XXV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Santander, 10-13 junio 2025
UC Universidad de Cantabria
IFToMM

Estudio sobre la emisión acústica en la deformación plástica de alambre vinculada al proceso de trefilado

E. Caso[1], A. Fernández del Rincón[1]*, Pablo Garcia-Fernandez[1], Ana de-Juan[1], Miguel Iglesias[1], Javier Sanchez-Espiga[1], Alberto Diez-Ibarbia[1], Fernando Viadero[1]

[1] *Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Área de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cantabria, enrique.caso@unican.es, alfonso.fernandez@unican.es, pablo.garcia@unican.es, ana.dejuan@unican.es, miguel.iglesias@unican.es, javier.sanchez@unican.es, alberto.diez@unican.es, fernando.viadero@unican.es*

La emisión acústica (EA) es una tecnología de sensores que, por sus características de trabajo a alta frecuencia, es sensible ante liberaciones de energía que se producen en los fenómenos de deformación y contacto que se dan en el proceso de trefilado de alambre. La manera en la que se producen estos fenómenos tiene que ver con las condiciones y el estado del proceso, por lo que la EA resulta una herramienta interesante para su monitorización. El análisis y diagnóstico con estas señales conlleva el problema de la simultaneidad de diferentes fenómenos involucrados en la generación de EA. Además, cambios en los parámetros que definen el proceso tienen efecto en las emisiones de EA, añadiendo complejidad para establecer la relación causa-efecto en la respuesta observada. En este trabajo, se analizan señales de EA adquiridas en laboratorio. De este modo, se pretende conseguir un despliegue experimental controlado afectado por menos parámetros que en el entorno industrial. La deformación plástica que se produce por el cambio de sección del alambre sin los efectos de contacto ha sido evaluada mediante un ensayo a tracción, registrando la EA frente a distintas solicitaciones de carga. El análisis de los efectos combinados, deformación volumétrica y de contacto, se ha llevado a cabo utilizando un banco de ensayos de trefilado propio que incorpora un útil diseñado exprofeso que permite integrar la hilera en una máquina de tracción convencional. Como resultados, se presentan los análisis de las señales mediante diferentes procesados que permiten evaluar su morfología y relacionar ciertos aspectos con los mecanismos de deformación y generación de EA.

1. Introducción

La monitorización del trefilado de alambre con emisión acústica (EA) da pie a potenciales mejoras en la supervisión del proceso, no solo ante la detección de incidencias puntuales cuando la señal de voltaje supera un determinado umbral, si no que el alcance puede ser más extenso. La respuesta de la EA ante ligeras variaciones de las condiciones de operación posibilita aspectos relacionados con la optimización del trefilado y la toma de decisiones de carácter preventivo utilizando la morfología de las señales como referencia [Caso2023]. Todo esto tiene como origen las fluctuaciones de las ondas generadas en la interacción alambre-hilera, donde interviene la deformación plástica del alambre, la fricción entre las superficies en contacto o la degradación de los componentes, entre otros fenómenos.

En la zona interna del alambre se produce una deformación volumétrica de carácter plástico al forzar el alambre a su paso por un orificio de menor diámetro. Los mecanismos de plastificación son fuentes de generación de EA, resultando estar su magnitud relacionada con el tamaño de la zona plástica del material [Palmer1973]. La contribución a la EA global de esta parte de la emisión, aislando el efecto de la fricción, tiene similitud con las condiciones que se imponen en un ensayo de tracción. La EA producida por debajo del límite elástico se relaciona con deformación plástica parcial asociada a la actividad de las dislocaciones en los bordes de grano, mientras que, en las proximidades del límite elástico-plástico, comienza a producirse debido al intenso movimiento de bandas de deslizamiento [Akbaria2009]. Al representar la EA frente a la fuerza de tracción quedan claramente diferenciadas la zona elástica, el límite elástico, la zona de deformación plástica y la rotura [Schnabel2017]. La ausencia, o no, de EA detectable por debajo del límite elástico y la distinción de las regiones elástica, plástica y de iniciación de grietas dependen de las propiedades cristalográficas del material, en especial de la fase alotrópica, por ejemplo, observándose de una manera más clara con probetas de ferrita, mientras que la distinción de esas regiones es menos evidente con bainita [tesisSchnabel2016].

El proceso de trefilado resulta ser más complejo debido a la interacción de la superficie del alambre con la hilera, en la que los mecanismos de contacto suponen una forma de generación de EA superpuesta y propensa a irregularidades por las variaciones superficiales a escala local. Los aspectos negativos de la fricción y degradación, así como la generación de defectos en superficie se intentan evitar utilizando lubricantes, normalmente lubricantes secos de tipo sólido [Byon2011]. La lubricación depende de la correcta impregnación del lubricante sólido sobre la superficie exterior del alambre, al que generalmente se aplica un recubrimiento (fosfatado) que favorece este aspecto, lo que incide en mejorar la calidad final del alambre y el proceso [Bay1994]. El rendimiento del lubricante también se ve afectado por la temperatura que puede incrementarse de manera local en puntos donde el recubrimiento o la adhesión no es uniforme suponiendo un incremento de la fricción [Abe1961]. Las variaciones en las condiciones locales de contacto pueden suponer la generación de grietas o defectos superficiales. Los defectos superficiales existentes en el alambre son deformados a su paso por las sucesivas hileras, afectando su presencia a la calidad del alambre trefilado [Baek2012].

La monitorización del proceso en una línea de trefilado industrial dificulta el análisis de aspectos aislados debido al gran número de parámetros involucrados que, a su vez, tienen efectos interrelacionados cuando se producen variaciones. Esta limitación ha llevado a plantear un estudio experimental en el laboratorio que proporcione información sobre la EA generada de manera controlada. Para ello, se ha desarrollado una metodología experimental y un útil que permite simular condiciones de deformación plástica en un alambre, cuyos resultados se muestran a continuación.

2. Procedimiento experimental

Los experimentos realizados en esta investigación tienen que ver con la EA generada en la deformación del alambre en el trefilado. Por una parte, interesa evaluar la EA, en un alambre sometido a esfuerzos, que se produce en la deformación plástica por la reducción de sección y por otra, la que se obtiene al forzar el alambre a pasar por la hilera. Para abordar experimentalmente estos aspectos, se desarrollan dos metodologías de prueba, una para el ensayo a tracción y otra para el trefilado mediante la utilización de un útil diseñado exprofeso.

El elemento común de las dos pruebas es una máquina de ensayos universal (EUROTEST-100-MD2iW) que permite aplicar la fuerza de tracción en el alambre. La máquina utilizada consta de una mordaza inferior fija y una superior que se desplaza mediante el accionamiento de un servomotor síncrono (husillo con correa dentada y reductor de engranajes cónicos) a una velocidad dentro del rango de 0,001 a 600 mm/min con una capacidad de 100 kN. La máquina se acciona con un software propio que registra el desplazamiento y la fuerza por medio de una célula de carga durante la realización del ensayo. Los alambres para las pruebas se dividen en dos categorías, Alambre A (tres probetas distintas A1, A2, A3 de similares características) de acero de 6 mm de diámetro y alambre B1 (un mismo alambre) de acero de 5 mm de diámetro.

Para la adquisición de las señales de EA se utiliza una tarjeta con capacidad de 2 MS/s y 16 bits modelo ADLink USB-1210 y un sensor de EA de tipo resonante con una frecuencia característica de 150 kHz modelo VS150-K3 con amplificador de señal externo, cuya zona de mayor sensibilidad puede establecerse entre los 100-450 kHz,

aunque existen picos en su respuesta en frecuencia fuera de ese rango. Las señales están filtradas con un filtro pasa banda Butterworth de orden cuarto entre 75-300 kHz (filtro que se aplica a todas las señales de este estudio). El posicionamiento del sensor se realiza con un soporte magnético y aplicando gel acoplante acústico entre la base del sensor y la superficie de monitorización.

2.1. Ensayos: tracción del alambre y trefilado

Los experimentos realizados se dividen en dos tipos de ensayo en laboratorio, ensayos de tracción y de trefilado de alambre. Los ensayos de tracción se realizan de manera convencional, mientras que los de trefilado han requerido el desarrollo de un útil para conseguir el banco de ensayo. Los parámetros que definen los experimentos y rangos de operación más relevantes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Descripción de los ensayos realizados.

Ensayo	Referencia alambre	Descripción	Velocidad de tirado
Tracción	Alambre A1	Ensayo llevado a rotura	10 mm/min
	Alambre A2	Ensayo llevado a rotura	5 mm/min
	Alambre A3	E1 – Solicitación por debajo de límite elástico y descarga	10 mm/min
	Alambre A3	E2 – Solicitación superando el límite elástico y descarga	10 mm/min
	Alambre A3	E3 – Solicitación superando el límite elástico y descarga	10 mm/min
	Alambre A3	E4 – Ensayo llevado a rotura	10 mm/min
Trefilado	Alambre B1	Tirado a velocidad estacionaria	90 mm/min
	Alambre B1	Tirado a velocidad estacionaria	300 mm/min
	Alambre B1	Tirado a velocidad estacionaria	500 mm/min
	Alambre B1	Tirado a velocidad estacionaria	750 mm/min

2.2. Ensayos de tracción del alambre

Este ensayo permite evaluar la EA generada únicamente en la deformación plástica del alambre que supone el cambio volumétrico de la sección, sin la fricción que se produce entre alambre e hilera en el trefilado. La configuración es la habitual en un ensayo de tracción, mordiendo el alambre con las mordazas inferior y superior para tirar de él. El sensor se coloca en una de las cuñas de la mordaza superior para tener un camino de propagación corto a la zona de generación de la EA (interfaz mordaza-alambre). En la Figura 1 se muestra la configuración utilizada.



