



ALGORITMO EN TIEMPO REAL PARA CLASIFICAR EVENTOS DE EMISIÓN ACÚSTICA DE ONDAS DE LAMB EN MATERIAL CFRP

REAL-TIME ALGORITHM TO CLASSIFY ACOUSTIC EMISSION EVENTS OF LAMB WAVES IN CFRP

Autores / Authors: José Martínez-Jequier¹, Antolino Gallego², Elisabet Suárez², Francisco J. Juanes³ y Angel Valea³

¹NDT Ingenieros, Madrid, España / NDT Ingenieros, Madrid, Spain

²Universidad de Granada. Escuela de Ingeniería de la Edificación, Granada, España / University of Granada. School of Engineering Building, Granada, Spain

³Universidad del País Vasco. Ingeniería Química y Medioambiental, Bilbao, España / University of Basque Country, Chemical Engineering and Environmental, Bilbao, Spain

RESUMEN

Daños internos como las delaminaciones, no detectables a través de la inspección visual, son de los más críticos en los laminados de material compuesto. Su detección es uno de los retos más atractivos en la Monitorización del Daño Estructural (Structural Health Monitoring). La Emisión Acústica (EA) es un interesante método para este propósito. Las ondas de Lamb de EA ofrecen una buena aproximación para evaluar este tipo de materiales, aunque debido a la combinación de diferentes modos de propagación de las ondas, reflexiones, efectos de dispersión, atenuación e interferencias constructivas/destructivas, su análisis para correlacionarlas con los defectos resulta ser un reto importante.

Como es bien conocido, las delaminaciones producen desplazamientos mecánicos de micro-pulsos fuera del plano (OP), mientras que las micro-roturas de matriz y las roturas de fibra producen micro-pulsos dentro del plano (IP). Además, se ha comprobado que el modo A0 se ve favorecido por excitaciones

OP, mientras que el modo S0 está favorecido por excitaciones IP. A partir de estas premisas, este trabajo propone un algoritmo para clasificar los eventos de EA en los tres mecanismos de daño. Además, en general, ambos modos están presentes simultáneamente en una señal de EA, razón por la cual, el mayor logro del algoritmo propuesto consiste en separar eficazmente ambos modos, intentando evitar factores colaterales importantes como reflexiones o la influencia del umbral usado en la detección de la EA.

El algoritmo se ha implementado completamente usando el código ECP del software comercial AEVisual, de tal forma que se puede usar en tiempo real. En este trabajo el algoritmo se ha validado con los resultados de ensayos de control, en los que se genera un solo mecanismo de daño, así como en ensayos de flexión a tres puntos de probetas de material compuesto, con y sin delaminaciones inducidas, proporcionadas por Airbus-España.



ABSTRACT

Internal damage like delaminations is one of the most critical damage in composite laminates not detectable through visual inspection. Its detection is one of the most attractive challenges in the Structural Health Monitoring. Acoustic Emission is a promising SHM technique for achieving that. AE Lamb waves offer a good approach to evaluate this kind of materials, but due to the combination of different wave propagation modes, reflections, dispersion effects, attenuation and constructive/destructive interferences, its separation becomes a major problem.

It is well known that delamination produces mechanical displacement micro-pulses outside the plane (OP), while matrix micro-cracking and tensile fiber breakage produce micro-pulses inside the plane (IP). Moreover, it has been verified that the A0 mode is favored by OP excitations, while the S0

mode is favored by IP excitations. From these previous assumptions, this work proposes an algorithm to classify the AE events into the three damage mechanisms. However, in general, both modes will be present simultaneously in a particular AE signal, reason why the major issue of the algorithm proposed here consists in an efficient separation of both modes, trying to avoid such a collateral factors as reflections or influence of the threshold used for AE detection.

Algorithm has been entirely implemented using the ECP code of the AEVisual software, so it can be run in real-time. The paper proposes its validation in control tests, in which only a damage mechanism is generated, and also in three-point bending tests of composite samples with and without artificial delaminations supplied by Airbus-Spain.

Introducción

Las características del material compuesto de fibra de carbono reforzado (CFRP) han permitido su uso extensivo en una gran variedad de aplicaciones. El método de Emisión Acústica (EA) es un candidato excelente para la monitorización del daño en tiempo real de estructuras de CFRP sometidas a cargas, pues permite obtener información sobre la progresión del daño [1].

La teoría de placas establece que las ondas de EA se propagan en placas bajo dos modos principales, el modo simétrico (S0) y el modo antisimétrico (A0) [2,3]. La separación de los modos supone un problema aún mayor en aplicaciones reales, debido a reflexiones y otros efectos físicos como dispersión, atenuación e interferencias constructivas/destructivas. La separación de estos modos permite extraer información sobre el mecanismo de daño [4].

La delaminación, normalmente debida a impactos, constituye un daño interno crítico en materiales compuestos laminados, no detectable mediante una inspección visual [4,5]. Su detección durante el servicio de las estructuras es un reto atractivo y aun sin resolver. Este fallo está ampliamente asociado

Introduction

The characteristics of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) composites have permitted their extensive use in a large variety of applications. Acoustic Emission (AE) testing is an excellent candidate for real-time damage monitoring of loaded CFRP structures because it is able to provide information on damage progression [1].

The plate theory establishes that AE waves propagate through plates in two main modes, the symmetric (S0) and the anti-symmetric (A0) mode [2,3]. Mode separation becomes a major problem in real applications, due to reflections and other physical effects like dispersion, attenuation and constructive/destructive interferences. The separation of these modes enables one to extract information about the damage mechanism [4].

Delamination, usually produced by impact, would constitute critical internal damage in laminate composites, not detectable through visual inspection [4,5]. Its detection during service operations can be seen as an attractive and outstanding challenge. This failure is largely associated with the production of mechanical displacement micro-pulses outside



con la producción de desplazamientos mecánicos de micro-pulsos fuera del plano (OP), es decir, movimientos perpendiculares al plano medio de la placa [6,7]. Por otro lado, la micro-rotura de matriz y la rotura de fibra pueden producir, en general, micro-pulsos dentro del plano (IP), es decir, movimientos en el plano de la placa y simétricos respecto del plano medio [6,7]. En trabajos recientes se ha verificado que el modo A0 se ve favorecido por excitaciones OP, mientras que el modo S0 está favorecido por excitaciones IP [2].

Este estudio propone un nuevo algoritmo para clasificar los eventos de EA en los tres mecanismos de daño predominantes en CFRP, asociando la delaminación con el modo A0, y la rotura de fibra y las micro-roturas de matriz con el modo S0. Además, en general, debido a la anisotropía microscópica del CFRP, ambos modos se presentan simultáneamente en una señal de EA. La aportación clave del algoritmo propuesto consiste en una separación efectiva vía *hardware/software* de ambos modos, evitando los factores colaterales como reflexiones o la influencia del umbral de detección de EA.

En este trabajo, para generar cada uno de los mecanismos de manera independiente, se realizaron tres ensayos de control (ensayo de delaminación, ensayo de rotura de fibra y ensayo de micro-rotura de matriz). Además, se realizaron ensayos de flexión a tres puntos en cuatro muestras extraídas de una placa de CFRP proporcionada por Airbus-España, con y sin delaminaciones inducidas.

En particular, el algoritmo propuesto usa dos filtros hardware durante la adquisición: uno en baja frecuencia, LF=[20-55] kHz; y otro en alta frecuencia, HF=[125-660] kHz. La banda [55-125] kHz se filtró, porque la discriminación entre ambos modos es imposible debido a que se propagan de manera simultánea con amplitudes similares en las mismas frecuencias.

