Italia), tal y como se muestra en la Figura 4. Se aplicaron dos series de simulaciones sísmicas, en cada una de las cuales el

was 23.5 MPa. The specimen was tested in the MTS 3 x 3 m² shaking table of the Laboratory of Dynamics of Structures of the University of Granada, under an accelerogram recorded at Calitri (Italy) during the Campano-Lucano earthquake (1980) shown in Figure 4. Two series of seismic simulations were applied to the test model, by scaling the peak acceleration (PA) applied to the table as indicated in Table 1, in terms of the gravity acceleration g .

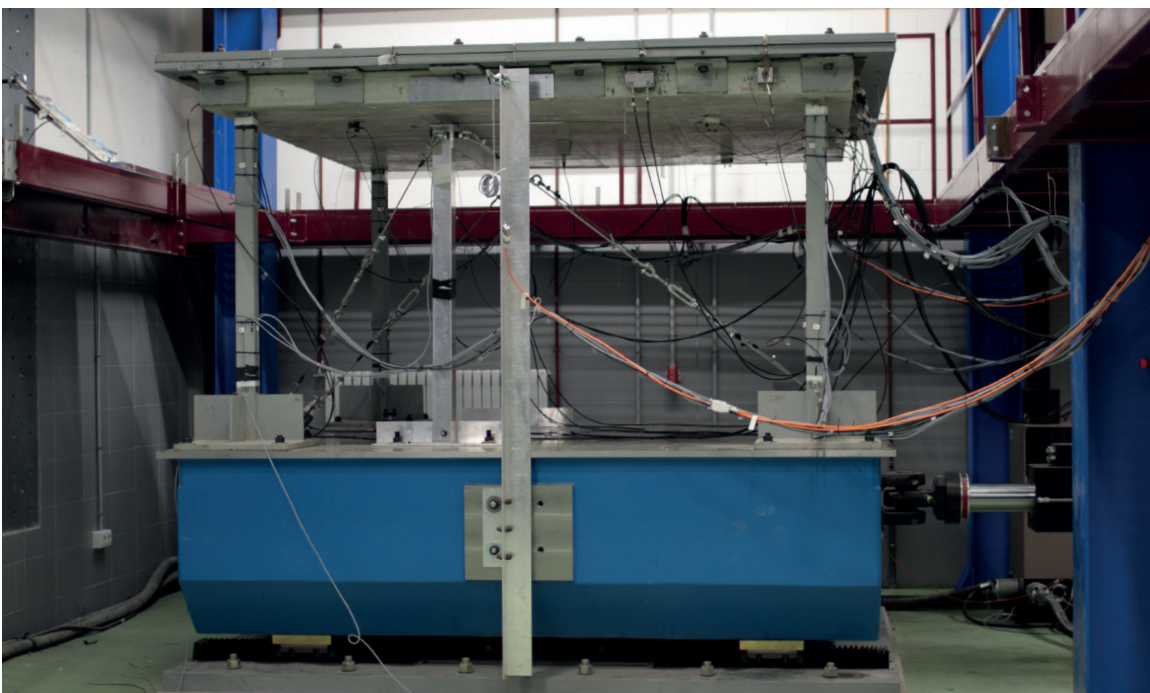


Figura 3. Ensayo 1: Vista general del experimento
 Figure 3. Test 1: General view of the experiment



Simulación Sísmica <i>Seismic Simulation</i>	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2
PA (g)	0.08	0.10	0.12	0.19	0.29	0.38	0.44	0.58	0.19	0.38	0.58	0.66	0.75	0.95	1.10

Tabla 1. Ensayo 1: Simulaciones sísmicas

Table 1. Test 1: Seismic simulations

acelerograma aplicado a la mesa se escaló a diferentes valores de pico (PA), que se indican en la Tabla 1 expresados en términos de la aceleración de la gravedad g.

Para medir la EA generada por el hormigón durante cada simulación sísmica se usó un equipo *Vallen Systeme* ASMY-5 y se colocaron 8 sensores de baja frecuencia (en el rango 20-100 kHz), 4 en el lateral y 4 en la parte baja de la losa (véase la Figura 2). Para registrar las señales de EA, se usaron filtros paso alta de 25 kHz y paso baja de 180 kHz, así como un umbral de detección de 45 dB. Además, para prevenir el ruido generado por fricción entre la base de las columnas y la mesa sísmica, se colocaron 4 sensores guarda (uno por cada columna) y se realizó un adecuado filtrado de señales de rozamiento, siguiendo el procedimiento descrito en [9]. Una vez filtradas las señales, se agruparon en eventos de EA mediante el software comercial *VisualAE™*. Sobre estos eventos se calculó la energía MARSE de la primera señal de cada evento, así como toda la energía acumulada a lo largo de cada simulación sísmica. A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra la historia de energía de EA registrada durante la simulación sísmica C2, junto con la historia de aceleración de la mesa. Puede verse, claramente, como la energía de EA, y por tanto, el nivel de microfisuración del hormigón, tiende a aumentar con la aceleración de la mesa.

