



SEGUIMIENTO DEL PROCESO DE DETERIORO EN UNIONES ADHESIVAS ESTRUCTURALES MEDIANTE EMISIÓN ACÚSTICA

Autores: F. J. Juanes¹, E. Suárez², A. Valea¹, A. Gallego²

¹Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea. javier.juanes@ehu.es

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

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados preliminares de la aplicación del método de Emisión Acústica (EA) como sistema de detección preventiva de fallos en uniones adhesivas. En concreto, se busca establecer, como una primera aproximación, una relación descripción de la EA registrada en el proceso de rotura de una unión adhesiva formada por

adherentes de aluminio y un adhesivo *epoxi* bicomponente de alta rigidez con pequeña contracción de volumen en el curado y buena adhesión a numerosos sustratos. Por otra parte, en el presente trabajo se busca establecer un sistema que permita ubicar de manera razonada las fuentes de EA durante el ensayo a rotura del sistema adhesivo propuesto.

Introducción

En general, cuando a materiales tales como metales y compuestos orgánicos se les someten a tensiones de deformación, se producen grandes cantidades de EA, que es necesario interpretar para poder utilizar este método en la predicción del comportamiento en servicio de piezas, componentes, recipientes, etc. En el caso de materiales metálicos, la tecnología para detectar y localizar fuentes de EA es bien conocida. En estos materiales las señales de EA pueden proporcionar una gran cantidad de información acerca de la fuente de emisión, del material y de su estructura. El estudio con materiales orgánicos y materiales compuestos está todavía en fase de desarrollo. En el futuro, se prevé la profundización en la utilización del método para caracterizar el comportamiento mecánico de uniones adhesivas que integran materiales metálicos y orgánicos, unidos formando una unidad estructural y que, son sometidos a esfuerzos mecánicos hasta rotura.

Las uniones adhesivas están relacionadas con un elevado número de elementos interrelacionados, de tal forma que una vez que se ha realizado la unión adhesiva, sólo puede inspeccionarse mediante técnicas de evaluación no destructiva. La finalidad de estas técnicas es detectar defectos en la unión, determinar las propiedades del adhesivo y asegurar el rendimiento de la junta adhesiva. Entre los métodos no destructivos que pueden aplicarse en el estudio de uniones adhesivas podemos encontrar la inspección mediante ultrasonidos en sus diferentes variantes, la radiografía de rayos-X, la radiografía de neutrones, la emisión acústica y la inspección térmica o infrarroja. Estos dos últimos métodos no están suficientemente desarrollados para esta aplicación.

En el caso de la EA la tecnología para detectar y localizar fuentes de EA está suficientemente establecida. Las señales de EA pueden proporcionar una gran cantidad de información acerca de la fuente de emisión, del material y de su estructura. A su vez,

el seguimiento de la EA puede satisfacer la necesidad de utilizar un método de ensayo pasivo no destructivo, sin interferencias y en tiempo real, para la evaluación del inicio de daños y crecimiento de discontinuidades.

Entre las ventajas que ofrece este método, respecto a otros métodos de ensayo no destructivos, se puede destacar que es un método de inspección dinámica que da una respuesta al crecimiento de la discontinuidad bajo una tensión estructural impuesta, con lo que si la discontinuidad permanece estática, no se generarán señales de EA. Este tipo de inspección dinámica permite analizar estructuras u otros sistemas bajo tensión durante el servicio, con la ventaja adicional de que podrían llevarse a cabo ensayos sin parar la instalación, siempre que se tomen las debidas precauciones. Por otra parte, las discontinuidades que para otros métodos no destructivos son inaccesibles, pueden ser detectadas mediante emisión acústica, dado que sólo se requiere un acceso limitado y se pueden detectar y evaluar a través de toda la estructura. En consecuencia, el método de EA puede usarse para prevenir fallos catastróficos en sistemas con posibles

discontinuidades, y limitar la presión máxima del sistema de contención durante el ensayo.

Descripcion experimental

El adherente utilizado para este estudio fue aluminio tratado mediante anodizado con ácido fosfórico y bajo voltaje. Por su parte, el adhesivo utilizado fue *Hysol 9466*, una resina epoxidica de alta resistencia de *Loctite*.

El ensayo de adhesión para juntas de solape se realizó en una primera fase según la norma ASTM D1002 con las siguientes características (véase la Figura 1): placas metálicas de aluminio anodizado de 101.6 mm de longitud, 25.4 mm de anchura y 1.6 mm de espesor; dimensiones del área de adhesión de 12.7 x 25.4 mm y área de los extremos de las probetas de adherente reservada para ser pinzada por las mordazas de 25.4 x 25.4 mm.