Comparando el RMS (Root Mean Squared) (Valor cuadrático medio) de las señales de EA en ambas bandas de frecuencia, es posible clasificar los eventos de EA como OP o IP, y así separar el mecanismo de delaminación de los mecanismos de rotura de fibra y micro-rotura de matriz. Evaluando el espectro de la señal de EA registrada en la banda HF, se detecta que las

the plane (OP), i.e. source motions perpendicular to the mid-plane of the plate [6,7]. On the other hand, matrix micro-cracking and tensile fiber breakage may produce overall micro-pulses inside the plane (IP), i.e. source motions that are in the plane of the plate and symmetric about the mid-plane [6,7]. Recent work has verified that the A0 mode is favored by OP excitations, while the S0 mode is favored by IP excitations [2].

Our study proposes a new algorithm to classify AE events into the three predominant damage mechanisms in CFRP, by associating the delamination progress to the A0 mode, and the fiber breakage and matrix micro-cracking to the S0 mode. However, in general, due to the microscopic anisotropy of the CFRP, both modes will be present simultaneously in a particular AE signal. That is why the key contribution of the algorithm proposed here consists of an efficient hardware/software separation of both modes, in an attempt to avoid collateral factors such as reflections or any influence of the AE threshold.

In this work, in order to generate each damage mechanism as a sole process, three control tests (delamination test, fiber breakage test and matrix micro-cracking test) were carried out. Moreover, three point bending tests were carried out on four samples extracted from a CFRP plate supplied by Airbus-Spain, with and without induced delaminations.

In particular, the algorithm proposed here considers the use of two hardware filters during acquisition: one in the low-frequency range, LF=[20-55] kHz; and the other one in the high-frequency range, HF=[125-660] kHz. The [55-125] KHz band was filtered out, because in it the A0 and S0 modes propagate simultaneously with reasonable amplitudes at similar frequencies, making frequency discrimination impossible.

Therefore, by comparing the RMS (Root Mean Squared) of the AE signals in both frequency bands, it was possible to classify AE events as OP or IP, and thus segregate the delamination mechanism from the fiber breakage and matrix micro-cracking. By evaluating the spectrum of the AE signals recorded in the HF band, it was found that the energy of signals coming from matrix micro-cracking was mainly concentrated over the third to fourth resonances of



señales procedentes de micro-rotura de matriz concentran su energía en la tercera y la cuarta resonancia del sensor, mientras las señales procedentes de rotura de fibra concentran su energía a partir de la cuarta resonancia.

Otro aspecto importante es el uso de la energía RMS de la señal calculada en una estrecha ventana temporal cerca del tiempo de cruce del umbral. Esta novedosa propuesta evita la influencia de las reflexiones y los efectos de conversión de los modos. Esta estrecha ventana temporal no cubre todo el rango del modo A0 y S0 de la señal, pero es suficiente para garantizar que se cumplen los supuestos físicos propuestos.

La Figura 1 muestra un esquema general del algoritmo de análisis de las señales de EA, usando dos pasos (*hardware* y *software*). El algoritmo se ha desarrollado en lenguaje de programación LUA, de tal forma que es fácil encapsularlo en *software* comercial de EA para aplicaciones en tiempo real.

the sensor, and from fiber breakage from the fourth resonance on up. The algorithm leads to separate the IP into events coming from each mechanism separately.

Another important aspect is the use of the RMS energy of the signal calculated only over very narrow time windows near the threshold crossing time. This novel approach meant overcoming the influence of reflections and mode conversion effects. Those narrow time windows do not cover the whole range of A0 and S0 transient signals, but they are sufficient and representative ensuring that previous physical assumption are fulfilled.

A general scheme of the AE signal analysis algorithm, using two classifying steps (hardware and software) is shown in Fig. 1. It was entirely developed in programming language LUA so that it might easily be encapsulated into AE commercial software for real-time applications.

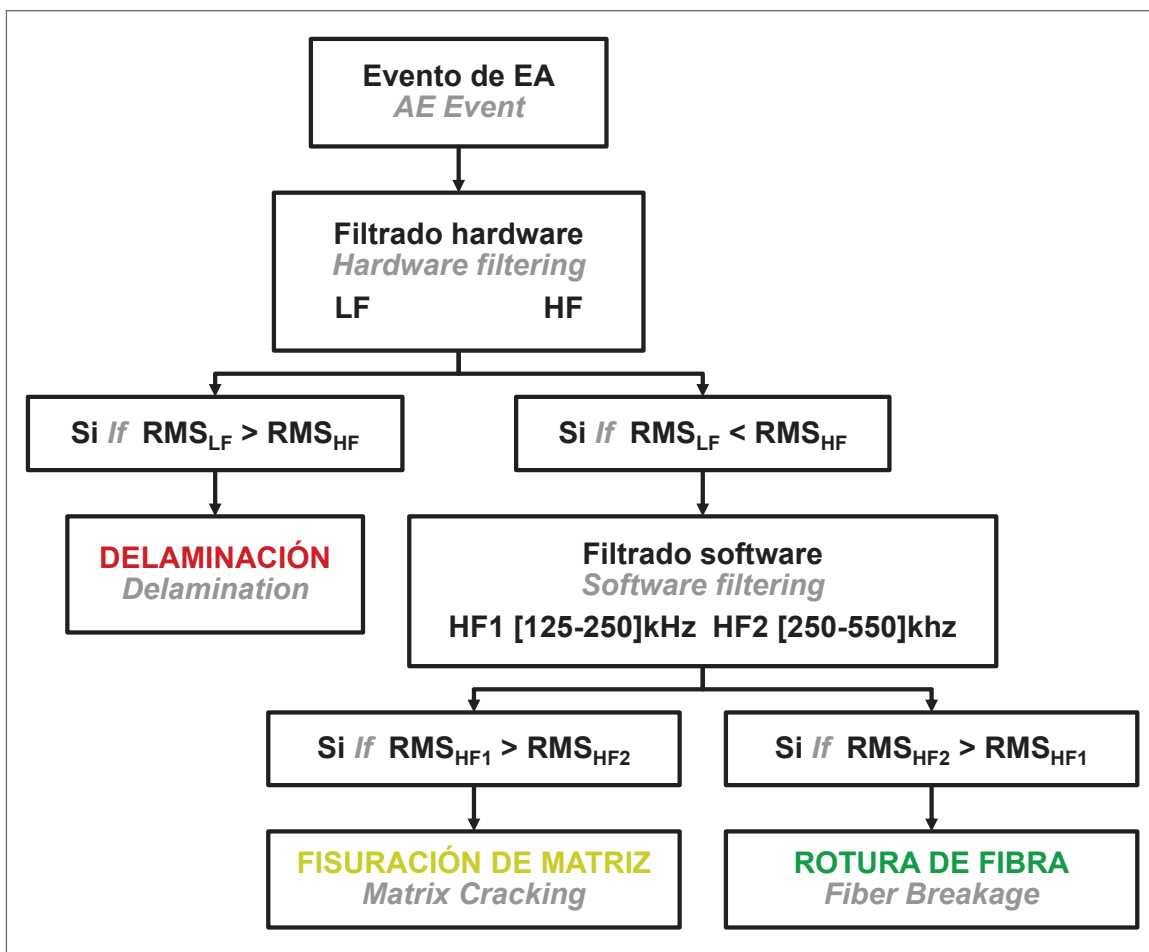


Figura 1. Esquema general del algoritmo propuesto
Figure 1. General scheme of the algorithm proposed



1. Experimentos previos: detección de modos mediante rotura de mina (PLB)

Para verificar la existencia de las ondas de Lamb, se realizaron roturas de mina en una placa (281x279 mm) cortada de una placa más grande cuasi-ortotrópica, de 4.22 mm de espesor y 22 capas, proporcionada por Airbus-España. Como equipo de adquisición se utilizó un osciloscopio. Se colocaron dos sensores multiresonantes VS45H (la Fig. 2-a muestra su respuesta en frecuencia) a 90 mm de la parte superior de la placa, en el mismo punto pero en caras opuestas, siguiendo la técnica descrita en [2] (Fig. 2-b). Se realizaron roturas de mina, tanto en la superficie de la placa como en el canto, simulando fuentes IP y OP respectivamente.