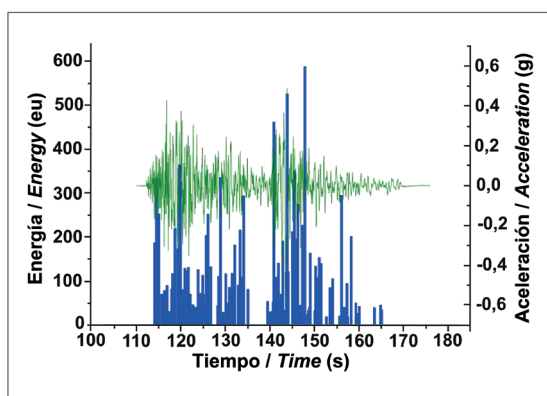


Figura 4. Ensayo 1: Energía de Emisión Acústica registrada durante la simulación sísmica C2

Figure 4. Test 1: History of AE energy registered during the seismic simulation C2

A *Vallen Systeme* AMSY-5 was used to measure the AE signals generated by concrete during the tests. Eight AE low-frequency sensors (in the range of 20-100 kHz) were placed, four in the lateral sides of the specimen and four on the bottom of the slab (see Figure 2). The filters used to the AE data acquisition were 25 kHz high pass filters and 180 kHz low pass filters. The threshold was set to 45 dB. Moreover, four AE guard sensors were placed (one on each column) to avoid the undesired friction noise generated in the connection between the base plate of the columns and the surface of the shaking table. An appropriate filtering of signals of friction were carried out [9].

After the signals passing, the filters were grouped in AE events using the commercial software *VisualAE™*. Over these events, the MARSE energy of the first hit of the event only and the accumulated AE energy during each simulation were calculated. As an example, the Figure 4 shows the history of AE energy registered during the seismic simulation C2 and the acceleration history of the shaking table. It can be seen clearly that the AE energy, and therefore, the microcracking level of the concrete, tend to increase when the acceleration of shaking table increases.

Simultaneously, the absolute response acceleration and the relative displacement of the slab with respect to the table were measured, allowing the calculation of the dissipated plastic strain energy of the structure, W_p [6]. Figure 5 shows this accumulated energy along all seismic simulations applied, normalizing to the value after the seismic simulation F1, named W_{p0} ($=1.41 \times 10^7$ Nmm). It was confirmed that until the F1 simulation the steel reinforcement of the RC slab and the steel columns remained in elastic range, so the plastic deformation energy is exclusively dissipated by the concrete. From F1 onwards, the columns reached the yielding point, therefore, W_p is partially consumed by the concrete, W_{pc} , and the columns, W_{ps} , that is to say, $W_p = W_{pc} + W_{ps}$.

Paralelamente, a partir de la medición de la aceleración absoluta de respuesta y del desplazamiento relativo de la losa respecto a la mesa, fue posible calcular la energía de deformación plástica disipada por la estructura, W_p (véase [6] para más detalles). La Figura 5, muestra esta energía de deformación plástica acumulada a lo largo de todas las simulaciones aplicadas, normalizada al valor al final de la simulación sísmica F1, denominado W_{p0} ($=1.41 \times 10^7$ Nmm). Hasta la simulación F1, la energía de deformación plástica fue disipada exclusivamente por el hormigón, ya que hasta dicha simulación sísmica mediante medidas extensométricas se comprobó que las armaduras de la losa y el acero de las columnas permanecieron en régimen elástico. A partir de F1, las columnas plastificaron, por lo que W_p se consumió parcialmente por el hormigón, W_{pc} , y parcialmente por las columnas W_{ps} , (es decir, $W_p = W_{pc} + W_{ps}$).

Por otro lado, la Figura 5 muestra también la energía de EA acumulada, E^{AE} , normalizada al valor tras la simulación F1, ($=14500$ ue). Durante las simulaciones sísmicas A1 a F1 (etapa I) el acero permaneció en régimen elástico, por lo que $W_{ps} = 0$ y $W_{pc} = W_p$. Como puede verse en la Figura 5, en esta etapa existe una clara correlación entre la energía de emisión acústica y la energía de deformación plástica. Por el contrario, durante las simulaciones G1, H1 y A2 a G2 (etapa II), $W_{pc} < W_p$. La E^{AE} registrada está relacionada solamente con la fisuración del hormigón (es decir únicamente con W_{pc}), ya que con el umbral usado (45 dB) es imposible detectar la EA generada por la plastificación del acero, lo que justifica que la energía de deformación plástica sea claramente mayor que la energía acústica en la etapa II (véase Figura 5). Por tanto, en la primera etapa I, se cumple que:

$$\frac{W_{pc}}{W_{pc,o}} = \frac{E^{AE}}{E_o^{AE}}$$

Gracias a esta estrecha relación comprobada experimentalmente, y a la utilización de un índice de daño mecánico ID que relaciona el daño con la cantidad de energía de deformación plástica acumulada se puede llegar a comprobar (véase [6] para más detalles) que:

$$ID = \frac{E^{AE}}{0.0265V^{0.77}}$$

donde V es el volumen de la estructura y E^{AE} es la energía de emisión acústica. El factor 0.0265 debe ser calibrado en cada caso según la instrumentación de emisión

