

L'EMISSIONE ACUSTICA SU PROVE DI TRAZIONE DOPO IMPATTO DI LAMINATI COMPOSITI TESSUTI

Carlo Santulli

CENTRO COMUNE DI RICERCA -ISIS - ATIA - ISPRA (VA)

Fabrizio Billi

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA - LA SAPIENZA

DIP. ICMMPM

SOMMARIO

Scopo del lavoro era osservare il comportamento a trazione dopo impatto di laminati compositi in fibra di vetro/poliestere e fibra naturale/poliestere impattati con l'emissione acustica: sono stati considerate tre serie di provini (juta, stuoia e tessuto), laminati carta su carta ed impattati con energie variabili tra gli 0 ed i 15 J. Tali prove rivestono un significato preliminare per il passaggio alla produzione di manufatti più complessi atti all'uso in compressione previsto (piano di calpestio, pannellature). Si tratta in particolare di verificare il degrado locale delle proprietà meccaniche, dovuto appunto all'impatto, e di correlarlo con l'innescò del danneggiamento durante la trazione, che conduce caratteristicamente a tipi di rottura diversi per i tre materiali ed alquanto anomali rispetto al consueto comportamento dei laminati compositi tradizionali. A tale scopo si è rivelato utile il monitoraggio dell'emissione acustica: in particolare la localizzazione degli eventi e la distribuzione delle loro ampiezze hanno fornito i risultati più promettenti, consentendo di valutare in modo semiquantitativo il livello di degradazione conseguente alle diverse energie di impatto.

I programmi futuri prevedono l'accoppiamento sugli stessi laminati dell'emissione termica adiabatica con l'emissione acustica allo scopo di un più puntuale monitoraggio delle fasi di transizione da un livello di danneggiamento ad uno più grave durante le prove di trazione, sempre nell'ottica di un uso combinato e sinergico delle diverse tecniche di monitoraggio in tempo reale e supporto per le prove meccaniche sui materiali innovativi.

INTRODUZIONE

L'interesse tuttora presente, anche in Italia, per la tecnica dell'emissione acustica, come risulta ad es. dai lavori tesi alla normalizzazione tecnica in questo settore, è testimoniato dal suo attuale utilizzo per il monitoraggio strutturale in tempo reale, come strumento di controllo di processo ed in supporto a prove meccaniche convenzionali e non.

Soffermandoci in particolare su quest'ultimo punto, tale tecnica si è rivelata capace di valutare l'evoluzione del danneggiamento sui materiali compositi, sia a matrice polimerica che metallica (1,2), durante una sollecitazione di trazione. In letteratura è possibile reperire informazioni sul suo uso per la misurazione con elevato grado di precisione del limite pseudo-elastico (3) del materiale e del limite di utilizzo possibile, informazione che riveste un particolare interesse da un punto di vista industriale. Queste possibilità, molto reali qualora si tratti di laminati unidirezionali o quasi-isotropi, specie nel caso delle fibre di carbonio, meritano senza dubbio un più accurato studio nell'ipotesi sia di laminati con sequenze di strati particolari (ad es. per sollecitazione a 90° rispetto alla direzione delle fibre), che di materiali con struttura marcatamente tridimensionale, come nel caso dei compositi tessuti.

Il punto tuttavia cruciale dell'investigazione con l'emissione acustica dei compositi rimane pur sempre la caratterizzazione dei meccanismi di rottura che si verificano gradatamente durante la trazione. Un approccio improntato ad una rigida schematizzazione dei diversi fattori conseguenti (rotture di matrice, delaminazioni, rotture di fibre, debonding, ecc.) con l'utilizzo in funzione discriminante di diversi parametri del segnale (ampiezza, durata, ecc.) (4), sembra oggi aver ceduto il passo ad una maggiore consapevolezza circa l'utilizzo in funzione statistica di tali parametri con il duplice senso di controllo di qualità e di

verifica *in situ* del comportamento meccanico, oltre che di quantificazione e successiva verifica delle zone di difficoltà del materiale, tentando di individuarne le cause ed i possibili rimedi. Il modo di concatenazione infatti dei diversi fenomeni di danneggiamento è spesso caratteristico del materiale e conduce sia ad un comportamento in emissione acustica tipico che ad una rottura altrettanto facilmente riconoscibile (5,6). Il vantaggio di un tale approccio è la sua adattabilità all'utilizzo combinato con altre tecniche di supporto alla prova meccanica (es., termografia, emissione termica, metodi ottici) e di valutazione *post-mortem* delle problematiche inerenti al materiale, conducendo ad un'eventuale correzione della formulazione dello stesso (7,8).

MATERIALI E METODI

Le tre serie di provini considerati erano laminati compositi tessuti, rispettivamente impilati con 17 strati di stuoia e carta, con 22 strati di tessuto e carta e con 13 strati di juta e carta, fino ad uno spessore complessivo di circa $3,5 \pm 2\%$ mm, uguale per le tre serie. Le altre dimensioni dei campioni erano di 200x20 mm, con tratto utile di $122 \pm 2\%$ mm. I laminati, dopo essere stati impattati con energie di 0, 5, 7.5, 10 o 15 J, venivano sollecitati a trazione fino a rottura. Per ogni composito ed energia di impatto venivano considerati nell'analisi tre dei provini esaminati.