1. Previous experiments: Mode detection with pencil lead breakage (PLB)

To verify the existence of Lamb waves, PLBs were carried out on a sample plate (281x279 mm) cut from a larger quasi-orthotropic plate, of thickness 4.22 mm and 22 plies, supplied by Airbus-Spain. An oscilloscope was used as the acquisition equipment for the AE signals. Two multi-resonant VS45H sensors (sensitivity response given in Fig. 2-a) were located 90 mm from the top of the sample, at the same point but on opposite sides of the plate, following the technique described in [2] (Fig. 2-b). Several PLBs were carried out, both on the plane of the plate and on the edge, respectively simulating IP and OP sources.

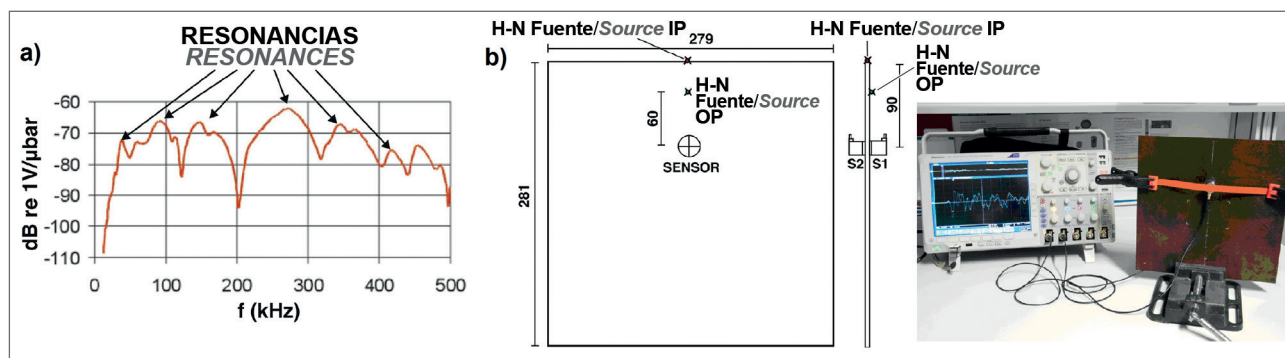


Figura 2. a) Respuesta en frecuencia de los sensores VS45H usados en los experimentos. b) Esquema experimental usado para la detección de los modos de Lamb. Distancias en mm

Figure 2. a) Sensitivity response of the VS45H sensors used in the experiments. b) Lamb modes detection experimental scheme. Distances in mm

La Figura 3 (izquierda) muestra las señales originales registradas en ambos casos, sin ningún filtrado, y aunque ambos modos se pueden reconocer visualmente (las señales S1 y S2 están en fase para el modo S0 y en oposición de fase para el modo A0) su separación requiere un tratamiento adicional. Con este objetivo, se realizó un filtrado mediante el software comercial MATLAB, considerando dos bandas de frecuencia.

Se usó una banda en baja frecuencia para captar principalmente el modo A0 correspondiente con la primera resonancia del sensor (LF=[20-55] kHz), así como otra banda en alta frecuencia para captar principalmente el modo S0 que comprende a partir de la tercera resonancia del sensor (HF=[125-660] kHz). Estos filtros generan una separación muy efectiva de los dos modos.

Figure 3 (left) shows the original signals –without any filtering– recorded in both cases; and although both modes are visually recognizable (S1 and S2 signals are in phase for S0 mode or in opposite phase for A0 mode) figuring individual separation calls for extra data treatment. To this end digital filtering with MATLAB commercial software was performed off line, considering two frequency bands.

One band in the low frequency range to capture mainly the A0 mode corresponds to the first resonance of the sensor (LF=[20-55] kHz) and the other in the high frequency range to capture mainly the S0 mode corresponds to the third resonance and up (> 3rd attenuated by propagation along the 90 mm distance to sensor) (HF=[125-660] kHz). These filters generate very effective separation of two modes.

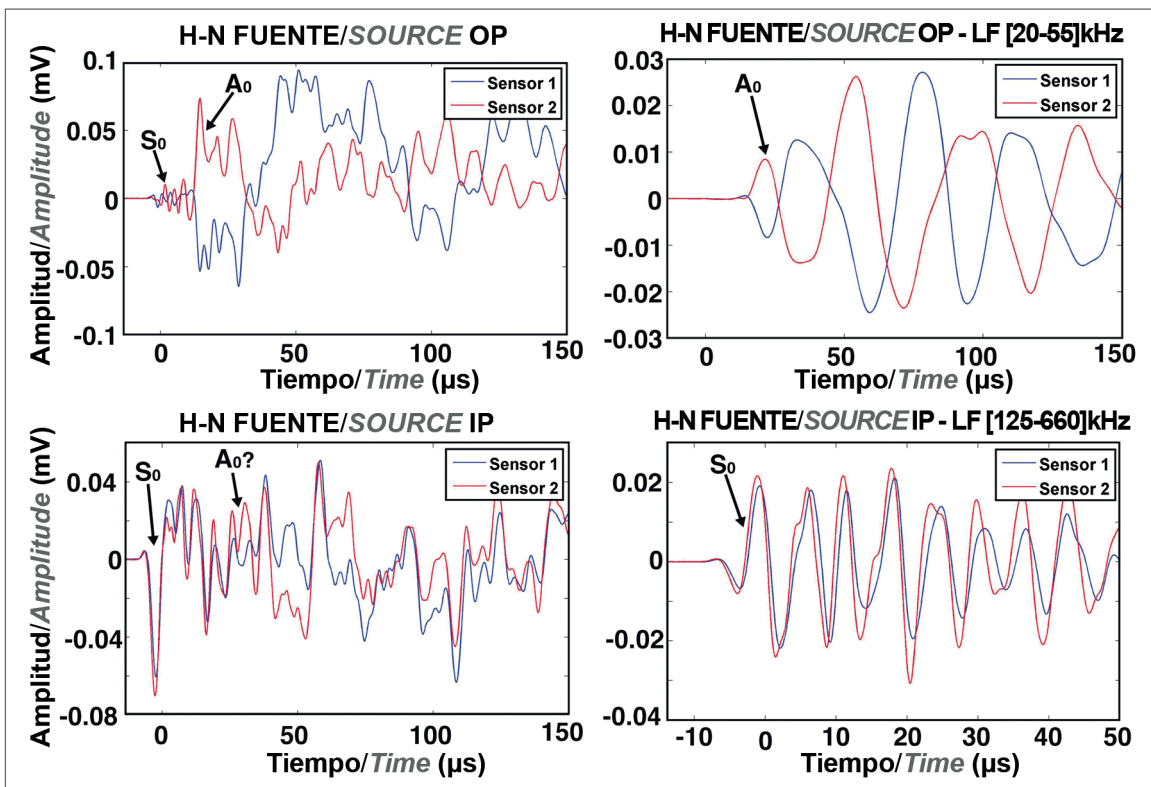


Figura 3. Señales originales (izquierda) y filtradas (derecha) registradas en el experimento para detectar los modos de Lamb

Figure 3. Original (left) and filtered (right) signals from the Lamb modes detection experiment

2. Configuración del equipo y ensayos

Se utilizó un equipo de adquisición Vallen AMSY-5. En todos los ensayos, las señales fueron registradas simultáneamente por 5 canales independientes, con diferentes filtros de frecuencias y diferentes umbrales de detección (ver Fig. 4)

2. Configuration setup and tests

A Vallen AMSY-5 was used as the acquisition equipment. In all tests, the signal was injected into and recorded simultaneously in five independent channels, with different input frequency filters and thresholds configured in each (see Fig. 4).