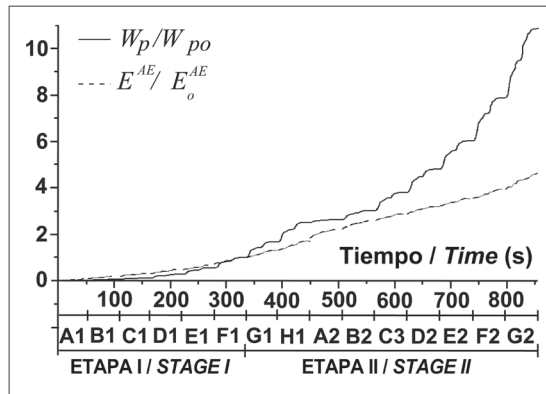


Figura 5. Energía de deformación plástica acumulada W_p , y energía de emisión acústica acumulada, E^{AE} , normalizada al valor final de la simulación F1

Figure 5. Test 1: History of accumulated energy of plastic deformation W_p , and of AE, E^{AE} , normalized to the value of final of simulation F1

On the other hand, Figure 5 shows the accumulated AE energy, E^{AE} , normalized to the value after the seismic simulation F1, E^{AE} ($=14500$ ue). During the seismic simulations A1 to F1 (stage I) the steel remained in elastic range, so $W_{ps} = 0$ and $W_{pc} = W_p$. In this stage, a good correlation between AE energy and plastic deformation energy can be seen in Figure 5. In contrast, during the seismic simulation G1, H1 and from A2 to G2 (stage II), $W_{pc} < W_p$. However, the registered E^{AE} is related only with the cracking of concrete (W_{pc}), as the detection threshold was 45 dB, and therefore it was impossible to detect the AE from the steel plastification. For this reason, the plastic deformation energy is clearly higher than the AE energy in the stage II (see Figure 5). Therefore, in the stage I, it was verified that

$$\frac{W_{pc}}{W_{pc,o}} = \frac{E^{AE}}{E_o^{AE}}$$

Due to this close relationship experimentally verified, and the use of a mechanical index of damage ID that related the damage with the amount of plastic strain energy dissipated, it is possible to prove (see [6] for details) that

$$ID = \frac{E^{AE}}{0.0265V^{0.77}}$$

where V is the volume of the structure and E^{AE} is the AE energy. The factor 0.0265 must be calibrated in each case according to the AE instrumentation used.



acústica utilizada. Esta fórmula permitiría evaluar de una forma cuantitativa el índice de daño de una estructura de este tipo, sometida a cargas sísmicas, mediante la medición exclusiva de la emisión acústica liberada por ella.

This formula allows the quantitative evaluation of the damage index in this kind of structures, subjected to seismic loads, by measuring only the AE released by the structure.