En una segunda fase y, a fin de poder determinar la localización de los eventos de EA con mayor precisión, se fabricaron probetas fuera de norma con las siguientes características (véase la Figura 2): placas metálicas

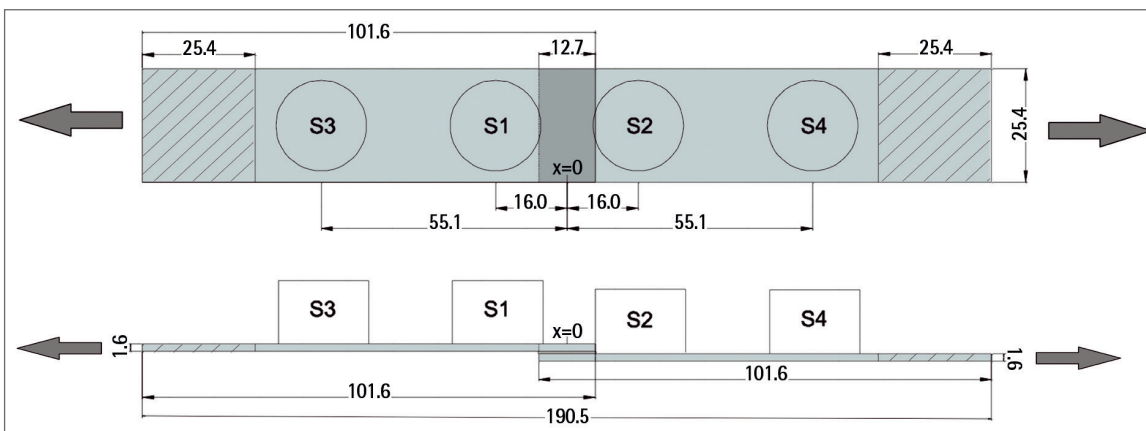


Figura 1. Esquema de la unión adhesiva y de la situación de los sensores de EA. Zona rayada: zona de mordaza. Zona más oscura: zona de adhesión. Cotas en mm. S1 a S4: sensores usados

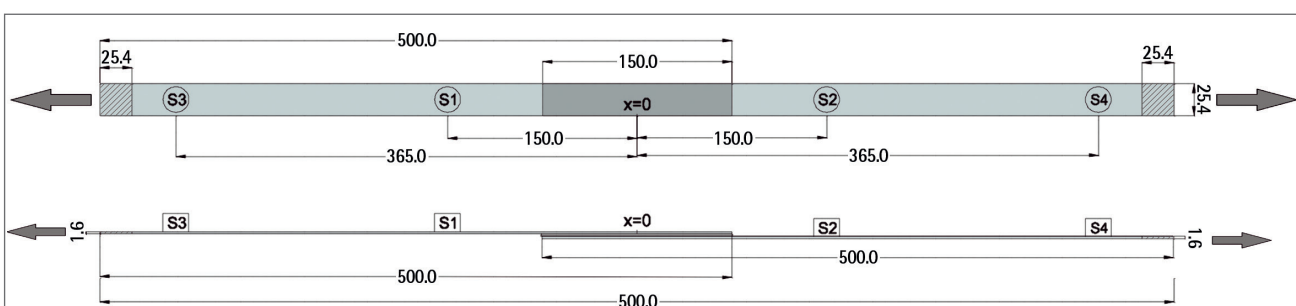


Figura 2. Esquema de la unión adhesiva no normalizada y situación de los sensores en probetas fuera de norma. Zona rayada: zona de mordaza. Zona más oscura: zona de adhesión. Cotas en mm. S1 a S4: sensores usados



de aluminio anodizado de 500.0 mm de longitud, 25.4 mm de anchura y 1.6 mm de espesor; dimensiones del área de adhesión de 150.0 x 25.4 mm y área de los extremos de las probetas de adherente reservada para ser pinzada por las mordazas de 25.4 x 25.4 mm.

Sobre la probeta se colocaron cuatro sensores de EA, situados tal y como puede observarse en las Figuras 1 y 2, fijados siempre por la parte interna de la unión adhesiva. En todos los casos, durante el análisis posterior de los datos, dos de los sensores S3 y S4 se configuraron como sensores de guarda, con objeto de eliminar en la medida de lo posible el ruido provocado por rozamiento proveniente de la unión de las mordazas de sujeción de la máquina de ensayos con la probeta.

Los ensayos mecánicos se realizaron a tracción a una velocidad de 0.1 mm/min en el caso de probetas bajo norma y de 0.3 mm/min en el caso de probetas fuera de norma, en una máquina de ensayos universal IBER-TEST, Modelo ELIB-50/W, con una capacidad de fuerza máxima de 50 kN y con un rango de velocidad de desplazamiento de 0.1-500 mm/min y de 0.05-5 kN/s. Para el estudio de las uniones adhesivas, tanto bajo norma como fuera de norma, se ensayaron 5 probetas en cada caso, obteniéndose resultados básicamente similares, por lo que en este artículo se presentan los resultados medios para cada caso. En el caso de las uniones adhesivas fuera de norma los ensayos se hicieron a velocidad de 3.0 mm/min, a partir del límite de elasticidad.