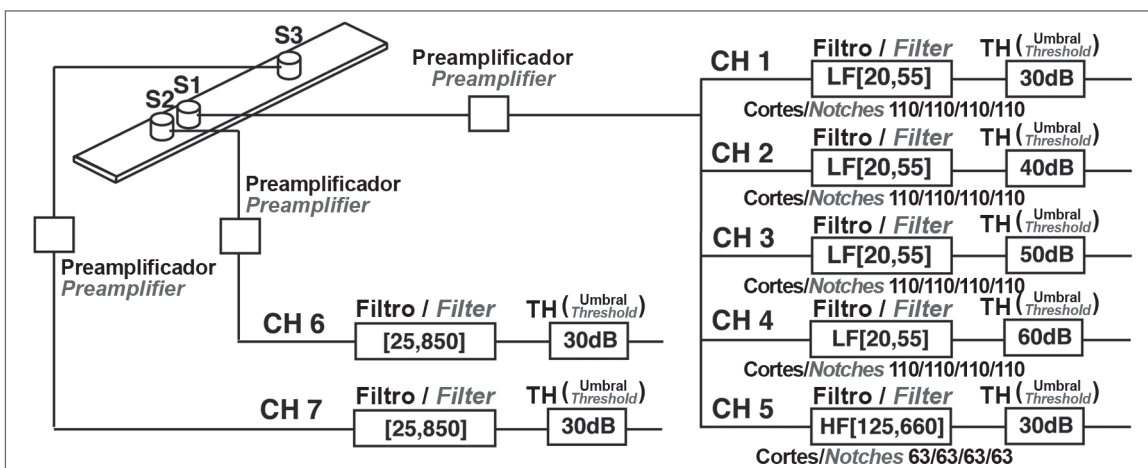


Figura 4. Configuración experimental de EA. Esquema de los canales, filtros y umbrales usados en los ensayos de control y en los ensayos de flexión

Figure 4. AE experimental setup. Channels, filters and thresholds scheme used in bending and control tests



2.1. Ensayo de delaminación

Se obligó a crecer una delaminación ya existente en una muestra predelaminada siguiendo dos periodos de carga, dos de carga mantenida y una descarga final (ver Fig. 5-a). La Fig. 5-b muestra dos señales de EA procedentes de un mismo *hit* registrado en los canales LF-CH2 y HF-CH5. Se puede ver como el modo S0 se propaga en baja frecuencia pero con mucha menor amplitud que el modo A0. Sin embargo, usando un umbral de 40 dB (seleccionando el canal CH2) es posible descartar el modo S0 y captar sólo el modo A0 después del cruce del umbral (THC). También se puede ver que la amplitud del modo A0 en el canal LF es mucho mayor que su amplitud en alta frecuencia (CH5), confirmando que esa señal ha sido originada por un micro-desplazamiento OP.

2.1. Delamination test

An already existent delamination was forced to grow in a pre-delaminated sample involving two loading periods, two load holds and a final unloading (see Fig. 5-a). Fig. 5-b shows two AE signals from the same *hit* recorded with the LF-CH2 and HF-CH5 channels. The S0 mode is seen to still propagate at the low frequency, but with a much lower energy than the A0 mode. However, using a threshold of 40 dB (i.e. by selecting the channel CH2) it is possible to discard the S0 mode and capture only the genuine A0 mode itself after the Threshold Crossing (THC). It can also be seen that the amplitude of the A0 mode of the LF channel is much greater than its corresponding HF amplitude (CH5), confirming that it was originated by OP micro-displacement.

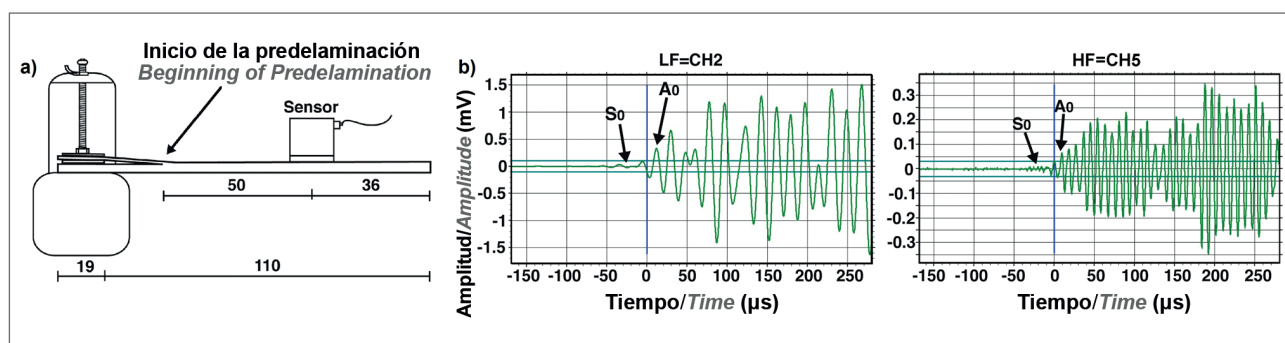


Figura 5. a) Esquema del ensayo de delaminación. b) Señales de EA registradas en un mismo evento durante el ensayo de delaminación. Centro: LF (CH2); Derecha: HF (CH5)

Figure 5. a) Delamination test scheme. b) AE signals from the same event recorded during the delamination test. Centre: LF (CH2); Right: HF (CH5)

2.2. Ensayo de rotura de fibra

Este ensayo de control se realizó introduciendo y pegando fibras entre dos capas de fibra de carbono de una muestra predelaminada y tirando de ellas hasta su rotura. Obviamente, las condiciones de contorno son diferentes en el caso de que las fibras se encuentren confinadas en la matriz de resina "epoxi", pero es una aproximación aceptable. En este caso, se registraron en el canal CH5 señales de EA muy repetitivas y de muy corta duración, confirmando que este mecanismo produce principalmente energía en alta frecuencia. El espectro obtenido en una ventana temporal [-2,4] μ s referida al cruce de umbral (Fig. 6-a) revela que este mecanismo genera energía principalmente en el rango 300-500 kHz.

2.2. Fiber breaking test

This control test was carried out by introducing and gluing fiber bundles in between two of the carbon fiber layers of a pre-delaminated sample and pulling them out to breakage. Obviously, boundary conditions are different than in the case of a fiber confined within the epoxy matrix, but this is an acceptable approach. In this case, very repetitive short duration AE signals were recorded with CH5, confirming that this mechanism mainly produces HF energy. The spectrum in the post-trigger window [-2,4] μ s (Fig. 6-a) reveals that this mechanism mainly generates HF energy over 300-500 kHz.

2.3. Ensayo de micro-rotura de matriz

Se fabricó una muestra de resina "epoxi" con las mismas dimensiones que las muestras de CFRP sometidas a ensayos de flexión. El ensayo consistió en generar actividad de EA degradando químicamente con acetona la muestra de resina "epoxi" sometida a fuerza. Esto causa micro-roturas de superficie en la resina. En este caso, las amplitudes de las señales de EA registradas no superaron los 50 dB. Además, las señales registradas en el canal de alta frecuencia (CH5) tuvieron mayor amplitud que las señales registradas en los canales de baja frecuencia, confirmando, una vez más, que este mecanismo produce principalmente energía de alta frecuencia. La Figura 6-b muestra el espectro en frecuencia en la ventana temporal [-2,4] μ s y revela que este mecanismo genera energía de alta frecuencia en torno a 250 kHz, cerca de la cuarta resonancia del sensor.

