

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE EMISIÓN ACÚSTICA (EA) PARA AUSCULTACIÓN EN DIVERSOS TIPOS DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE (EA) FOR DIAGNOSTICS OF DIFFERENT TYPES OF MATERIALS AND STRUCTURES

E. Martínez¹, A. Gallego², C. Infantes², A. Benavent-Climent³, L. Morillas³, J.M. Jequier⁴, J. Juanes⁵, A. Valea⁵

¹Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica (LEAM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

²Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada (UGR).

³Departamento de Mecánica de Estructuras, Universidad de Granada (UGR).

⁴NDT Ingenieros, Madrid.

⁵Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Resumen

En este trabajo se presentan los últimos resultados derivados de la aplicación de la técnica de la emisión acústica (EA) en el diagnóstico y evaluación de daño en diversos materiales y estructuras analizadas por diferentes grupos de investigación. En particular, la EA se ha aplicado, en el marco de tres proyectos, a:

- La caracterización de delaminaciones en materiales compuestos laminados de fibra de carbono y resina epoxi (CFRP) de uso aeronáutico. Se presenta y analiza la eficacia de un nuevo índice de daño para la detección de delaminaciones inducidas, en ensayos de flexión a tres puntos, en probetas con y sin delaminación inducida.
- Al estudio de los mecanismos de fallo en aceros para herramientas. También en ensayos de flexión a tres puntos, se determina el inicio de rotura de los carburos primarios. Se identifica el nivel de tensión que las produce mediante las señales de EA registradas.
- La evaluación del daño en estructuras de hormigón armado sometidas a terremotos, mediante el desarrollo de simulaciones sísmicas realizadas en la mesa sísmica de la Universidad de Granada.

Palabras clave: Emisión acústica, materiales compuestos, aceros para herramientas, hormigón armado, terremotos.

Abstract

This paper shows the last results obtained by several research working groups applying the Acoustic Emission (AE) technique for damage monitoring in some tests on different kinds of materials and structures. In particular, the AE technique has been applied to the three following projects:

- Delamination detection in Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP laminated composites) commonly used in aeronautics. The effectiveness of a new damage index to detect evolution of delamination induced by means of three points bending tests is shown, by comparing composite samples with and without pre-delamination.
- The study of failure mechanisms in tool steels. The beginning degradation of the specimens is determined for 3-points bending tests, revealing the stress level that causes the onset of primary carbides rupture by EA signals recorded during loading of the specimen.
- Damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to earthquakes, by means seismic simulations carried out with the shaking table of the University of Granada.

Keywords: *Acoustic emission, composite materials, tool steels, concrete, earthquakes.*

1. INTRODUCCIÓN

El término “Emisión Acústica” se emplea tanto para definir un fenómeno físico como una técnica de END. Según se recoge en la norma EN13554, atendiendo al aspecto físico: *“la emisión acústica es un fenómeno físico que tienen lugar en el interior de los materiales, y el termino de EA se utiliza para definir la energía espontánea elástica, emitida dentro de un material o debida a un proceso, en forma de ondas elásticas transitorias”* [1].

La aplicación de cargas y/o condiciones ambientales severas en un material, puede producir modificaciones internas tales como el crecimiento de grietas, deformación local plástica, corrosión, cambios de fase, etc., que normalmente van acompañadas de la emisión de ondas elásticas que se propagan por el material. Así, estas ondas, contienen información sobre el comportamiento interno del componente sometido a esfuerzos.

En general, las señales de EA no son audibles ya que las ondas que se generan están en la zona ultrasónica de frecuencias (entre 20 kHz – 1 MHz), y pueden ser detectadas mediante sensores acoplados al componente sometido a estudio. Estos captadores convierten los movimientos de la superficie provocados por las ondas mencionadas en señales eléctricas. Éstas son procesadas con la finalidad de detectar, caracterizar y/o

localizar aquellas fuentes que están generando las señales de EA. En la Figura 1 se puede ver un esquema general del proceso de medida en un ensayo de EA.

