

## 1.1. BREVE HISTORIA DE LA EA

Al igual que en otras disciplinas científicas, el uso de ondas elásticas emitidas por un material para obtener información sobre su estado, se inició con aplicaciones y observaciones populares, sin justificación formal, en una etapa denominada precientífica.

La emisión acústica y la actividad microsísmica ocurren de manera natural. Aunque no se conoce exactamente cuando se oyeron las primeras emisiones acústicas, los procesos de fractura, tales como roturas de ramas y fracturas de rocas y huesos, probablemente fueron las primeras. La primera emisión acústica usada por un artesano pudo haber sido, durante muchos años, en la fabricación de cerámica. Para evaluar la calidad de estos productos, los ceramistas tradicionalmente confiaban en los sonidos de la rotura de vasijas de arcilla enfriándose en el horno. Estas emisiones constituían indicaciones bastante precisas de si las cerámicas fallaban estructuralmente.

La primera observación de emisión acústica en metales pudo haber sido el llamado grito del estaño, una emisión audible producida por el maclado del estaño puro durante su deformación plástica. Este fenómeno pudo ocurrir solamente después de que los humanos aprendieran a fundir estaño puro, ya que este se presenta en la naturaleza únicamente en forma de óxido.

El primer documento con observaciones de emisiones acústicas puede haberlo realizado el alquimista árabe Geber (su nombre árabe es Abu Musa Yabir al-Sufir Hayyan, 721-815). Trabajó en Kuba, actual Irán, y su libro documenta los sonidos emitidos por el estaño, así como el sonido emitido durante el forjado del hierro, debido a la formación de martensita durante el enfriamiento. En su libro *Summa Perfectionis Magisterio* escribe que Júpiter (estaño) emite un fuerte sonido o ruido cuando es deformado, y también lo hace Marte (hierro) cuando es enfriado tras la forja.

En 1540, el metalurgista italiano Vannoccio Biringuccio, encargado de la fundición artística del Vaticano, y contemporáneo de Leonardo da Vinci, escribe el libro *De la Pirotecnia*, en el que menciona las aleaciones de plomo y estaño diciendo que el ruido que emiten cuando son deformados es una forma de reconocerlos, y agrega que es mayor con el estaño que con otros metales.

Ya en América, el sacerdote español Álvaro Alonso Barba estudió los textos antiguos sobre metales, adquiriendo una destacada experiencia en el Alto Perú sobre el beneficio de la plata. Escribió el libro *El Arte de los Metales* (Madrid 1640), en el que se refiere al estaño diciendo que se produce un estridor cuando se muerde o quiebra (Figura 1.1).



Figura 1.1. Portada del libro *El Arte de los Metales* de Álvaro Alonso Barba (Madrid 1640)

Desde el tiempo de los alquimistas en la Edad Media, se ha conocido la emisión acústica del cadmio y del cinc. El grito del estaño está documentado en libros de química en la mitad del siglo XIX. Alrededor del comienzo del siglo XX, los investigadores comenzaron a desarrollar

modernas teorías y técnicas de metalurgia, siendo el estaño y el cinc los mejores metales para estudiar fenómenos de transformación de fases martensíticas y de maclado. Durante estos estudios, fue normal oír los sonidos emitidos por tales metales y aleaciones.

El paso de la observación accidental del grito del estaño a la realización de estudios de fenómenos de EA consistió básicamente en diversos experimentos en los cuales se usó la instrumentación para detectar, amplificar y registrar los eventos de EA.

El primero de ellos se realizó en Japón en el año 1933 a cargo del sismólogo Fuyuhiko Kishinouye. Para estudiar la fractura de la corteza de la Tierra a causa de los terremotos, este investigador diseñó y desarrolló una serie de experimentos conceptuales para amplificar y registrar la EA de la fractura de la madera. Su instrumentación consistió en un amplificador de tres tubos de un sismógrafo y un fonocaptador con una aguja de acero insertada en el lado tensionado de una tabla de madera a la cual le aplicó un esfuerzo de flexión para causar su fractura. Los oscilogramas de Kishinouye mostraron vibraciones muy rápidas y sonidos de fracturas de la tabla de madera, siendo estos por tanto registros de formas de onda de EA. El trabajo de Kishinouye fue presentado en 1934 en el encuentro del Instituto de Investigación sobre Terremotos en la Universidad de Tokyo (*Imperial University of Tokyo*), y traducido al inglés por el profesor Kanji Ono para la revista *Journal of Acoustic Emission* en el año 1990.