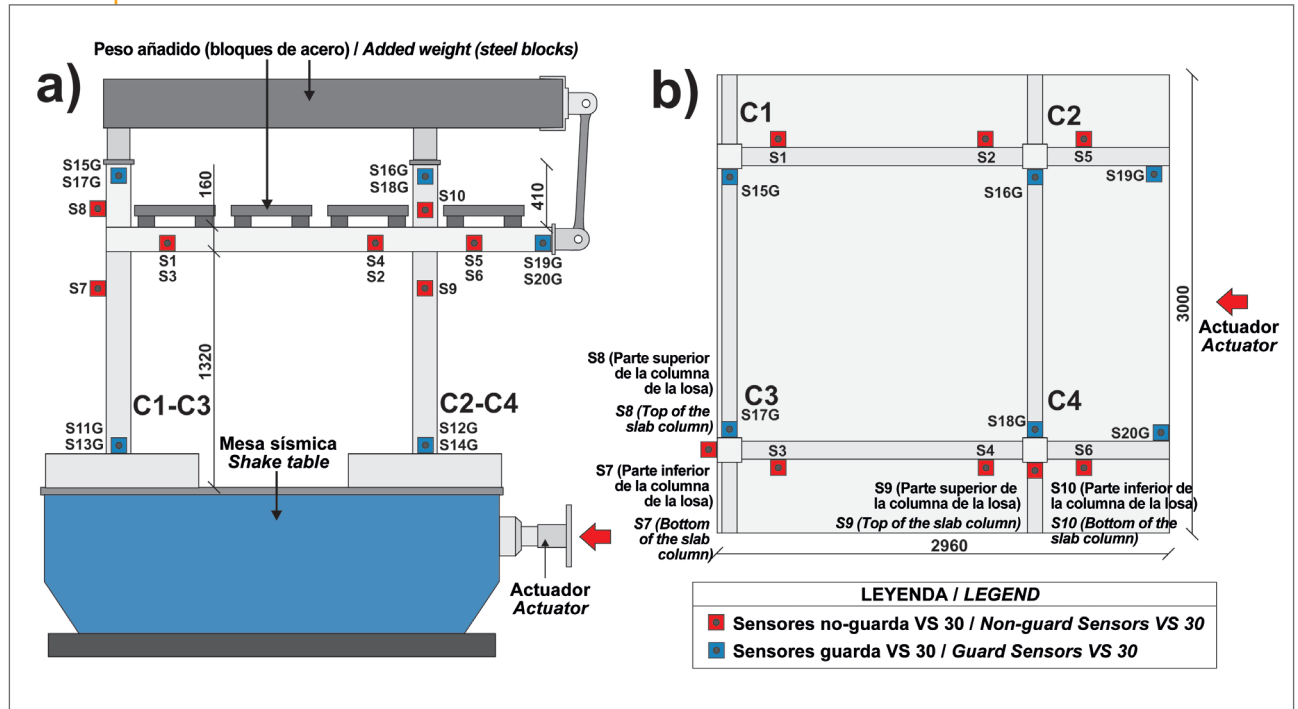


Figura 6. Ensayo 2: Modelo de ensayo con la posición de los sensores de Emisión Acústica. a) Elevación. b) Planta (ver abajo)
 Figure 6. Test 2: Test model with AE sensor positions. a) Elevation. b) Plan (bottom view)

Caso 2: estructura porticada de hormigón armado

Como segundo ejemplo se muestran los resultados para una estructura porticada convencional de HA formada por cuatro pilares y dos vigas conectadas por uniones rígidas, proyectada de acuerdo con las normas españolas, siguiendo el criterio comúnmente aceptado de columna fuerte-viga débil y los principios de diseño por capacidad. La geometría del espécimen se muestra en la Figura 6. Una vista general del experimento se puede ver en la Figura 7. La altura de la planta es de 2.24 m y las dimensiones en planta 2.96 x 2.30 m.

El espécimen se ensayó usando la misma historia de aceleración que en el caso 1. No obstante, en este caso, sólo se aplicaron cuatro simulaciones sísmicas al espécimen, usando los valores pico de aceleración aplicada a la mesa, mostrados en la Tabla 2. La EA generada durante los ensayos por la rotura del hormigón fue medida por veinte sensores de baja frecuencia (del

Test 2: reinforced concrete framed structure

A RC frame sub-structure consisting of four columns and two beams connected by rigid joints was designed according to current Spanish codes and followed the commonly accepted strong column-weak beam criteria, and the principles of capacity design. The geometry of the specimen and a general view of the experiments are shown in Figures 6 and 7, respectively. The storey height is 2.24 m in and the dimensions in plan 2.96 x 2.30 m².

The test model was tested using the same acceleration history of the Test 1. Four seismic simulations were applied to the test model, scaling the acceleration applied to the table to the peak values shown in Table 1. AE generated by the concrete breaking was measured during the tests by means twenty low-frequency sensors (same than Test 1) placed on the test model. Ten guard sensors were fixed in