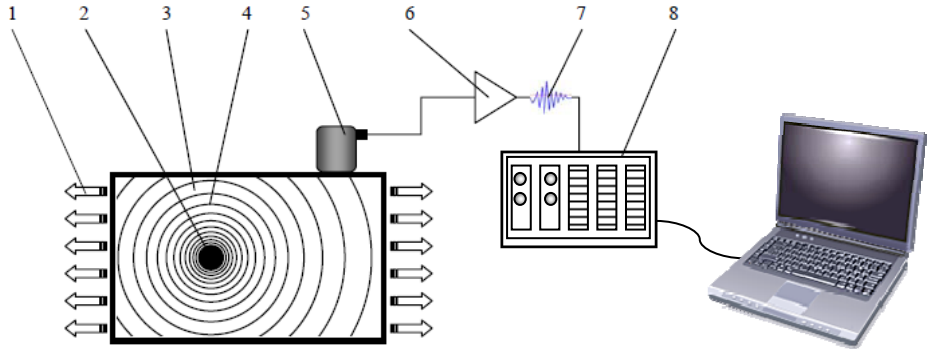


Fig. 1. Principio esquemático de detección de las ondas de EA. 1. Carga que induce tensión en el material; 2. Discontinuidad creciente (fuente de EA); 3. Especimen; 4. Ondas de EA; 5. Sensor de EA; 6. Preamplificador; 7. Señal de salida; 8. Equipo de EA: detección, medida, almacenamiento, interpretación y evaluación las señales.

Otras técnicas de END (rayos X, ultrasonidos, corrientes inducidas, etc.) detectan discontinuidades geométricas inyectando energía en el objeto sometido a estudio. En la EA, en cambio, el propio defecto genera su propia señal, y ésta puede ser detectada a cierta distancia. El origen de las ondas es una de sus principales ventajas, ya que permite ejecutar ensayos con la mínima incidencia en la operatividad del elemento estudiado.

Las principales características de la técnica de la EA son:

- Se trata de un método de detección “pasivo” que registra la respuesta dinámica del material respecto a la carga aplicada.
- Permite la detección de fuentes de EA desde distancias importantes (dependiendo de las propiedades del material sometido a ensayo).
- Es sensible al crecimiento de los defectos y a los cambios estructurales del material, en lugar de a la presencia de defectos geométricos como otros END.
- No es invasivo y puede aplicarse durante el funcionamiento normal del elemento sometido a ensayo.
- Permite localizar discontinuidades crecientes.

Las principales limitaciones de esta técnica son:

- Las discontinuidades que no crecen no generan señales de EA, por lo que no pueden ser detectadas.

- Hay materiales que no generan EA suficiente para ser detectada hasta que no se supera el nivel de tensión máximo aplicado durante su funcionamiento (se trata de un fenómeno conocido como efecto Kaiser).
- Es un método muy sensible a los ruidos del proceso.

En el este trabajo se recoge el uso de la EA en diferentes ámbitos, con el objetivo de mostrar su aplicabilidad y versatilidad en tres proyectos en los que se encuentran trabajando actualmente los autores. En particular, se describe su implicación en:

- La caracterización de delaminaciones en materiales compuestos laminados de fibra de carbono y resina epoxi (CFRP) de uso aeronáutico.
- El estudio de los mecanismos de fallo en aceros para herramientas.
- La evaluación del daño en estructuras de hormigón armado sometidas a terremotos simulados en la mesa sísmica de la Universidad de Granada.

En los tres casos se han utilizado equipos de EA de la marca Vallen Systeme, AMSY-5, y el programa de análisis VisualAE™ de la misma marca.

2. APLICACIONES DE LA EMISIÓN ACÚSTICA.

2.1 Aplicación 1. Evaluación del daño en estructuras de hormigón armado sometidas a terremotos.

Una fuente de daño importante en estructuras de hormigón armado (HA) localizadas en zonas sísmicas es la carga cíclica producida por la aceleración del suelo durante los sismos. Estas estructuras son diseñadas comúnmente para soportar dos niveles de acciones sísmicas: terremotos de baja a media intensidad (nivel I), y terremotos fuertes (nivel II). Bajo los terremotos de nivel I, las estructuras de HA permanecen básicamente en el rango elástico. En regiones de simicidad media o alta, una estructura de HA puede experimentar decenas de terremotos de baja a media intensidad durante su vida.

