

C. Esposito*, A. Calabrò*, A. Lizza*, M. Giordano**, A. D'Amore**, L. Nicolais**

* C.I.R.A. S.p.A. Centro Italiano Ricerche Aerospaziali

Via Maiorise - 81043 Capua (CE)

** Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione

P.le Tecchio, 80 - 80125 Napoli

Sommario

La conoscenza dei meccanismi di danno e del comportamento a rottura di laminati in composito CFRP è di fondamentale importanza per la progettazione e verifica di elementi strutturali, in particolare per il calcolo della resistenza residua post-danno. In condizioni di servizio, le strutture in composito possono, infatti, manifestare: crack della matrice, debond fibra-matrice, rottura di fibre e delaminazioni. Questi fenomeni causano una riduzione permanente dell'integrità del laminato, degradando le caratteristiche di rigidità e di resistenza del materiale stesso.

In questo lavoro vengono presentate diverse campagne di prova a trazione statica su laminati: unidirezionali a 0°, a 90° e cross-ply. Viene inoltre discussa una nuova metodologia per il monitoraggio dello stato di danneggiamento e l'individuazione dei modi di danno basata su tecniche estensimetriche e sull'Emissione Acustica. Le sequenze di laminazione considerate hanno generato preferenziali modi di danno. L'uso congiunto di estensimetri elettrici e l'acquisizione degli eventi di EA hanno permesso il riconoscimento dei seguenti modi di danno: crack della matrice e debond fibra-matrice, rottura di fibre e genesi e propagazione di delaminazioni.

Abstract

The AE techniques are able to monitor structural micro-failures. The AE recorded signals are associated to the elastic energy released during the micro-failure events. In CFRP laminate four different interlaminar failure modes can be identified: fiber failure, matrix cracking, pull-out and interfacial debonding. The major difficulty in establishing a relationship between the AE signals and the occurring failure processes consists in the concurrent observation of different modes.

Analysis of the AE signals associated to micro-failure processes in CFRP laminates has been performed. Unidirectional (0° and 90°) and cross-ply laminates have been tested. The AE signals associated to the failure processes have been detected and then recorded with an oscilloscope. A frequency spectral analysis has been performed via FFT.

On the basis of previous works, where the frequency acoustic signatures of the different failure modes have been individuated, it was possible to evaluate the occurrence of different failure processes during tensile loading.

1. Introduzione

L'EA è una tecnica molto sensibile nel rilevare la formazione e la crescita di una grande varietà di rotture microstrutturali nei diversi materiali in uso.

Quando un meccanismo di danno si attiva, parte dell'energia potenziale elastica accumulata viene rilasciata sotto forma di onde elastiche transitorie che si propagano dalle superfici del danno, inteso come sorgente di EA, fino ad interessare l'intero materiale. Nei laminati in composito a matrice polimerica si possono sviluppare vari fenomeni di danno a diverse scale che possono comportare perdite permanenti d'integrità alla singola lamina oppure all'intero laminato. Se consideriamo la singola lamina, si parla di danno intralaminare, si possono manifestare: crack della matrice; scollamento fibre-matrice (Debonding); rotture di fibre e fuoriuscita delle fibre dal piano della lamina (Pull out). A livello dell'intero laminato, si parla di danno interlaminare, il danno che si può manifestare è la delaminazione: questa si verifica quando i vari crack della matrice originatisi in maniera del tutto casuale si coalizzano tra loro e si propagano all'interfaccia tra due lamine dando origine allo scollamento reciproco.

L'individuazione univoca dei modi di danno è di fondamentale importanza qualora si vogliano impiegare le tecniche di EA per il monitoraggio dello stato di danneggiamento di strutture in servizio. Infatti le strutture in materiale composito producono una grande quantità di eventi di EA quando vengono sollecitate.

Nell'ottica delle "smart structures" disponendo di una rete di sensori opportunamente inglobati nelle strutture o componenti, è possibile rilevare con tempestività la posizione e la tipologia del danno che sta evolvendo. Ciò può avvenire o con la comparazione di segnali già presenti in un "data base" e quindi con tecniche di riconoscimento del segnale, oppure mediante algoritmi che risolvano "problemi inversi". Per far questo occorre quindi l'analisi delle intere forme d'onda dei segnali di EA.

2. Emissione Acustica: Generalità

Con la tecnica dell'Emissione Acustica (ASTM E1316), si intende la rilevazione e la caratterizzazione delle micro-quantità di energia elastica che vengono rilasciate da un materiale ogni volta che si verificano nel suo interno modificazioni di carattere strutturale. Questo rilascio di energia elastica avviene sotto diverse forme, in parte sotto forma di onde di pressione che si propagano nel materiale sino a raggiungere la superficie: in tal modo vengono trasmesse all'esterno e possono essere rilevate mediante opportuni sensori.

Importante caratteristica della metodologia è quindi di fornire le informazioni sull'integrità strutturale del materiale in tempo reale nello stesso istante in cui si verificano le alterazioni [1]. Si rende possibile così il monitoraggio continuo degli impianti e dei loro principali organi di funzionamento. L'EA costituisce quindi l'unica metodologia in grado di dare informazioni sul processo dinamico relativo alla degradazione della struttura.