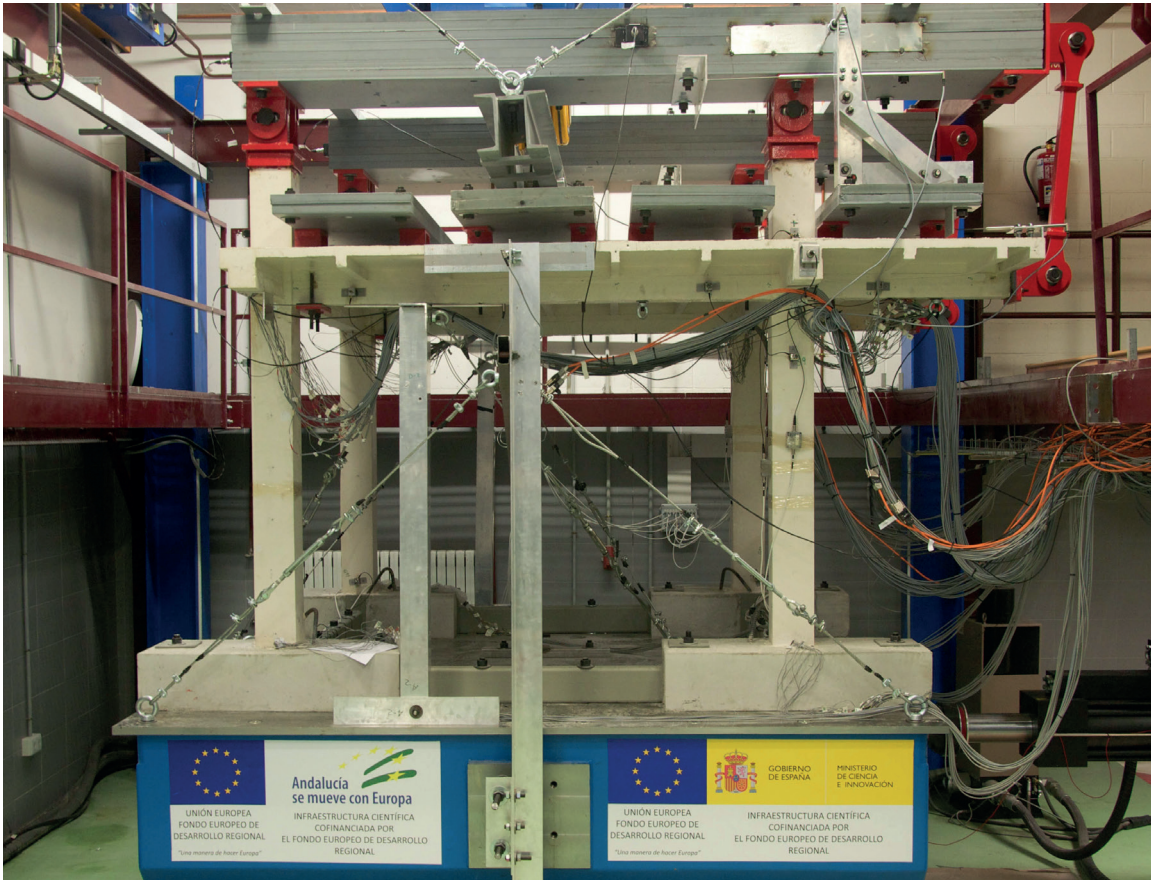


Figura 7. Ensayo 2: Vista general del experimento

Figure 7. Test 2: General view of the experiment

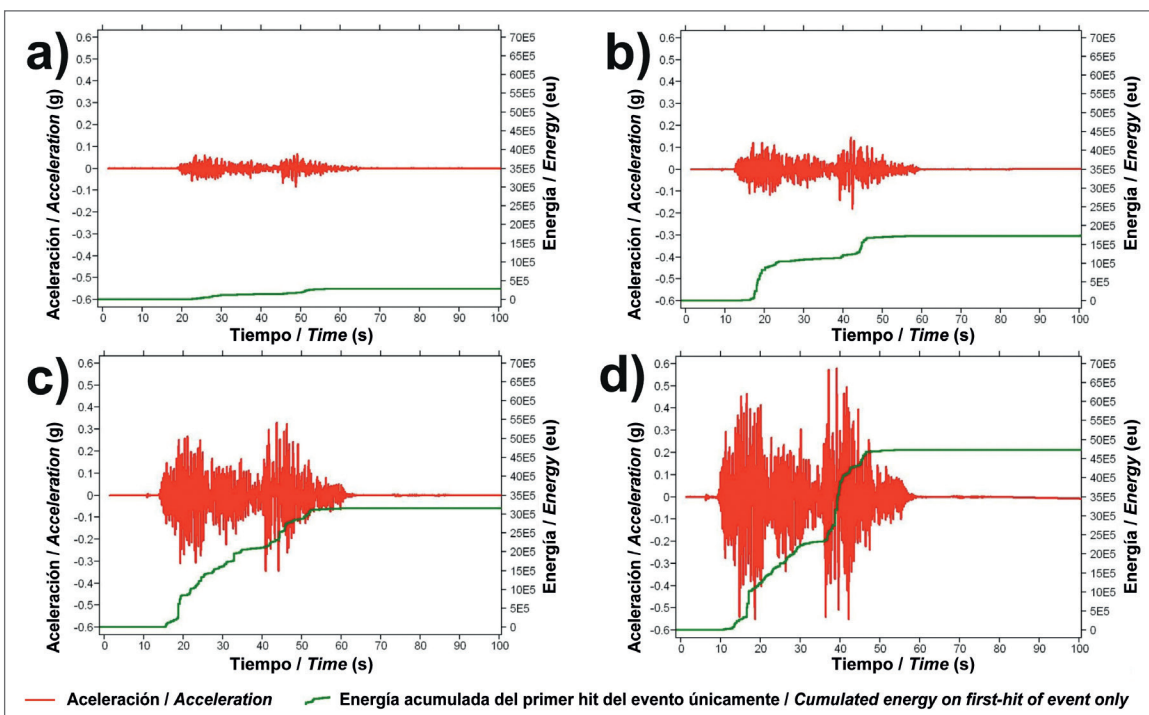


Figura 8. Ensayo 2: Energía acumulada del primer hit del evento, a lo largo de cada simulación sísmica. Viga C1-C2. a) Simulación Calitri_50. b) Simulación Calitri_100. c) Simulación Calitri_200. d) Calitri_300

Figure 8. Test 2: Cumulated energy of first-hit of event only, along each seismic simulation. Beam C1-C2. a) Simulation Calitri_50. b) Simulation Calitri_100. c) Simulation Calitri_200. d) Simulation Calitri_300



mismo tipo que en el caso 1). Se colocaron diez sensores guarda en los principales lugares donde se esperaba fricción y ruido mecánico. Al tratarse de un espécimen simétrico en la dirección del sismo, los sensores no guardas fueron colocados en las dos columnas no simétricas, C3 (cara interior del pilar) y C4 (cara exterior del pilar), dos sensores en cada uno (encima y debajo de la unión viga-columna). Los otros seis sensores se colocaron en las dos vigas en la dirección del sismo, tres en cada viga, para estudiar el daño en toda la viga y posibles daños en el forjado. Se utilizaron los mismos filtros que en el caso 1, con un umbral de 50 dB.

Como se esperaba, el espécimen se comportó como un sistema de columna fuerte-viga débil. En consecuencia, las rótulas plásticas se formaron en el arranque de los pilares y en los extremos de las vigas. La medición del desplazamiento máximo entre plantas permitió determinar el nivel de daño alcanzado por la estructura en cada una de las cuatro simulaciones sísmicas (ver Tabla 2).

the main places where the friction and mechanical noise were expected. As the specimen is symmetric in the earthquake direction, the non-guard sensors were placed in the two non-symmetrical columns, C3 (interior column-beam joint) and C4 (exterior column-beam joint), two sensors per each (up and down the column-beam joint). The other six sensors were attached to the two beams in the direction of the earthquake, three per each, to study the damage in the whole beam and possible damage to the slab. Same signal filters than Test 1 and 50 dB detection threshold were used.

