



# LA EMISIÓN ACÚSTICA COMO MÉTODO END. DEFINICIÓN, VENTAJAS Y LIMITACIONES

Autores: Eva Martínez<sup>1</sup>, Antolino Gallego<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LEAM (EUETIB), Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), eva.martinez@leam.upc.edu

<sup>2</sup>Dpto. de Física Aplicada, Campus Fuentenueva, Universidad de Granada, antolino@ugr.es

## Introducción

El término emisión acústica (EA) se emplea tanto para denominar un método de ensayo no destructivo (END) como un fenómeno físico que tiene lugar en el interior de los materiales. Atendiendo al fenómeno físico, la emisión acústica es la energía espontáneamente emitida por un material, estructura o proceso, en forma de ondas elásticas transitorias. La aplicación de cargas, otros estímulos o unas condiciones ambientales severas en un material, pueden producir cambios en su estructura interna, tales como el crecimiento de grietas, deformación local plástica, corrosión o cambios de fase que, normalmente, están acompañados de la emisión de ondas elásticas en su interior. Estas

ondas, por tanto, contienen valiosa información sobre su comportamiento interno. Asimismo, un ensayo de EA es útil para controlar la formación de defectos en un material mediante la detección y análisis de las ondas de emisión acústica generadas.

Dependiendo del material y del proceso emisor, el oído humano puede detectar estas ondas convertidas en sonidos característicos del fenómeno, siempre que sus frecuencias características estén por debajo de 20 kHz. Algunos ejemplos de emisión acústica audible serían la madera al quebrar, un papel cuando se rasga o rompe, el agua al congelarse o las transformaciones martensíticas. Pero, en general, los fenómenos más interesantes en los que es útil el ensayo de EA no son

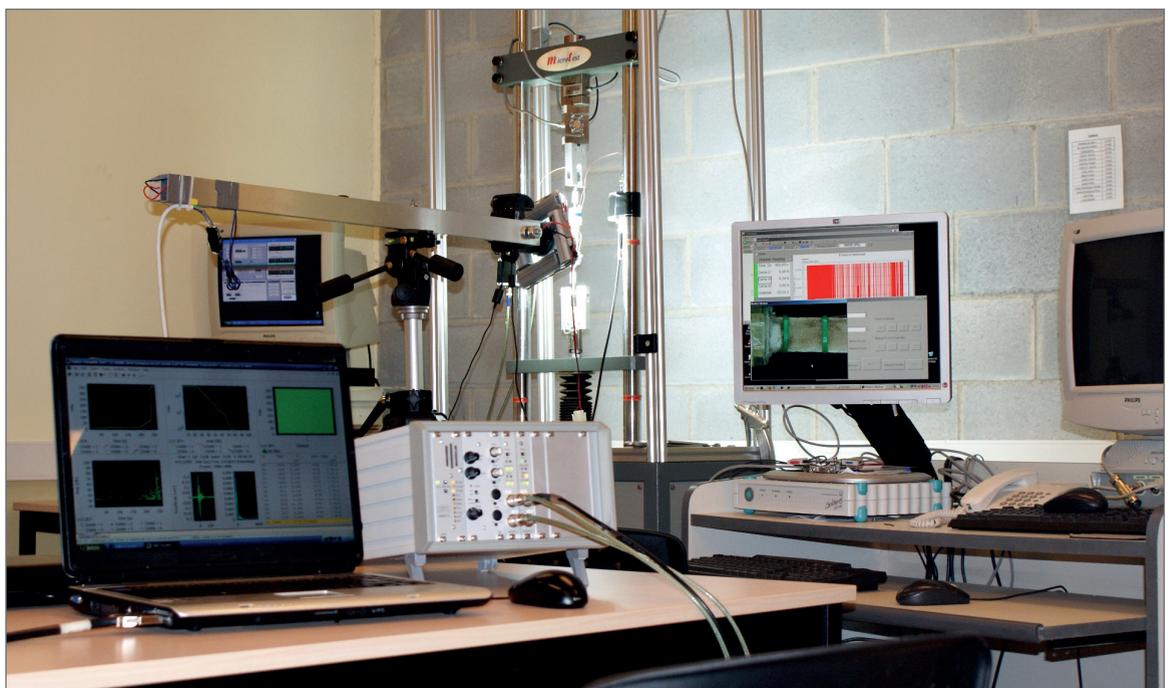


Figura 1. Ensayo de tracción auscultado mediante EA

audibles y, para su detección, son necesarios equipos apropiados. Que estas emisiones no sean audibles se debe, fundamentalmente, a dos razones (en muchos casos una combinación de ellas): que la intensidad de las mismas sea débil y que la frecuencia de las mismas se sitúe en el rango de los ultrasonidos (más de 20 kHz). Este hecho ha dado pie, en numerosas ocasiones, a que se cuestione la terminología y, aunque "emisión acústica" es el más utilizado para definir el proceso, también se emplean los nombres de "micro-sísmica", "emisión de ondas elásticas" o "emisión de ondas de tensión" (SWE, de sus siglas en inglés).