3. Set-Up Sperimentale per l'analisi in frequenza dei segnali di EA

Per la messa a punto della tecnica di monitoraggio si è reso necessario progettare un particolare campione in composito monofilamentare SFFT (Single Fiber Fragmentation Test), in modo tale da generare un unico modo di danno: rottura della fibra. Lo scopo di questi test è quello di caratterizzare i segnali di EA associati al modo di danno rottura fibra, evitando le possibili interferenze dovute agli altri modi caratteristici dei compositi. Resina poliestere e fibre di carbonio sono state utilizzate per la realizzazione dei campioni. In Tab. 1 sono riportate le caratteristiche della resina e delle fibre.

Tabella 1		
Caratteristiche della resina e delle fibre		
	Poliestere	Fibre di carbonio HS
Densità [Kg/m ³]	1200	1750
Modulo [GPa]	3.2	227
Resistenza a rottura [GPa]	0.73	3.1

Sono stati realizzati anche campioni senza fibra, infatti era necessario verificare che l'evento che si realizzava era la rottura della fibra e non l'evento crack della matrice. Ciascun campione realizzato è stato osservato al microscopio per indagare sull'eventuale presenza di difetti.

Le Figg. 1 e 2 riportano gli schemi dei set-up di prova rispettivamente nei test condotti su SFFT e nei test su laminati in composito:

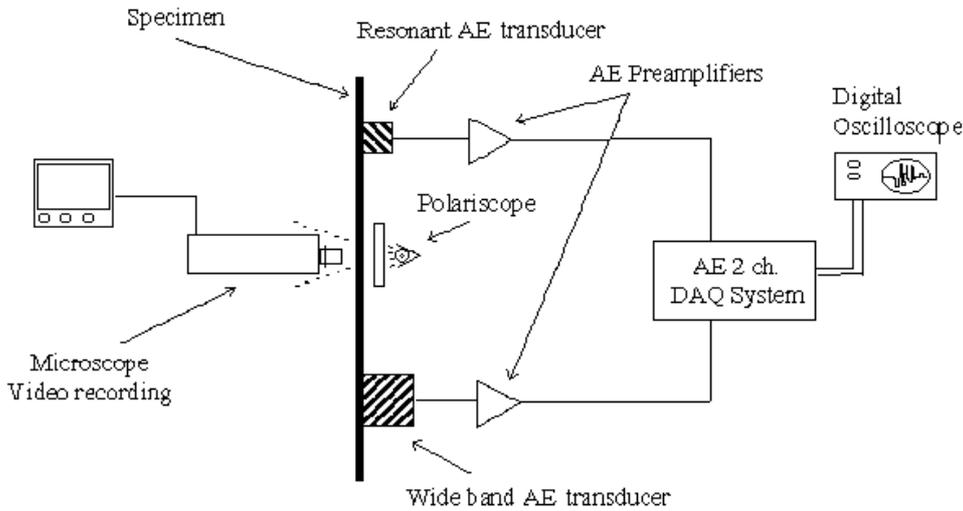


Figura 3

Schema del set-up di prova su SFFT.

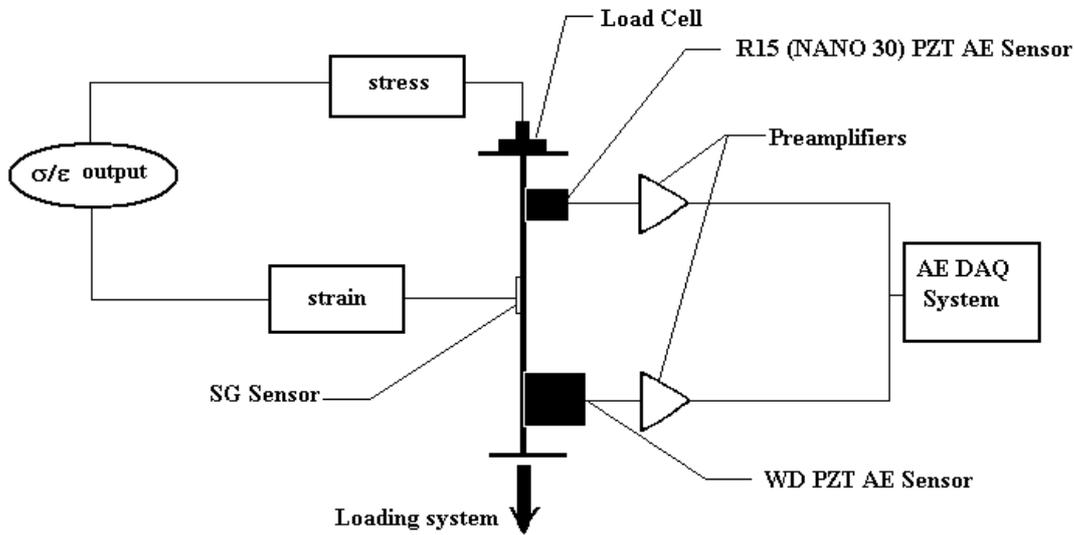


Figura 2

Schema del set-up di prova su laminati.