Durante la sollecitazione, effettuata da una macchina universale ZWICK 1488 con testa di carico di 100 kN in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min, l'emissione acustica veniva acquisita con un sistema PAC LOCAN-AT, ponendo due sensori entrambi sulla faccia del provino non impattata a +35 mm e -35 mm dal centro dell'impatto. L'amplificazione totale del sistema risultava di 60 dB, mentre la frequenza centrale dei sensori era di 150 kHz e la finestra di acquisizione 100-300 kHz. La soglia veniva impostata a 45 dB, cercando un compromesso tra la necessità di evitare la saturazione del sistema e quella di una sufficiente sensibilità del sistema, intesa come rapporto segnale/rumore.

RISULTATI

I dati meccanici medi ottenuti dalle diverse serie di provini vengono mostrati nelle fig.1 (carico di rottura) e 2 (modulo elastico). Può essere interessante notare come nella stuoia non sempre la presenza di un impatto a bassa velocità (5 J) provochi una marcata riduzione delle caratteristiche meccaniche a trazione del materiale, che invece risulta verificarsi con chiarezza nel passaggio dai 5 ai 7.5 J per tutti e tre i compositi. Un certo recupero è tuttavia presente nel caso dell'impatto a 10 J.

La spiegazione può essere nel particolare tipo di materiale utilizzato che si presta molto meglio alla resistenza alla compressione normale anche localizzata che alla trazione e nella struttura del tessuto che consente un riequilibrio delle tensioni interne provocate dalla sollecitazione. Va notato peraltro come anche con impatti di 15 J siamo ben lontani dall'energia di perforazione del materiale; i valori di carico di rottura a trazione mostrano in questo caso una riduzione media rispetto al non impattato del 40%.

Per la misura del modulo elastico medio dei materiali in esame, poiché solo in pochi casi la curva sforzo-deformazione mostra dei cambiamenti di pendenza apprezzabili, risultando peraltro piuttosto lontana dalla linearità fin dall'inizio della sollecitazione, si è fatto uso del metodo suggerito in (9), considerando come valore del modulo elastico quello ottenuto mediando i valori forniti da tutti i punti compresi tra il 20 e l'80% del carico di rottura del materiale. Si può osservare dalla fig.2 che il modulo della stuoia -più alto in valore assoluto- diminuisce gradatamente con l'aumentare dell'energia di impatto, mentre per la

juta l'impatto con energie più basse dà un certo incremento al modulo stesso, con un'inversione di tendenza per gli impatti ad energie più alte. Il tessuto mostra una marcata perdita di rigidità solo nel caso dell'impatto a 15 J.

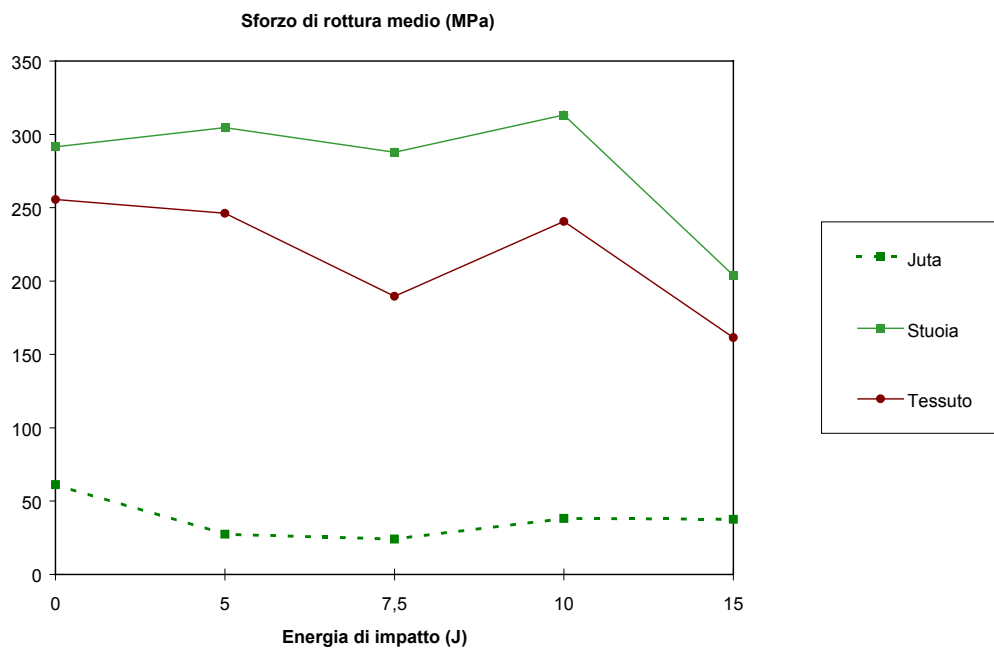


fig.1 Carico di rottura a trazione medio per i tre materiali alle diverse energie di impatto