2.3. Matrix micro-cracking test

A sample of graphite epoxy resin having the same sizes as the CFRP samples used in the bending tests was manufactured. The test consisted of generating AE activity in the epoxy resin sample under stress by subjecting it to acetone, which chemically degrades, causing surface micro-cracking in the resin. In this case, the amplitudes of the AE signals recorded were not higher than 50 dB. Moreover, signals recorded by the HF channel (CH5) had much larger amplitudes than the signals recorded in the LF channels, confirming once again that this mechanism mainly produces HF energy. Figure 6-b shows the frequency spectrum in the post-trigger window [-2,4] μ s, revealing that this mechanism mainly generates HF energy around 250 kHz, near the fourth sensor resonance.

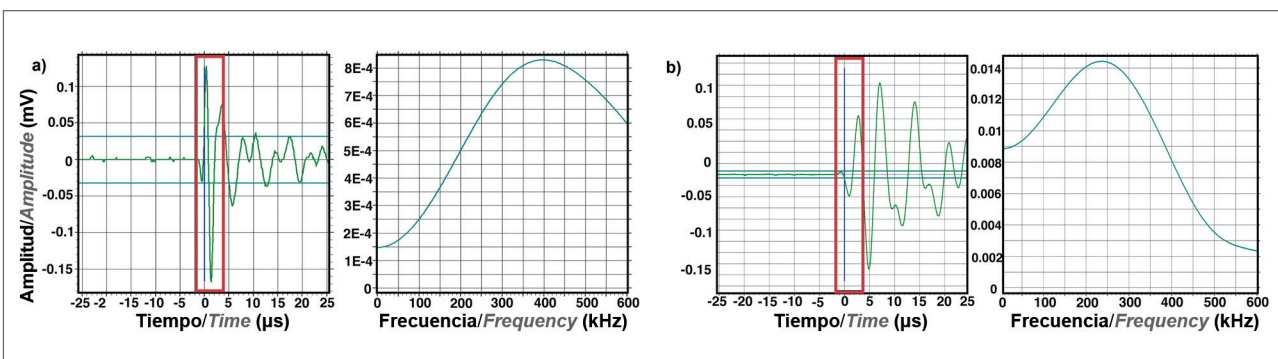


Figure 6. a) Ensayo de control de rotura de fibra; b) Ensayo de micro-rotura de matriz. Izquierda: señal temporal registrada. Derecha: respuesta espectral en la ventana temporal [-2,4] μ s

Figura 6. a) Fiber breakage control test; b) Matrix micro-cracking test. Left: Temporal signal recorded. Right: Spectral response in the time window [-2,4] μ s

2.4. Ensayo de flexión a tres puntos

Se cortaron cuatro probetas de tamaño 260x40 mm² de una placa de CFRP proporcionada por Airbus-España. Las muestras denominadas SD y BD se predelaminaron artificialmente introduciendo, en una localización específica, una lámina de teflón entre dos capas, de tamaño 25x25 mm² (SD) y 40x50 mm² (BD). Las otras dos probetas, ND1 y ND2, no contenían ninguna predelaminación artificial. El ensayo de flexión a tres puntos (con una velocidad de desplazamiento de 0.5 mm/min) se realizó para inducir los tres mecanismos de daño. Se colocaron dos sensores guarda, S2 y S3. La carga de rotura de las probetas fue 237.7 kg para ND1, 260.24 kg para ND2, 233.5 kg para SD y 192.35 kg para

2.4. Three point bending tests

Four samples sized 260x40 mm² were cut from a CFRP plate supplied by Airbus-Spain. The samples designated as SD and BD were deliberately pre-delaminated at a specific location by inserting a Teflon film between two layers, the respective sizes being 25x25 mm² (SD) and 40x50 mm² (BD). The other two samples, ND1 and ND2, were left without any pre-delamination. A three point bending test (with a displacement velocity of 0.5 mm/min) was carried out to induce all kinds of damage mechanisms. Two guard sensors, S2 and S3, were used. The breaking load of the samples was 237.7 kg for ND1, 260.24 kg for ND2, 233.5 kg for



BD, confirmando que la existencia de una delaminación previa reduce la resistencia del material.

3. Análisis de los datos

Los "hits" de EA con amplitudes menores de 45 dB no se han considerado por la dificultad de ajustar la ventana temporal a la primera parte de la señal. Los eventos de EA se han agrupado en 4 tipos: H1: eventos formados por un solo "hit" registrado en el canal de alta frecuencia (CH5); L1: eventos formados por un "hit" registrado en algún canal de baja frecuencia; HS: eventos formados por varios "hits", cuyo primer "hit" ha sido registrado por el canal de alta frecuencia; LS: eventos formados por varios "hits", cuyo primer "hit" fue registrado por un canal de baja frecuencia.

Tras una observación detallada de las señales, se seleccionó la ventana $W_{LF}=[0,22] \mu s$ para calcular el RMS de la señal registrada en los canales de baja frecuencia (RMS_{LF}). Se comprobó que dicha ventana evitaba la presencia de reflexiones y conversión de modos, captando adecuadamente el modo A0. Para seleccionar el canal de baja frecuencia adecuado (CH1, CH2, CH3 o CH4), se usó el siguiente criterio: CH1: si $A \leq 45$; CH2 si $45 < A \leq 60$; CH3 si $60 < A \leq 80$; CH4 si $A > 80$. El uso de este criterio dinámico para seleccionar el canal de baja frecuencia permite captar una parte significativa del modo A0. A modo de ejemplo, la Fig. 7 muestra una señal con una amplitud de pico $A=76.1$ dB, registrada en los canales de baja frecuencia CH1, CH2 y CH3. Se puede ver que la señal seleccionada aplicando el criterio anterior, registrada en el canal CH3, capta una parte significativa del modo A0. La elección de los canales CH1 o CH2 habría generado resultados erróneos.

SD and 192.35 kg for BD, confirming that the previous existence of a delamination leads to a loss in strength of the material.

3. Data Analysis

AE hits with amplitudes lower than 45 dB were not considered due to the difficulty of matching the time window to the first signal appearances. Signals were grouped as: H1: One-hit events corresponding to the HF channel (CH5); L1: One-hit events corresponding to any LF channel; HS: Events with subsequent hits, the HF channel being the first-hit channel; LS: Events with subsequent hits, any LF channel being the first-hit channel.

After detailed observation of the signals, the window $W_{LF}=[0,22] \mu s$ was selected to calculate the RMS of the signals recorded in LF channels (RMS_{LF}). It was corroborated that this window mainly avoids the presence of reflections and mode conversions, properly capturing the genuine A0 mode. Then, in order to select the proper LF channel (CH1, CH2, CH3 or CH4), the following criteria were used: CH1: if $A \leq 45$; CH2 if $45 < A \leq 60$; CH3 if $60 < A \leq 80$; CH4 if $A > 80$. As confirmed, this dynamic criterion for the LF channel enabled us to properly capture a substantial and significant part of the A0 mode. As an example, Fig. 7 shows a signal with peak amplitude $A=76.1$ dB recorded by the LF channels CH1, CH2 and CH3. It can be seen that with the selected channel CH3, based on the above criterion, a significant part of A0 mode is properly picked up. Note that the choice of channels CH1 or CH2 would have delivered erroneous results.