Microscope: Microscopio ottico Reichert-Yung, mod. Polyvar. SG Sensor: Estensimetro elettrico ($R=350 \Omega$). R15 AE Sensor: sensore di EA piezoelettrico con Frequenza di risonanza 150 kHz della PAC (Physical Acoustic Corporation). NANO 30 AE Sensor: sensore di EA piezoelettrico con Frequenza di risonanza 300 kHz della PAC. WD AE Sensor: sensore di EA piezoelettrico a Banda Larga (20÷1000 kHz) della PAC. AE DAQ System: composto da un Sistema di acquisizione per segnali AE PAC LOCAN320 AT, Oscilloscopio digitale LECROY 3904 con Banda Passante 200 MHz (4 canali di input). Load Cell: cella di carico da 100 kN. Loading system: Macchina per prove statiche INSTRON 4505.

Per l'applicazione del carico nei SFFT è stato utilizzato un microdinamometro Minimat, dotato di una cella di carico con fondo scala di 200 N, sufficiente a coprire il range di carico di nostro interesse. Durante le prove a trazione i campioni sono stati osservati utilizzando un microscopio ottico, munito di polarizzatori incrociati, in luce trasmessa. In corrispondenza dei punti in cui si realizza la rottura della fibra, la concentrazione di tensioni ed il diverso stato di deformazione determinano una variazione delle proprietà ottiche del materiale nelle diverse direzioni, ed in particolare una variazione dell'indice di rifrazione. La rottura della fibra è evidenziata mediante bande di birifrangenza. Per l'acquisizione e l'analisi dei segnali di emissione acustica è stato utilizzato l'acquisitore multicanale LOCAN 320. I sensori utilizzati in questo tipo di prove sono trasduttori piezoelettrici di due tipi: a) Sensore risonante NANO 30 con frequenza di risonanza 300 kHz e R15 con frequenza di risonanza 150 kHz; b) Sensore a banda larga WD, frequenza circa 20 kHz ÷ 1 MHz, differenziale, diametro 16mm. Un oscilloscopio Lecroy è utilizzato per visualizzare le forme d'onda e valutarne i parametri caratteristici. L'oscilloscopio è regolato in modo da ottenere la migliore visualizzazione della forma d'onda. Il sistema è regolato in modo da acquisire segnali provenienti dal sensore WD quando si presenta un segnale sul sensore risonante. Questa tecnica, detta di "triggering", si rende necessaria a causa del numero elevato di segnali provenienti dal sensore WD, non tutti utili o relativi all'evento di danno che interessa. Il sensore risonante, impiegato come "trigger", viene scelto in funzione delle caratteristiche in frequenza dei segnali da acquisire associati agli eventi di danno.

4. Provino monofilamentare (SFFT)

I campioni sono stati caricati a trazione lungo la direzione della fibra disponendoli orizzontalmente tra le ganasce della Minimat, avendo fissato una velocità di spostamento delle ganasce di 0.25 mm/min. Durante ciascuna prova, eventi successivi di frammentazione della fibra, sono stati osservati mediante il microscopio ottico in luce polarizzata. All'osservazione mediante microscopio ottico corrisponde un evento di EA rilevato dai sensori. Il segnale di EA corrispondente alla rottura della fibra è stato acquisito e visualizzato mediante l'oscilloscopio. La diretta corrispondenza tra evento di EA ed insorgenza del danno è stata verificata mediante la comparazione tra numero di eventi di EA e zone di rottura visibili in luce polarizzata. I segnali di EA associati alla rottura della fibra sono stati analizzati mediante Fast Fourier Transforms. In generale il segnale registrato è la somma dell'evento relativo al danno all'interno del materiale, del rumore di fondo e dell'effetto del filtro antialiasing (1MHz). La procedura di filtraggio e deconvoluzione dei segnali componenti è stata effettuata eliminando le frequenze <30 kHz (caratteristiche del rumore di fondo) e le frequenze >750 kHz limite superiore della banda di acquisizione del sensore a banda larga.

La figura 3 riporta il contenuto in frequenza di un evento di EA associato al danno rottura fibra registrato nel corso delle prove, filtrate secondo i criteri sovraesposti. Le ampiezze sono state normalizzate rispetto all'ampiezza massima del segnale nella banda di frequenze di interesse. Per ciascun evento sono stati riportati i valori di frequenze corrispondenti a picchi di ampiezza caratteristici. Il confronto tra i dati relativi a prove distinte mostra che per valori di frequenza < 300 kHz, il segnale relativo al danno rottura fibra contiene le medesime frequenze caratteristiche. E' quindi possibile ipotizzare che le componenti dell'onda dinamica associata alla rottura della fibra siano una proprietà dell'evento di danno stesso.