Una inspección visual de la estructura, que es difícil de realizar por encontrarse ésta en general cubierta de elementos no estructurales, no suele proporcionar suficiente información del daño acumulado en la estructura. En este punto, los END juegan un papel muy importante, y la metodología de la EA es muy efectiva para este propósito.

El trabajo desarrollado en la mesa sísmica de la Universidad de Granada, consiste en la monitorización de la energía de EA aplicada para evaluar el daño en una losa de HA (armada con dos mallazos de acero) cuadrada de 4,8x4,8 m y 125 mm de espesor (véase la Figura 2), sostenida sobre cuatro columnas de acero de longitud 2,8 m y sometida a cargas sísmicas de un terremoto de nivel I. Los ciclos de carga aplicados reproducen la aceleración del suelo registrada en Calitri (Italia) durante el terremoto

de Campano-Lucano (1980, Italia). Se asume que la zona del Mediterráneo tiene una actividad sísmica moderada.

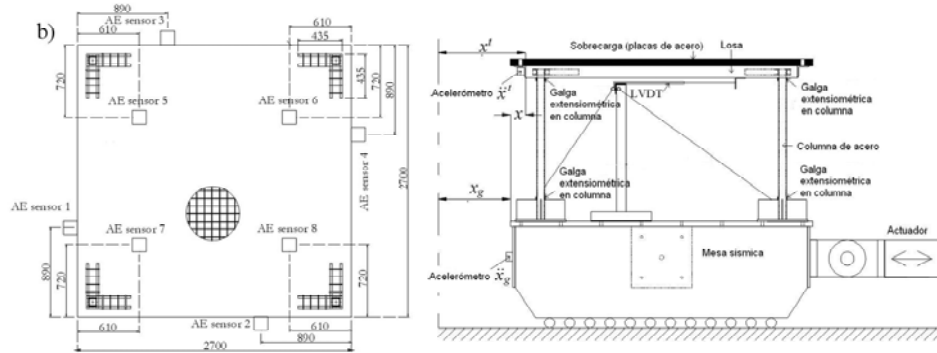


Fig. 2. Izquierda: Plano del espécimen en planta. Derecha: Configuración del ensayo.

Los valores de los picos de aceleración (PA) aplicados a cada simulación sísmica están resumidos en la Tabla 1, expresada en términos de aceleración gravitatoria g .

Tabla 1. Serie de las simulaciones sísmicas realizadas.

| Test series | PA | Comentarios | Test series | PA | Comentarios |
|--------------|------|--------------------------------------|--------------|------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | | 1 | 2 | |
| Simulaciones | (g) | | Simulaciones | (g) | |
| A1 | 0.08 | Las columnas se matuvieron elásticas | A2 | 0.19 | Las columnas se matuvieron elásticas |
| B1 | 0.10 | Las columnas se matuvieron elásticas | B2 | 0.38 | Las columnas se matuvieron elásticas |
| C1 | 0.12 | Las columnas se matuvieron elásticas | C2 | 0.58 | Plastificación de las columnas |
| D1 | 0.19 | Las columnas se matuvieron elásticas | D2 | 0.66 | Plastificación de las columnas |
| E1 | 0.29 | Las columnas se matuvieron elásticas | E2 | 0.74 | Plastificación de las columnas |
| F1 | 0.38 | Las columnas se matuvieron elásticas | F2 | 0.95 | Plastificación de las columnas |
| G1 | 0.44 | Plastificación de las columnas | G2 | 1.10 | Plastificación de las columnas |
| H1 | 0.58 | Plastificación de las columnas | | | |

Para la adquisición de EA se colocaron ocho sensores de baja frecuencia (modelo VS30 con un rango de 20-100kHz) en el espécimen como muestra la Figura 2. Se usaron sensores guarda para evitar el ruido del sistema en las uniones entre los pilares y la mesa sísmica. Se usaron 45 dB de nivel umbral de detección.