En Alemania se realizaron otra serie de experimentos alrededor del año 1936 por parte de los investigadores Friedrich Föster y Erich Scheil. Sus experimentos consistieron en medir cambios de voltaje muy pequeños y variaciones de resistencia producidos por súbitos movimientos causados por transformaciones martensíticas. Föster construyó un transmisor electrodinámico y un sistema receptor para transformar la vibración mecánica y la emisión acústica a voltajes eléctricos, los cuales podían ser amplificados y registrados.

En Estados Unidos, Warren P. Mason, Herbet J. McSkimin y William Shockley realizaron y publicaron diversos experimentos de EA en 1948. Shockley había sugerido experimentos para observar el movimiento de dislocaciones mediante las ondas elásticas que generan. El experimento consistió en presionar el elemento de ensayo (estaño puro) directamente frente a un transductor de cristal de cuarzo y aplicar suficiente tensión para deformarlo y causar dislocaciones por maclado, las cuales producen EA. Su instrumentación fue capaz de medir desplazamientos de 1 nm en episodios de 1  $\mu$ s de duración, siendo la frecuencia del cristal de cuarzo desde unos pocos kHz hasta 5 MHz.

Un cuarto experimento fue implementado por D.J. Millard en 1950 en el Reino Unido, a lo largo de su tesis doctoral en la Universidad de Bristol. Realizó experimentos de maclado sobre hilos de cristal de cadmio, detectándose y registrándose EA.

En el campo de la geología, L. Obert registró exitosamente emisiones microsísmicas en rocas. En 1938 Obert realizó ensayos de velocidad sísmica en minas de cinc del noreste de Oklahoma. A través de estos ensayos detectó que ciertas señales esporádicas se registraban en el espacio entre dos geófonos. Tras eliminar posibles efectos del equipamiento, descubrió que estas señales estaban generadas por la propia roca, argumentando que la actividad microsísmica podría detectarse de manera controlada en experimentos con roca.

Estos experimentos así como las audiciones de sonidos no fueron directamente un estudio de la EA en sí mismo como fenómeno físico, es decir, los investigadores no hicieron más investigación sobre EA. La génesis de la EA como la tecnología que hoy día conocemos fue el trabajo de Josef Kaiser en la *Technische Hochschule München* de Alemania (Figura 1.2).

En 1950, Kaiser publicó su tesis doctoral en la que expuso la investigación más comprensible sobre el fenómeno de la EA. Kaiser realizó ensayos de tensión de materiales de ingeniería convencionales, con cuatro

objetivos: 1) Determinar los sonidos que se generaban dentro de los elementos de ensayo; 2) Determinar los procesos acústicos que se ponían en juego; 3) Determinar los niveles de frecuencia encontrados; 4) Establecer la relación entre las curvas esfuerzo-deformación y las frecuencias observadas para varias tensiones a las cuales se sometían los elementos de ensayo. Su descubrimiento más importante es el fenómeno irreversible conocido como efecto Kaiser. Kaiser también propuso la distinción entre señales de EA transitorias y continuas. Continuó su investigación en Munich hasta que murió en marzo del año 1958. Sus trabajos supusieron el pistoletazo de salida para la investigación extensiva en EA.

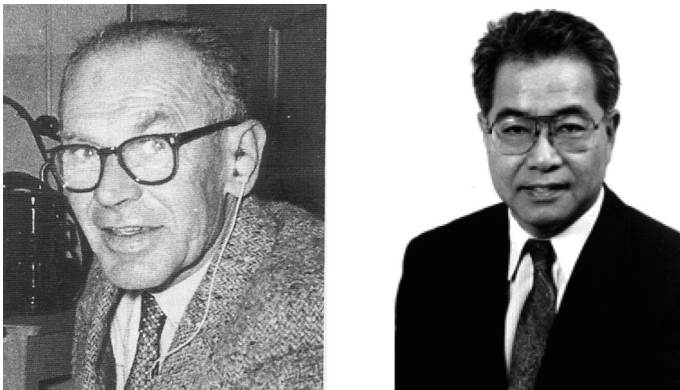


Figura 1.2. Izquierda: Josef Kaiser (Alemania); Derecha: Kanji Ono (Estados Unidos)

La primera investigación a gran escala en EA tras los trabajos de Kaiser se realizó en Estados Unidos por Bradford H. Schofield. En 1954, este investigador inició un programa de investigación sobre la aplicación de la EA a materiales en ingeniería. Sus primeras investigaciones fueron en la línea de verificar las conclusiones de Kaiser y su primer propósito fue determinar fuentes de EA. Schofield desarrolló investigaciones de cómo los efectos de superficie y de volumen están relacionados con el comportamiento de la EA. Su mayor conclusión fue que la EA es fundamentalmente un efecto de volumen, y no de superficie. Schofield publicó sus pioneros trabajos en varios artículos, introduciendo el término *acoustic emission* (emisión acústica).