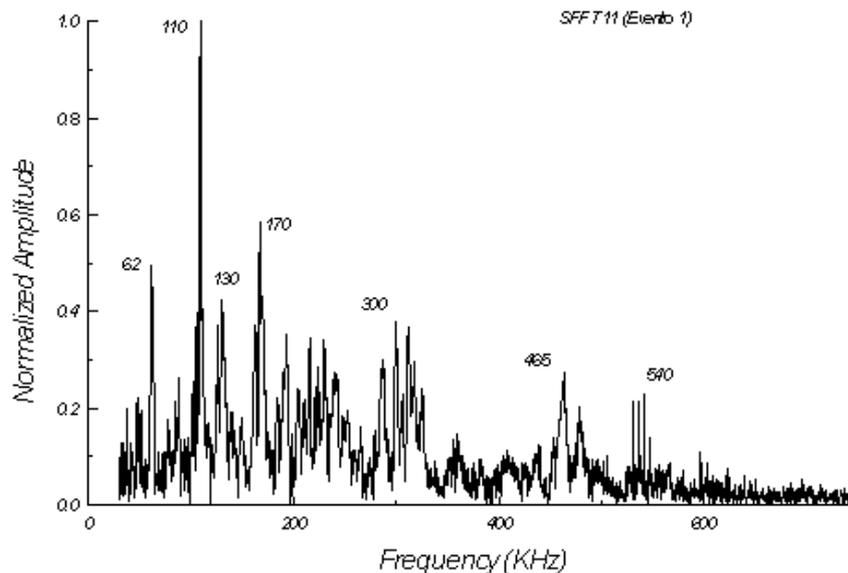


Figura 3

Contenuto in frequenza di eventi di EA acquisiti nella prova SFFT11.

5. Laminato unidirezionale a 90°

Le prove sono state eseguite in accordo alla Norma ASTM D3039-95a, in ciascuna prova il carico di trazione è stato applicato realizzando un controllo in spostamento, con velocità pari ad 1 mm/min. I campioni sono composti in laminato unidirezionale a 90° a 15 lamine, realizzati con resina epossidica a 177°C di polimerizzazione rinforzata con fibre di grafite a modulo moderato (HTA 5131 12K). Per le prove a trazione è stata utilizzata la INSTRON 4505 dotata di una cella di carico con fondo scala pari a 100 kN. Per la valutazione della deformazione sono stati utilizzati estensimetri (strain gages) incollati sul provino. Nel corso della prova sono state utilizzate in contemporanea le tecniche di EA e quelle estensimetriche per ottenere una relazione tra eventi di EA e curva σ/ϵ . Nelle prove sui laminati unidirezionali a 90° i debonding fibra-matrice ed i contemporanei crack della matrice sono i primi danni che si manifestano. Le fibre infatti sono disposte ortogonalmente alla direzione di applicazione del carico, ed è la matrice ad assorbire il carico applicato. Sotto l'azione del carico la matrice tenderebbe ad allungarsi ed a ridurre la sezione trasversale (Effetto Poisson), ma la presenza delle fibre che agiscono da puntoni, impedisce tale comportamento. Come conseguenza si realizzano elevate concentrazioni di sforzi di taglio che determinano il crack della matrice, che può propagarsi senza coinvolgere le fibre oppure lungo l'interfaccia fibra-matrice (debonding).

La velocità di propagazione dell'onda calcolata sfruttando il metodo della mina (ASTM E976-94) è pari a 2500 m/s. Le caratteristiche della lamina riferite ad un contenuto in fibra del 57% sono: spessore nominale della lamina = 0.13 mm, $E_{11}=135000$ MPa, $E_{22}= 9300$ MPa, $G_{12}=5400$ Mpa, $\nu_{12}=0.29$. I valori medi delle caratteristiche meccaniche del laminato ottenuti in questa campagna di prova sono: $\sigma_{ult}= 41.75$ MPa, $\mu\epsilon_{ult}= 4104$, $E_c=10337$ MPa.

In Figura 4 viene riportato il grafico stress-strain di una prova, si evidenzia un comportamento di tipo fragile. Sono riportate nelle Figg. 5 e 6 un tipico evento di EA e la sua FFT. Dal confronto delle FFT si evince la possibilità di riconoscere gli eventi di EA associati al crack della matrice per il fatto che il contenuto in frequenza è compreso in una banda molto stretta 80-130 kHz.

Dallo studio dei parametri caratteristici di EA nel dominio del tempo (Eventi, Ampiezza degli eventi) si evince, invece, che la rottura dell'interfaccia ed i primi crack della matrice si manifestano all'incirca a 1600 $\mu\epsilon$. Quindi per questa sequenza di laminazione le prime rotture microscopiche nella matrice avvengono all'incirca al 39 % della deformazione a rottura del laminato, ovvero a circa il 41 % del carico a rottura.

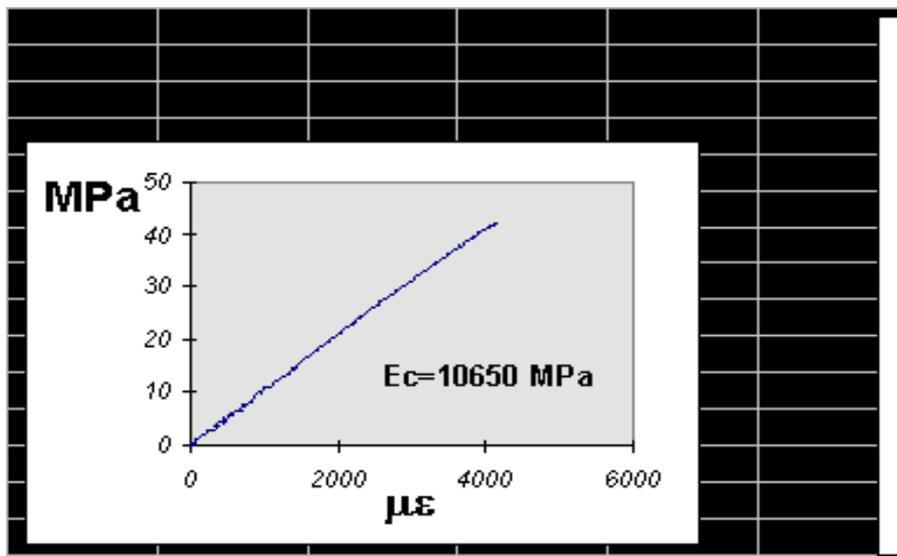


Figura 4

Curva sforzo -microdeformazioni.