Figura 1: Configuración de la máquina y posicionamiento del sensor de EA en los ensayos de tracción del alambre.

En primer lugar, se realizó un ensayo a rotura de una probeta de alambre. La prueba se completó con ensayos sucesivos a una misma probeta de alambre (análoga a la inicial) con la siguiente secuencia de carga. Las dos pruebas se describen de la siguiente manera:

- Ensayo cargan a rotura una probeta de alambre a velocidad constante.
- Ensayo con secuencia de carga (y descarga) a una misma probeta de alambre, finalizando en rotura.

2.3. Ensayos de trefilado del alambre

Para poder efectuar los ensayos en la máquina de tracción fue necesario diseñar un útil que permita el accionamiento de la hilera imitando el proceso de trefilado. El trefilado requiere un movimiento relativo entre el alambre y la hilera. En las líneas de trefilado es el alambre el que se desplaza, estando fija la hilera. En este caso, se utilizó el movimiento de la mordaza superior para tirar de la hilera con el alambre enhebrado y fijado con la mordaza inferior por la parte de mayor diámetro. El útil, mostrado en la Figura 2, cuenta con unas barras de separación que permiten el recorrido del alambre, una base de posicionamiento de la hilera con topes para asegurar su posición y un orificio para la salida del alambre. También se dispone de una placa de sujeción de la hilera, atornillada a la base, que incorpora una tolva de lubricante para impregnar el alambre a su paso. Es en esta placa de sujeción donde se coloca el sensor de EA mediante un soporte magnético. Los equipos de adquisición y sensores utilizados son los mismos que los de la anterior prueba de tracción del alambre.

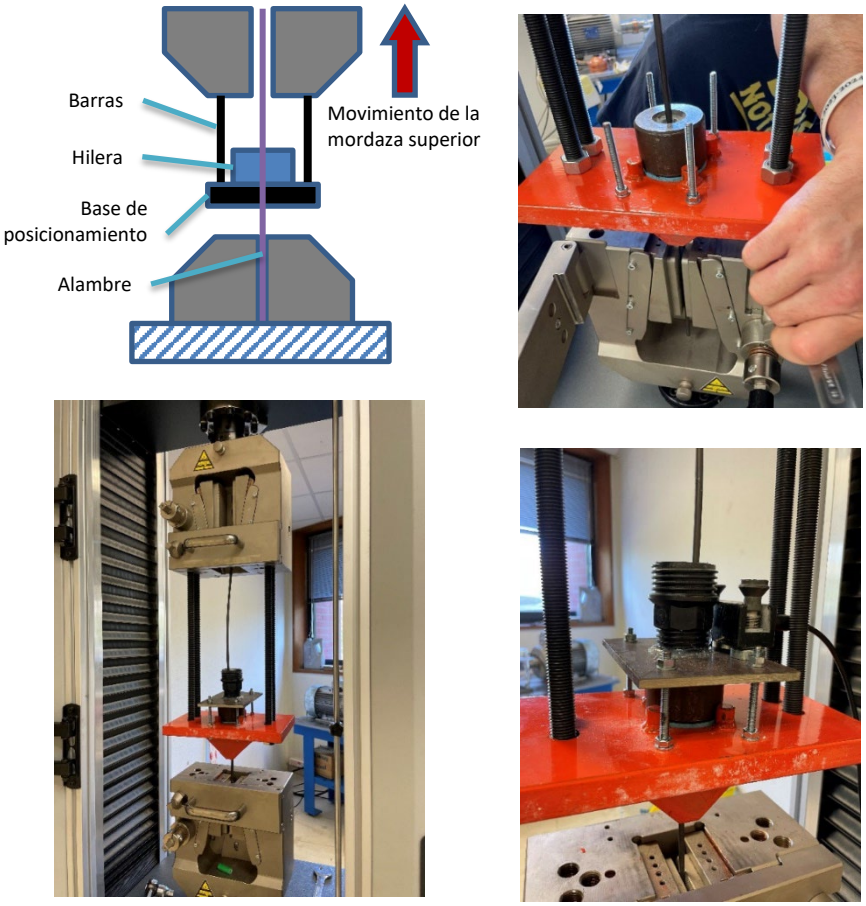


Figura 2: Configuración de la máquina y posicionamiento del sensor de EA en los ensayos de trefilado.

En esta configuración experimental no existe la posibilidad de descartar un primer tramo de calentamiento hasta que las condiciones de lubricación se adecuan. Dado que las condiciones iniciales en un ensayo como éste, de un corto tramo de alambre diferirían de las que se dan en la producción industrial, se aplicó calor a la superficie del alambre previamente al inicio de la prueba para conseguir una impregnación adecuada del lubricante. Para ello, se realizó un estudio experimental mediante un barrido de temperaturas entre 50-150ºC para encontrar una temperatura de alambre adecuada (Figura 3). El calor se aplicó mediante un decapador, acción que se incorporó como procedimiento a la realización de los ensayos.

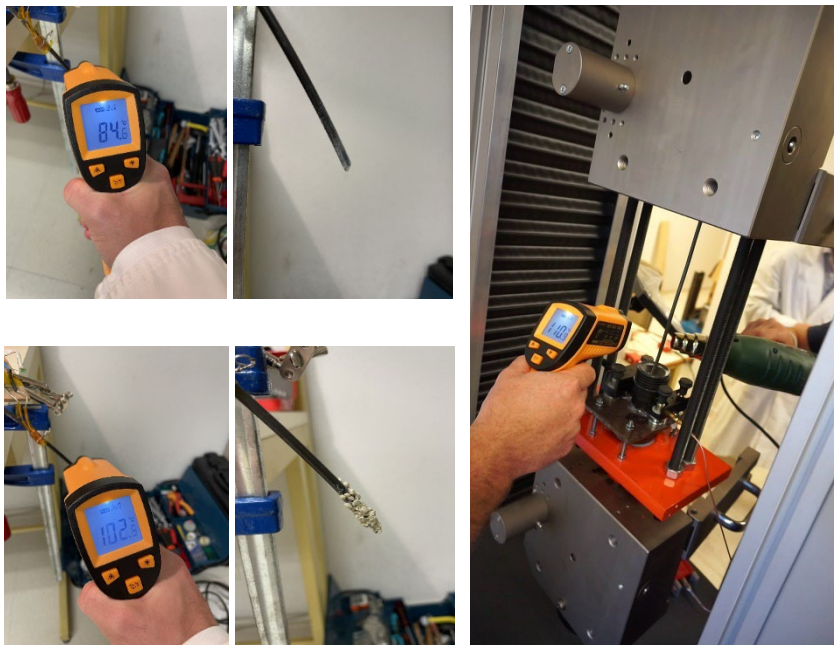


Figura 3: Fotografías mostrando la capacidad de impregnación del lubricante en polvo para una temperatura superficial de 84ºC y 102ºC en el alambre y el procedimiento de calentamiento previo a la prueba.

El procedimiento del experimento consistió en el trefilado de una misma probeta de alambre. La prueba se dividió en cuatro tramos, cada uno de ellos consistente en un ensayo a una velocidad de tirado estacionaria de 90 mm/min, 300 mm/min, 500 mm/min y 750 mm/min.

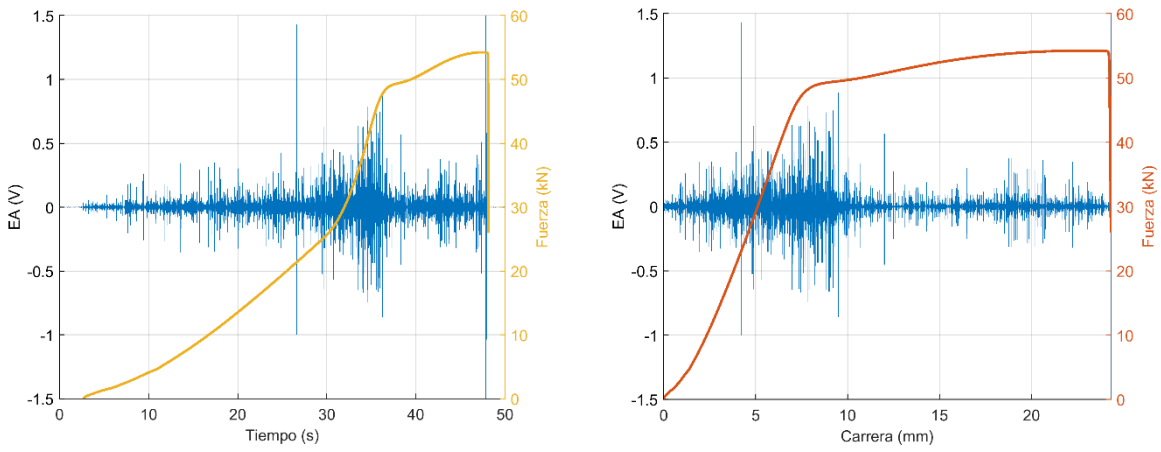
3. Resultados

Los resultados se dividen en tres subsecciones según la prueba de la en la que fueron obtenidos, las dos primeras con ensayos de tracción y la tercera con el útil de trefilado: una para la prueba de tracción a rotura, y otra para la prueba de trefilado:

1. Resultados de los ensayos de tracción del alambre a rotura.
2. Resultados de los ensayos de tracción del alambre con secuencia de carga.
3. Resultados de los ensayos de trefilado del alambre.

3.1. Resultados de los ensayos de tracción del alambre a rotura

La señal de EA de la Figura 4 (correspondiente al Alambre A1 trefilado a 10 mm/min) está representada en el eje izquierdo de la gráfica mientras que en el derecho de muestra la fuerza aplicada. La Figura 4a consiste en la evolución temporal de la EA mientras que la Figura 4b visualiza la misma señal en función del desplazamiento o carrera de las mordazas de la máquina de tracción.