El equipo de EA utilizado fue el modelo AMSY 5 de Vallen Systeme equipado con diferentes tipos de filtros. Se utilizaron cuatro sensores VS150L (resonantes a 150 kHz) que fueron colocados en las caras internas de las probetas de ensayo. Dos de los sensores, utilizados

FRECUENCIA DE MUESTREO	NÚMERO DE MUESTRAS POR SEÑAL	TIEMPO DE DISCRIMINACIÓN DE LA DURACIÓN DEL EVENTO (DDT)
5000 MHz	2048	50 ms

Tabla 1. Parámetros de adquisición de las señales de EA

TIPO DE SENSOR UMBRAL	FILTROS (PASO BAJA Y ALTA)		PREAMPLIFICADOR
VS150-L	Sensores de señal (S1 y S2)	Sensores de guarda (S3 y S4)	Ganancia
40 dB	95 y 1450 kHz	95 y 850 kHz	34 dB

Tabla 2. Parámetros de adquisición de la EA

como sensores de señal, se situaron próximos a la zona del área de adhesión. Los otros dos sensores, utilizados como sensores de guarda, se ubicaron lejos de la zona de adhesión y cerca de la zona pinzada por las mordazas. En los ensayos de calibración se utilizaron minas de grafito 2H de 0.3 mm de diámetro, como fuentes Hsu-Nielsen normalizadas. Los ensayos de calibración permitieron además establecer la velocidad de las ondas elásticas a través de la probeta.

Las variables de ensayo utilizadas para la captación de la EA están recogidas en las Tablas 1 y 2.

Resultados

Con objeto de utilizar las diferentes variables que permite el sistema para el estudio del comportamiento de los materiales cuando se les somete a esfuerzos que generan procesos de deterioro en el interior del material y que son fuentes de EA captables por los sensores, se procedió a la utilización de un localizador de eventos, conocida la ubicación de los sensores y la velocidad de propagación de las ondas elásticas en la probeta.

Uniones adhesivas bajo norma

El estudio del deterioro de las uniones adhesivas se comenzó analizando probetas normalizadas.

Los análisis básicos de EA de dichas uniones se presentan en las gráficas de la Figura 3. En la parte izquierda de dicha figura se representan los eventos registrados frente al tiempo. En ella se puede observar cómo la emisión comienza cuando ha transcurrido una cuarta parte del ensayo. A partir de 140 s y hasta 450 s, aunque existe emisión, el número de eventos producido es bajo. La duración de esta parte del ensayo se extiende durante aproximadamente la mitad del ensayo total. Desde 450 s y hasta 610 s, la emisión producida identifica varios momentos del ensayo con un mayor número de eventos producidos en la zona de la unión adhesiva.

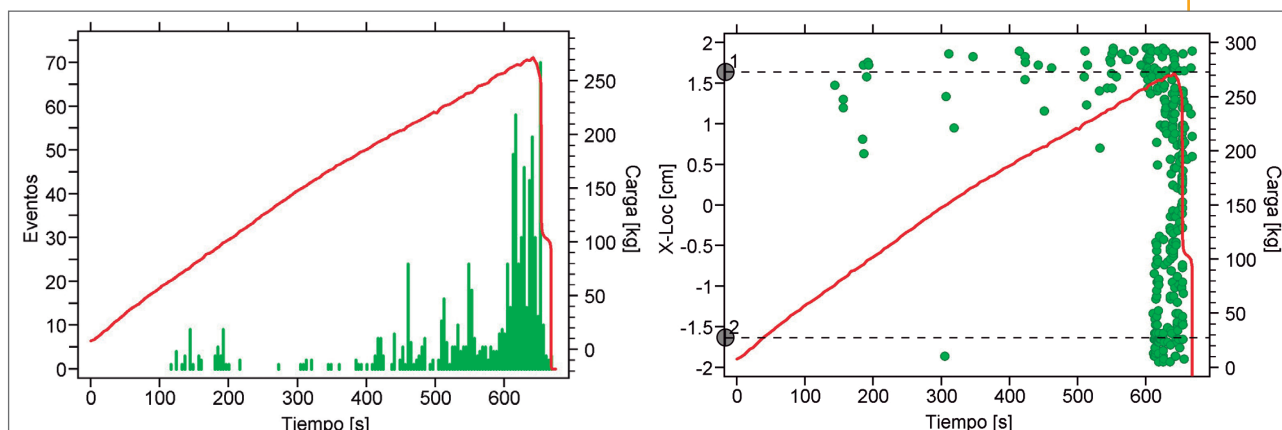


Figura 3. En la parte izquierda: Eventos de EA frente al tiempo. En la parte derecha: Localización de los eventos de EA a lo largo del tiempo (posición x, tomando como origen el centro de la unión adhesiva; se marca la posición de los sensores S1 y S2). En ambos casos se representa la carga aplicada

En concreto, se pueden observar cuatro picos con un número de eventos cercano o superior a 20. Por último, y a partir de 610 s, se producen al menos cinco picos con un número de eventos superior a 40, temporalmente muy próximos entre ellos y que anuncian la cercanía de la rotura de la unión.