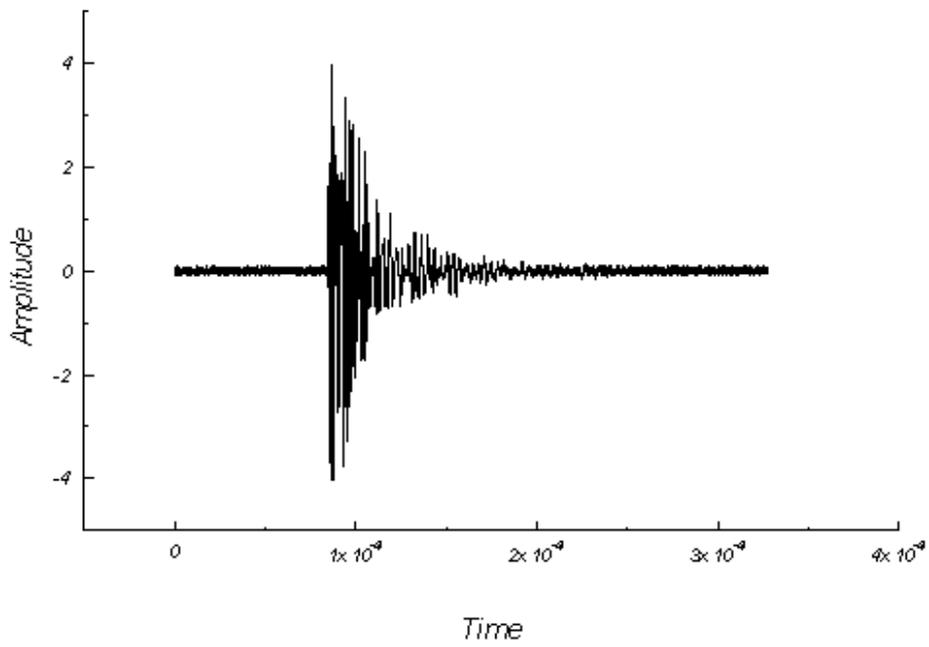


Figura 5

Evento singolo di EA (acquisito dal sensore WD) vs. Time.

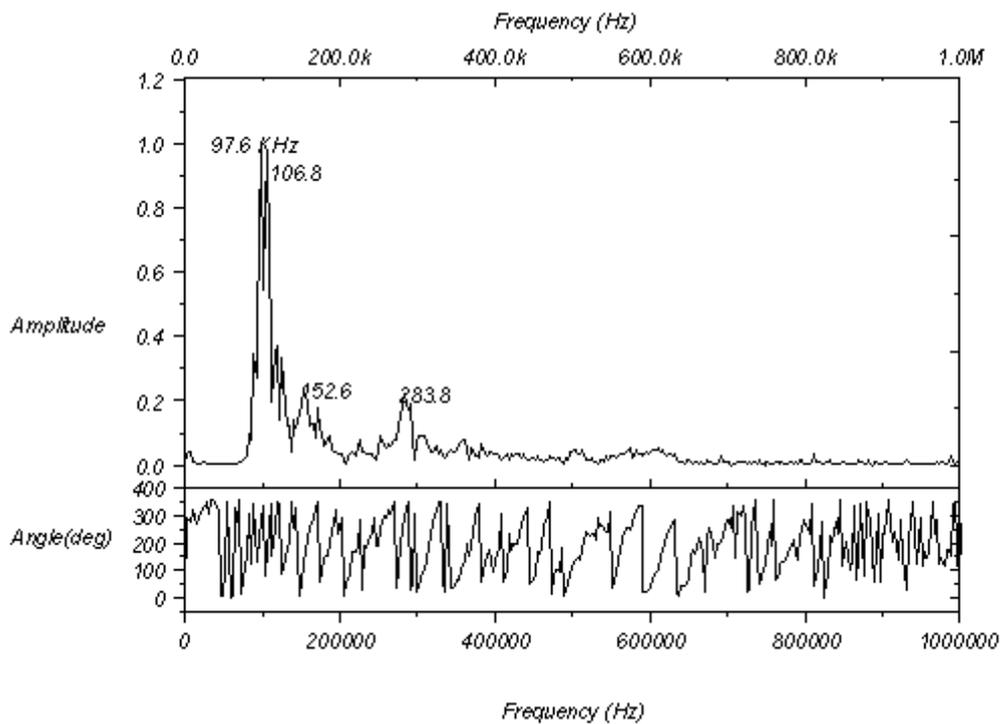


Figura 6

Impronta in frequenza dell'evento di EA correlato al Crack della Matrice.