(a) En función del tiempo (b) En función de la carrera

Figura 4: Señal de EA generada en el ensayo que lleva a rotura una probeta de alambre.

La EA muestra un comportamiento relacionado con el régimen de deformación de la probeta representativo de la EA generada en este tipo de ensayos. En ella se observa un mayor nivel de amplitud en la señal coincidiendo con el paso por el límite elástico observable en la zona en la que se produce el cambio de pendiente en la fuerza. Se observan eventos previamente al límite elástico. La respuesta en esta zona está condicionada por las propiedades cristalográficas del material, una estructura alotrópica diferente podría dar una morfología distinta, incluso ausencia de emisiones significativas por debajo del límite elástico.

La EA emitida en esos eventos puede ser también evaluada por medio de la evolución del contenido espectral de la señal. Para calcular la evolución dentro de una misma señal se ha recurrido a una ventana móvil que la recorre, obteniendo un espectro para cada tramo de señal (Figura 5). A cada uno de esos tramos se le ha asociado el tiempo correspondiente a los segundos mitad del tramo, permitiendo la representación temporal. Considerando la correlación entre tiempo y carrera también se puede representar la evolución espectral respecto de este parámetro.

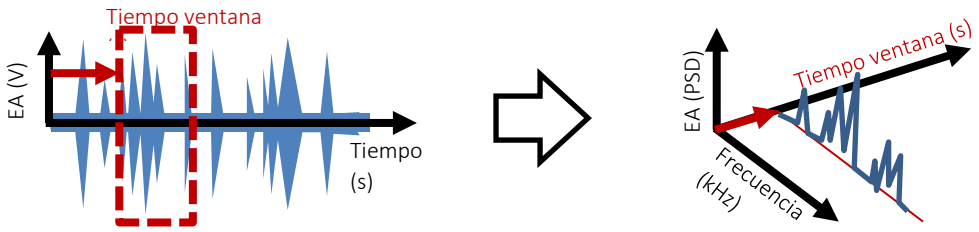
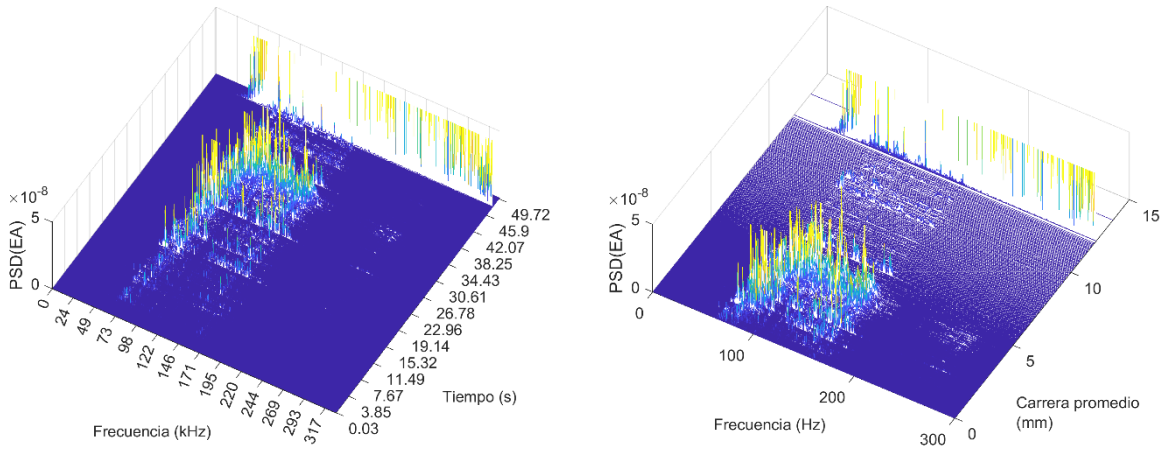


Figura 5: Esquema de la representación de la evolución en frecuencia de la señal de EA.

La Figura 6 muestra los espectros a lo largo de la señal frente a tiempo y a la carrera. Al hacer un cambio de variable entre el tiempo y la carrera, se obtiene que, al representar según la carrera, los espectros no quedan equiespaciados debido a la deformación más rápida en la parte final (Figura 6b). Tanto en el dominio temporal como en el espectral, se observa con claridad unos niveles picos superiores y una mayor banda de frecuencia excitada durante el periodo asociado al sobrepaso del límite elástico.



(a) Evolución en función del tiempo (b) Evolución en función de la carrera promedio

Figura 6: Evolución espectral de la EA y durante el ensayo de tracción (mismas señales que la Figura 4).

Es en torno al límite elástico cuando la EA aumenta en su valor pico de los eventos y nivel de amplitud promedio, representado este último por el RMS en la Figura 7. Tras el límite elástico se reduce la amplitud de los eventos y de la parte de señal considerada como emisión continua según este umbral, volviendo a aumentar ligeramente el RMS en la zona previa a la rotura, al igual que la variación temporal de la fuerza.

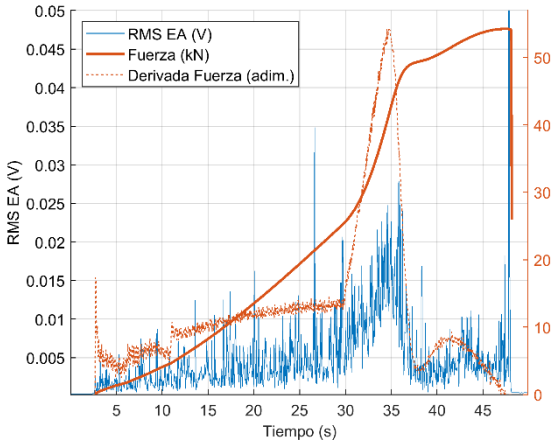


Figura 7: Evolución del RMS de la EA junto con la fuerza aplicada y su derivada durante el tiempo del ensayo.

3.1.1 Procesado de señal en base a la identificación de eventos

En general, la señal de EA se compone de eventos aislados que superan un nivel de ruido base entre ellos. Durante el ensayo de tracción, el nivel de ruido base es cercano al registrado por la tarjeta de adquisición en ausencia de perturbaciones, ya que los mecanismos de generación son emisiones puntuales. Esta morfología de señal puede ser analizada mediante la de detección de eventos asociados al sobrepaso de un umbral identificando su aparición y características. En este caso, se recurre al empleo de un procesado de señal denominado Tri-signal o señal triangular. Consiste en la detección de los tiempos de subida y de bajada de la señal respecto un umbral y del valor pico junto con su amplitud máxima, consiguiendo caracterizar cada evento por medio de un triángulo. De esta manera se obtiene una señal triangular con un reducido número de datos que contiene información sobre los eventos.

Partiendo de esa representación de los eventos en la señal triangular determinada por el umbral seleccionado, se han definido dos indicadores que permiten evaluar ciertas características de la EA. En el esquema de la Figura 8 se muestra el modo de obtener ambos indicadores. El primero de ellos es el número de eventos por unidad temporal, calculado contado los eventos en un intervalo determinado de corta duración. El segundo de ellos, el ancho de eventos promedio, se calcula promediando el ancho o duración de cada uno de los eventos identificados en ese intervalo. Por lo tanto, para cada intervalo temporal son definidos dos valores numéricos.

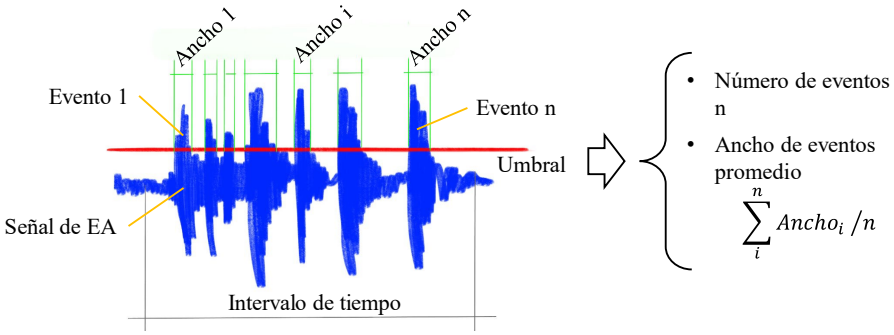
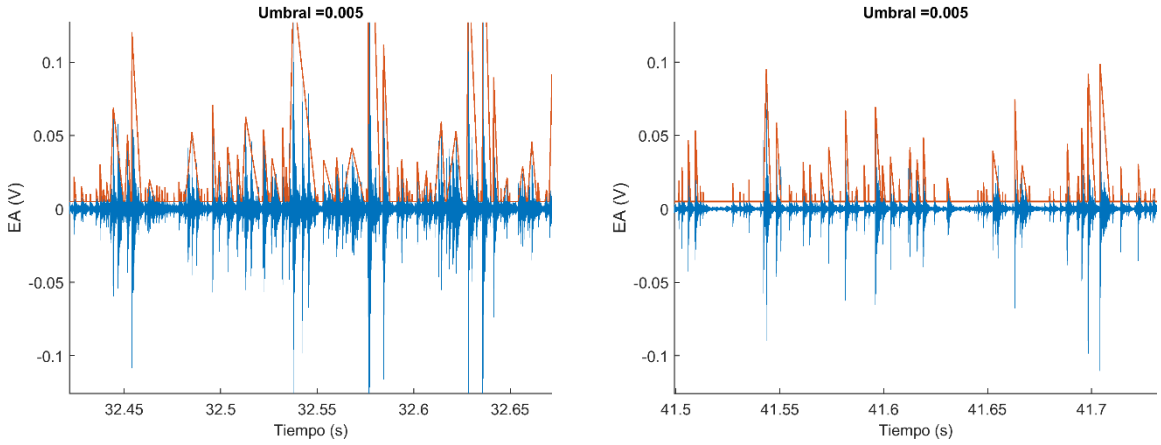


Figura 8: Esquema del procesado en base a la identificación de eventos.