Atendiendo a la gráfica que representa la localización de los eventos a lo largo del tiempo de ensayo, se puede observar que según avanza el ensayo, se puede identificar cómo el comienzo de la emisión, que se produce hacia los 140 s, se sitúa en la parte superior del espécimen. La localización de los eventos continúa hasta los 200 s, para desaparecer y volver a aparecer hacia los 310 s. Durante esta parte del ensayo se va produciendo el deterioro de la unión adhesiva con pocos eventos detectados, si bien estos se sitúan en la parte superior y de una manera continua y creciente según avanza el ensayo. Por último, a partir de 610 s, la emisión se generaliza, incrementándose y extendiéndose por toda el área de adhesión y produciéndose la rotura del material hacia los 660 s, momento en que el número de eventos supera los 70, tal como se puede apreciar en la gráfica eventos-tiempo.

La Figura 4 representa la relación fuerza a carrera durante la realización del ensayo. La curva presenta una primera zona lineal que mantiene la proporcionalidad hasta, aproximadamente, la mitad del ensayo (fuerza de 1.56 kN y tiempo de 310 s), lo que corresponde a una carrera de 0.54 mm y un porcentaje de carga a rotura del 60%. A partir de ese punto la deformación que obtenga el material va a ser deformación con un carácter no puramente elástico

(que podemos considerar parcialmente irreversible), ya que las deformaciones a partir de este punto son más acusadas que en la zona elástica anterior y que, además, se acentúa hasta el momento de la rotura.

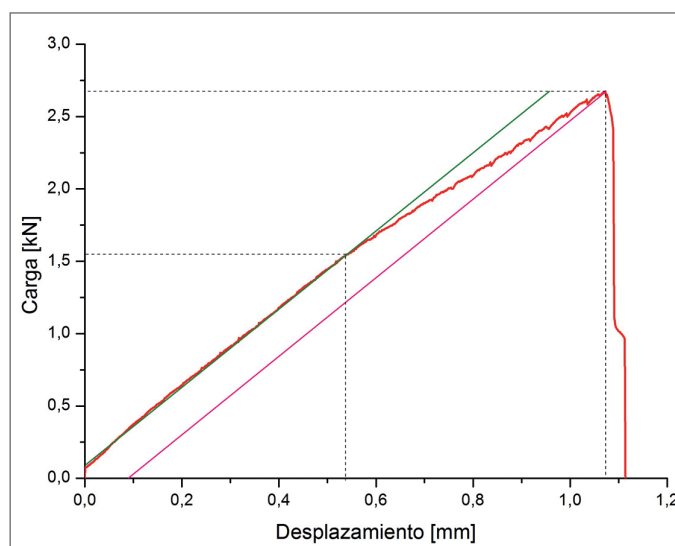


Figura 4. Fuerza frente a la carrera durante el ensayo de tracción sobre la unión adhesiva

Si se relaciona el comportamiento del material hasta el punto del límite proporcional con la EA recogida hasta dicho instante, se puede observar que el número de eventos es muy pequeño. Sin embargo, a partir del límite proporcional, el número de eventos se va incrementando, presentando una continuidad hasta el momento final de la rotura.

El conjunto de la información recogida durante el ensayo permitiría dividir el proceso de deterioro de la unión adhesiva en cinco partes:



1. Zona base o zona azul: viene definida por la ausencia de eventos
2. Zona inicial o zona verde: desde el inicio de la recogida de eventos hasta el límite proporcional (60% de la carga a rotura)
3. Zona intermedia o zona amarilla: entre el límite proporcional y la zona de alta emisión (99% de la carga a rotura)
4. Zona final o zona de color rosa: entre la zona de alta emisión y la rotura. En esta zona se produce una emisión muy considerable, indicando que la rotura de la unión adhesiva está próxima. Además, los eventos aparecen localizados en todo el margen de posiciones de la unión (distancia x)
5. Zona de rotura o zona de color morado: correspondiente al momento de la rotura (100% de la carga a rotura)

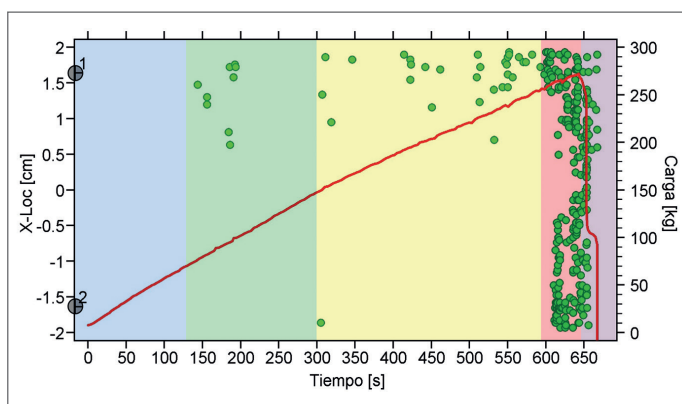


Figura 5. Localización de eventos de EA y carga aplicada frente al tiempo, con identificación de las distintas zonas de seguimiento del proceso de deterioro de la unión adhesiva