A pesar de que los ruidos o "emisiones acústicas" han sido una herramienta de predicción común en todas las civilizaciones, su empleo para caracterizar el uso, o abuso, de un material ha sido, generalmente, despreciado en los ámbitos técnicos y científicos. Esta situación ha ido cambiando en las últimas seis décadas, gracias a los avances, tanto en la electrónica de los equipos de adquisición, como en la sensibilidad de los transductores empleados para la detección de las ondas de EA.

Esta tipología de ensayo se diferencia del resto de los END en dos aspectos fundamentales. La primera diferencia radica en el origen de la señal de EA, ya que se trata de un método pasivo: detecta la energía que se libera en el propio material, mientras que los otros métodos necesitan aportación artificial de energía para la detección de defectos (por ejemplo, rayos X, rayos gamma, ultrasonidos, energía térmica o microondas). La segunda, es que detecta fenómenos dinámicos. Esta característica es, especialmente relevante, ya que durante el ensayo sólo se detectan fenómenos activos, como puede ser el crecimiento de grietas, y no discontinuidades geométricas como hacen el resto de métodos END.

El ensayo de EA es efectivo para detectar el comportamiento de la fractura y fatiga en diversidad de materiales como metales, materiales compuestos avanzados, plásticos, hormigón, madera, etc. En este sentido, el ensayo resulta útil para supervisar la integridad de estructuras de forma no invasiva, así como para la caracterización de materiales sometidos a deformación y/o fractura. Algunas aplicaciones en que el uso de este ensayo es común son la detección de fallos y/o fugas en depósitos a presión, sistemas de tuberías, tanques de almacenamiento, control de

soldaduras, detección de procesos de corrosión, inspección de estructuras o maquinaria.

Mediante el ensayo de EA se puede medir, sólo cualitativamente, la cantidad de daño que se produce en una estructura o componente. Con el fin de obtener resultados cuantitativos sobre el tamaño, profundidad y aceptabilidad del daño es necesario combinar este ensayo con otros métodos. Otro inconveniente del ensayo de EA es la sensibilidad al ruido de fondo, tanto mecánico como eléctrico, por lo que su uso en entornos de servicio severos es complicado. Para garantizar el éxito de un ensayo de EA, es crucial la discriminación y reducción de las señales de ruido, considerado éste como las señales de EA generadas por todos los mecanismos irrelevantes al ensayo que se está realizando.

## Breve reseña histórica

Aunque a menudo se presenta la EA como un nuevo método de ensayo END, es difícil datar sus primeros usos. Dado que muchos fenómenos naturales emiten emisiones acústicas, es fácil imaginar que un uso muy primigenio del mismo como herramienta de predicción corresponde a los primeros hombres. Probablemente, una de las primeras aplicaciones como herramienta de control de calidad se pueda atribuir al uso que hacían los antiguos alfareros (alrededor de 2600 a.C.). Éstos evaluaban la estabilidad de las vasijas de cerámica mientras se enfriaban en el horno gracias a las "emisiones acústicas" emitidas.

En metales, es razonable suponer que las primeras observaciones de EA se remontan al inicio de la elaboración de estaño puro. Las piezas más antiguas de este material encontradas datan del año 2.650 a.C. Sin embargo, en otros materiales su uso podría ser más antiguo. La primera observación documentada de la EA en metales la realizó el filósofo y alquimista árabe Abu Musa Yabier al-Sufi Hayyan (721-815 d.C.), más conocido por su nombre latinizado Gerber. En esta publicación indica que el estaño (Júpiter) emite un fuerte ruido cuando se deforma, y que el hierro (Marte) también emite ruidos cuando se enfría después de ser forjado.

Los orígenes de la EA en el mundo científico-técnico, pueden atribuirse a varios textos del siglo XIX en los



que investigadores describen que, durante el desarrollo de algunos experimentos con metales (como estaño, hierro, cadmio o zinc), pueden escucharse sonidos.