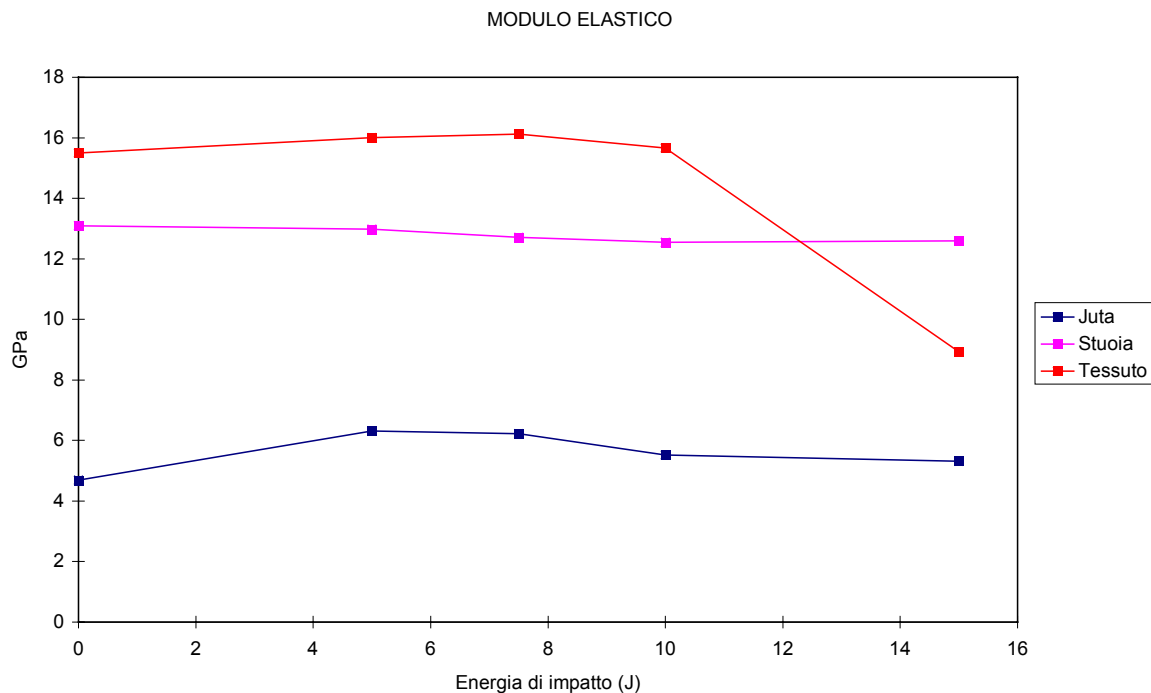


fig.2 Modulo elastico medio per i tre materiali alle diverse energie di impatto

Le modalità di rottura giustificano questi risultati: la stuoia mostra a trazione una notevole tendenza alla delaminazione e ad una vera e propria “apertura” di taglio del provino, accrescendone la sezione durante la prova in modo vieppiù evidente con le maggiori energie di impatto. La iuta invece si rompe essenzialmente per strappo, approssimativamente coincidente con il diametro centrale dell'impatto, ove questo sia

presente. La forza di adesione tra gli strati é qui molto più grande della resistenza degli stessi alla trazione e non desta stupore il fatto che un impatto a bassa velocità possa irrigidire gli strati superficiali, aumentandone la mutua capacità di adesione. Il tessuto infine presenta un tipo di collasso più simile a quanto osservabile nei classici laminati compositi, cioè essenzialmente per fuoriuscita delle fibre dalla matrice o per lesioni della trama che trascinano a rottura l'ordito. Il materiale poco rigido già in partenza ripartisce in modo efficace le tensioni presenti durante la sollecitazione, tranne che per l'impatto a più alta energia; va notato comunque che i valori del carico di rottura mostrano qui la più ampia escursione da un valore di impatto ad un altro, il che senza dubbio va fatto risalire al peso dominante delle fibre pretensionate nella rottura, la cui percentuale é spesso molto variabile col campione oltre che con l'entità dell'impatto.

Un tipico approccio al monitoraggio delle prove di trazione con emissione acustica consiste nell'osservazione delle curve conteggi cumulativi-deformazione, le informazioni tratte dalle quali integrano in molti casi efficacemente quelle provenienti dalle curve sforzo-deformazione. Questo può valere a maggior ragione in questi materiali, con comportamento viscoelastico fin dall'inizio e nei quali la componente plastica difficilmente prevale al di là di una certa sollecitazione.

Osserviamo però a titolo di esempio le figg.3 e 4, relative rispettivamente ad un provino juta-carta non impattato e ad un provino stuoia carta impattato invece a 7.5 J. Nel primo caso (fig.3) due valori limite non evidenti dalla curva σ - ϵ , lo divengono invece dall'osservazione rispettivamente del carico per cui l'attività acustica inizia, e di quello per cui la curva dei conteggi cumulativi cambia pendenza. Tali valori possono essere descritti il primo come *limite di utilizzo* del materiale ed il secondo come un vero e proprio *limite di proporzionalità*.