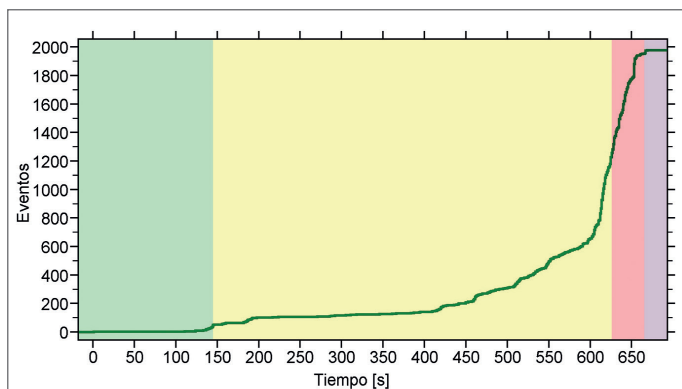


Figura 6. Eventos acumulados a lo largo del ensayo, con identificación de las distintas zonas de seguimiento del proceso de deterioro de la unión adhesiva

Estas zonas separadas por distintos colores se han marcado en la gráfica de localización de eventos mostrada en la Figura 5.

En la Figura 6, se puede observar, cómo mediante la obtención de los distintos puntos de inflexión de la gráfica de eventos acumulados frente al tiempo de ensayo, se pueden identificar las distintas zonas definidas anteriormente para el proceso de deterioro. En este caso, la segunda zona definida con el criterio de eventos acumulados incluye las zonas segunda y tercera definidas con los criterios anteriores. Por otra parte, debe comentarse que no se han encontrado relaciones significativas entre la amplitud y duraciones de los eventos de EA recogidos durante el ensayo y la localización de los mismos. Esto es debido, fundamentalmente, a que dichos parámetros clásicos de EA están muy afectados por efectos colaterales relativos a la propagación de las ondas elásticas, y no relacionados con las fuentes de EA que los han generado, como reflexiones, conversiones de modos, atenuación, dispersión de la onda, etc.

Uniones adhesivas fuera de norma

El estudio de la localización de los procesos de deterioro en uniones adhesivas estandarizadas viene condicionado por el pequeño tamaño de la zona de adhesión y el tamaño del área de captación de los propios sensores. Por esta razón, se propuso una segunda parte del trabajo en la que se amplió el tamaño de las probetas. Los adherentes pasaron de ser de una longitud de 10.16 cm a ser de 50.00 cm, y la zona de adhesión pasó de tener una longitud de adhesión de 1.27 cm a una longitud de 15.00 cm.

Para este tipo de uniones adhesivas —fuera de norma— mediante ensayos de calibración se determinó la velocidad de propagación de las ondas elásticas, obteniendo un valor de 350 cm/ms. Este valor de velocidad corresponde a las ondas que llegan en primer lugar al sensor (las más rápidas). Un análisis previo permitió determinar que, dado el espesor del adherente, estas ondas corresponden fundamentalmente a ondas de Lamb, siendo el S0 el modo más rápido. Además, el valor de velocidad obtenido, está en buen acuerdo con los valores conocidos para el modo S0 en el aluminio, su espesor, y la frecuencia de sensibilidad de los sensores utilizados (150 kHz). Asimismo, dado que

los esfuerzos ejercidos sobre la probeta están dentro del plano de la misma (esfuerzos de tracción a lo largo del eje de la probeta), es de esperar que se favorezca la emisión de micropulsos con desplazamientos en el plano, y por tanto, se favorezca la emisión del modo SO frente al modo AO de las ondas de Lamb.

Este valor de velocidad se consideró adecuado para el estudio de localización, ya que la mayor parte de eventos simulados mediante roturas de minas (fuentes de Hsu-Nielsen) se ubicaron correctamente, y muchos de los eventos generados durante los ensayos de tracción, se situaron dentro de la longitud de adhesión, tal como es razonable esperar que ocurra durante el proceso de deterioro de la unión adhesiva. En la Figura 7 se muestran los resultados de localización de los eventos en este caso. La longitud de adhesión estaba entre -7.5 cm y 7.5 cm. Muchos eventos se localizaron dentro de esta zona, mientras que otros se localizaron fuera, aunque no demasiado lejos, demostrando que aún siguen existiendo errores en la localización, que animan a seguir trabajando en este sentido. Estos errores pueden deberse a muchas razones, como la incorrecta detección del tiempo de llegada de las ondas, la influencia de las reflexiones, inhomogeneidad de la muestra (cambios de espesor y material) y por tanto imposibilidad de establecer una única velocidad de propagación de las ondas, mezcla de modos, atenuación de las ondas, etc.