El profesor Fuyuhiko Kishinouye fue el primero en informar sobre un experimento científico planeado con emisión acústica durante una conferencia en 1933 del "Earthquake Research Institute" (Instituto de Investigación de Terremotos). Dicho profesor llevó a cabo una serie de experimentos que amplificaban y grababan las emisiones acústicas producidas por la fractura de madera durante terremotos, proporcionando una vía muy necesaria para la resolución de problemas relacionados con la distribución del tiempo de los terremotos. Trabajos destacados también son los de Erich Scheil, quien describió emisiones acústicas audibles procedentes de la formación de martensita en acero, los trabajos de Friedrich Föster, quien con Scheil, publicaron los resultados de sus primeros experimentos de EA en acero-níquel. O los trabajos de Robert Anderson que estudió las emisiones que una aleación de aluminio emitía, al superar el límite elástico.



Figura 2. Fotografía de los participantes en la primera reunión científica sobre EA celebrada en Idaho Falls que organizó el AEWG el 8 de febrero de 1968

Sin embargo, los mayores esfuerzos sobre los fundamentos del fenómeno de la EA y de su comportamiento durante la fractura y deformación, tuvieron lugar en el año 1950 con la publicación de la tesis doctoral en Múnich del ingeniero Joseph Kaiser. Este hecho se considera el origen del método de EA, que abrió una era de grandes avances que se expandió durante los años 50 y 60. En 1954, Bradford Schofield inició el primer programa de investigación en los Estados Unidos para examinar las aplicaciones de la EA en diversos materiales de ingeniería. Entre los años 1960 y 1980, a pesar de las limitaciones en los equipos, muchos investigadores

como Dunegan, Pollock, Wadley, Scruby, Birchon, Schofield, Beattie, Proctor, Harris u Ono desarrollaron una considerable producción científica que permitió grandes avances en este campo.

Durante este periodo se desarrollaron equipos de EA, se caracterizó el comportamiento de la EA en muchos materiales y el método fue ganando reconocimiento por su capacidad única de auscultar procesos dinámicos. A finales de 1960 se creó el AEWG (AE Working Group, Grupo de Trabajo en EA) con el fin de fomentar el intercambio de ideas e información relacionada con los ensayos de EA a escala internacional y, para establecer una dirección para las investigaciones futuras en este ámbito. Y en 1972 se reunió por primera vez en Londres el "European Working Group of Acoustic Emission (EGWAE)", cuya última reunión tuvo lugar en Granada el año pasado, bajo los auspicios de la Universidad de Granada, celebrando, además, los 50 años de constitución del grupo y la 30 edición de la conferencia. Estos años resultaron muy prolíferos, apareciendo incluso los primeros equipos comerciales de EA.

El final de la Guerra Fría en los años 80 produjo el declive de la industria pesada, de la energía nuclear y de los gastos en defensa. Dado que estas áreas eran las más prometedoras para la aplicación de la EA, hubo una reducción en las inversiones en este campo y, por tanto, un descenso significativo en los avances científico-técnicos. Sin embargo, en el momento que los ordenadores se convierten en componentes básicos en la instrumentación y el análisis de datos, se reduce el coste y surgen nuevas oportunidades de investigación y desarrollo.

En este contexto, a mediados de los años 90 la EA se aplica, ampliamente, en la industria petroquímica y aeroespacial. Actualmente, la EA es un método conocido y fiable para el control de daño en estructuras, emergiendo como un potente método dentro de los END. El aumento en su creciente popularidad puede atribuirse a avances recientes en los equipos, muy especialmente, en la velocidad de adquisición. En el momento actual, gracias a estas mejoras, hay una transición a un análisis de las señales de EA basado en la forma de onda y no sólo en algunas de las características de la señal. Esto ha abierto un nuevo enfoque, grandes avances y una reinterpretación de algunos resultados obtenidos en épocas anteriores.