6 Laminato cross-ply $[0/0/90/90/0]_s$

I campioni sono composti in laminato a 10 strati $[0/0/90/90/0]_s$ con lamine dello stesso materiale e caratteristiche simili a quelle usate nei laminati a 90° . I valori medi delle caratteristiche meccaniche del laminato ottenuti in questa campagna di prova sono: $\sigma_{ult}=1081$ MPa, $\mu\epsilon_{ult}=12565$, $E_c=82626$ MPa. Dal diagramma in funzione del tempo di prova, Fig. 8, si evince un salto in termini di sforzo ($\Delta = 20$ MPa a circa 630 MPa, il 55% del carico di rottura) e di deformazione ($\Delta = 200$ $\mu\epsilon$ a circa 7600 $\mu\epsilon$, il 60% della deformazione a rottura) avvenuto nello stesso istante sul campione.

La fenomenologia è complessa: si generano dapprima crack della matrice, ed infatti si registrano alcuni eventi con la stessa impronta (Figura 9) dell'evento associato al crack della matrice nei laminati unidirezionali a 90° , che accumulandosi generano crack trasversali che propagandosi all'interfaccia 0/90 causano estese delaminazioni. Quest'ultimo fenomeno (formazione della delaminazione estesa) è a carattere esplosivo, infatti è udibile ad orecchio durante la prova di trazione. Si riscontra un imbozzamento (fuoriuscita delle lamine a 0° dal piano ovvero perdita di parallelismo con il piano medio del laminato) causato dalla compressione agente sulle lamine a 90° .