En la Figura 8 se pueden observar las gráficas de los eventos registrados y su localización frente al tiempo. En primer lugar, se observa cómo los primeros eventos se empiezan a detectar hacia los 210 s, aunque se

producen de manera aislada y en baja cantidad hasta los 490 s. Entre 490 s y 570 s, el número de eventos es mayor que en la parte anterior del ensayo, y mayor también que los que se detectaban en los ensayos con probetas normalizadas. Por último, se puede identificar una alta emisión cercana a la rotura de la unión adhesiva.

Por otra parte, en la gráfica de localización de los eventos frente al tiempo, se puede observar cómo los eventos que empiezan a partir de 210 s, se producen alternativamente en la parte superior e inferior de los extremos de la zona de adhesión. Esta alternancia se desplaza hacia la parte inferior de la zona adhesiva en 490 s y hacia la parte superior en 540 s. A partir de 560 s, los eventos se detectan en ambos lados de la zona de adhesión.

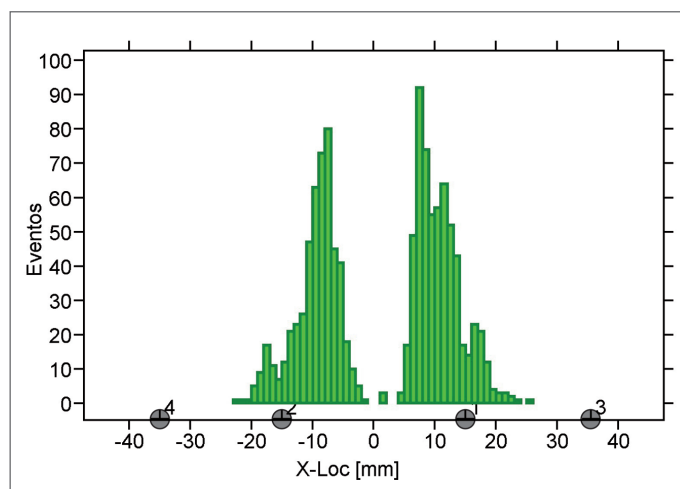


Figura 7. Número de eventos frente a su localización durante el ensayo de tracción para probetas fuera de norma

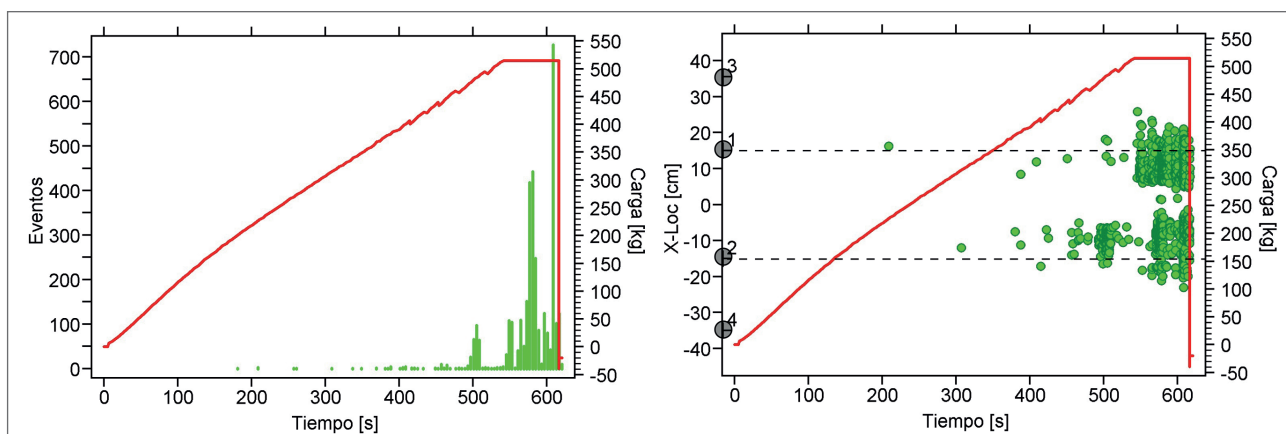


Figura 8. En la parte izquierda: Eventos de EA frente al tiempo. En la parte derecha: Localización de los eventos de EA a lo largo del tiempo (posición x, tomando como origen el centro de la unión adhesiva; se marca la posición de los sensores S1 a S4). En ambos casos se representa la carga aplicada. Para probetas fuera de norma



En la Figura 9 se representa la amplitud de los eventos de EA frente a su localización en diferentes períodos temporales separados según las observaciones comentadas, previamente. Esta representación muestra una clara separación en la localización, lo que indica que el lugar dónde más sufre la probeta es en los extremos de la zona de adhesión, y que a medida que pasa el tiempo, el deterioro empieza a dirigirse hacia zonas del interior de la zona de adhesión. Este comportamiento está en concordancia con el hecho de que el adhesivo comience a despegarse en los extremos de la zona de adhesión y a medida que transcurre el tiempo y se acerca el proceso de deterioro, se desplace hacia el centro de la misma. Sin embargo, en cuanto a la amplitud de los eventos de EA producidos en las distintas fases, no se aprecian diferencias significativas.