Figura 3. Fotografía de los participantes en la 30ª Edición del congreso europeo de EA (30<sup>th</sup> EWGAE) coincidiendo con la 7ª Conferencia Internacional (7<sup>th</sup> ICAE) celebradas en Granada (España) en septiembre de 2012. Organizado por la Universidad de Granada

## Principios básicos del ensayo de EA

La Figura 4 esquematiza los elementos básicos que intervienen en un ensayo de EA. Cuando un material (estructura, componente o probeta) está sometido a un estímulo, que puede ser de diversa naturaleza (mecánica, electromagnética, térmica, química, etc.), se induce un estado tensional en el material que puede modificar localmente su estructura interna. Estos cambios o discontinuidades crecientes se denominan

fuentes de EA y el mecanismo que las genera recibe el nombre de evento. Después de que tenga lugar un evento de emisión acústica, una parte de la energía elástica almacenada en el campo tensional se libera en forma de ondas de emisión acústica. Éstas se propagan desde la fuente en todas las direcciones, aunque con una fuerte directividad en muchos casos. Las ondas al alcanzar la superficie del material, inducen pequeños desplazamientos en la superficie, que pueden captarse con un transductor apropiado. Se pueden detectar movimientos superficiales del

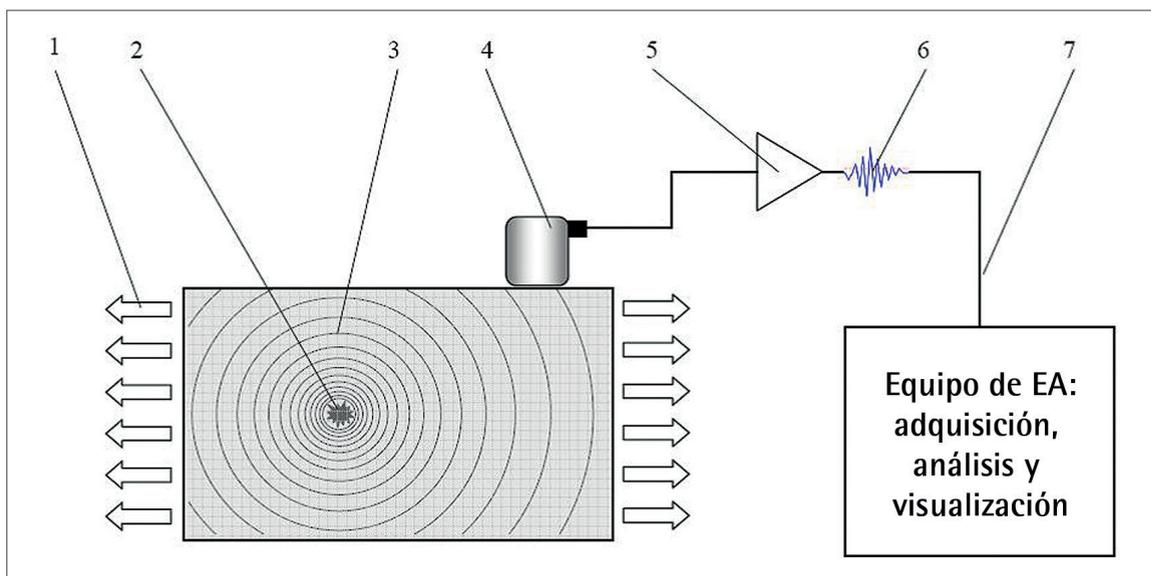


Figura 4. Esquema de los elementos que intervienen en un ensayo de EA: 1- Estímulo, 2- Discontinuidad creciente (fuente de EA), 3- Ondas de EA, 4- Sensor de EA, 5- Pre-amplificador, 6- Señal de EA, 7- Equipo de EA. Detección, medida, registro, y visualización de las señales de EA