La selección del umbral es un aspecto crítico para la validez de los resultados de estos indicadores. Debido al manejo de un número de señales reducido y al carácter de investigación de esta señal, se han definido umbrales fijos tras un análisis detallado de las señales involucradas. En el caso de estandarizar el procesado pensando en un sistema de monitorización, debería plantearse un umbral automático definido en base a la morfología de la señal registrada. Una vez se selecciona el umbral adecuado, los dos indicadores deben analizarse en conjunto para obtener la información sobre la EA.

La Figura 9 muestra un ejemplo de la señal triangular resultante a un umbral de 0.005 V en dos intervalos que se corresponden a dos momentos diferentes de la deformación del alambre. El umbral fijo funciona bien en la mayor parte de la señal para identificar eventos individuales, caracterizados por un único máximo (Figura 9b). Sin embargo, en la mencionada zona en torno al límite elástico de material se solapan los eventos por un incremento en la duración de su emisión (ancho de evento) o en el aumento del nivel de ruido base entre ellos (Figura 9a). Este comportamiento se reproduce en las señales analizadas y con un barrido de diferentes umbrales hasta definir el umbral especificado de 0.005 V.



(a) Zona del límite elástico (b) Superado el límite elástico

Figura 9: Señal de EA y señal triangular para un tramo de 25 ms.

Aunque pueda ser interpretado como una mala aplicación del algoritmo para obtener la señal triangular, el procesado para calcular los indicadores planteados, número de eventos y ancho promedio de eventos, permite dar una interpretación de la morfología de la señal. Los dos indicadores sirven para la caracterización de las zonas de diferente emisividad con valores numéricos, ya que su identificación puede resultar difusa atendiendo a las señales en bruto. Para tener en cuenta el posible solapamiento de eventos se recurre a computar de manera conjunta el número de eventos y el ancho de evento, un indicador que evalúa el tiempo de emisión de los eventos por medio de la diferencia entre los tiempos de bajada y subida.

En la Figura 10 se muestra el resultado del procesado propuesto para la misma señal analizada anteriormente (alambre A1 trefilado a 10 mm/min). En esta gráfica se incluye la tasa o número de emisión de eventos por unidad de tiempo en forma de barras (eje izquierdo), contando el número de eventos contenidos en cada intervalo de 0.5 s de la señal. Sobrepuesto a la gráfica de barras, se representa el valor del ancho de evento en cada uno de esos tramos (eje derecho), calculado como el promedio del ancho de esos eventos.

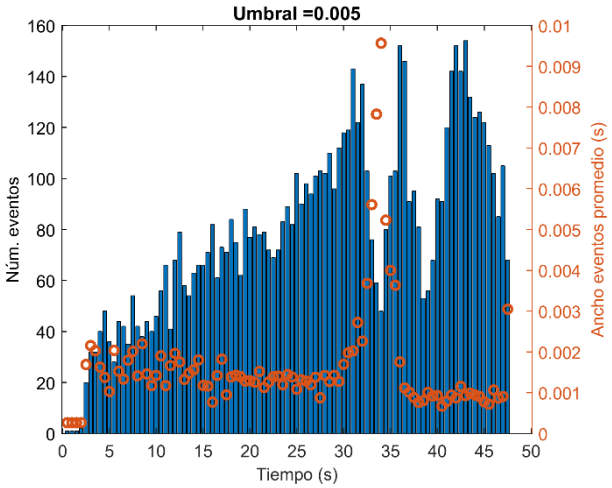


Figura 10: Número de eventos (barras) y ancho de evento promedio (círculos) de la señal de EA computados en tramos de medio segundo.

El número de eventos por unidad de tiempo aumenta progresivamente manteniendo un valor similar en su anchura promedio hasta los 30 s de duración del ensayo (30-35 s, Figura 10). En ese momento se aproxima el límite elástico, que se traduce en una disminución del número de eventos y un aumento de su anchura debido al solapamiento al mantenerse la EA por encima del umbral (Figura 9a). Una vez en el tramo de deformación plástica, superados los 35 s, los eventos identificados por la señal triangular mantienen un ancho promedio estable, produciéndose un variación únicamente en el número de eventos por unidad temporal.

3.1.2 Efecto de la velocidad de tirado

La velocidad de tirado en la primera prueba (Alambre A1) fue de 10 mm/mim. Para evaluar el efecto de la velocidad se realizó una segunda prueba de tracción a rotura con una probeta análoga a un velocidad inferior de 5 mm/min (Alambre A2). El la Figura 11 se muestran las señales a dos velocidades de tirado, 5 y 10 mm/min, en

función de la carrera de la máquina, ya que permite una comparación más precisa que respecto al tiempo por las distintas velocidades.

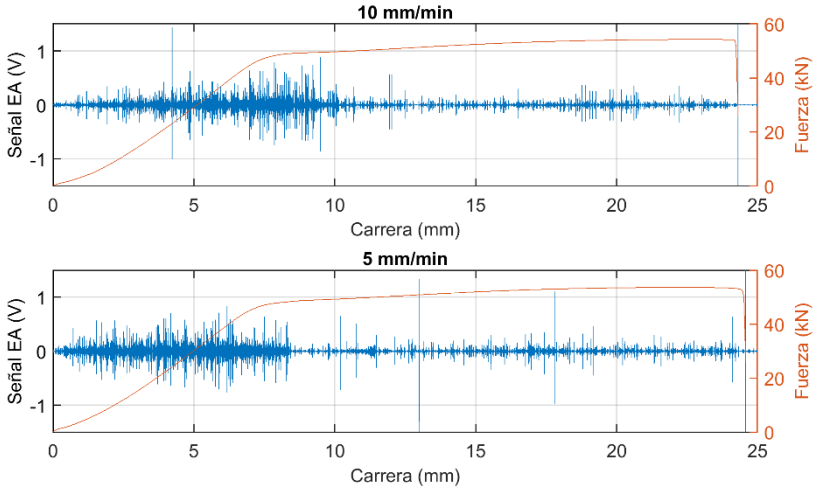


Figura 11: Señales de EA a dos velocidades de tirado, 10 y 5 mm/min.

La morfología de las señales de acuerdo con esta representación resulta similar, especialmente si se atiende a la amplitud con valores pico en el mismo orden tanto en la región del límite elástico como una vez superada. La principal diferencia en las señales es un mayor tramo de emisión de amplitud elevada tras el límite elástico para la velocidad de 10 mm/min (más apreciable en la representación frente a la carrerea que frente al tiempo, Figura 11).

El la Figura 12 se recurre a representar la evolución del RMS en función del alargamiento (en valor adimiensional, siendo 1 la distancia de rotura de la probeta) para analizar el nivel de la EA de ambas señales en función de la velocidad. Se observa que para la zona anterior al paso por el límite elástico (carrera adim. 0-0.17) el nivel se señal es similar para ambas velocidades respecto de la carrera. También se obtiene un nivel se señal similar para la zona de deformación plástica por encima del límite elástico (carrera adim. 0.5-1) independientemente de que el ensayo sea a 5 o 10 mm/min.

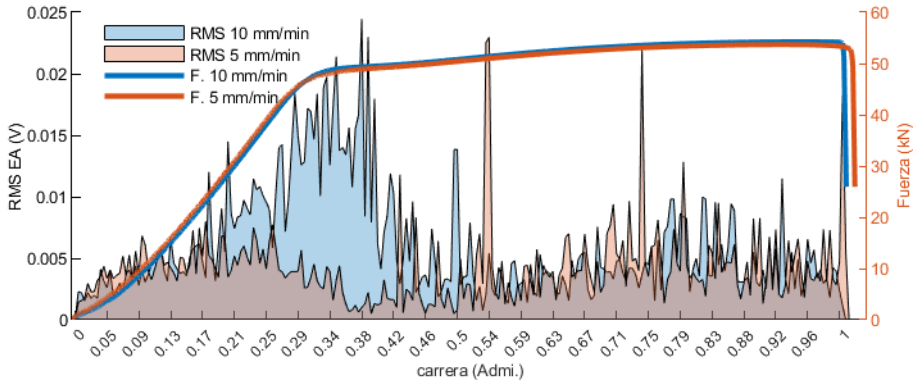


Figura 12: RMS de la EA para las probetas de alambre a 5 y 10 mm/min.

La principal diferencia según la velocidad, en cuanto al nivel de señal medido por el RMS, se detecta en la zona en torno al límite elástico, siendo mayor para velocidades más altas. Por lo tanto, el aumento de velocidad tendría un efecto significativo en incrementar el nivel de la señal cuando se está produciendo los fenómenos de plastificación asociados a esa solicitación de carga. No obstante, la generalización de este resultado necesita un mayor número de pruebas, ya que la zona de mayor emisión puede variar según aspectos cristalográficos del alambre (incluso aunque nominalmente se identifiquen como el mismo material de acero).