Atendiendo al comportamiento mecánico, el límite de proporcionalidad fue detectado a 3 mm de carrera (tiempo de 550 s) y a una fuerza de 5.4 kN (49% de la carga a rotura). En cuanto al momento en que se detectó un alto incremento de la EA (observable por un alto pico de emisión en la Figura 8), se puede situar a un tiempo de 610 s que corresponde a un 93% de carga a rotura.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se pueden definir distintas partes en el proceso de deterioro tal como se ha realizado con las probetas normalizadas (Figura 10):

- 1 Zona base o azul: en la que no se produce emisión
- 2 Zona inicial o verde: zona donde se produce poca emisión. Esto se observa mediante la gráfica de eventos frente a tiempo y en la de localización frente a tiempo
- 3 Zona intermedia o amarilla: en la que se observa una mayor emisión debido a la aparición de picos con mayor número de eventos. La situación de los sucesos de deterioro está preferencialmente localizada en uno u otro lado de la unión adhesiva. El inicio de esta zona se puede asociar con el límite de proporcionalidad que corresponde a un 49% de la carga a rotura
- 4 Zona final o de color rosa: que va desde el pico de mayor cantidad de eventos (al 93% de la carga a rotura) hasta la rotura de la unión adhesiva
- 5 Zona de rotura o de color morado: se corresponde con la rotura

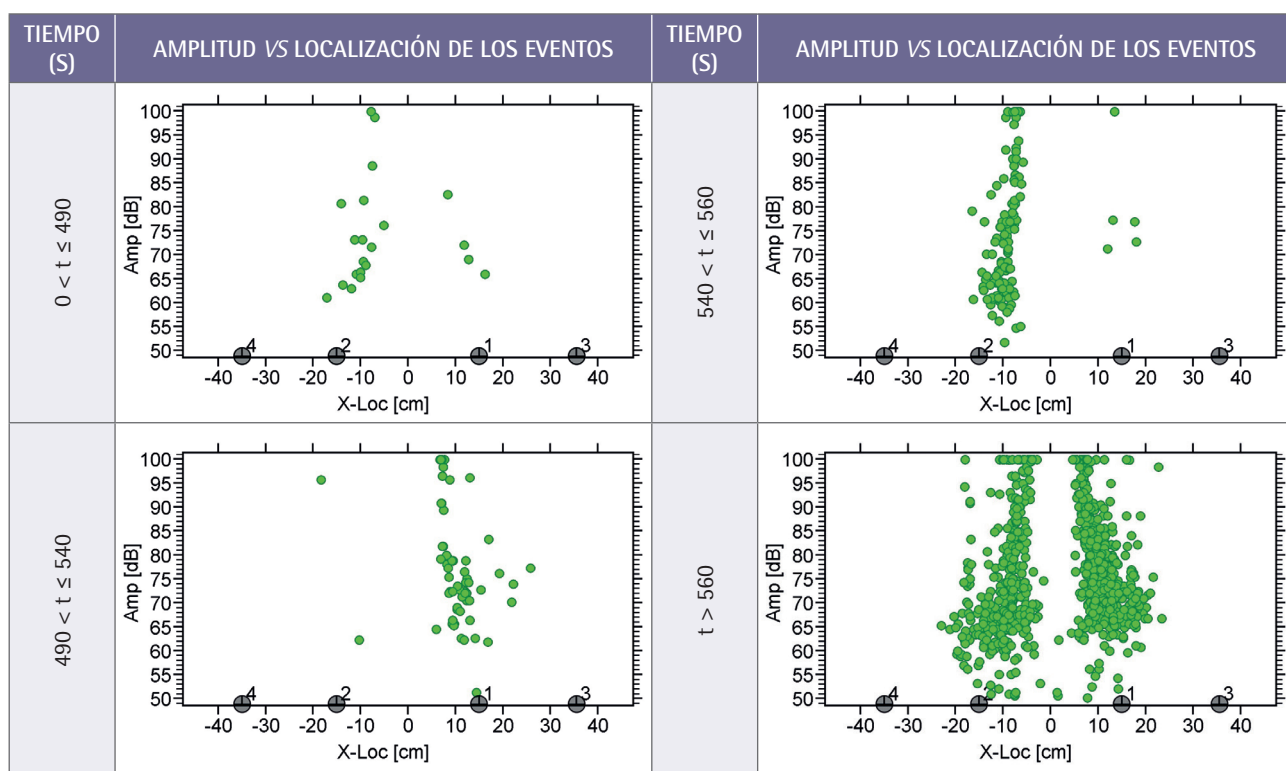


Figura 9. Gráficas de amplitud de los eventos de EA (en dB) en función de la localización en distintos periodos temporales del ensayo. Probetas fuera de norma



En la Figura 11 se representan los eventos acumulados frente al tiempo. En este caso, al igual que se propuso para el caso de las uniones adhesivas normalizadas, se pueden definir cuatro zonas características atendiendo a los puntos de inflexión de la representación gráfica. Igualmente, la primera zona definida según este criterio, englobaría las dos zonas definidas con los criterios anteriores, y que se han denominado como zona base y zona inicial.