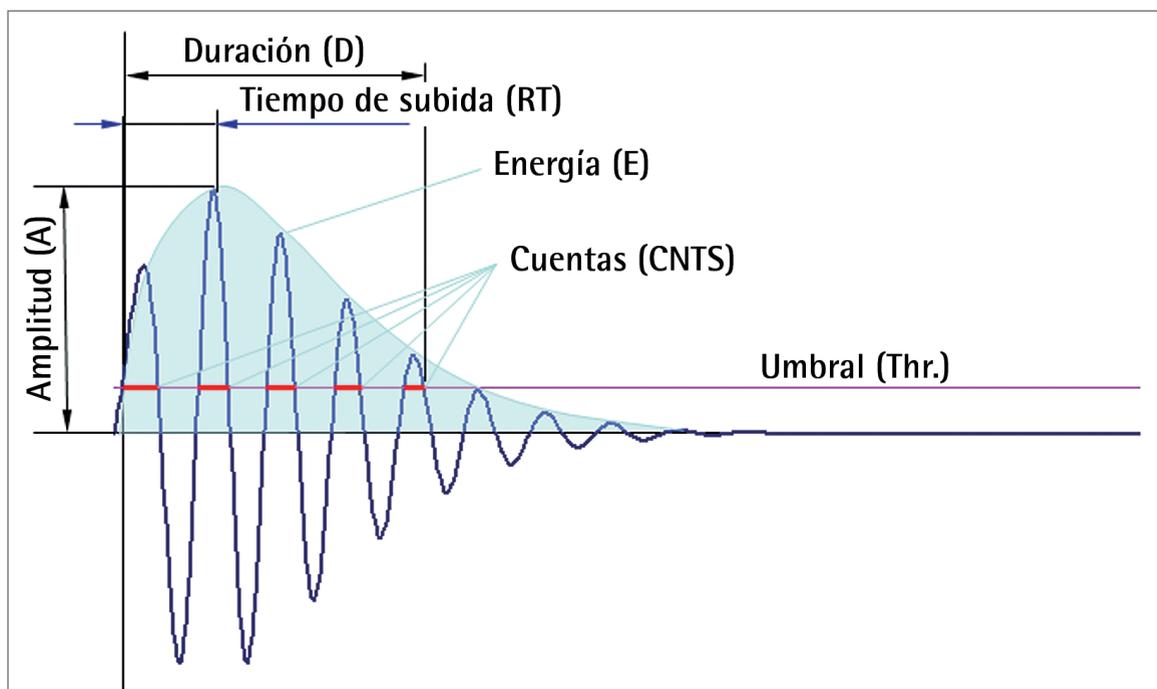


Figura 5. Señal transitoria de EA

orden de 10 -12  $\mu\text{m}$ , con sensores de EA apropiados y acoplados fuertemente a estas superficies. Los sensores tienen la función de convertir estos desplazamientos en señales eléctricas. Éstas son débiles, lo que requiere de pre-amplificadores para reducir al mínimo ruidos, interferencias y evitar las pérdidas de señal en el cable. Son comunes pre-amplificadores de ganancia entre 20-40 dB; aunque pueden usarse otras ganancias. La señal acondicionada se envía al equipo de EA, que permite el filtrado, grabado, análisis y visualización de las señales de EA, para una posterior interpretación de los resultados del ensayo.

Además de grabar y analizar los datos de salida de la EA, es importante también tener en consideración la evolución de la carga, la deformación, presión y/o temperatura de la estructura durante el ensayo para poder referenciar las señales de EA. Este tipo de entradas del equipo de EA se suelen denominar entradas paramétricas.

La emisión acústica se produce en las fuentes de EA como un pulso de energía, por lo que las ondas elásticas generadas contienen energía en todas las frecuencias, alcanzando frecuencias de 1 MHz y superiores. Típicamente los ensayos de EA se centran en el rango de 100 a 500 kHz, pero sin descartar otros rangos más elevados o más bajos en algunas aplicaciones concretas.

El ensayo de EA detecta discontinuidades crecientes provocadas por un estímulo externo. De esta forma, el ensayo permite auscultar de forma continua componentes o estructuras bajo condiciones de servicio. La no direccionalidad del ensayo permite que mediante una correcta distribución de sensores, fuentes de EA lejanas al sensor puedan ser detectadas sin importar la posición relativa del defecto respecto a la posición del sensor. El número de sensores necesarios para llevar a cabo un ensayo dependerá del tamaño de la zona a ensayar y de la atenuación del material, que en algunos casos como materiales compuestos avanzados puede llegar a ser muy elevada.

Es importante destacar que los ensayos de EA son irreversibles, es decir, un defecto que ya se ha generado no se puede volver a formar. Por lo tanto, si se carga un material hasta una cierta tensión, se descarga y se vuelve a cargar, no se observará actividad de EA a menos que se exceda la última tensión aplicada o exista una presencia mayor de daño. Este comportamiento se conoce como "efecto Kaiser", y tiene importantes consideraciones prácticas, ya que es la razón por la que se puede detectar daño que se genera en una estructura mediante este método. Igualmente importante es el efecto contrario, la emisión acústica antes de superar la carga máxima anteriormente alcanzada, denominado "efecto Felicity". Su uso es especialmente importante para evaluar la

integridad de estructuras de material compuesto de fibra de vidrio y de carbono. En la Figura 6, a modo de ejemplo, se muestra el número de eventos registrados durante un ensayo de deslaminación artificialmente forzada entre dos capas de un laminado de material compuesto de fibra de carbono (CFRP), en un proceso de carga y descarga, que incluyó dos fases de carga mantenida. Puede observarse que la EA registrada aumenta considerablemente durante los procesos de carga (Fases 1 y 3), pero incluso, aunque más lentamente, lo hace en las fases de carga mantenida (Fases 2 y 4), debido a que las tensiones aplicadas hacen que el proceso de deslaminación siga avanzando.