Después de filtrar las señales recibidas por los sensores mediante diversos algoritmos de tratamiento de señales, estas fueron agrupadas en eventos de EA usando el constructor de eventos del software VisualAETM. Posteriormente, se obtuvo la energía de MARSE de la primera señal de cada evento registrado durante cada simulación sísmica (unidades de energía: $1ue = 1nVs$), y así, la energía de EA total acumulada en cada terremoto.

En cada simulación, se adquirieron también simultáneamente desplazamientos, tensiones y aceleraciones (transductores indicados en las Figura 2). La deformación de las galgas situadas en los extremos de las columnas indicó que se superó el límite

elástico para un PA de 0,38g, y que por tanto, sufrieron deformaciones plásticas para las simulaciones con PA > 0,38g. Mediante la medida de aceleraciones y desplazamientos sobre el espécimen, se calculó la energía de deformación plástica disipada (W_p) por el espécimen [2]. Esta energía, hasta la simulación F1 (ver Tabla 1), denominada como W_{po} , perteneció enteramente al hormigón, pues antes no hubo plastificación del acero. Sin embargo, en las simulaciones desde G1 a H1 y C2 a G2, las columnas sufrieron deformación plástica, con lo que W_p fue parcialmente agotado por el hormigón, W_{pc} , y parcialmente por las columnas de acero, W_{ps} , ($W_p=W_{pc}+W_{ps}$). El armado de la losa permaneció elástico durante todas las simulaciones. Evidentemente, hasta el final de la simulación F1, $W_{ps}=0$, y en el último instante de esta simulación, $W_{pc}=W_{po}$. La Figura 3 muestra en línea continua la historia de W_p acumulada durante los sucesivos ensayos y normalizada por W_{po} ($=1,41 \times 10^7$ N·mm).

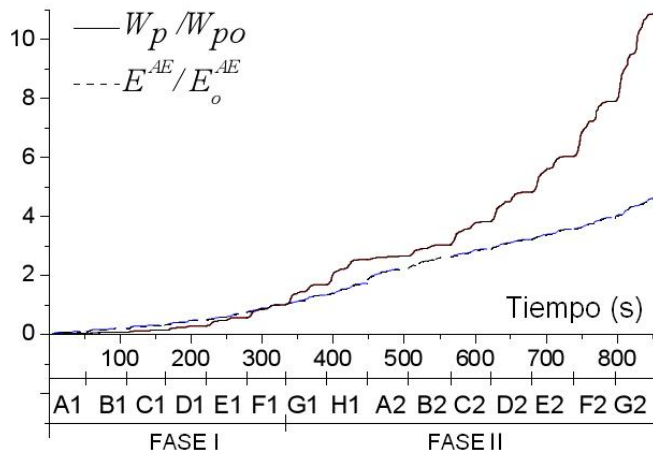


Fig.3: Energía acumulada de deformación plástica, W_p , y energía de EA, E^{EA} , normalizadas por sus correspondientes valores al final de la simulación F1.

Con la EA medida y los análisis anteriormente descritos, se calculó la energía de EA en cada simulación. Por ejemplo, la Figura 4 muestra la tasa de energía de EA durante la simulación C2, junto con la historia de aceleración de la mesa sísmica.

Como puede verse en la Figura 3 hasta el terremoto F1 hay una fuerte correlación entre ambas energías, ya que la EA recoge toda la EA liberada por la fisuración del hormigón (no hay deformación plástica del acero). Sin embargo, a partir de dicha simulación, ambas energías divergen, puesto que la EA no recoge la deformación plástica del acero por estar por debajo de 45 dB. Esta fuerte correlación hasta el punto de plastificación del acero, por un lado, permite determinar en qué punto plastifica la estructura, y por otro, como se describe en [2] permite desarrollar un índice de daño del espécimen midiendo esta energía de EA.

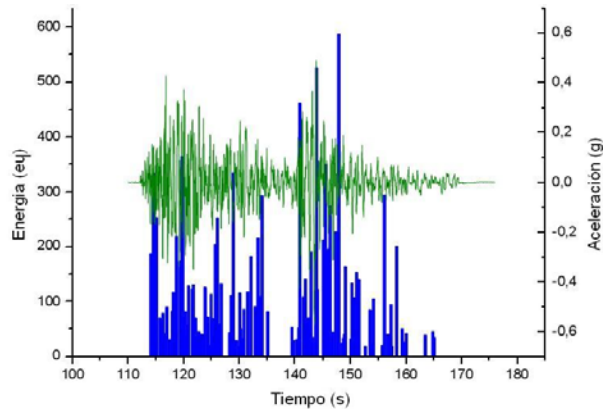


Fig.4: Tasa de energía de EA durante la simulación C2 (en azul) e historia de aceleración de la mesa (en verde).