3.2. Resultados de los ensayos de tracción del alambre con secuencia de carga

Los resultados independientes de cada ensayo de tracción realizados a la misma probeta de alambre (Alambre A3) proporcionan información de los niveles de EA obtenidos en diferentes regiones de deformación. La secuencia de ensayos a los que se sometió la probeta de alambre fue:

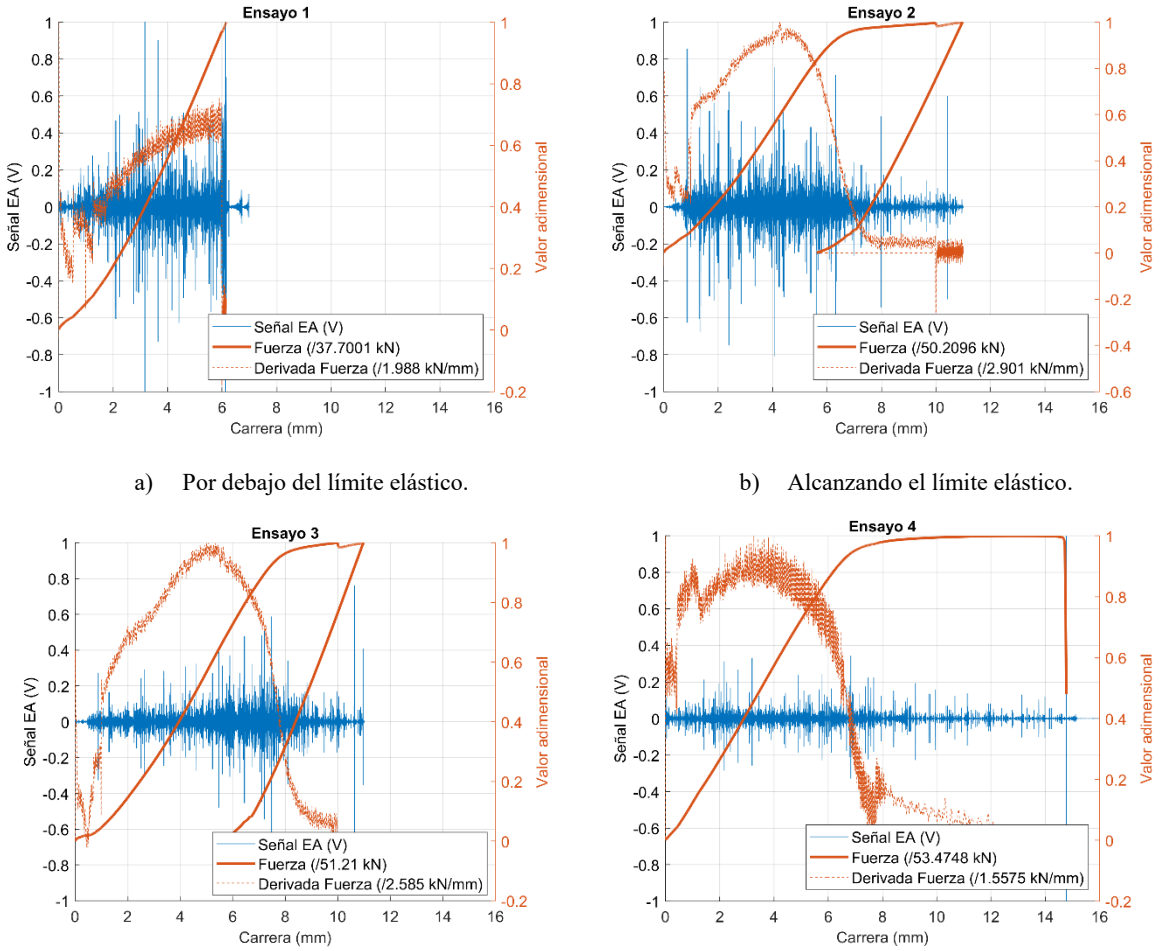
a) E1: Alcanzar una solicitud por debajo del límite elástico y descargar.

b) E2: Superar ligeramente el límite elástico y mantener la carga un periodo antes de descargar.

c) E3: Superar ligeramente el límite elástico y mantener la carga un periodo antes de descargar.

d) E4: Llevar la probeta a rotura.

La Figura 13 representa la señal de EA (eje izquierdo de las gráficas) frente a la carrera para los cuatro ensayos, reflejando los sucesivos ciclos de carga con deformación elástica y plástica del material. También se muestran el valor de la fuerza y su variación con el tiempo en función de la carrera para poder correlacionar la EA con la solicitación de carga (representadas en valor adimensional el eje derecho).



a) Por debajo del límite elástico.

b) Alcanzando el límite elástico.

c) Superando el límite elástico.

d) A rotura.

Figura 13: Señal de EA respecto la carrera para los cuatro ensayos a los que fue sometida la probeta.

Las señales obtenidas en esta prueba muestran eventos de amplitud similar a lo largo de cada una de ellas. Por ejemplo, en la Figura 13a (Ensayo 1 del Alambre A3) se registran eventos con valor pico del mismo orden en el tramo de la carrera entre 2-4 mm. En el Ensayo 1 apenas se supera el límite elástico, sin llegar a plastificar por completo el material. En la Figura 13b (Ensayo 2) se observa una reducción de amplitud una vez superado el límite elástico, identificable por el cambio de pendiente en la fuerza y su derivada, aunque la fase inicial no hay un cambio que parece indicar el inicio de la plastificación. La Figura 13c (Ensayo 3) presenta una morfología más parecida a la de las señales previas de los alambres llevados a rotura, aunque sigue siendo poco evidente el límite elástico. Los Ensayos 2 y 3 consiguen superar el límite elástico, mantener esa fuerza durante un tramo y, por último, descargar. La última de las cuatro figuras, la Figura 13d, correspondiente al Ensayo 4 que sí alcanza la rotura, no muestra una variación en amplitud a lo largo de la señal.

A diferencia de lo observado en las pruebas anteriores (Alambre A1 y A2) en las que la probeta se lleva a rotura, el paso por el límite elástico no queda identificado. Por otra parte, sí se registra el mismo comportamiento una vez se supera y se da la deformación plástica, como una desaparición de la EA continua y eventos más aislados. Cuando se mantiene prácticamente constante la fuerza aplicada tras superar el límite elástico apenas se genera EA. Al estancarse el progreso de la deformación plástica desaparece la emisión continua de la señal, observando únicamente eventos aislados. Justo en el momento de descargar la probeta, puede elevarse el nivel de la EA por la relajación de material.

La realización de ciclos de carga y descarga en una misma probeta ha permitido obtener los resultados de la Figura 14, que suponen la concatenación de las señales de los cuatro ensayos sucesivos. En esta figura se muestra la evolución del RMS de la EA en función del tiempo de señal (tiempo acumulado de los cuatro ensayos). En el eje

derecho de esta gráfica se representa la fuerza de tracción para poder identificar las solicitaciones en cada momento.

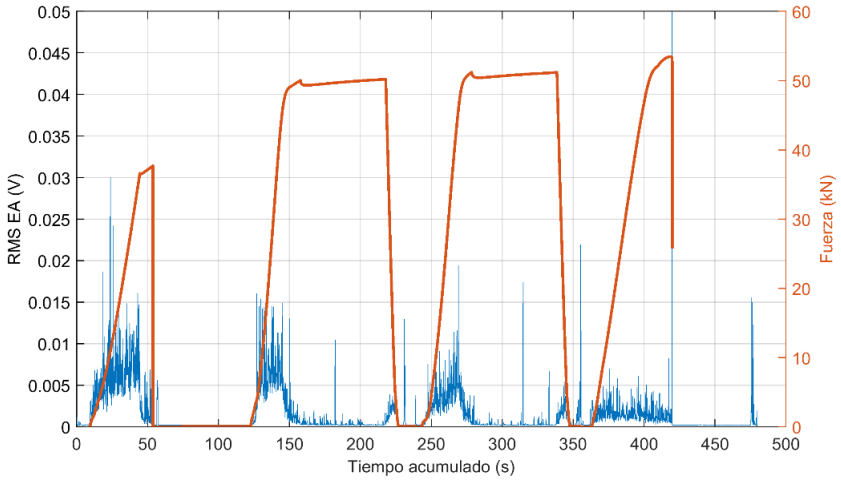
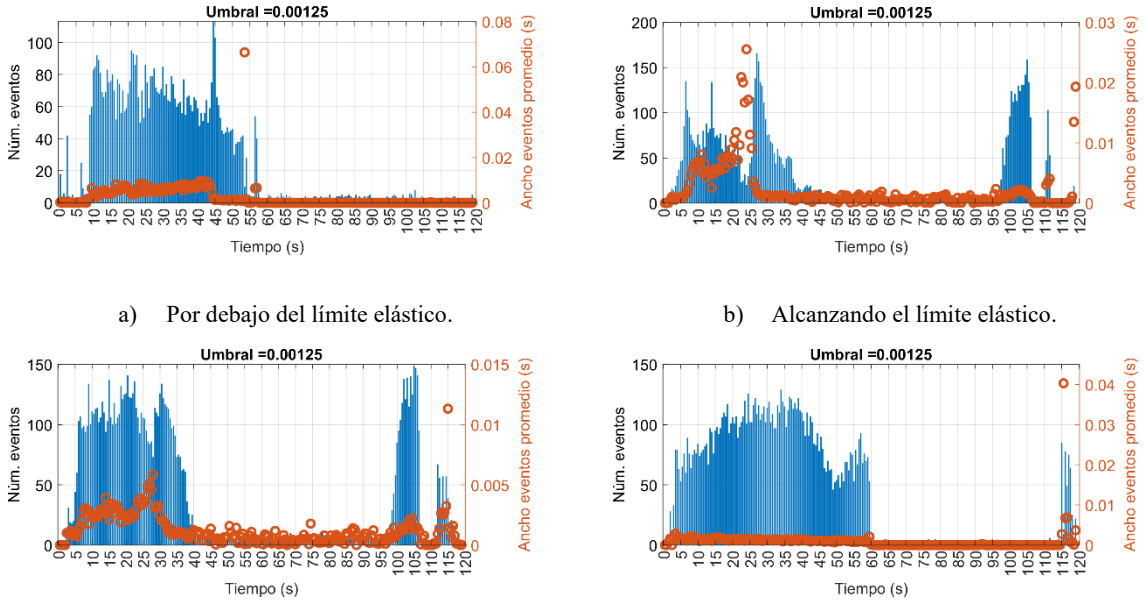


Figura 14: Evolución del RMS de la de EA en función del tiempo para los cuatro ensayos representados de manera consecutiva.