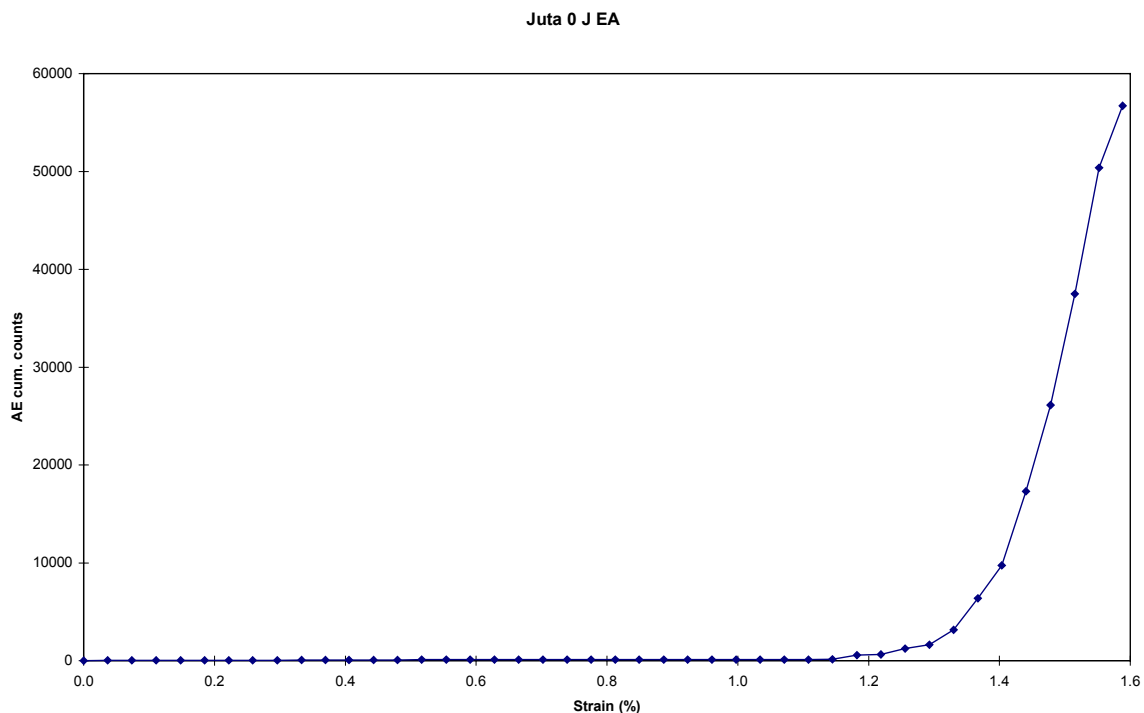


fig. 3 Curva conteggi cumulativi EA- deformazione per la juta non impattata

Non sempre a dire il vero il riconoscimento delle tre fasi del comportamento del materiale a trazione si presenta così agevole; nel caso in fig.4: qui la presenza di una grande attività

acustica porta alla saturazione frequente delle apparecchiature ed ad una perdita di dati, sicché, se la misura di un limite di utilizzo a trazione del laminato sembra possibile dall'osservazione del cambiamento di pendenza della curva di emissione acustica, rilevato intorno ai 150 MPa, il limite di proporzionalità rimane invece, a causa dei predetti fenomeni, indefinibile. Si tratta di una difficoltà che ci si propone di eliminare nel prosieguo di questa sperimentazione con l'utilizzo di velocità di trazione differenti per i diversi materiali e per le diverse velocità di impatto, oltre che con il ricorso a filtri logici che selezionino in partenza i soli segnali meccanicamente rilevanti (filtro sui conteggi o sull'energia).

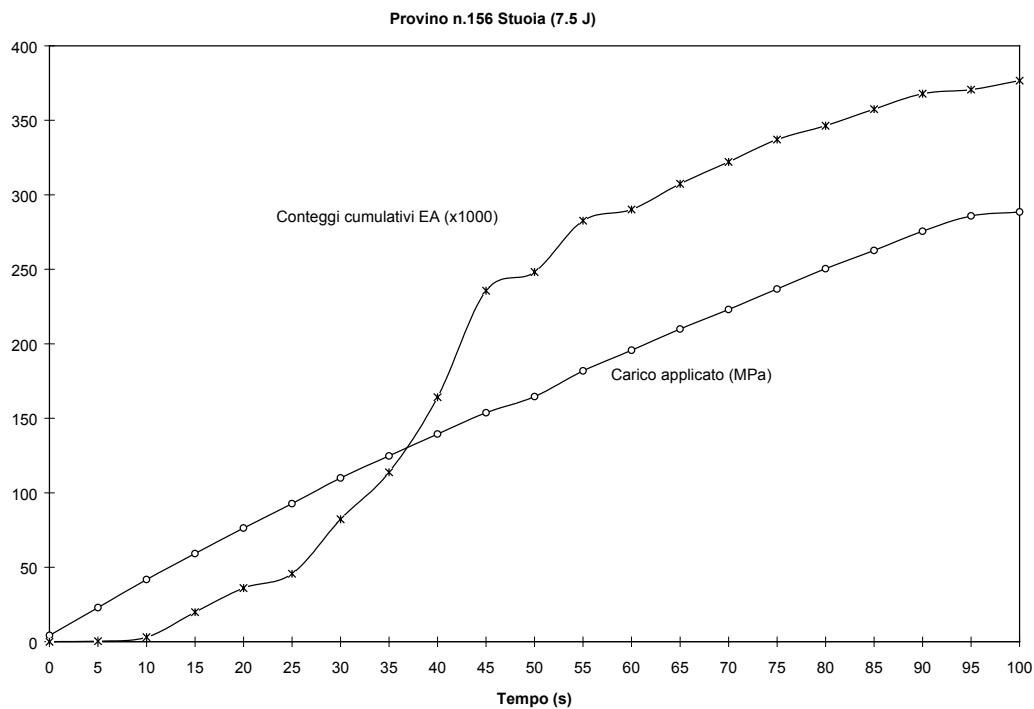


fig.4 Sforzo e conteggi cumulativi di EA rispetto alla deformazione per la stuoia impattata a 7.5 J

Un notevole riscontro alla validità dell'analisi di emissione acustica viene comunque dai grafici di localizzazione lineare degli eventi. In questo caso sono stati riportati i diagrammi relativi a provini non impattati (figg. 6, 8 e 10, rispettivamente per la stuoia, il tessuto e la juta) e quelli relativi a provini impattati con la massima energia (15 J; fig.7, 9 ed 11, c.s.). Tale scelta era motivata ad indicare la possibilità di discriminazione massima insita nella tecnica di monitoraggio, proponendo per così dire il caso migliore e quello peggiore.