2.2 Aplicación 2. Caracterización de delaminaciones en materiales compuestos laminaciones de fibra de carbono y resina epoxi (CFRP) de uso aeronáutico.

Se presenta y analiza la eficacia del análisis modal para la detección de mecanismo de delaminación en el laminado, mediante ensayos de flexión a tres puntos, comparando probetas con y sin delaminación inducida.

La geometría de la probeta es una placa de 4 mm de espesor, 40 mm de ancho y 260 mm de largo. Los modos de propagación de ondas en este medio corresponden a modos de LAMB y transversales.

Las delaminaciones generan micro-pulsaciones mecánicas perpendiculares al plano (fuera de plano, FDP) mientras que la micro-fisuración y roturas de fibras por tracción los generan paralelos al plano (EP). Por otro lado, el modo LAMB fundamental anti-simétrico (A0) se ve favorecido por excitaciones DSP, mientras que el fundamental simétrico (S0) por excitaciones EP. Este último punto ha sido comprobado experimentalmente en la probeta, simulando sucesos de emisión acústica FPD y EP. Esto permite asociar los mecanismos de delaminación al modo A0 y los de micro-fisuración y roturas de fibra por tensión al S0.

Una vez completado el ensayo se ha procedido al análisis. Primero se han filtrado convenientemente en el dominio de la frecuencia las señales de los primeros ciclos de la respuesta del captador. Segundo, mediante un sencillo código de alto nivel incrustado en el programa de adquisición y análisis simultáneo de datos en un equipo VALLEN AMSY5, se han contabilizado por separado las llegadas de los modos A0 o S0. El código genera dos variables independientes y específicas para cada modo, asociadas por lo expuesto anteriormente a cada mecanismo.

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para la probeta con delaminación inducida.

En la gráfica derecha, se presenta la distribución diferencial de mecanismos en función de la carga (barras en rojo: evolución de la delaminación, barras en verde: microfisuración y rotura de fibras).

Nótese que la delaminación se inicia con el inicio de la carga, los demás mecanismos tardan en aparecer y participan en un porcentaje pequeño (7 %) de causa de rotura.

En la gráfica izquierda, se muestra la distribución de energías RMS medias.

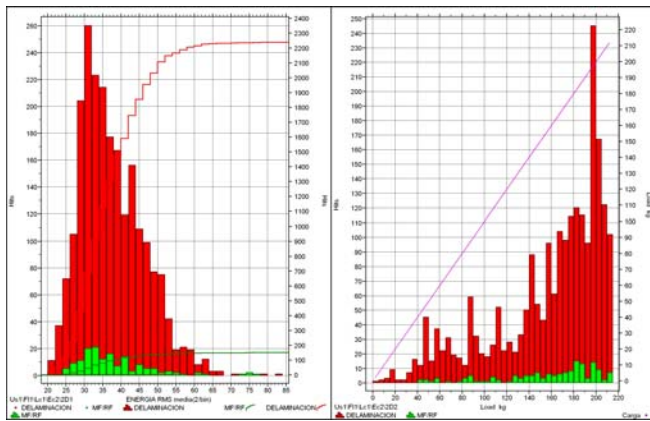


Fig.5. Resultados correspondientes a la probeta con delaminación extensa inducida.