Conclusiones

Para el sistema adhesivo estudiado en este trabajo se pueden proponer las siguientes zonas para el seguimiento del proceso de deterioro de la unión adhesiva:

- **Zona de seguridad:** que viene definida por una primera parte con ausencia de eventos y una segunda con baja localización de eventos. Esta zona se extiende hasta llegar al límite proporcional (50-60% de la carga a rotura) y la emisión acústica aparece, preferentemente, en alguna de las zonas lejanas al centro de la unión adhesiva
- **Zona de alarma:** entre el límite proporcional hasta la zona de alta emisión previa a la rotura final (93-99% de la carga a rotura). En esta zona, la emisión acústica es más elevada y también se da, preferentemente o alternativamente, en uno de los lados de la unión adhesiva

Para valores de carga superiores a los anteriores, la rotura de la unión adhesiva es inminente y se caracteriza por un alto nivel de emisión acústica que se extiende a lo largo de toda la zona de adhesión, detectándose por primera vez en las zonas centrales de la misma.

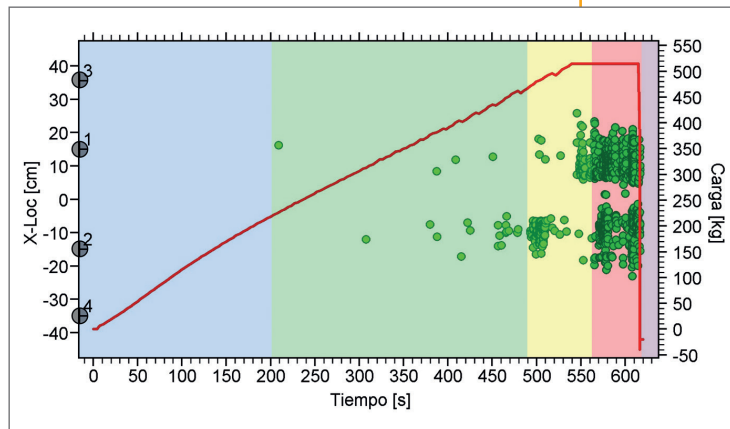


Figura 10. Localización de eventos de EA y carga aplicada frente al tiempo, con identificación de las distintas zonas de seguimiento del proceso de deterioro de la unión adhesiva. Probeta fuera de norma

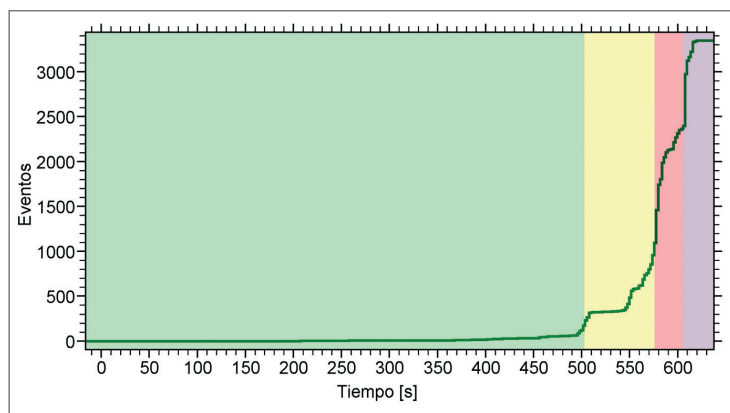


Figura 11. Eventos acumulados a lo largo del ensayo, con identificación de las distintas zonas de seguimiento del proceso de deterioro de la unión adhesiva. Probeta fuera de norma

Las distintas zonas definidas en este trabajo permiten establecer un criterio de anticipación al fallo de sistemas que utilizan uniones adhesivas poliméricas, permitiendo proponer la utilización de la EA como método de seguimiento de procesos de deterioro en uniones adhesivas con sustratos metálicos, en este caso de aluminio.

Referencias

- [1] Leone C., Caprino G. y de Iorio I., *Composite Science and Technology*, 66, 233 (2006)
- [2] Crococo D. y Cuppini R., *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 490 (2006)
- [3] Gozdecki C. y Smardzewski J., *Holzforchung*, 59, 219 (2005)
- [4] Pandurangan P. y Buckner G.D., *Experimental Mechanics*, 46, 601 (2006)
- [5] Crococo D. y Cuppini R., *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 234 (2009)
- [6] Juanes F.J., Serrano O., Míguez J.C., Bilbao E., Valea A. *Tendencias en adhesión y adhesivos. Vol III*, 110 (2010)