El nivel alcanzado en los dos primeros ensayos es similar debido a que en el primer ensayo no se llega superar el límite elástico, por lo que la plastificación fue residual. En los tres siguientes ensayos (125-425 s en la Figura 14) se observa la progresiva reducción del nivel alcanzado por la EA. Por lo tanto, en la señal del RMS se observa una progresiva reducción del nivel de señal alcanzado tras etapas previas de deformación plástica ligado con el efecto Kaiser de la EA. Tras conseguirse cierta plastificación del material, al volver a someter la probeta a una solicitud de carga, el nivel alcanzado por la señal es cada vez menor.

3.2.1 Procesado de señal en base a la identificación de eventos

Aparentemente, el nivel de señal resulta elevado en toda la zona previa a la región plástica, sin un incremento significativo en torno al límite elástico. Atendiendo únicamente a la señal temporal o su nivel RMS no se consigue identificar con claridad el paso por el límite elástico. Cabe recordar que esa emisión continua se trata de una superposición de eventos puntuales que se solapan entre sí. Para analizar en detalle este aspecto se recurre al procesado presentado anteriormente en el que se computan el número de eventos que sobrepasan un umbral y su ancho promedio. Los gráficos que combinan ambos indicadores, número de eventos en el eje izquierdo y ancho promedio en el derecho, están representados en la Figura 15 para los cuatro ensayos que suponen la sucesiva carga y descarga de la probeta.



a) Por debajo del límite elástico.

b) Alcanzando el límite elástico.

c) Superando el límite elástico.

d) A rotura.

Figura 15: Evolución del número de eventos y su ancho para los cuatro ensayos.

A diferencia del análisis observando las señales o la evolución RMS, la evaluación en detalle de los eventos de la señal por medio de la combinación de estos dos indicadores sí permite una identificación del tramo correspondiente al límite elástico. En la gráfica asociada al primer ensayo (Figura 15a) no hay un cambio drástico de los indicadores, ya que la probeta se mantuvo por debajo del límite elástico, tan solo un leve escalón en torno a los 45 s indicando la carga máxima y la descarga. Por otro lado, en los ensayos 2-4 (Figura 15 b-d) el paso por el límite elástico se observa como una disminución del número de eventos, que vuelve a incrementarse al pasar a la región plástica. El comportamiento en cada tramo es diferente debido a la deformación previa por la plastificación del material en los ensayos precedentes. Además, en los ensayos 2 y 3 (Figura 15 b-c) el paso por el límite elástico produce un aumento significativo del ancho promedio de los eventos detectados con el umbral de voltaje seleccionado. Ese aumento del ancho de eventos es mayor en el Ensayo 2 que en el Ensayo 3, atribuible a la deformación permanente que la probeta ha sufrido con anterioridad. En el Ensayo 4 el incremento de anchura de los eventos no es perceptible.

En número acumulado de eventos es otro indicador que también muestra variación conforme lo hace la fuerza aplicada, como se muestra en la Figura 16. En los tramos en los que la fuerza se mantiene constante apenas aumenta, ya que solo se produce un bajo número de eventos aislados. El límite elástico se identificaría por medio de una reducción en la pendiente de esta magnitud, ya que se relaciona con una disminución del número de eventos, según el umbral seleccionado debido a el solapamiento entre eventos individuales.

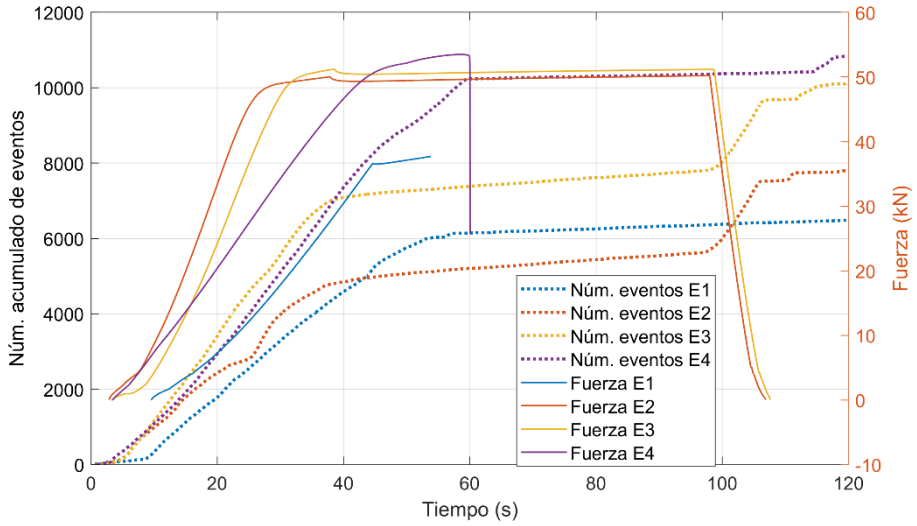


Figura 16: Número acumulado de eventos para las señales de EA correspondientes a los cuatro ensayos junto con la evolución de la fuerza (mismo color para mismo ensayo).

La Figura 16 permite realizar una interpretación análoga de los resultados anteriormente expuestos. La curva de eventos acumulados correspondiente al primer ensayo (E1) mantiene una pendiente aproximadamente constante hasta que se detiene la tracción, por debajo del límite elástico del material. En el segundo ensayo (E2) se observa una modificación en la pendiente en torno a los 25 segundos correspondiente al paso por el límite elástico, derivada del solapamiento de los eventos. Una vez comienza a dominar la deformación plástica se reduce la pendiente, disminuyendo drásticamente cuando se mantiene constante la fuerza aplicada. El tramo final que supone la liberación de la carga produce también un incremento en el número de eventos. El tercer ensayo (E3) muestra un comportamiento análogo al anterior, con una menor modificación debido al paso por el límite elástico, diferencia atribuible a la plastificación previa. En el cuarto ensayo (E4), en el que se produce la rotura, se da el mayor número acumulado de eventos. La pendiente de este parámetro se mantiene sin cambios drásticos desde el inicio hasta la rotura.

3.3. Resultados de los ensayos de trefilado del alambre

La EA generada durante el trefilado, es decir, al forzar el paso del alambre por la hilera, puede dividirse en dos pates según su origen, por una parte, la deformación plástica volumétrica del cambio de sección y, por otra parte, los fenómenos de contacto entre las superficies del alambre y la hilera. Lo observado previamente para los ensayos de tracción tiene superpuesta la emisión de la fricción por el contacto entre asperezas y fenómenos de desgaste de adhesión y abrasión. En el caso del ensayo de tracción se hace un barrido aumentando la fuerza que puede llegar hasta la rotura del alambre, mientras que en el trefilado la fuerza impuesta se corresponde con una solicitación estacionaria para conseguir la reducción de sección dada a una cierta velocidad

En la Figura 17 se muestra una señal de EA correspondiente a un ensayo de trefilado. La EA está representada frente al tiempo en el eje izquierdo y la fuerza aplicada en el derecho. La curva de la fuerza permite delimitar con mayor claridad el tiempo de trefilado, ya que la señal de EA se extiende anterior y posteriormente al trefilado

propiamente dicho. Se ha incluido ese ruido (tramos en torno los 0-20 s y 45-60s) para destacar la morfología de la señal de EA generada en durante el trefilado respecto del ruido y eventos producidos por la operación de la máquina de ensayos.

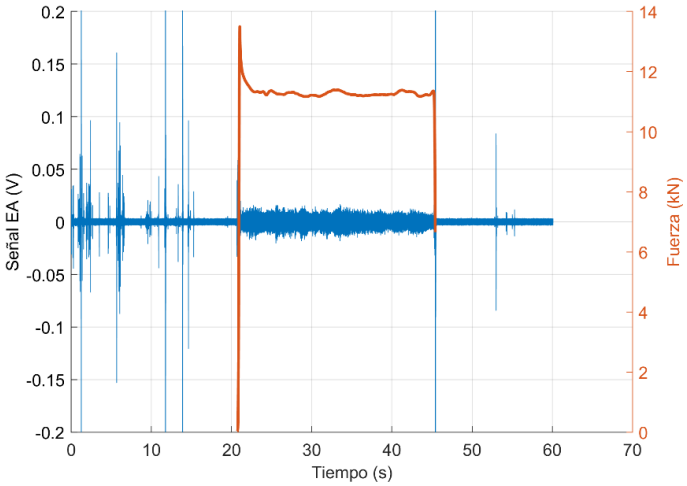
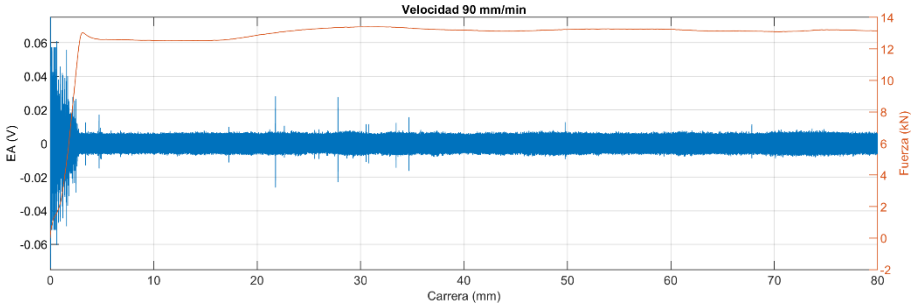


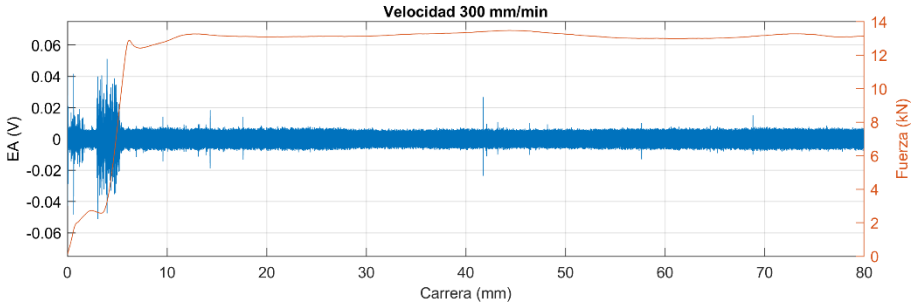
Figura 17: Señal de EA durante el trefilado del alambre.