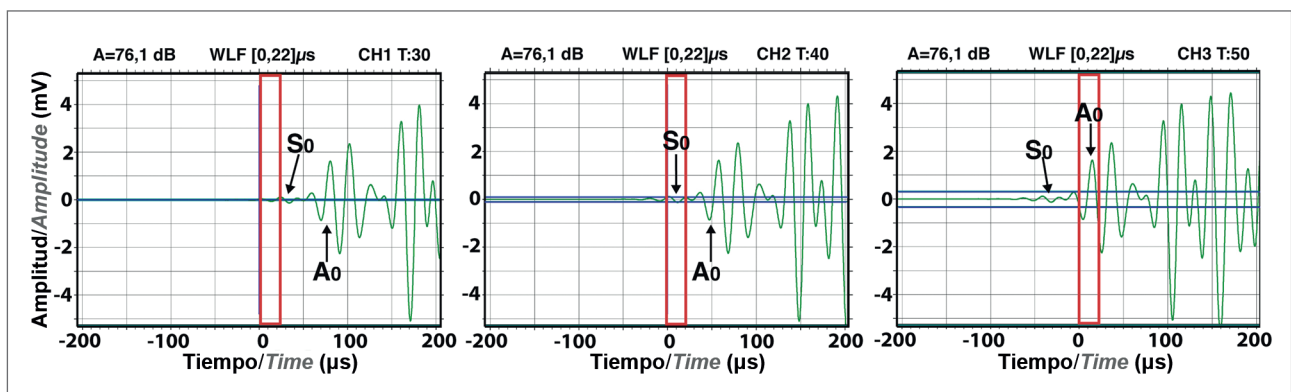


Figura 7. Ventana en LF. Señal transitoria con una amplitud de pico de 76.1 dB, registrada en los canales CH1, CH2 y CH3

Figure 7. LF window. Transient recordings of a 76.1 dB peak amplitude signal at CH1, CH2 and CH3



Para señales registradas sólo en el canal de alta frecuencia, HF, se definieron dos ventanas temporales para captar el modo S0: una ventana post-trigger (después del tiempo de cruce del umbral, THC) $W_{HF1}=[-2,4]$ μ s y otra ventana pre-trigger (antes del tiempo de cruce de umbral) $W_{HF2}=[-7,-1]$ μ s. Para cada señal HF, se calculó la energía RMS en ambas ventanas, llamadas RMS_{HF1} y RMS_{HF2} , respectivamente. Comparando RMS_{HF1} y RMS_{HF2} , se ha implementado una decisión automática en el algoritmo que selecciona la ventana que mejor capta el modo S0 en cada uno de los eventos, sin que influyan las reflexiones.

Una vez calculados los valores RMS_{LF} y RMS_{HF} de cada evento, se aplica el algoritmo (Fig. 8) a cada uno de los eventos para asignarle un tipo de fractura. Se usó la siguiente nomenclatura: Micro-rotura de matriz (Dela=0); Delaminación (Dela=1) y Rotura de fibra (Dela=2). La decisión del algoritmo depende del tipo de evento registrado:

-Eventos L1 y LS: se clasifican como Dela=1 porque no se registró señal en el canal de alta frecuencia o se registró una señal muy débil. Por tanto, se asume que la mayor parte de la energía corresponde con el modo A0.

For signals recorded with the only HF channel, two temporal windows were defined to capture the S0 mode: a post-trigger (after the THC) window $W_{HF1}=[-2,4]$ μ s; and a pre-trigger (before the THC) window $W_{HF2}=[-7,-1]$ μ s. For each HF signal, the RMS energy in both windows was calculated, hence RMS_{HF1} and RMS_{HF2} . By comparing RMS_{HF1} and RMS_{HF2} , an automatic decision was implemented in the algorithm to select which window would best capture the S0 mode in each event without a significant influence of reflections.

Once the RMS_{LF} and RMS_{HF} were calculated for each event, the algorithm (Fig. 8) was applied to associate each event to a specific class of damage. The following designation was used: Matrix micro-cracking (Dela=0); Delamination (Dela=1); Fiber breakage (Dela=2). The decision algorithm obviously depends as well on event features:

-For L1 and LS events: They were directly classified as Dela=1 because no signal or a weaker signal was recorded in the HF channel. It was thus assumed that most of their energy corresponded to the A0 mode.

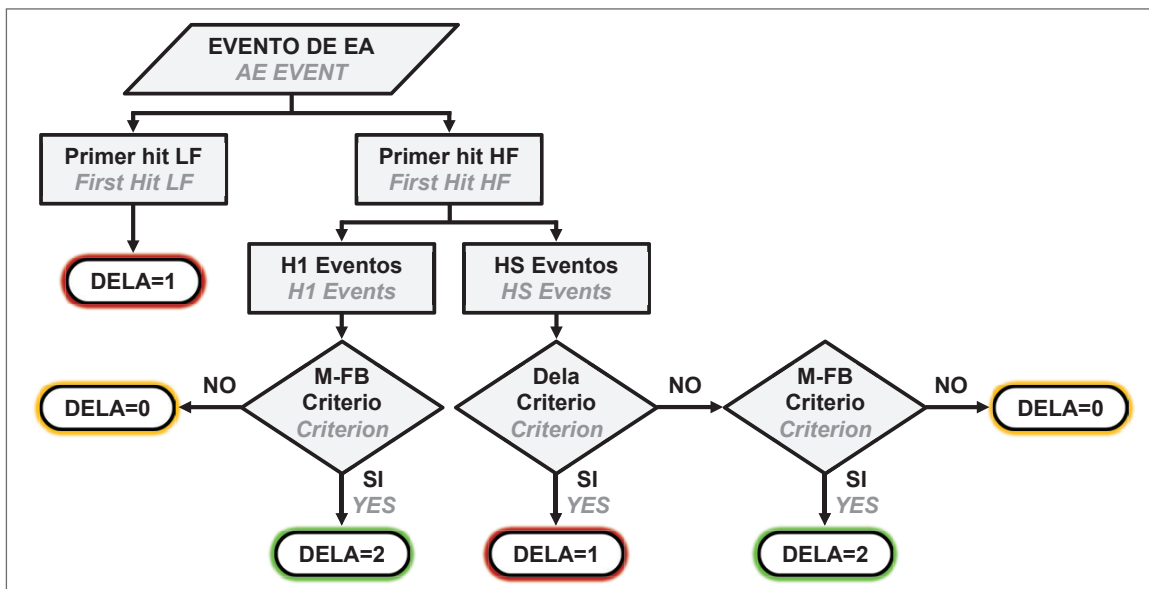


Figura 8. Diagrama de bloques del algoritmo de clasificación del mecanismo de daño

Figure 8. Block diagram of the algorithm for damage mechanisms segregation

-Eventos H1: debido a que no se registró ninguna señal en los canales de baja frecuencia, los eventos H1 se asocian con micro-desplazamientos IP, por tanto, la mayor parte de la energía correspondería al modo S0. Estos eventos se pueden asociar a mecanismos

-For H1 events: Due to the fact that no signal was received in the LF channel, these events were associated to IP micro-displacements, since most energy would correspond to the S0 mode. Thus, the events were associated to mechanism Dela=0 or Dela=2,



Dela=0 o Dela=2, de acuerdo con el criterio espectral propuesto (criterio M-FB).

Se calculan las relaciones espectrales (SR) de la señal registrada en alta frecuencia en la ventana W_{HF} en tres bandas, correspondientes a tres resonancias del sensor: BW1=[125-250] kHz (tercera resonancia); BW2=[250-350] kHz (cuarta resonancia); BW3=[350-550] kHz (quinta resonancia). Para evitar distorsiones espectrales que generen resultados erróneos, las relaciones espectrales de las bandas BW2 and BW3 se calcularon de manera individual y luego se sumaron. El índice de SR entre dichas bandas (BW2, BW3) y la banda BW1, en dB, viene dado por:

according to a specific spectral criterion (M-FB criterion) proposed.

The Spectral Ratios (SR) of the HF signal in the window W_{HF} were calculated over three individual bands corresponding to three resonances of the sensor: BW1=[125-250] kHz (third resonance); BW2=[250-350] kHz (fourth resonance); BW3=[350-550] kHz (fifth resonance). To avoid spectral distortions delivering unreliable results, the spectral ratios of BW2 and BW3 were gathered and calculated as the individual sum of the two bands. The rate of the SR between these bands (BW2, BW3) and BW1, in dB, is given by:

$$R_{SR_{HF}} = 20 \log \left[10^{\frac{SR_{HF_{BW2}}}{20}} + 10^{\frac{SR_{HF_{BW3}}}{20}} \right] - SR_{HF_{BW1}} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la rotura de fibra produce emisión principalmente entre la cuarta y la quinta resonancia [BW2 and BW3], si $R_{SR_{HF}}$ es mayor que el umbral T_{SR} , el evento se asocia con el mecanismo Dela=2. En otro caso, el evento se asocia con el mecanismo Dela=0.