As expected, the tested model behaved as a strong column-weak beam system. Accordingly, plastic hinges formed at the lower end of the columns of the first story and at the ends of the beams. No cracking was observed in any other section of the columns. The measurement of the maximum interstory drift allowed us to determinate the damage level reached in each of the four seismic simulations (see Table 1).

Simulaciones Sísmicas <i>Seismic Simulations</i>	Calitri_50	Calitri_100	Calitri_200	Calitri_300
Pico de aceleración (g) <i>Peak Acceleration (PA)</i>	0.084 g	0.18 g	0.34 g	0.58 g
Nivel de daño <i>Damage Level</i>	Sin daño <i>No damage</i>	Daño moderado / Sin daño <i>Moderate / No damage</i>	Daño intenso <i>Intense damage</i>	Daño importante <i>Serious damage</i>

Tabla 2. Ensayo 2: Simulaciones sísmicas / Nivel de daño
Table 2. Test 2: Seismic simulations / Damage level

Después de aplicar el constructor de eventos de EA como se hizo en el caso 1, los resultados muestran la evolución temporal de la energía de EA acumulada, mostrando también la historia de la aceleración de la mesa sísmica. A modo de ejemplo, la Figura 8 muestra estos resultados para la viga C1-C2. En este caso, para la definición del constructor de eventos, los sensores S1, S2 y S5 se consideraron normales, los sensores S12, S13, S15 y S16 guardas y el sensor S19 combinado (normal y guarda). Para el cálculo sólo se ha tenido en cuenta la energía de la primera señal de cada evento. Se puede ver un claro incremento de la energía acumulada cuando el valor de la aceleración pico aplicada a la mesa aumenta. Se observa un incremento significativo de la energía coincidiendo con los dos picos de aceleración del sismo. Esta observación implica que los mayores daños se concentraron en los momentos de máxima aceleración, como era de esperar.

After applying an AE event builder like in Test 1, the results present the AE temporal cumulated energy evolution, showing also the history of seismic acceleration of the shaking table. As an example, Figure 8 shows the results for the beam C1-C2. In this case, for the event builder the sensors S1, S2 and S5 were used as normal sensors. The sensors S12, S13, S15 and S16 were used as guards, and the sensor S19 as combined (normal and guard). Only the energy of the first hit of each event was considered for this calculation. Significant increase in the cumulated energy could be observe when the peak acceleration of the earthquake increases. Segments of significant growth of energy were observed coinciding with the two peaks of maximum acceleration of the earthquake, one in each section of the earthquake. This observation implies that the greatest damage was concentrated in the moments of maximum acceleration, as expected.



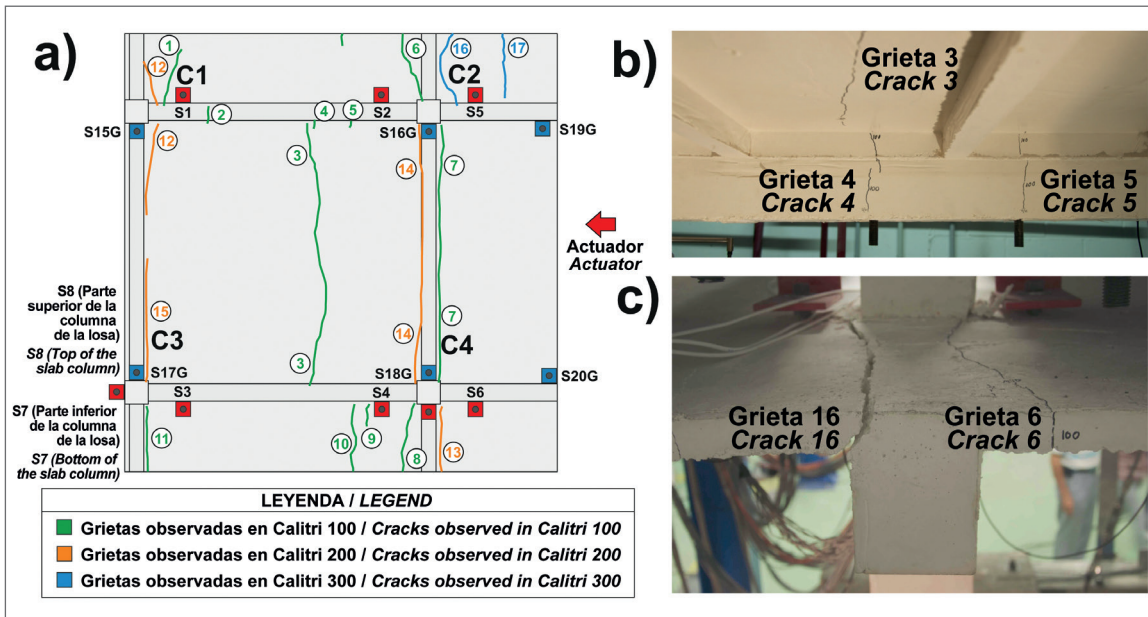


Figura 9. Ensayo 2: Diagrama de las grietas observadas. b) Las grietas de la viga C1-C2 después de la simulación Calitri_100. c) Las grietas de la viga C1-C2, cerca de la columna C2, después de la simulación Calitri_300