Un'osservazione anche qualitativa dei diagrammi, che rappresentano la zona dei provini compresa tra le ascisse 10 e 60 mm, ove in 0 è posto il centro del sensore n.1 ed in 70 quello del sensore n.2, consente di rilevare nel caso dei provini non impattati una distribuzione abbastanza casuale degli eventi di emissione acustica su tutta la zona presa in considerazione, mentre nel caso dei provini impattati l'area di impatto è chiaramente individuabile come zona di addensamento degli eventi. L'effetto della trazione e quindi del tipico concentrarsi degli eventi sulla mezzeria del provino (qui ascissa 35 mm) pare invece scarsamente avvertibile, a causa probabilmente delle modalità atipiche della frattura di questi materiali.

Sviluppi ipotizzabili per questa analisi della localizzazione lineare sono la misura con essa del diametro dell'impatto a rottura, confrontabile anche con quanto osservabile con tecniche ottiche o fotografiche prima dell'inizio della prova.

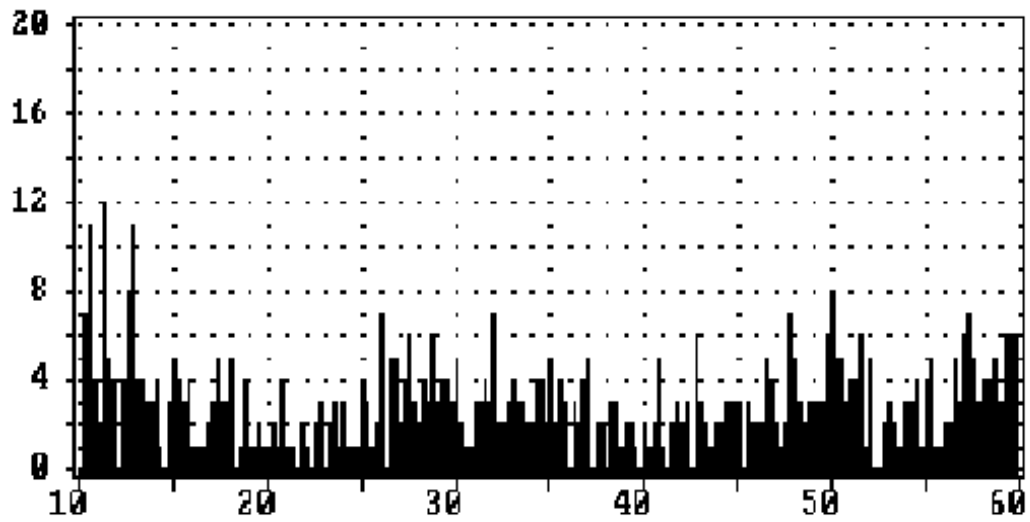


fig.5 Diagramma di localizzazione per un provino di stuoia non impattato

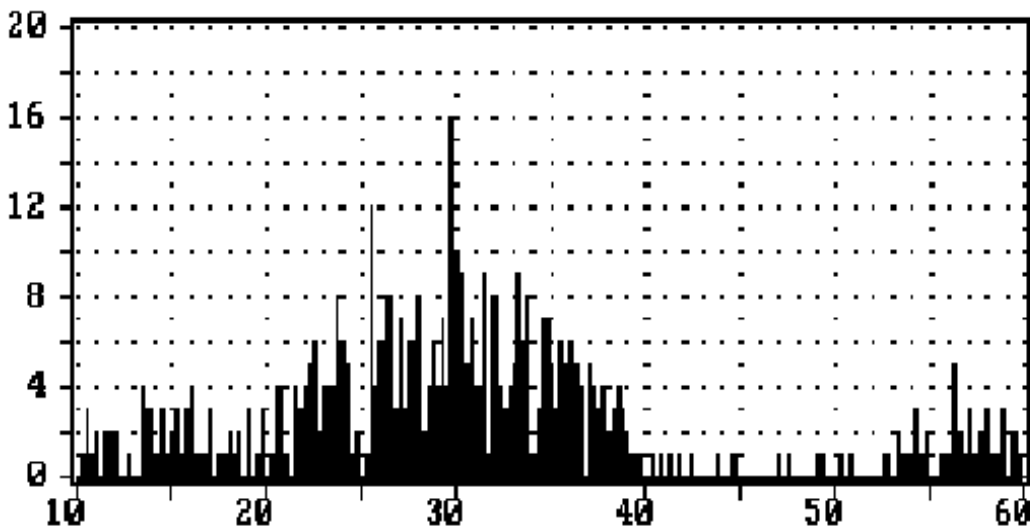


fig.6 Diagramma di localizzazione per un provino di stuoia impattato a 15 J

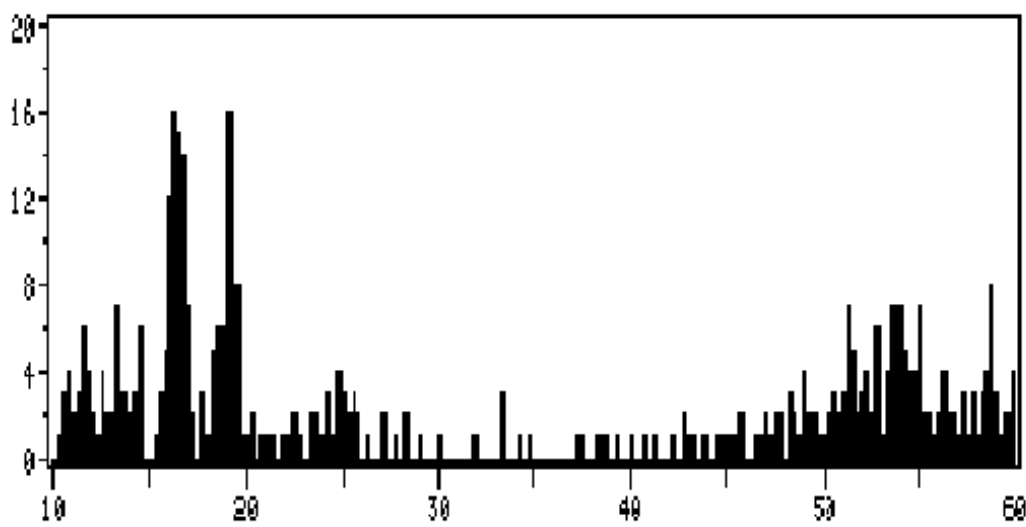