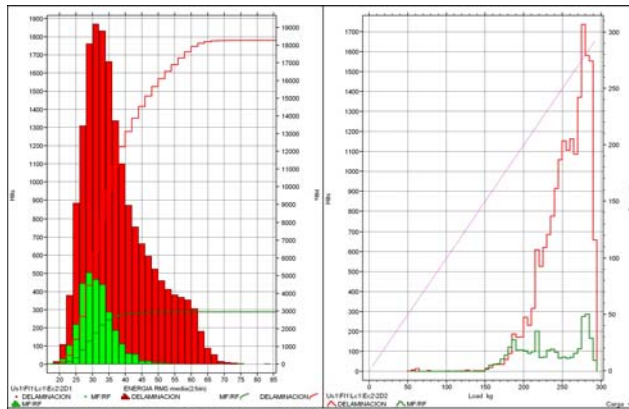


Fig. 6. Resultados correspondientes a probeta exenta de defectos inducidos.

En la Figura 6 anterior se muestran los resultados obtenidos para la probeta sin defectos inducidos previos al ensayo.

En la gráfica de la derecha, la distribución diferencial de mecanismos en función de la carga (en rojo: evolución de la delaminación; en verde: de la micro-fisuración y rotura de fibras).

Nótese que la delaminación y micro-fisuración/rotura de fibras, en este caso, se inician simultáneamente al 50 % de la carga de rotura. Los segundos mecanismos aumentan a un 16.5 % su participación en la rotura.

En la gráfica izquierda, se muestra la distribución de energías RMS medias.

Estos resultados son aplicables al Control No Destructivo de estructuras de fibra, como por ejemplo tanques de almacenamiento, estructuras de proceso y conducciones, con sólo alcanzar las tensiones máximas de proceso, como complemento a la normativa internacional actual de ensayo por EA aplicable a estas estructuras, al poderse evaluar los mecanismos de deterioro.

2.3 Aplicación 3. Estudio de los mecanismos de fallo en aceros para herramientas.

Los avances y las mayores prestaciones exigidas en la industria automovilística, han favorecido la incorporación masiva de materiales como los AHSS (Advanced High Strength Steels), caracterizados por su elevado límite elástico (superior a 550 MPa. Esta ventaja se convierte en un problema para su conformado, ya que durante este proceso las herramientas de conformado están sometidas a condiciones de trabajo muy severas [3]. Para ello, se diseñan materiales con una estructura apropiada tanto en términos del tamaño, forma y distribución de los carburos primarios que los conforman como de su naturaleza química [4].

El origen de la fractura y la rotura por fatiga normalmente está asociado con los carburos primarios que rompen bajo la carga aplicada y actúan como iniciadores de grietas [5]. Por lo tanto, el aumento de las propiedades mecánicas de estos carburos contribuye a un aumento en la resistencia a rotura y fatiga de los aceros que los contienen. La tensión de rotura de los carburos depende de su dureza, de su forma y de la presencia de defectos internos [4]. En este sentido, conocer la tensión de rotura de los carburos primarios reporta información valiosa para comprender la respuesta mecánica global de los aceros para herramientas y, por tanto, de las herramientas de conformado.

Para determinar experimentalmente el nivel de tensión que provoca la rotura de los carburos primarios, se ha aplicado la EA durante el ensayo de flexión a 3 puntos de probetas de aceros para herramientas.

En este resumen se presentan los resultados obtenidos para el acero K360 D3 (1,25% C 0,90% Si 0,35% Mn 8,75% Cr 2,70% Mo 1,18% V). Se trata de un acero al cromo, que presenta una gran tenacidad, una resistencia elevada a la compresión y una buena resistencia al desgaste. En este caso, las probetas son prismáticas de dimensiones especialmente pequeñas, 8x6x80 mm. Por tanto, las reflexiones y rebotes devienen un

problema en el análisis de las señales obtenidas. Para poder extraer conclusiones, tal como en el caso anterior, se realiza un análisis de los primeros ciclos de la señal obtenida, obviando el resto de las ondas por contener los rebotes y contaminar la señal.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo, la rotura de carburos primarios del acero tiene se inicia cuando la fuerza es de 4.000 N que corresponde al tiempo e ensayo de unos 150 s.