Bearing in mind that fiber breakage emission falls mainly within the fourth and fifth resonances [BW2 and BW3], if $R_{SR_{HF}}$ was higher than a particular threshold T_{SR} , the event was associated with Dela=2. Otherwise, the event was associated with Dela=0.

-Eventos HS: En este caso, como los eventos tienen señales de baja y alta frecuencia, para asociarlos con micro-desplazamientos IP o OP, se calcula la diferencia entre los valores RMS en baja y alta frecuencia (Criterio Dela):

-For HS events: In this case, since events have LF and HF signals, to associate those events with IP or OP micro-displacements, the difference of the RMS value in LF and HF was calculated (Dela Criterion), i.e.

$$R_{LF-HF} = RMS_{LF} - RMS_{HF} \quad (2)$$

Si $R_{LF-HF} \geq 0$, el evento tiene más energía en LF que en HF, por tanto se asocia con micro-desplazamientos OP (Dela=1). En otro caso, el evento se asocia con micro-desplazamientos IP y se aplica el criterio M-FB para asociarlo con los mecanismos Dela=0 o Dela=2.

Thus, if $R_{LF-HF} \geq 0$, the event has more energy in LF than in HF, so it was associated with OP micro-displacements (Dela=1). Otherwise, the event was associated with IP micro-displacements and the M-FB criterion was applied to associate it with Dela=0 or Dela=2.

4. Resultados de los ensayos de control

En primer lugar, el algoritmo se aplicó a señales procedentes de los ensayos de control. Para el ensayo de delaminación, la mayoría de los eventos fueron

4. Results of control tests

Firstly, the algorithm was applied to the AE signals coming from the control tests. For the delamination test in particular, most events were correctly



correctamente clasificados como $Dela=1$, tanto en las fases de carga, carga mantenida y descarga (ver Fig. 9-a). De hecho, la variable R_{LF-HF} usada para clasificar los eventos HS fue mayor de 10 dB en el 95% de los eventos HS. Esta validación fue claramente corroborada en los ensayos de control de la rotura de fibra, en los que el 100% de los eventos fueron clasificados como $Dela=2$ (Fig. 9-b). En este caso, la variable R_{SRHF} (usada para diferenciar entre $Dela=0$ y $Dela=2$) fue siempre mayor de 11 dB, demostrando que la mayor parte de la energía emitida por este mecanismo de daño se concentra en las bandas de frecuencia $BW2-BW3=[250-550]$ kHz. En los ensayos de control de micro-rotura de matriz, la mayoría de los eventos fueron clasificados correctamente como $Dela=0$ (ver Fig. 9-c), corroborando que la energía emitida por este mecanismo de daño procede de la banda de frecuencia $BW1=[125-250]$ kHz. En este caso, la variable R_{SRHF} siempre tomó valores menores de 9 dB.

classified as $Dela=1$, both in loading, load holds and unloading (see Fig. 9-a). Indeed, the variable R_{LF-HF} used to classify the HS events was greater than 10 dB for more than 95% of HS events. Validation was also clearly verified for the fiber breakage control test, in which case 100% of the events were classified as $Dela=2$ (Fig. 9-b). In this case, the variable R_{SRHF} (used to discern between $Dela=0$ and $Dela=2$) was consistently higher than 11 dB, demonstrating that most of the energy emitted by this mechanism falls into the frequency band $BW2-BW3=[250-550]$ kHz. For the matrix micro-cracking control test, meanwhile, most of the events were classified as $Dela=0$ (see Fig. 9-c), proving that the energy emitted in this mechanism remained in the frequency band $BW1=[125-250]$ kHz. In this case, the variable R_{SRHF} had values that were always less than 9 dB.

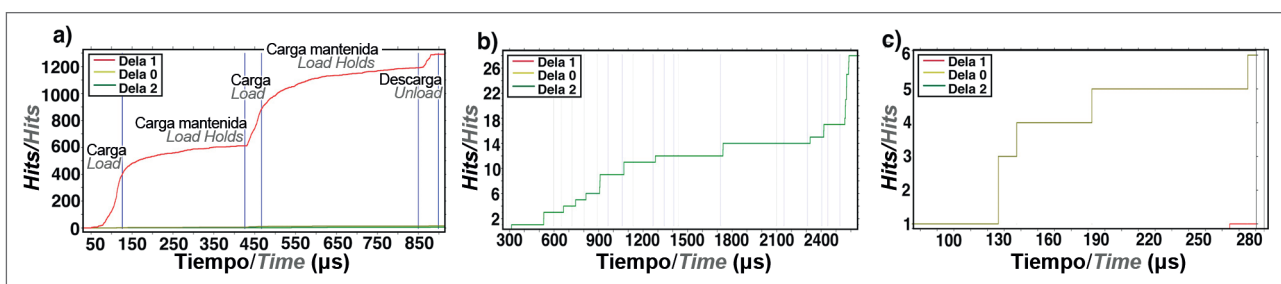


Figura 9. Clasificación de los eventos de EA de los ensayos de control: a) Ensayo de delaminación; b) Ensayo de rotura de fibra; c) Ensayo de micro-rotura de matriz

Figure 9. Classification of AE events in the control-tests: a) Delamination test; b) Fiber-breakage test; c) Matrix micro-cracking test

Estos ensayos de control permitieron determinar el umbral T_{SR} finalmente propuesto para el criterio M-FB. Teniendo en cuenta que el valor de R_{SRHF} fue siempre mayor que 11 dB en el ensayo de control de rotura de fibra y menor que 9 dB en el ensayo de micro-rotura de matriz, se estableció un valor $T_{SR}=9$ dB para llevar a cabo una correcta clasificación de los eventos en ambos casos.

These control tests also allowed us to determine the threshold T_{SR} finally proposed for criterion M-FB. Taking into account that R_{SRHF} was always higher than 11 dB in the fiber breakage control tests and less than 9 dB in the matrix micro-cracking control test, a value of $T_{SR}=9$ dB was established to arrive at a correct classification of events in both cases.

5. Resultados de los ensayos de flexión a tres puntos

5. Results of three point bending tests

Probetas SD (Delaminación pequeña) y BD (Delaminación grande)

SD (Small Delamination) and BD (Broad Delamination) samples

Para las probetas predelaminadas sometidas a los ensayos de flexión, SD y BD, la mayoría de los eventos se asociaron

For the pre-delaminated samples subjected to bending tests, SD and BD, most events were associated



con el mecanismo Dela=1. Los eventos aparecieron casi desde el principio (10% de la carga de rotura para la probeta BD y 20% para la SD). Se detectó visualmente que la probeta BD rompió principalmente debido a la delaminación, dado que la predelaminación ocupaba todo el ancho de la probeta. Este hecho se puede corroborar porque no se produjo un aumento significativo de los mecanismos Dela=0 ni Dela=2 en ningún momento del ensayo (ver Fig.10 a). La probeta SD (Fig.10 b) mostró un incremento rápido e importante de los eventos asociados al mecanismo Dela=1 en el 80% de la carga, posiblemente relacionado con la generación de una nueva delaminación, acompañado de un pequeño incremento de los eventos de Dela=0. Además, otro incremento significativo de los eventos Dela=2 se observó en torno al 93% de la carga, anunciando la rotura final de la probeta.

to Dela=1. Events appeared almost from the beginning (10% of breaking load for the BD and 20% for the SD). It was visually evident that sample BD broke only by delamination, given that the pre-delamination occurred along the whole width of the sample. This could be clearly corroborated because no significant increase in the Dela=0 and Dela=2 mechanisms was seen at any time (see Fig. 10 a). In contrast, sample SD showed a sudden, substantial and sustained increase of the Dela=1 slope at 80% of load, very possibly related to the generation of a new delamination, followed a bit later by an increase in the Dela=0 rate. Moreover, a significant increase in the Dela=2 events is observed around 93% of load, announcing the final breaking of the sample (see Fig. 10 b).