En 1956, Lawrence E. Malvern, de la Universidad del Estado de Michigan, se encontró un artículo sobre vibraciones audibles durante deformaciones de Wilhelm Späth. El artículo referenciaba las observaciones de Kaiser, entre otras. Interesado en el estudio de la teoría de la fricción, Malvern sugirió a un nuevo miembro de la facultad, Clement A. Tatro, que esta técnica acústica debería ser de interés en investigación. Como consecuencia de ello, Tatro fundó el laboratorio de estudios de EA.

En 1957 Tatro fue consciente del trabajo de Schofield y los dos comenzaron a colaborar. Tatro pensó que los programas científicos sobre EA deberían seguir una de estas dos ramas: 1) Estudios relativos al fenómeno físico que da lugar a las emisiones para completar el entendimiento del fenómeno propiamente dicho; 2) usar la EA como herramienta para estudiar algunos problemas difíciles de resolver sobre el comportamiento de materiales. Tatro igualmente predijo el gran potencial de la EA como procedimiento de END. Su entusiasmo por la investigación, promovió el interés de muchos estudiantes de su Universidad, que eligieron la EA para sus proyectos de investigación. En 1966, Tatro se unió al Laboratorio de Radiación Lawrence, que posteriormente pasó a ser el *Lawrence Livermore National Laboratory*.

Schofield y Tatro ayudaron en gran medida al establecimiento de la investigación y la aplicación de la EA a lo largo de los Estados Unidos.

Antes de los años 60, en el ámbito de la tecnología de hormigones, se publicaron tres artículos relativos a la EA en estos materiales. Ruesch conocía los trabajos de Kaiser, y estudió el ruido emitido durante la carga a compresión de hormigón (1959), encontrando que el efecto Kaiser se cumple hasta el 75% aproximadamente de la carga de rotura. Por otro lado, bajo ensayos de carga a compresión, la relación entre el descenso en la velocidad del ultrasonido, la generación activa de EA hasta el 75% de la carga de rotura, y el incremento en el módulo de Poisson fueron resumidos por L'Hermite en 1960. Estos históricos descubrimientos, despertaron mucho interés en Japón, país donde desde entonces se han

desarrollado prolijos grupos de investigación de EA en hormigones y estructuras de Ingeniería Civil.

Por otro lado, en el contexto de una California basada en la industria aeronáutica, Aleen T. Green, Charles S. Lockman y Richard K. Steele trataron de verificar la integridad estructural del motor del cohete Polaris fabricado por la armada de los Estados Unidos. Ellos se dieron cuenta que las audiciones eran consistentemente evidentes durante ensayos hidrostáticos y decidieron instrumentar las vasijas para detectar, registrar y analizar señales de EA. Su primer ensayo de EA se realizó en 1961, usando micrófonos de contacto, una cinta grabadora y equipamiento de análisis del nivel del sonido registrado. Como parte de un contrato con la *National Aeronautics and Space Administration*, Green, Lockman y Steele instrumentaron en 1965 la carcasa de un motor de cohete de 6,6 m de diámetro, para monitorizar la vasija durante pruebas hidráulicas. El análisis de los registros de sonido mostró claramente la iniciación de fracturas y su propagación antes del fallo catastrófico al 56% de presión. Incluso, mediante técnicas de triangulación, fueron capaces de localizar el origen del fallo con un error de 0,3 m.

Harold L. Dunegan (Figura 1.3) y el *Lawrence Radiation Laboratory* se interesaron en la EA tras conocer el artículo de Tatro y Liptai en la conferencia celebrada en San Antonio (Texas) en 1962. De esta forma, los investigadores del *Livermore*, como resultado de informes internos de Dunegan, comenzaron a aplicar la EA para investigación en vasijas de presión. Sus actividades y las de sus colaboradores incorporaron un amplio espectro de aplicaciones. En 1969, Dunegan y Paul L. Knauss dejaron el laboratorio y crearon una empresa dedicada exclusivamente a la fabricación de equipamiento de EA.