La EA del trefilado del alambre muestra una banda de emisión continua que destaca sobre el ruido de fondo. Esa banda mantiene un cierto nivel respecto del que se producen fluctuaciones en amplitud. No se producen descensos de la señal a un nivel cero, o de ruido base, como en el ensayo de tracción, si no que se identifican eventos debido a los valores pico que superan un nivel de señal. La morfología de la señal de EA se basa en eventos, pero se observa un solapamiento continuado entre ellos mientras dura el ensayo de trefilado.

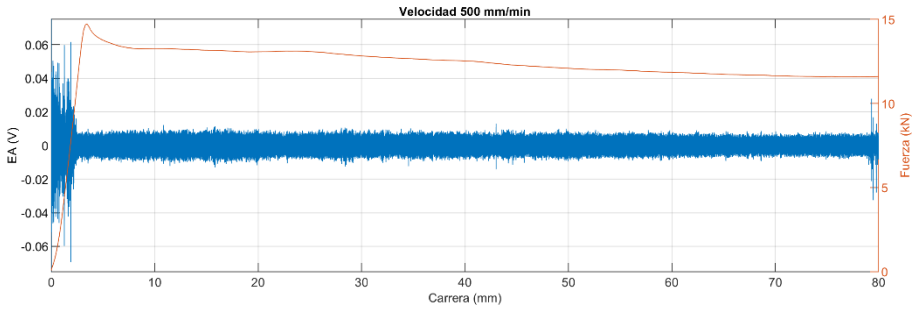
El trefilado de alambre (misma probeta, Alambre B1) se ha repetido a cuatro velocidades estacionarias. En la Figura 18 se muestran las señales de EA representadas frente a la carrera (eje izquierdo) y la fuerza aplicada (eje derecho).



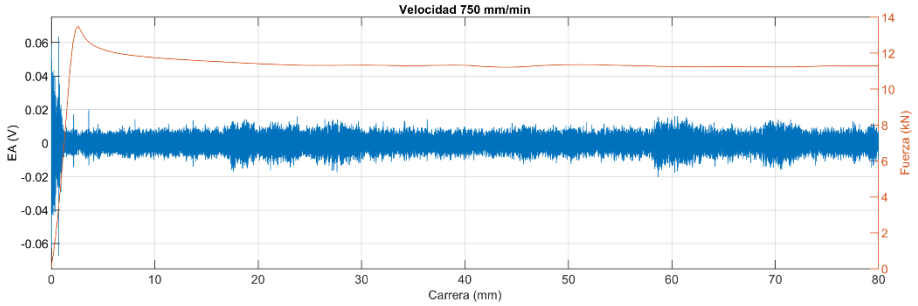
a) Señal a 90 mm/min



b) Señal a 300 mm/min



c) Señal a 500 mm/min



d) Señal a 750 mm/min

Figura 18: Señales de EA representadas frente a la carrera (tramo de 0 a 80 mm) a las cuatro velocidades estacionarias estudiadas.

Se observa cierta variación en la amplitud según la velocidad. Con otra representación se muestra con mayor claridad este efecto, obteniendo las señales de EA de la Figura 19 en las que se observa la esperada banda de emisión continua a diferentes niveles.

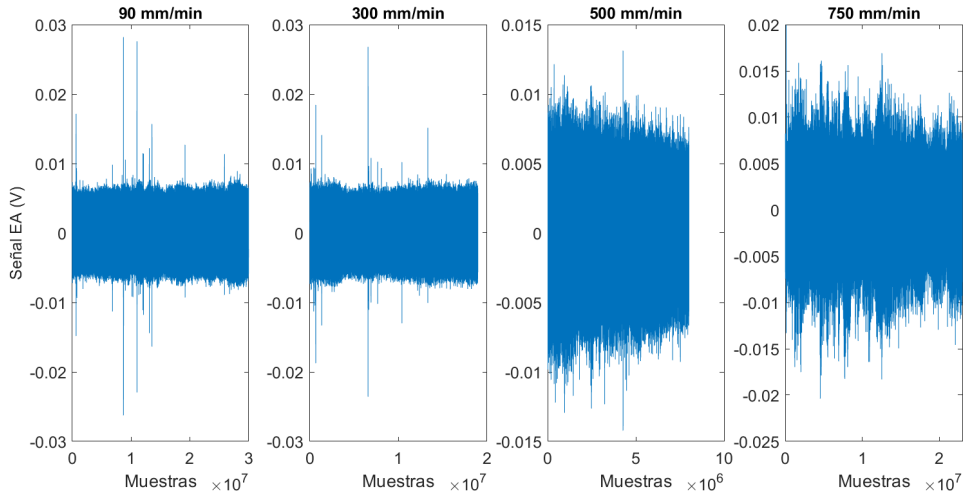


Figura 19: Señales de EA en los tramos de trefilado a cuatro velocidades estacionarias.

Las señales para las velocidades de 90 y 300 mm/min muestran una amplitud similar. Aumentando la velocidad, respectos de los 300 mm/min se identifica un incremento del nivel de la EA con la velocidad. Este es el comportamiento esperable del nivel de EA con el aumento de la velocidad de tirado. Como resumen, en la Figura 20 se muestra el RMS de los mismos tramos de señal durante el trefilado para las velocidades de 90, 300, 500 y 750 mm/min. Se observa de nuevo lo analizado sobre las señales temporales, entre 90 y 300 mm/min no hay apenas variación, pero por encima de ese valor el RMS se incrementa con la velocidad de trefilado.

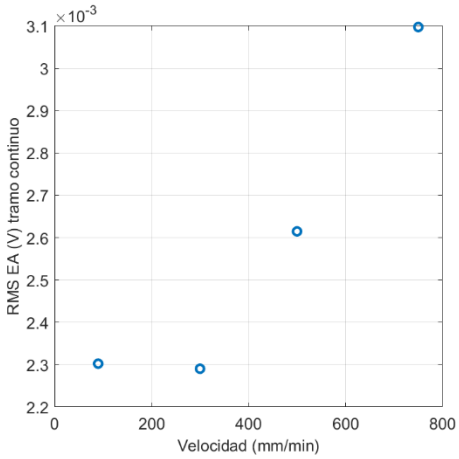
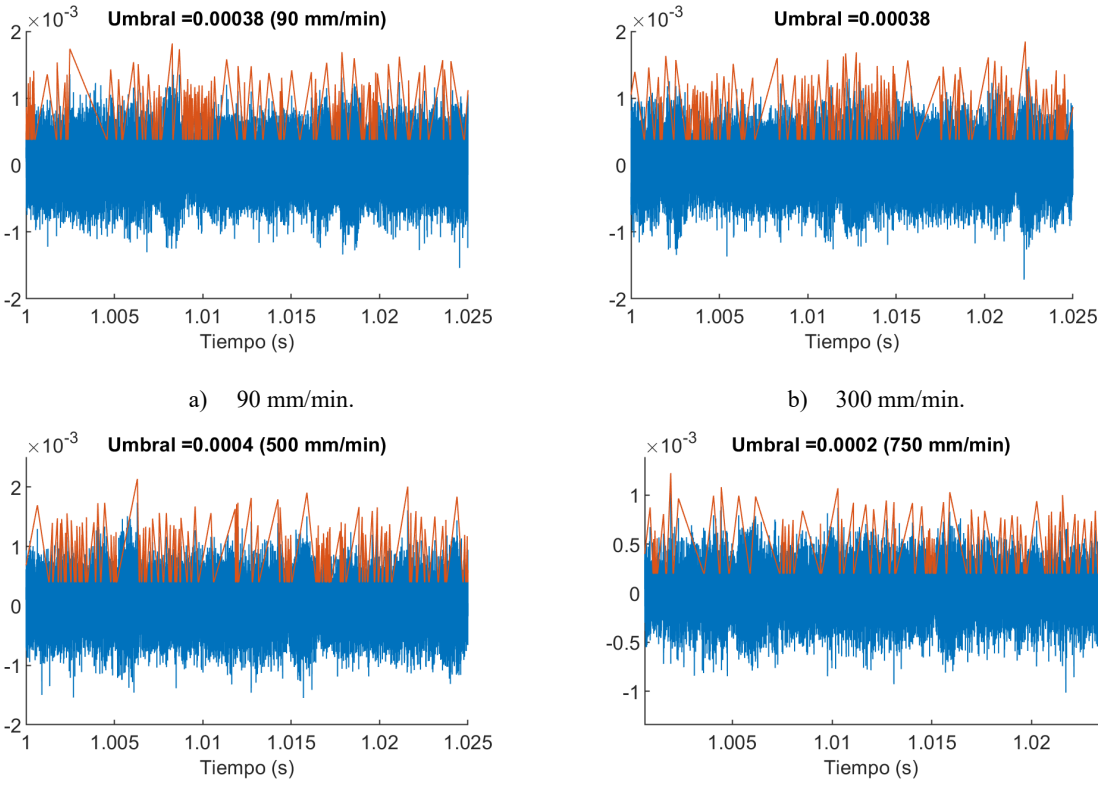


Figura 20: Valor RMS de las señales de EA en los tramos de trefilado a cuarto velocidades estacionarias.