fig.7 Diagramma di localizzazione per un provino di tessuto non impattato

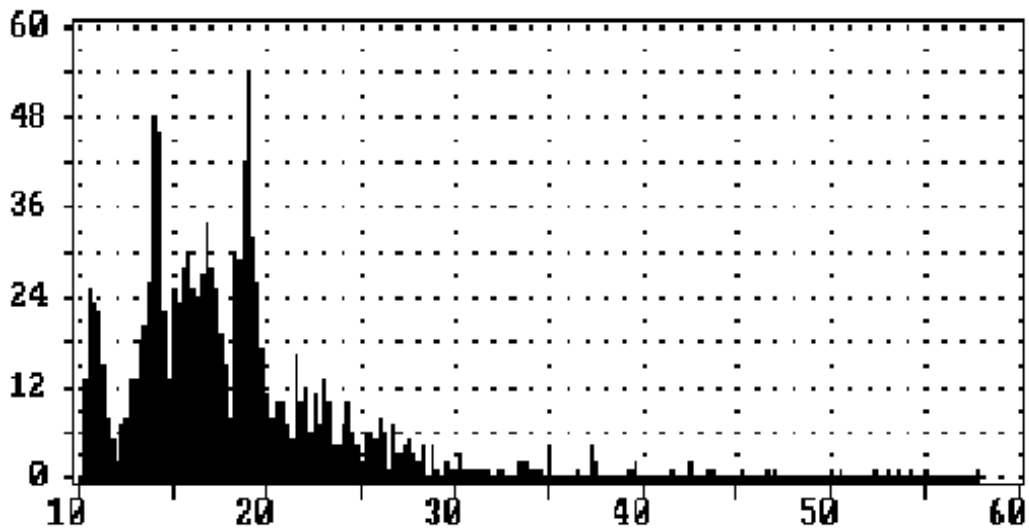


fig.8 Diagramma di localizzazione per un provino di tessuto impattato a 15 J

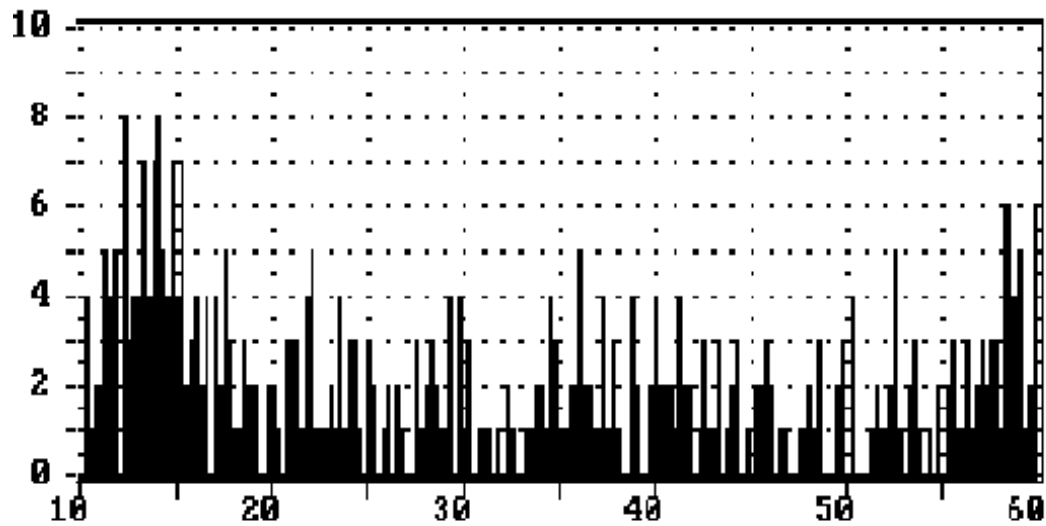


fig.9 Diagramma di localizzazione per un provino di juta non impattato

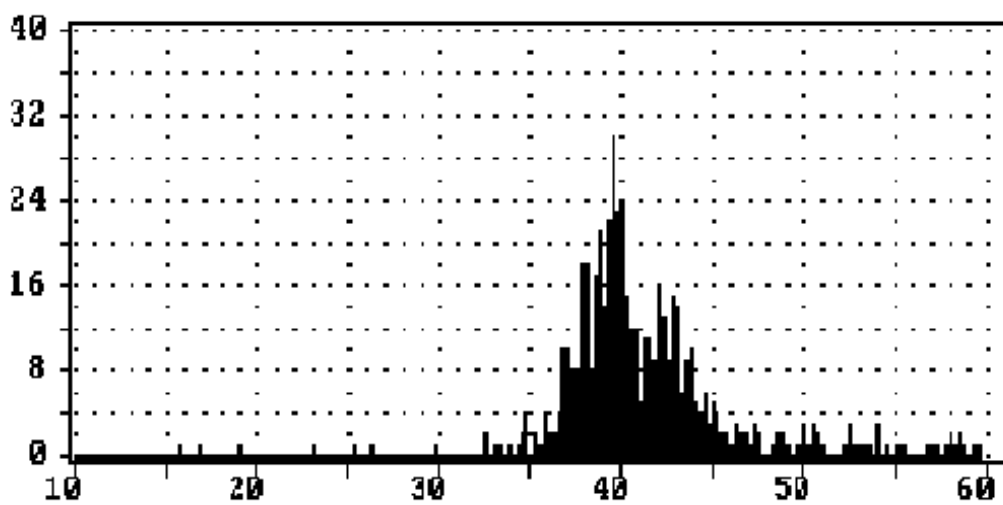


fig.10 Diagramma di localizzazione per un provino di juta impattato a 15 J

E' stata infine riportata, per un inizio di caratterizzazione, l'analisi effettuata relativamente alle ampiezze medie degli eventi rilevati in cinque diversi momenti della sollecitazione, cioè al $20 \pm 1\%$ del carico di rottura poi ancora al $40 \pm 1\%$, $60 \pm 1\%$, $80 \pm 1\%$ ed infine

nell'ultimo 2% dello sforzo che prelude al collasso del materiale. Tali ampiezze sono state registrate negli istogrammi di fig.11 (juta), fig.12 (stuoia) e fig.13 (tessuto), riportandole per maggior leggibilità dei risultati come ampiezze relative alla soglia impostata.

Ciò che si può desumere da una prima valutazione di quanto ottenuto viene per maggior chiarezza riportato nei punti seguenti:

- **juta:** nella juta non impattata vi sono pochissimi eventi e di ampiezze al limite della soglia fino al 60% del carico di rottura, mentre per i provini impattati una rilevante percentuale di eventi di alta ampiezza anche a basso carico si nota proprio per quella energia di impatto che produce un inatteso recupero nei valori di carico di rottura (cfr. fig.1), cioè il 10 J, il che indica un qualche fenomeno di efficace ripartizione del danneggiamento. In tutti i casi, tranne che nel 15 J, dove l'effetto dell'impatto ha una rilevanza maggiore, le più alte ampiezze non si verificano in conseguenza della rottura, che avviene infatti quasi senza coinvolgimento delle fibre orientate nel verso della trazione.

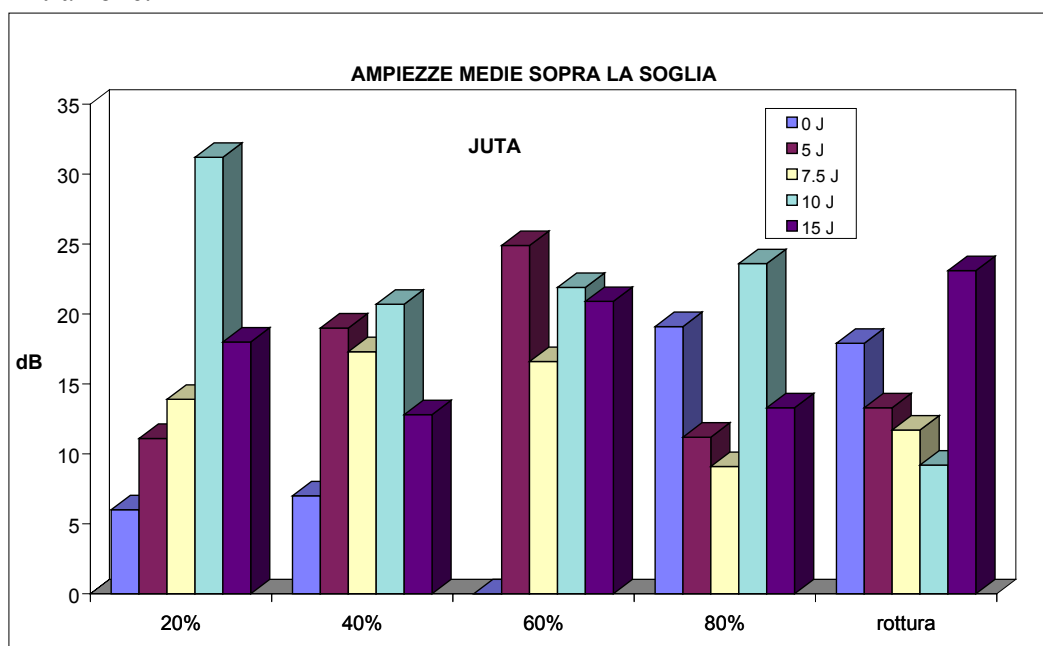


fig.11 Ampiezze medie degli eventi di emissione acustica per la juta

- **stuoia:** qui le massime ampiezze e quindi il massimo lavoro delle fibre si notano in modo crescente dal 40 all'80% del carico di rottura. Invece in prossimità della rottura prevalgono ampiezze molto più basse con prevalenza dell'effetto di trazione obliqua e di aumento della sezione di applicazione del carico, che viene accresciuto dagli inneschi di delaminazione creati dall'impatto (in effetti sul composito non impattato la riduzione di ampiezza alla rottura è molto meno avvertibile)