Al final de los años 60 y durante los años 70, la investigación y desarrollo de la EA en Estados Unidos se desarrolló por diversos laboratorios nacionales y por las industrias de aviación, nuclear y petrolera. En el Reino Unido, el método de la EA se desarrolló en el *Imperial College* de Londres y en el *Atomic Energy Research Establishment*. En la primavera

del año 1967, un conjunto importante de investigadores trabajaba en el fenómeno de la EA y publicaban sus trabajos, pero no de una forma centralizada. Había muchas diferencias en terminología y técnicas experimentales, en muchos casos reflejando los conocimientos previos en el campo de cada investigador. Jack C. Spanner contactó con una docena de ellos y los invitó a participar en la formación y organización del *Acoustic Emission Working Group* (AEWG), cuyo primer encuentro se realizó formalmente en el año 1968 en Idaho Falls (Figura 1.3). Desde entonces, este grupo, de manera ininterrumpida, celebra una conferencia en diferentes lugares de Estados Unidos. La última se celebró en el año 2014 en Salt Lake City, Utah (AEWG-56). Aunque inicialmente se trataba de una conferencia nacional, desde hace ya muchos años es muy destacada la presencia de investigadores de todo el mundo, así como de miembros del grupo AEWG de todo el mundo. Además, en relación con la actividad microsísmica, H.R. Hardy organizó y auspició una serie de 5 conferencias sobre *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, entre 1974 y 1991, contribuyendo enormemente a su aplicación en este campo de la Geología.



Figura 1.3. Izquierda: Dunegan y Pollock inspeccionando la campana Liberty; Derecha: Grupo AEWG reunido el año 1968 en Idaho Falls (USA)

Por otro lado, también se establecieron grupos de trabajo en EA en Japón y en Europa, los cuales organizan conferencias bienales. En Europa, el grupo EWGAE (*European Working Group of Acoustic Emission*) celebró su primer encuentro en Londres en el año 1972 como *European Stress Wave Emission Working Group*. Durante el verano de 1971, Dunegan viajó a Inglaterra y a diversos países de Europa para impartir



cursos cortos sobre EA y mostrar la instrumentación desarrollada por su empresa *Dunegan Research Corporation*. En marzo de 1972, el Dr. Adrian A. Pollock (Figura 1.3) de *Cambridge Consultants* organizó la *Institute of Physics Conference on Acoustic Emission* en el *Imperial College* de Londres, en la que se presentaron 15 artículos de europeos y estadounidenses. Posteriormente Pollock y Birchon (*Admiralty Materials Laboratory*) organizaron el *European Stress Wave Emission Working Group*, que celebró su primer encuentro en el año 1972. El primer encuentro del EWGAE como tal, se realizó sin embargo en Estambul en 1986, del cual 7 artículos ampliados se publicaron en la revista *Journal of Acoustic Emission* (JAE). La penúltima conferencia EWGAE, la número 30, se celebró en Granada (España) en septiembre de 2012, auspiciada por la Universidad de Granada bajo la presidencia del Dr. Antolino Gallego.

Hoy en día la EA se usa extensamente en Europa a través de muchas áreas y ensayos de prueba, monitorización en servicio, detección de corrosión y fugas, etc. El subgrupo de códigos publicó 5 códigos de operación con EA hasta 1985. La normalización del método se realiza por el Grupo de Trabajo CEN/TC 138/WG 7 “*Emisión Acústica*” dentro del Comité Europeo de Normalización (CEN).

Por otro lado, en el año 1969 se fundó el Comité Japonés de EA, país con muchos grupos activos en EA. Desde el año 1980 este comité está organizado como un comité técnico *ad hoc* dentro de la *Japanese Society for Nondestructive Inspection* (JSNDI). Este grupo de trabajo organiza una conferencia internacional bienal, *The International Acoustic Emission Symposia* (IAES), desde el año 1972. El primer encuentro se celebró en Tokyo y el último hasta la fecha en Sendai en 2014.