## Ventajas y desventajas de la EA respecto a otros END

Las principales ventajas de la EA se listan a continuación:

1. Es un método de detección pasivo que registra la respuesta dinámica del material con respecto al estímulo aplicado
2. Permite detectar y evaluar la importancia de discontinuidades en la totalidad de una estructura durante un único ensayo
3. Es sensible al crecimiento de los defectos y a los cambios en la estructura del material en vez de serlo a la presencia de defectos estáticos
4. Permite la detección de fuentes, dependiendo de las propiedades de los materiales, hasta varios metros de distancia

5. Permite la localización del defecto creciente a partir de la diferencia del tiempo de llegada de las señales de EA a los diferentes transductores
6. Se pueden detectar discontinuidades inaccesibles a otros métodos de END, ya que la EA requiere un acceso limitado a la estructura
7. Algunos ensayos pueden realizarse durante el servicio de la instalación, ya que la EA requiere poco o ningún tiempo de inactividad
8. Se puede emplear para impedir un fallo catastrófico de un sistema con discontinuidades, y para conocer la tensión máxima a la que se puede someter una estructura o componente
9. Se trata de un ensayo no direccional, no tiene excesiva importancia la posición relativa entre los sensores y las discontinuidades a detectar

Las principales desventajas de este método son:

1. En ocasiones es complicado discriminar entre señales genuinas de EA relacionadas con inestabilidades de las de ruido
2. La señal de EA a la salida de los transductores es la combinación de la onda que proviene de la fuente, de sus modos de propagación y de la respuesta del transductor
3. Requiere una elevada especialización y destreza de los operarios, especialmente en la fase de análisis de los datos

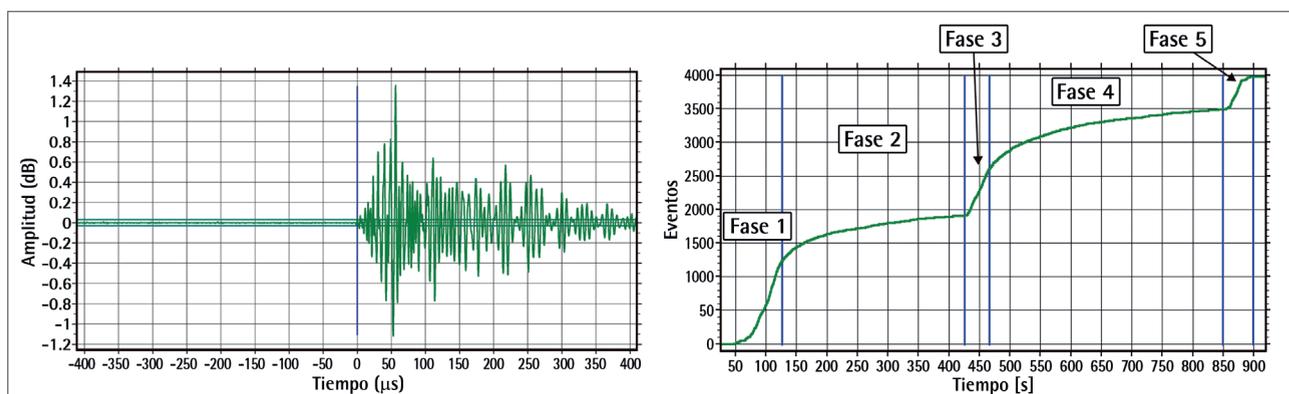


Figura 6: EA registrada en un ensayo de deslaminación forzada sobre una probeta de material CFRP. Izquierda: Ejemplo de señal transitoria registrada. Derecha: Número de eventos de EA acumulados durante el ensayo. Fases 1 y 3: Aumento de la carga. Fases 2 y 4: Mantenimiento de la carga. Fase 5: Descarga



## Limitaciones y retos futuros de la EA

A pesar de que las aplicaciones de la EA son numerosas, existen casos donde su uso puede ser muy complejo, como en grandes estructuras. Cuando éstas se ensayan, es necesario emplear un importante número de transductores y multitud de canales. Esto puede ser un obstáculo y, en algunos casos, el coste imposibilita el uso del método. El número de sensores necesarios está directamente relacionado con el material, las dimensiones de la estructura sometida a ensayo y las zonas de daño potenciales.