Figure 9. Test 2: a) Diagram of the cracks observed. b) Cracks of the beam C1-C2 after simulation Calitri_100. c) Cracks of the beam C1-C2, near column C2, after simulation Calitri_300

Mediante el software comercial VisualAE™, se realizó una localización lineal de las fuentes de EA a lo largo de las vigas y de las columnas. A modo de ejemplo, se presenta y analiza la localización en la viga C1-C2. Después de cada simulación sísmica se realizó un exhaustivo análisis visual de las fracturas aparecidas en el espécimen, cuyo resultado se muestra en la Figura 9a. La Figura 10

AE source linear locations were made along the beams and the columns. As an example, the C1-C2 linear location is shown in this paper. After every seismic simulation an in-depth visual analysis of the cracks in the specimen was made. The results are shown in the Figure 9a. The energy rate of the events located in the beam C1-C2 is represented

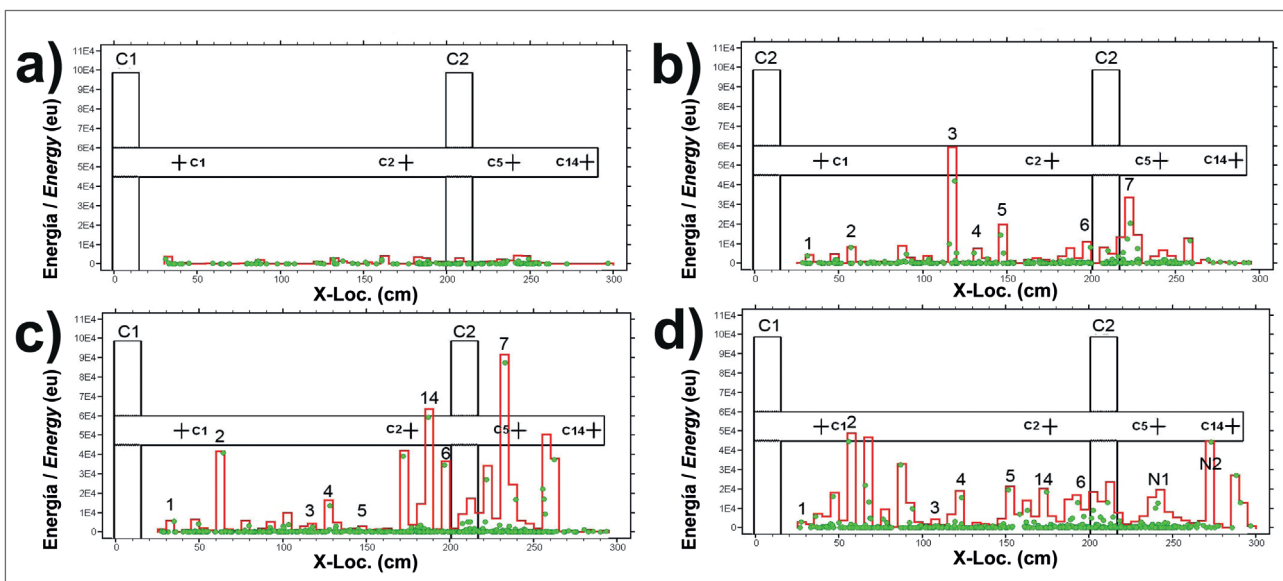


Figura 10. Ensayo 2: Energía acumulada del primer hit del evento, a lo largo de la longitud de la viga C1-C2. a) Simulación Calitri_50. b) Simulación Calitri_100. c) Simulación Calitri_200. d) Simulación Calitri_300

Figure 10. Test 2: Cumulated energy of first-hit of event only, along the length of the beam C1-C2. a) Simulation Calitri_50. b) Simulation Calitri_100. c) Simulation Calitri_200. d) Simulation Calitri_300



muestra la energía de los eventos localizados en la viga C1-C2 frente a su ubicación. En dicha figura aparece también un dibujo de la viga y el número de cada una de las fisuras observadas, por motivos de comparación.

Se puede ver que la energía registrada durante la simulación Calitri_50 estuvo distribuida a lo largo de la viga sin que apareciera ninguna fisura visible, lo que implica que sólo se produjo microfisuración interna del hormigón. Sin embargo, durante la simulación Calitri_100, se produjo un incremento de la energía en las mismas posiciones en las que se observaron las macrofisuras. La mayor concentración de energía se produjo en el centro de la viga debido a la fisura 3, seguida de las fisuras 7 y 5 y de otras fisuras con menos energía (1, 2, 3 y 6). Después de la simulación Calitri_200 se produjo un progreso de las fisuras aparecidas durante la simulación Calitri_100. Apareció una nueva fisura muy energética, la fisura 13. Después de la simulación sísmica Calitri_300 la estructura quedó seriamente dañada. Las fisuras ya estaban totalmente abiertas en las simulaciones anteriores lo que provocó una disminución de la EA generada. En particular, en la viga C1-C2 aparecieron grandes fisuras en torno a la columna C2, como se muestran en las Figuras 9b y 9c. Además, aparecieron nuevas fisuras durante la última simulación, las fisuras 16 y 17, que provocaron una gran fracturación macroscópica en el hormigón.