Finalmente, hay que resaltar la importante labor realizada por el profesor Kanji Ono (Figura 1.2) de la Universidad de California Los Ángeles (UCLA), quien ha sido fundador y editor desde el año 1982 de la revista *Journal of Acoustic Emission*, la cual ha ido aumentando de manera importante el número de artículos publicados, proporcionando a los

investigadores y trabajadores en el método de la EA un excelente foro donde encontrar el estado del arte en este campo. Por otro lado, cabe citar también la importante labor de documentación histórica sobre la EA que ha realizado Thomas Drouillard, con tres artículos en los años 1979, 1987 y 1996, los cuales han inspirado y documentado la redacción de esta Sección.

## **1.2. TERMINOLOGÍA DE EA. NORMA EN 1330-9:2009**

La norma europea EN 1330 fue elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 138 *Ensayos no destructivos* (END) en el año 1998, y recibió el rango de norma nacional por el comité técnico AEN/CTN 130 *Ensayos no destructivos* cuya Secretaría desempeña la Asociación Española de Ensayos no Destructivos (AEND), siendo editada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

La norma engloba todos los métodos de END y consta de 11 partes. Su novena parte (EN 1330-9) es la relativa al método de Emisión Acústica (EA), cuyo título es *Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 9: Términos utilizados en ensayos de emisión acústica*. La primera versión de esta norma se publicó en el año 2000 y fue anulada por la versión de 2009. En ella, la emisión acústica se define como un fenómeno que produce ondas elásticas transitorias, por ejemplo por deformación plástica, propagación de fisuras, erosión, corrosión, impacto, fuga. El resto de términos se dividen en 4 bloques, que hacen referencia al fenómeno físico de la EA, a la detección de la EA, a las señales de EA medidas y a las aplicaciones del método, respectivamente. Más concretamente estos bloques son:

### **Bloque 1: TÉRMINOS RELATIVOS AL FENÓMENO FÍSICO**

**Evento de emisión acústica:** Fenómeno físico que genera una emisión acústica.

**Fuente de emisión acústica:** Elemento espacial a partir del cual se originan uno o más eventos de emisión acústica.

**Ondas de emisión acústica:** Ondas elásticas transitorias generadas por liberación de energía en un material o por un proceso.

**Energía de la onda de emisión acústica:** Energía de la onda elástica liberada por un evento de emisión acústica.

## **Bloque 2: TÉRMINOS RELATIVOS A LA DETECCIÓN DE LA EMISIÓN ACÚSTICA**

**Sensor de emisión acústica:** Dispositivo que transforma el movimiento de las partículas producido por la onda elástica en una señal eléctrica.

**Acoplante de emisión acústica:** Material utilizado en la interfase objeto-sensor para mejorar la transmisión de las ondas de emisión acústica a través de la interfase.

**Emisión discreta:** Emisión acústica de eventos que pueden separarse unos de otros en el tiempo.

**Emisión continua:** Emisión acústica de eventos que no pueden separarse unos de otros en el tiempo.

**Guía de ondas de emisión acústica:** Dispositivo utilizado para la transmisión de ondas de emisión acústica del objeto de ensayo al sensor de emisión acústica, cuando el acoplamiento directo no sea posible.

**Señal de emisión acústica:** Señal eléctrica procedente de un sensor producida por la onda de emisión acústica. Esta onda puede presentar otras interferencias como por ejemplo las EMI (interferencias electromagnéticas).

**Señal discreta:** Señal de emisión acústica con un principio y un final identificables.

**Señal continua:** Señal de emisión acústica con un principio y un final no identificables.

**Ruido de emisión acústica:** Señales que no son relevantes para los objetivos de este ensayo. Pueden ser de origen electromagnético, térmico o mecánico.

**Ruido de fondo:** Ruido de emisión acústica que puede excluirse aumentando el umbral de detección o el filtrado de la frecuencia.

**Ruido parásito:** Ruido de emisión acústica que no puede eliminarse aumentando el umbral de detección o el filtrado de frecuencia y que podría eliminarse mediante filtrado analógico.

**Canal de emisión acústica:** Conjunto formado por un único sensor de emisión acústica y los instrumentos asociados a este para detectar y procesar las señales.

**Rango dinámico de un canal de emisión acústica:** Relación entre la tensión de la señal más elevada (sin distorsión) y la tensión máxima del ruido electrónico. Debe expresarse en dB y estar definido por:

**rango dinámico =**

$$= 20 \log \left[ \frac{\text{tensión máxima (señal)}}{\text{tensión máxima (ruido electrónico)}} \right].$$