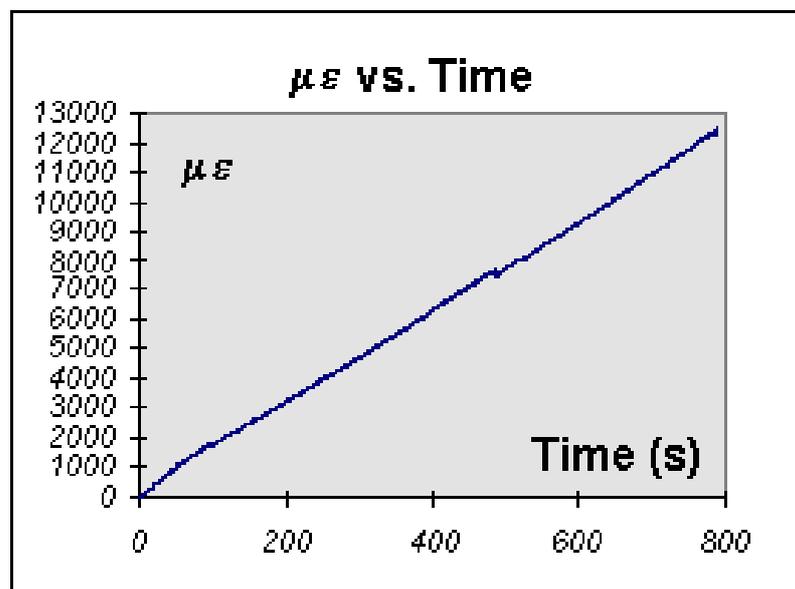


Figura 7

Microdeformazioni vs. Tempo

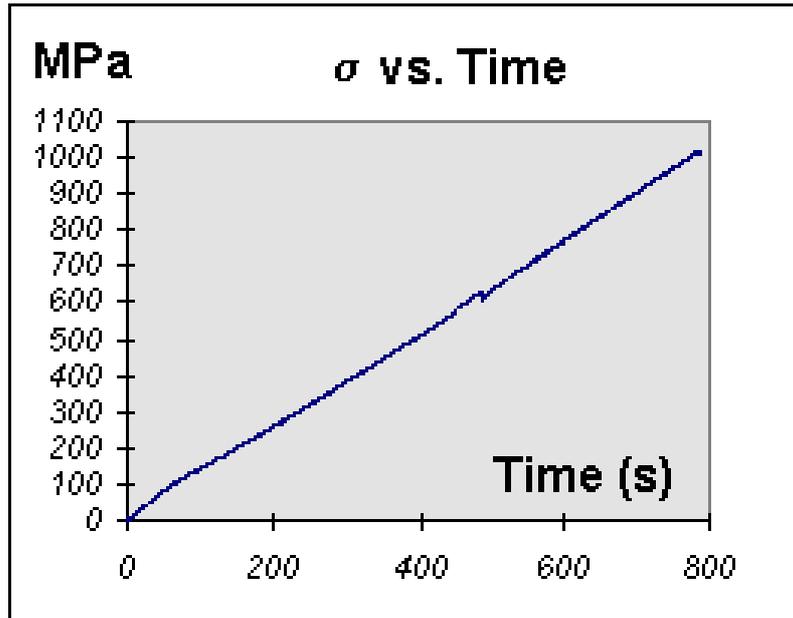


Figura 8

Sforzo vs. Tempo

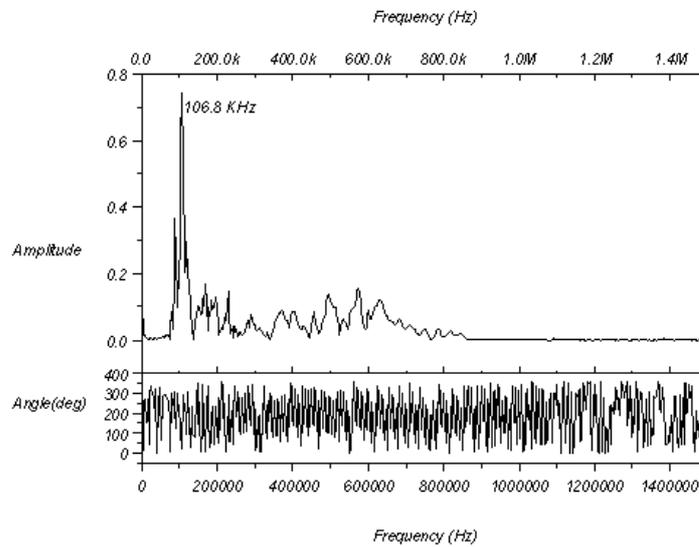


Figura 9

Impronta in frequenza dell'evento di EA correlato al Crack della Matrice

Per questa sequenza di laminazione le prime rotture microscopiche nella matrice avvengono all'incirca al 22÷25 % del carico di rottura del laminato, mentre le delaminazioni estese esplodono nell'intervallo compreso tra il 55 e 70% del carico a rottura per tutti i 10 campioni provati.

7. Laminato unidirezionale a 0°

La velocità di propagazione dell'onda nel laminato calcolata con il metodo della mina, è pari a 8460 m/s. I risultati confermano quanto ci si aspettava circa il comportamento di un laminato unidirezionale a 0° , ossia un comportamento lineare fino a rottura del tipo materiale fragile, che si manifesta in modo catastrofico visto il raggiungimento quasi contemporaneo della σ a rottura delle fibre. Osservando l'andamento degli eventi e dei conteggi di EA cumulativi, Fig. 10, si può vedere come ci sia una crescita degli eventi di emissione acustica su base esponenziale con emissioni a scariche avvicinandoci alla rottura. Ciò è dovuto principalmente all'unico modo di danno presente in questa tipologia di provini: la rottura delle fibre.