3.3.1 Procesado de señal en base a la identificación de eventos

Las señales obtenidas durante el trefilado difieren principalmente de las de los ensayos a tracción en la continuidad de las emisiones por el solapamiento de los eventos. Mientras que la EA generada en la deformación plástica a tracción supone eventos puntuales aislados, en el trefilado se sobrepone la EA producida en los fenómenos de contacto. A continuación, se particulariza para estas señales el procesado presentado anteriormente en base a identificar los eventos en la señal, teniendo en cuenta la diferente morfología.

Al aplicar el mismo procesado para calcular el ancho de eventos promedio y el número de eventos a las señales del trefilado se obtienen las señales triangulares de la Figura 21. Tras un proceso iterativo de análisis, se seleccionó un umbral fijo para cada una de ellas, dentro de un rango similar y adecuado según el nivel de las cuatro señales (valor definido en 0,0002-0,0004 V). Mientras que en las señales del ensayo de tracción se identifican con claridad los eventos puntuales sobre un nivel de señal ruido reducido, en las señales del trefilado se produce un solape de los eventos. Ese solape se observa de manera general en las señales dinámicas en forma de eventos aparentes de mayor anchura, como las obtenidas en la monitorización del trefilado. El continuo rozamiento y contacto entre asperezas resulta la principal diferencia entre las condiciones de operación del ensayo a tracción y el trefilado.

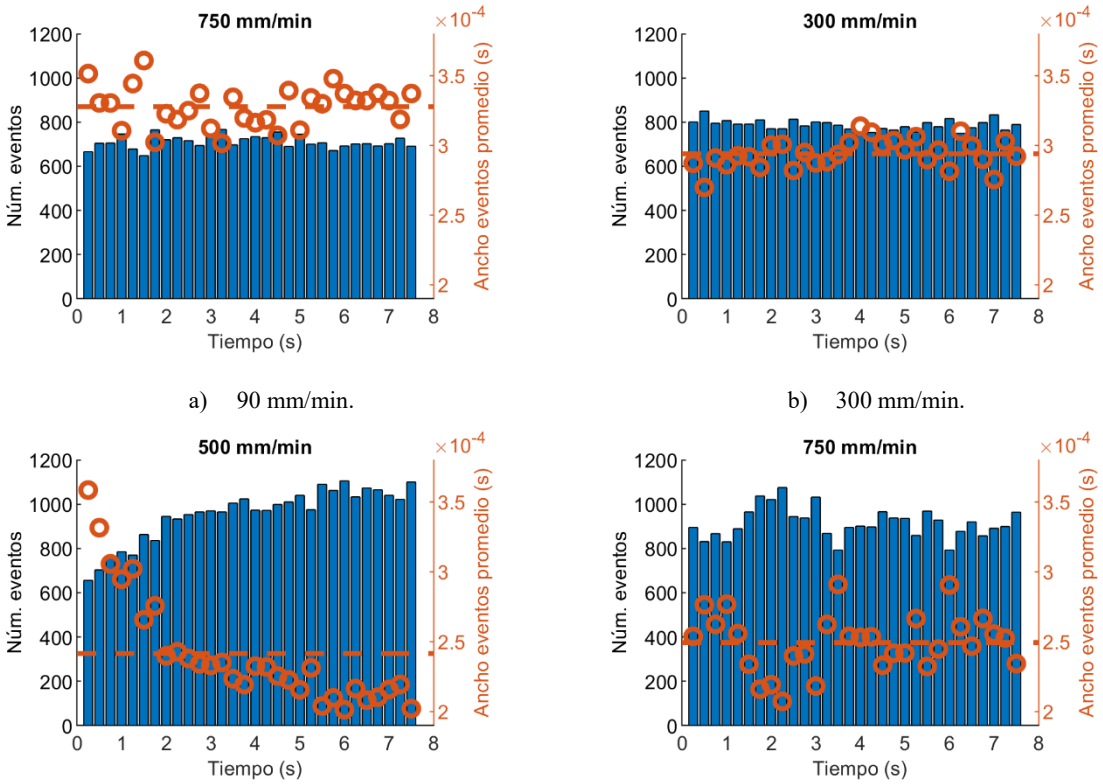


a) 90 mm/min. b) 300 mm/min.

c) 500 mm/min. d) 750 mm/min.

Figura 21: Identificación de eventos con la señal triangular.

Los gráficos de la Figura 22 se obtienen a partir de las señales triangulares resultantes de la identificación de eventos mostradas en la Figura 21. Con los umbrales empleados, se observa un mayor número de eventos por unidad temporal y un menor ancho de evento al aumentar la velocidad de trefilado. La diferente morfología observada entre las señales a 90 y 300 mm/min frente a las de 500 y 750 mm/min en las señales temporales de EA (Figura 19) se refleja en la representación de estos indicadores. Se observa el transitorio en amplitud de la señal temporal a 500 mm/min (Figura 19) por medio de las tendencias de ambos indicadores. Señales más estacionarias suponen menor fluctuación del número y ancho de los eventos.



a) 90 mm/min. b) 300 mm/min.

c) 500 mm/min. d) 750 mm/min.

Figura 22: Número y ancho de eventos promedio para las señales del trefilado.

A diferencia de en los ensayos a tracción, en los que se modifica la solicitación de carga y, en consecuencia, la deformación plástica que sufre la probeta, en el trefilado se opera a una solicitación estacionaria. Por lo tanto, es esperable un nivel estable en los valores de estos indicadores, con fluctuaciones debido a ligeros camios en las condiciones de operación.

Al igual que se expuso para las señales de los ensayos de tracción, la selección correcta del umbral determina la validez del posible análisis que se realice con estos indicadores. Si se selecciona de manera que la señal triangular no consiga una identificación de eventos similar en las señales no es posible establecer una comparación entre ellas. El estudio de la aplicación de umbrales adaptativos resulta una solución interesante si se plantea la utilización de estes procesado para la monitorización de señales de EA.

4. Conclusiones

Los experimentos realizados han mostrado la EA generada en las diferentes zonas de deformación que atraviesa la probeta de alambre durante el ensayo de tracción. La EA se genera a lo largo de todo el ensayo, modificándose la morfología de las señales según los fenómenos dominantes. El límite elástico ha sido identificado en la EA como una aparición de eventos de mayor amplitud. No obstante, la diferenciación de este límite respecto del resto de la señal en la zona previa de deformación plástica puede no ser evidente en las señales temporales y depende de las características del material y de la plastificación previa a la que puede haber sido sometida la probeta. El aumento de la velocidad de tirado ha mostrado tener un efecto significativo en el incremento del nivel de EA emitido entorno a esa zona de mayores emisiones en torno al límite elástico.

La señal de EA se compone de múltiples eventos que se liberan de manera súbita por los diferentes mecanismos físicos de generación. En el caso de las señales registradas durante los ensayos de tracción, esos eventos son claramente identificables debido a la muy baja emisión de señal entre ellos. Para analizar la señal en base a las características de los eventos se definieron dos indicadores, el número de eventos y el ancho de eventos promedio

por unidad temporal. Con ellos, se consigue caracterizar la emisividad en las distintas zonas del ensayo, proporcionando una marcada respuesta frente al paso de la probeta por la zona del límite elástico, aunque en las señales temporales no sea evidente. Por ejemplo, con la carga y descarga de una misma probeta, partes del material han plastificado, reduciéndose el nivel de EA de la señal y modificando la respuesta ante mismas solitudes de carga. No obstante, con los indicadores desarrollados, por debajo del límite elástico sus valores se mantienen constantes, mientras que cuando la plastificación del material comienza, el indicador de ancho de evento promedio aumenta y el del número de eventos disminuye.

En el caso de las señales del trefilado el efecto de los fenómenos de contacto superpuestos a la deformación plástica por la reducción de sección proporciona unas señales en forma de banda continua con los eventos solapados. El nivel de esta banda depende de la velocidad de tirado, resultando superior para mayor velocidad, aunque se ha observado que para velocidades muy bajas el cambio puede no ser evidente. La aplicación del procesado para el cálculo de los indicadores de número de eventos y de ancho de evento promedio puede aplicarse, con las respectivas consideraciones, a estas señales, permitiendo otro modo de caracterizarlas.

Agradecimientos y declaraciones

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto PID2023-147249OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

5. Referencias

[1] Caso E., Diez-Ibarbia A., Garcia P., Sanchez-Espiga J., Fernandez-del-Rincon A., “Evaluation of acoustic emission for monitoring wire drawing process”, *Mechanical Systems and Signal Processing* **200**, 110598 (2023)

[2] Palmer I.G., Heald P.T., “The application of acoustic emission measurements to fracture mechanics”, *Materials Science and Engineering*, **11** (4), 181-184, ISSN 0025-5416 (1973)

[3] Akbari M., Ahmadi M., “The application of acoustic emission technique to plastic deformation of low carbon steel”, *Physics Procedia*, **3** (1), 795-801, ISSN 1875-3892 (2010)

[4] Schnabel S., Golling S., Marklund P., Larsson R., “The influence of contact time and event frequency on acoustic emission signals”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, **231** (10), 1341-1349 (2017)

[5] Schnabel, S., “High Frequency Elastic Wave Emission Caused by a Single Elastohydrodynamically Lubricated Contact: Fundamental sources and Principles”, Tesis Doctoral, Luleå University of Technology (2016)

[6] Abe K., “On the wire drawing lubricant”, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **27** (181), 1439-1447 (1961)

[7] Baek H.M., Jin Y.G., Hwang S.K., Im Y.T., Son I.H., Lee D.L., “Numerical study on the evolution of surface defects in wire drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, **212** (4), 776-785, ISSN 0924-0136 (2012)

[8] BYON S.M., LEE S.J., LEE D.W., LEE Y.H., LEE Y., “Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21** (1), s104-s110 (2011)

[9] Bay N., “The state of the art in cold forging lubrication”, *Journal of Materials Processing Technology*, **46**, (1–2), 19-40 (1994)