Conclusiones

El trabajo presenta de forma resumida los resultados de la EA registrada durante dos ensayos dinámicos de estructuras de HA sometidas a diferentes simulaciones sísmicas mediante la mesa sísmica del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Granada. Aunque los resultados son aún preliminares, la EA se muestra como un método prometedor para la evaluación continua de daño estructural por cargas sísmicas, debido en gran medida a la fuerte correlación entre la energía de deformación plástica y la energía de emisión acústica. No obstante, quedan aún bastantes aspectos por resolver antes de su puesta en aplicación para monitorización de este tipo de estructuras, como la eliminación de señales de ruido, el tipo de sensores a utilizar, la calibración de los índices de daño, así como mejoras en los algoritmos de localización de fuentes, inherentes a la complejidad de la estructura y del material.

in the Figure 10 versus its position. This figure also shows the beam and the number of the each crack, for comparison.

It can be seen that the registered energy during the Calitri_50 simulation was distributed along the beam without any visual cracks, which implies that only internal concrete microcracking occurred. However, during Calitri_100 simulation, an increase of the energy happened just where the macrocracks were observed. The highest concentration of energy took place in the middle of the beam with the crack 3 followed by the cracks 7 and 5 and other cracks with less energy (1, 2, 3 and 6). After the Calitri_200 simulation a progress of the cracks happened during the Calitri_100 simulation is seen. A new very energetic crack appeared, the crack 13. After the Calitri_300 seismic simulation the structure was seriously damaged. The cracks already opened during the previous simulations provoked a less generation of AE. Particularly, in the beam C1-C2 big cracks appeared around the column C2, as is shown in the Fig 9b and 9c. Moreover, new cracks, 16 and 17, appeared during the last simulation, causing a big discontinuity in the concrete.

Conclusions

This paper summarizes the results of the AE recorded during dynamic tests conducted on two RC structures subjected to several seismic simulations with the shaking table of the Laboratory of Dynamics of Structures of the University of Granada. Although the results are still preliminary, the AE is shown as a promising method for the continuous assessment of damage caused by seismic loads. This is largely due to the strong correlation between the plastic deformation energy and the energy of acoustic emission signals emitted. However, there are still aspects to be solved before its implementation for monitoring in this type of structures: noise reduction, the type of sensors to be used, damage index calibration, as well as the improvements in the algorithms of the source locations, inherent to the complexity of the structure and the material.



Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología de la Junta de Andalucía (España), proyectos P07-TEP-02610 y P08-TEP-03641, y por el Ministerio de Educación y Ciencia (Plan Nacional BIA 2008 00050). Estas investigaciones recibieron financiación de fondos FEDER.

Acknowledgements

This research received the financial support of the local government of Spain, Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología, Projects P07-TEP-02610 and P08-TEP-03641 and by the Spanish Ministry of Education (Project BIA 2008 00050). This research received funds from the European Union (FEDER).

Bibliografía / References

1. Yuyama, S., Li, ZW., Yoshizawa, M., Tomokiyo, T. and Uomoto, T. (2001), "Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission", *NDT&E International*, Vol. 34 (6), pp. 381:387.
2. Zhiwei, L. and Paul, H. (2009), "Evaluation of Reinforced Concrete Beam Specimens with Acoustic Emission and Cyclic Load Test Methods", *ACI Structural Journal*, Vol. 106 (3), pp. 288-299.
3. McLaskey, G., Glaser, SD. and Grosse, CU. (2010), "Beamforming Array Techniques for Microseismic Monitoring of Large Structures", *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 329, pp. 2384-2394.
4. Carpinteri, A., Lacidogna, G. and Niccolini, G. (2007), "Acoustic emission monitoring of medieval towers considered as sensitive earthquake receptors", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 7, pp. 251-261.
5. 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*, Vol. 8, pp. 175-189.
6. Benavent-Climent A, Gallego A. and Vico J.M. (2012), "An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads", *Structural Health Monitoring*, Vol. 11 (1), pp. 69-81.
7. Suárez, E., Sánchez, A., Gallego, A. and Benavent, A. (2011), "Application of acoustic emission to assess the damage in reinforced concrete structures subjected to seismic loading", *World Conference on Acoustic Emission, WCAE-2011, Beijing (China)*.
8. Suárez, E. (2011), "Evaluación de daño en estructuras de hormigón armado sometidas a sismo mediante la técnica de emisión acústica". Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada.
9. Gallego A., Benavent-Climent A. and Infantes C. (2011). "Health monitoring of reinforced concrete slabs subjected to earthquake-type dynamic loading via measurement and analysis of acoustic emission signals", *Smart Structures and Systems*, Vol. 8, pp. 385-398.
10. Benavent A., Castro E. and Gallego A. (2010). "Evaluation of low-cycle fatigue damage in RC exterior beam-column subassemblages by acoustic emission", *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (10), pp. 1830-1842.