Además, para obtener buenos resultados durante un ensayo de EA los estímulos externos ajenos al propio ensayo pueden ser un obstáculo. A diferencia de otros métodos de END, la EA es un ensayo en tiempo real que es sensible a inestabilidades locales, o ruido, debidos al propio emplazamiento del ensayo. El ruido puede ser debido a fricciones (componentes que presentan rozamiento entre ellos), impactos (como puede ser la lluvia, pájaros, o partículas que lleva el viento) y vibraciones mecánicas de equipos que se encuentran en la zona. Para realizar un buen ensayo de EA, es imprescindible conocer las posibles fuentes de ruido y, éste debe ser eliminado o, como mínimo, identificado antes de interpretar los resultados del ensayo.

Además del ruido y la cantidad de sensores necesarios, la tercera gran preocupación cuando se realiza un ensayo de EA es la falta de resultados cuantitativos. Si del ensayo se deben determinar el tamaño, profundidad o el estado general de un material, la EA no es un método apropiado, ya que no es capaz de suministrar esta información. Por este motivo, otros END son necesarios y pueden ser un complemento a los resultados del ensayo de EA. Lógicamente, el método de END más apropiado depende de la aplicación y del material sometido a ensayo.

Es en este ámbito de limitaciones, donde la EA debe hacer frente en un futuro cercano. A nivel de España el método alcanza unos niveles de aplicación muy bajos, comparados con otros países como Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Francia, Italia, Austria, Rusia, Brasil, China, República Checa, Israel, etc., en gran medida por no disponer por ahora de un sistema de formación y certificación de técnicos a Niveles 1, 2 y 3. Es sin duda este un reto de futuro inmediato de este país en general, y de la AEND en particular,

siendo evidente la creciente demanda de ciertos sectores industriales, que tienen que buscar empresas y técnicos certificados en algunos de los países anteriormente mencionados.

## Aplicaciones

### Aplicaciones de la EA

La EA se aplica en una amplia variedad de campos, tanto en investigación como en ámbitos civiles e industriales. A continuación se resumen algunas de las aplicaciones más extendidas de este método de END:

1. **Ensayo y caracterización de materiales diversos:** metales, materiales compuestos avanzados, plásticos, madera, hormigón, material biológico, etc.
2. **Industria química y petrolífera:** ensayos de integridad en recipientes a presión, ensayos de tanques de almacenamiento, tanques criogénicos, pruebas de tiempo de reutilización de los reactores termales, torres, columnas y sistemas de tuberías, ensayos del fondo de tanques, detección de corrosión en tiempo real, ensayo de tanques de FRP, inspección en la red de tuberías, detección de fugas en válvulas y en tuberías enterradas, detección de arena en las tuberías de alta mar y auscultación en las plataformas "offshore"
3. **Auscultación y diagnóstico de centrales eléctricas**
4. **Ensayos de descargas parciales en transformadores**
5. **Industria aeronáutica y aeroespacial:** ensayos en aviones, ensayos de envejecimiento de aviones, ensayos de fatiga de componentes, detección de corrosión bajo las alas, inspección in-situ de partes del tren de aterrizaje, ensayo de álabes y palas en helicópteros, detección de grietas en el fuselaje, etc.
6. **Industria metalúrgica:** desgaste de herramientas y detección de roturas, detección de contacto entre piezas, control de calidad de procesos de trabajo en metales, detección de colisiones y prevención en procesos de fabricación
7. **Ingeniería civil:** inspección de la estructura de edificios de hormigón, ensayos en puentes y

túneles, la vigilancia continua de daños o propagación de grietas, ensayos de las grúas, etc.

8. **Aplicaciones en el transporte:** detección y localización de fallos en remolques, vagones y camiones cisternas, detección de grietas en materiales y estructuras ferroviarias, pruebas de integridad de puentes y túneles, control del estado de los rodamientos y cojinete de camiones y trenes, detección de grietas en las ruedas y los ejes de los trenes, etc.

9. **Otras aplicaciones:** control de soldaduras, control de sequía de los cultivos y bosques, aplicaciones geológicas y sismológicas, supervisión del estado del motor, control de procesos "on-line" de máquinas rotativas, aplicaciones médicas como detección de osteoporosis, etc.