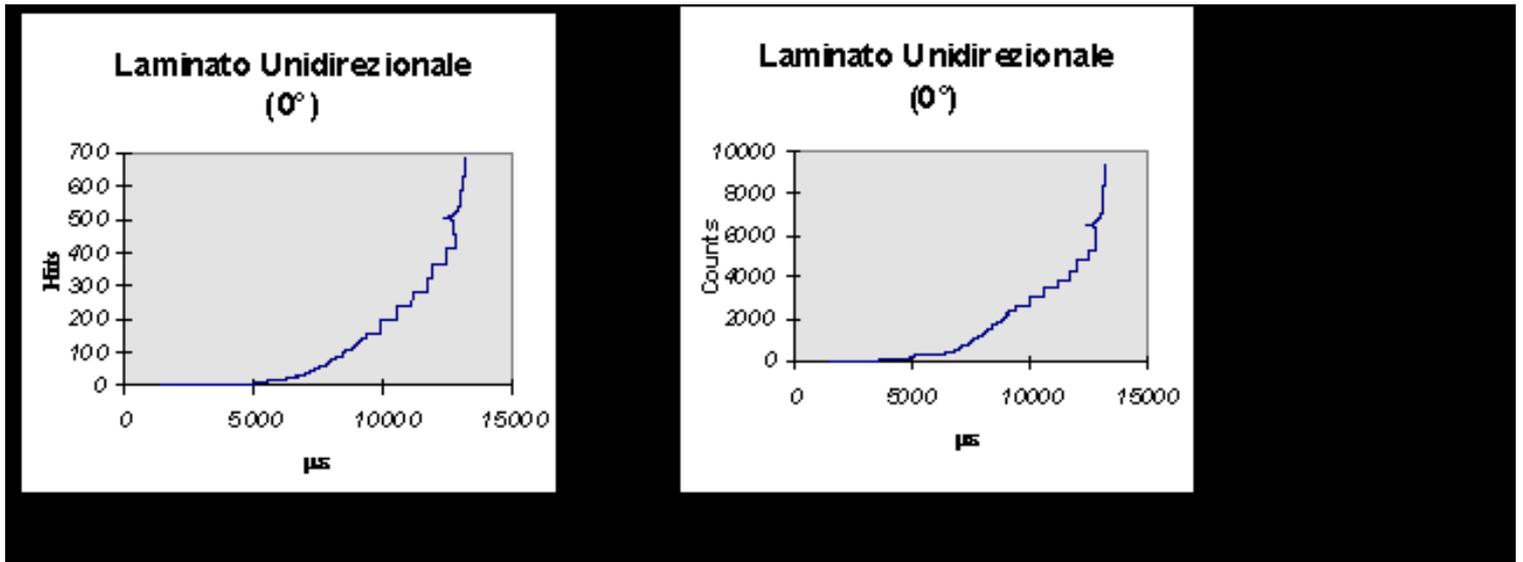


Figura 10

Eventi e conteggi cumulativi vs. μs

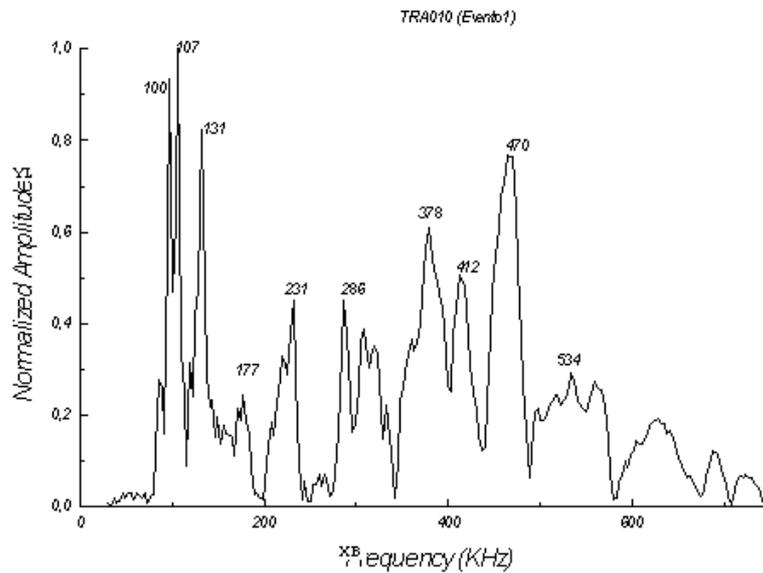


Figura 11

Impronta in frequenza (kHz) dell'evento di EA associato a rottura di fibre

Sono, invece, molto più esplicativi i grafici dell'analisi nel dominio delle frequenze. In Fig. 11 viene riportato uno spettro in frequenza di un evento di EA associabile alla comparsa di rotture di un numero finito di fibre dove le frequenze caratteristiche degli eventi sono normalizzate rispetto all'ampiezza massima. L'informazione più evidente è un'ampia banda compresa tra i 100 ed i 500 kHz con frequenze simili nei diversi eventi. Questa informazione potrebbe essere considerata come l'impronta della rottura di un numero discreto di fibre. Infatti per i provini unidirezionali a 90° e cross-ply la risposta in frequenza è contenuta nella banda ristretta 80-130 kHz associabile ad un numero discreto di crack

della matrice.

A conclusione di ciò, ragionando sui contenuti in frequenza di eventi di emissione acustica corrispondenti a diversi modi di danno, certamente sono distinguibili il crack della matrice e la rottura di fibre.

8. Conclusioni

È stata proposta una nuova metodologia di indagine basata sulla tecnica dell'Emissione Acustica per il riconoscimento dei modi di danno nei materiali compositi. La messa a punto della procedura è stata effettuata su compositi monofilamentari. L'analisi in frequenza dei segnali di EA accoppiata all'osservazione al microscopio ottico in luce polarizzata ha permesso il riconoscimento univoco degli eventi di EA associati alle rotture di fibre. L'applicazione di tale metodologia a strutture complesse, quali i laminati unidirezionali ed i cross-ply, ha messo in luce l'enorme potenzialità della tecnica per la discriminazione ed l'individuazione delle diverse tipologie di danno.

Attualmente si sta proseguendo il lavoro sia su provini monofilamentari, variando il tipo di fibra per avere indicazione dell'influenza di questa sul contenuto in frequenza del segnale registrato, sia su laminati, variando e i modi di applicazione del carico che le sequenze di laminazione, al fine di ottenere correlazioni tra impronte di EA e più complessi modi di danno.

Bibliografia

1. A. Calabrò, C. Esposito, P. Massarotti jr., P. Perugini, Analisi Sperimentale e Numerica del Danneggiamento Plastico nei Metalli e Ricerca del Danno Critico Attraverso la Tecnica dell'Emissione Acustica, IGF 97 : XIII Congresso Nazionale, 430-438.
1. R. L. Mehan and J. V. Mullin, Analysis of composite failure mechanisms using acoustic emissions, *J. Composite Materials*, 5, 1971, 266-269.
1. I. Narisawa and H. Oba, An evaluation of acoustic emission from fibre-reinforced composites -Part 2, *J. Materials Science*, 20, 1985, 4527-4531.
1. J. M. Berthelot, Relation between amplitudes and rupture mechanisms in composite materials, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 7, 1988, 284-299.
1. H. Suzuki, M. Takemoto, K Ono, The fracture dynamics in a dissipative glass-fiber/epoxy model composite with AE source simulation analysis, *J Acoustic Emission*, 14(1), 1996.
1. A. T. Di Benedetto, L. Nicolais, L. Ambrosio, J Groeger, Stress transfer and fracture in single fiber/epoxy composites, in Composite interfaces, *Hatsuo Hishida, Koenig Jack L. Eds.*, pag.47, 1987.
1. A. N. Netravali, L. T. T. Topoleski, W. H. Sachse, S. L. Phoenix, An acoustic emission technique for measuring fiber fragment length distributions in the single-fiber-composite test, *Composites science and technology*, 35, 1989, 13-29.
1. J. Anderson and V. Tamuzs, Fiber and interface strength distribution studies with the single-fiber composite test, *Composites science and technology*, 48, 1993, 57-63.
1. R. B. Clough and W. G. McDonough, The measurement of fiber strength parameters in fragmentation tests by using acoustic emission, *Composites science and technology*, 56, 1996, 1119-1127.
1. A. Calabrò, C. Esposito, A. Lizza, M. Giordano, A. D'Amore, L. Nicolais, An Acoustic Emission Characterization Of The Failure Modes In Polymer-Composite Materials, *Composites Science and Technology*, 1998, in press.
1. A. Calabrò, C. Esposito, A. Lizza, M. Giordano, A. D'Amore, L. Nicolais, A Frequency Spectral Analysis Of The Fiber Failure Ae Signal In A Single Fiber Composite, 1997 IEEE Ultrasonics Symposium, Toronto.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

Versione HTML realizzata da