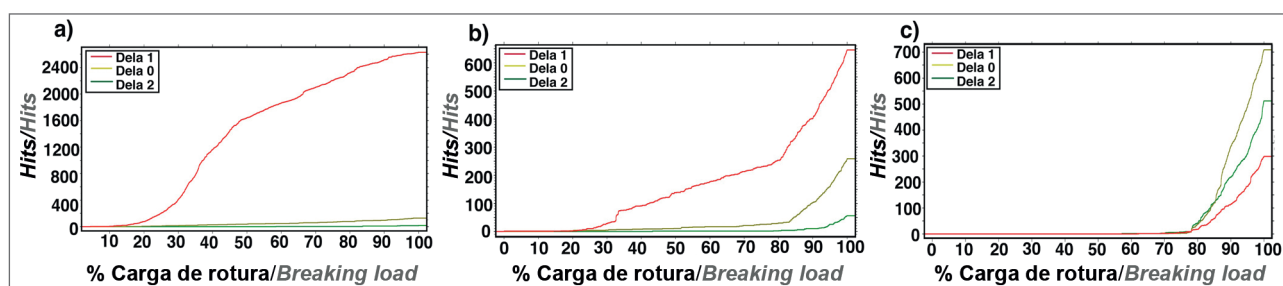


Figura 10. Resultados del ensayo de flexión a tres puntos: a) BD; b) SD; c) ND1

Figure 10. Three point bending test results: a) BD; b) SD; c) ND1

Probetas ND1 y ND2 (Sin delaminación)

La Figura 10-c muestra el resultado obtenido para la probeta ND1. El comportamiento es totalmente diferente al obtenido en las probetas predelaminadas. En ausencia de predelaminación, el inicio de la EA se produce en el 57% de la carga de rotura. A partir de ese punto, los tres mecanismos comenzaron a aumentar lentamente. A diferencia del resultado observado en las probetas predelaminadas, no destaca el mecanismo Dela=1. Al 79% de la carga de rotura se produjo un aumento significativo de los tres mecanismos de daño. En este caso, se observaron dos delaminaciones, en concordancia con las dos pendientes diferentes de la curva de los eventos acumulados Dela=1 (al 79% y al 92% de la carga de rotura). El comportamiento de la probeta ND2 fue similar al observado en la probeta ND1. En este caso, los eventos de EA empezaron al 62% de la carga de rotura. Se detectó un incremento significativo en Dela=0 y Dela=2 en el 77% de la carga de rotura, indicando el inicio de la delaminación. Se produjo un incremento rápido de los eventos Dela=1

ND1 and ND2 samples (No Delamination)

Figure 10-c refers to sample ND1. It shows a totally different behavior than the preceding pre-delaminated samples. AE onset was established at 57% of break load in the absence of a pre-delamination. From this point, all three mechanisms began to increase slowly, meaning that Dela=1 was not the prevailing type of event, in contrast with the pre-delaminated samples. At 79% of break load a significant increase of all three mechanisms took place. In this case, two delaminations were visually observed, matching the two different slope increases of the Dela=1 events (at 79% and 92% of break load). The behavior of the sample ND2 was very similar to that seen for ND1. In this case, the AE events started at 62% of the break load. A significant increase in Dela=0 and Dela=2 was witnessed at 77% of break load, marking the onset of delamination. A sudden increase in Dela=1 and Dela=0 events at 87% of ultimate load coincides with a considerable increase of the delamination in



y $\Delta\epsilon=0$ al 87% de la carga de rotura, coincidiendo con un incremento considerable de la delaminación. Se debe enfatizar que el inicio de la delaminación en las probetas ND1 y ND2 apareció en el mismo valor de carga (77%), que coincidió con la aparición de la segunda delaminación en la muestra pre-delaminada SD.

6. Conclusiones

Se ha propuesto un nuevo procedimiento para evaluar, en tiempo real, el progreso de las delaminaciones en placas de material compuesto CFRP usando el método de emisión acústica. Se basa en un algoritmo que produce una separación apropiada entre los modos de S0 y A0 de las ondas de Lamb en las señales de EA. En primer lugar, durante la adquisición se usan dos filtros hardware: un filtro en baja frecuencia, LF=[20-55] kHz para captar principalmente el modo A0 y un filtro en alta frecuencia, HF=[125-660] kHz para captar el modo S0. En segundo lugar, comparando la energía de la señal de EA en dos bandas de frecuencia en ventanas temporales muy estrechas, es posible distinguir el mecanismo de delaminación de otros mecanismos. En tercer lugar, la aplicación de la relación espectral permite separar los eventos procedentes de micro-rotura de matriz y los procedentes de rotura de fibra. El uso de una ventana temporal muy estrecha es una contribución original de este trabajo, y permite comparar la energía de los modos S0 y A0, eliminando la influencia de las reflexiones y otros efectos secundarios de propagación. Los sensores han sido adecuadamente seleccionados para este trabajo para asegurar la sensibilidad necesaria tanto en baja como en alta frecuencia.

course. It must also be stressed that the onset of significant delamination in samples ND1 and ND2 appeared at the same value of load (77%) as the onset of the second delamination in the pre-delaminated sample SD.

6. Conclusions

A new procedure to evaluate, in real-time, the progress of delaminations in CFRP composite plates using the acoustic emission technique has been proposed. It entails an algorithm based on an appropriate separation between the S0 and A0 Lamb modes in the AE signals. Firstly, two hardware filters were used during acquisition: LF=[20-55] kHz to capture mainly the A0 mode, and HF=[125-660] kHz to capture mainly the S0 mode. Secondly, by comparing the strength of the AE signals in the two frequency bands in very narrow windows, it was possible to classify AE events as outside or inside the plane, and thus segregate the delamination mechanism from other ones. Thirdly, the Spectral Ratio made it possible to separate the AE events coming from matrix micro-cracking and the fiber breaking mechanisms. The use of very narrow temporal windows is an original contribution of this paper, and allows for a comparative evaluation of the genuine strength of S0 and A0, significantly mitigating the influence of reflections and other secondary propagation effects. Sensors were also properly selected to ensure the necessary sensitivity in the HF and LF ranges used in this experimental work.

Bibliografía / References

- [1] Ono K, Gallego A. *Research and application of AE on advanced composite. Journal of Acoustic Emission* 2012; 30: 180-229.
- [2] Ono K, Gallego A. *Attenuation of Lamb waves in CFRP plates. Journal of Acoustic Emission* 2012; 30: 109-123.
- [3] Guo D, Mal A, Ono K. *Wave theory of acoustic emission in composite laminates. Journal of Acoustic Emission* 1997; 15: 14-19.
- [4] Ip HK, Mai, WY. *Delamination detection in smart composite beams using Lamb waves, Journal of Smart Materials and Structures* 2004; 13: 544-551.
- [5] Sridharan S. *Delamination behavior of composites. Woodhead Publishing; 2008.*
- [6] Mizutani Y, Nagashima K, Takemoto M, Ono K. *Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis. NDT&E International* 2000; 33: 101-110.
- [7] Prosser WH, Jackson KE, Kellas S, Smith BT, MacKaon J, Friedman A. *Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix cracking in composites. Materials Evaluation* 1995; 53: 1052-1058.