## Conclusiones

La EA es un método de END pasivo, que sin aportación artificial de energía al material o estructura, permite la detección de la energía elástica liberada debido a un cambio físico o mecánico en el interior de un material. Este método es muy eficaz cuando se utiliza para detectar fatiga y el comportamiento de la fractura en metales, materiales compuestos avanzados, plásticos, fibra de vidrio, materiales cerámicos, hormigón y madera. Con el equipo adecuado y personal capacitado, se pueden detectar fallos a escala micro-métrica. Sus numerosas ventajas y aplicaciones han hecho que la EA sea un método de END consolidado y fiable para la evaluación del daño y la prevención de fallos en un material. Este método puede ayudar a evitar costes asociados con las reparaciones de estructuras dañadas si no se detecta un defecto.

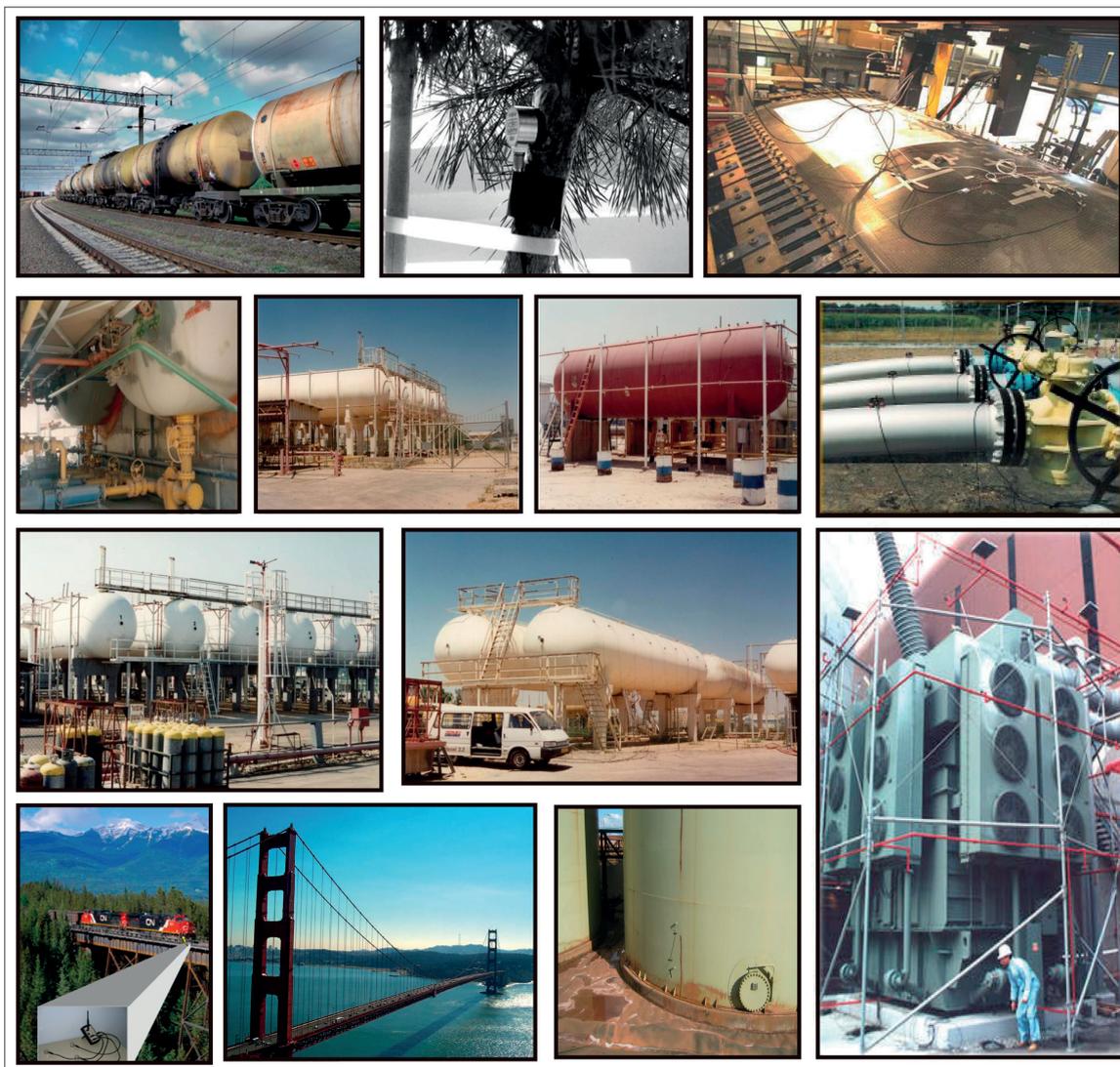


Figura 7. Ejemplos del campo de aplicación del método de EA