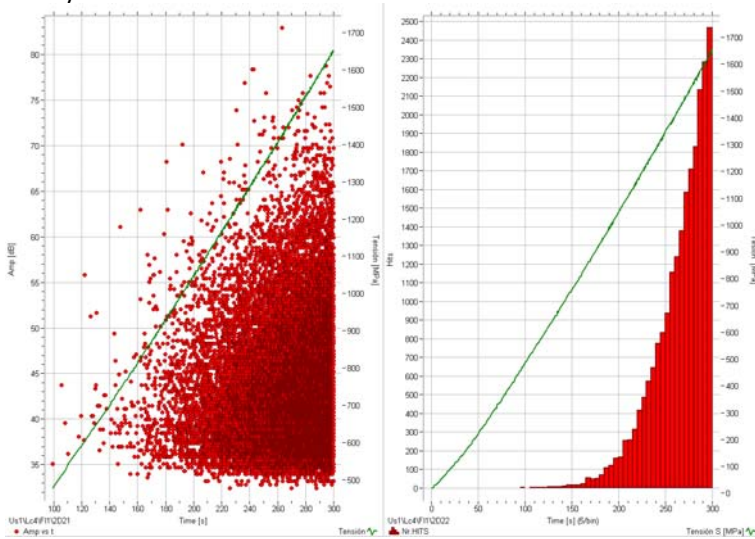


Fig. 7. Resultados correspondientes probeta exenta de defectos previos.

Según se observa en la Figura 7, se pueden determinar tres tramos en el comportamiento de la probeta durante el ensayo:

- **Primer tramo.** En la primera fase de ensayo, no aparecen prácticamente señales de EA ya que la probeta se encuentra en el rango elástico. Ni los carburos ni la matriz, presenan ningún efecto de fractura, propagación o plastificación. Es decir, el comportamiento lineal del material se asocia a la ausencia de señal de EA, una vez eliminado el ruido de fondo. Aparecen algunas señales de EA aisladas que se sospecha pueden asociarse a alguna rotura prematura de carburos o algún salto de material debido algún defecto del pulido de la probeta.
- **Segundo tramo.** Aparecen las primeras señales de EA, sobre los 150 s, que van creciendo de forma suave en amplitud y bruscamente en número. En esta fase, se observa en las micrografías realizadas, rotura de carburos. La cantidad de carburos que han roto aumenta significativamente con el aumento de la tensión. Se observan algunas plastificaciones en algunas zonas de la probeta.

- **Tercer tramo.** El número de señales registradas aumenta de forma exponencial, de igual forma que lo hace la energía acumulada. El valor de la amplitud de las señales disminuye en promedio. A este nivel de tensiones, se encuentran la práctica totalidad de los carburos fracturados, mayor cantidad de zonas que han plastificado y grietas en la matriz. Los ensayos se han parado, sin llegar a la rotura de la probeta.

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha tratado de dar una idea de la utilidad de la técnica de EA para la caracterización de mecanismos de fallo en tres tipos de materiales tan dispares como el hormigón, los materiales compuestos de fibra de carbono y los aceros de alta resistencia. Son en cada caso aplicaciones de enorme interés social (alertas sísmicas en edificios de HA y alertas por fallos estructurales en naves aeronáuticas fabricadas con CFRP) y tecnológico (desarrollo de herramientas conformado). Se pretende con esto motivar a la comunidad científica NDE española para el uso de esta técnica como complemento a otras más conocidas en nuestro país.

4. AGRADECIMIENTOS

La investigación realizada por el grupo de la Universidad de Granada ha sido financiada por el gobierno de España, Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología, Proyecto P07-TEP-02610. También ha recibido financiación de la Unión Europea.

El proyecto de la UPC relativo a los aceros para herramientas, se realiza conjuntamente con el Centre Tecnològic de Manresa (CTM).

4. REFERENCIAS

- [1] EN 13554:2002, “Non-destructive testing. Acoustic emission. General principles”.
- [2] A. Benavent-Climent, E. Castro, A. Gallego: Structural Health Monitoring 2009, 8, 175-189.
- [3] Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines Version 3, International Iron & Steel Institute. Committee on Automotive Applications, (2006).
- [4] D. Casellas, J. Caro, S. Molas, I. Valls, J.M. Prado, , Acta Materialia, 4277 (2007).
- [5] I. Picas, N. Cuadrado, D. Casellas, A. Goez, L. Llanes, Micro structural effects on the fatigue crack nucleation in cold work tool steels, Procedia Engineering, 1777 (2010).