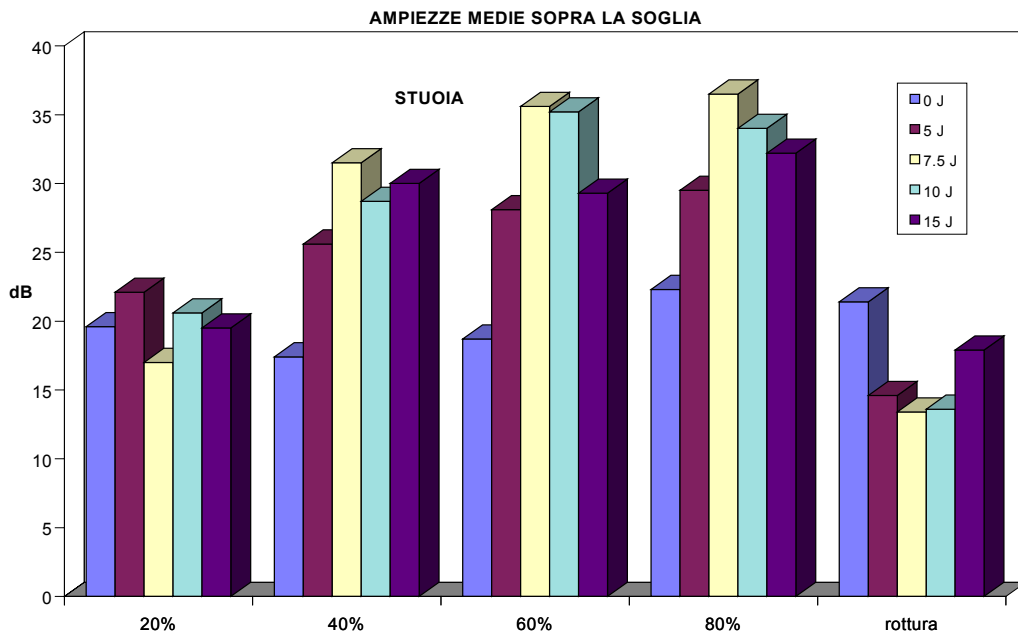


fig.12 Ampiezze medie degli eventi di emissione acustica per la stuoia

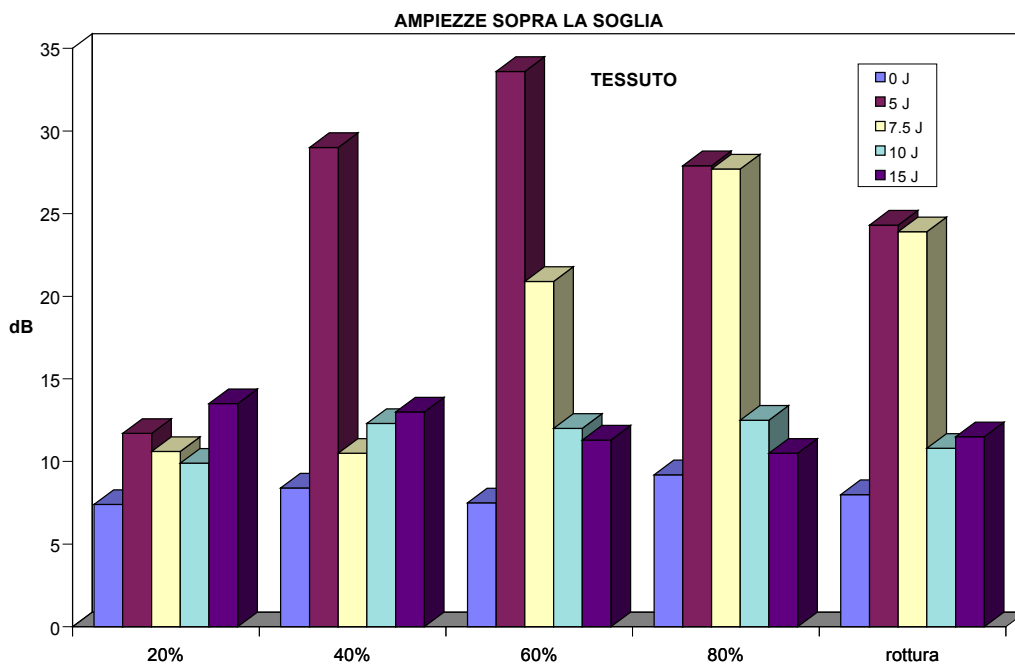


fig.13 Ampiezze medie degli eventi di emissione acustica per il tessuto

- tessuto:** qui invece il maggior lavoro delle fibre indicato dalle alte ampiezze, dovuto alla rottura di più fibre pretensionate e volto a mantenere una stessa rigidezza al laminato, si nota in particolare nel caso dei 5 e dei 7.5 J. Per energie maggiori tende a prevalere anche a rottura l'effetto delaminante dell'impatto sulla trazione pura, e le ampiezze medie sono più basse; questo potrebbe essere dovuto anche alla presenza di più fibre fuoriuscite dal tessuto o addirittura già rotte rispetto ai casi precedenti.

CONCLUSIONI

Tentando un'analisi dell'emissione acustica su prove di trazione dopo impatto di provini compositi tessuti e raffrontandole con i dati meccanici, va osservato che la localizzazione degli eventi insieme con la distribuzione delle ampiezze degli eventi stessi hanno fornito i risultati più promettenti. Questo specie in relazione alle variazioni in seguito all'impatto del carico di rottura e del modulo elastico dei materiali (juta/carta, stuoia/carta, tessuto/carta) le cui modalità di frattura si sono rivelate tra loro caratteristicamente differenti. Il proseguimento dello studio riguarderà, oltre che l'utilizzo combinato di altre tecniche per lo studio dell'evoluzione del danneggiamento insieme con l'emissione acustica allo scopo di evidenziare l'effettiva portata dell'impatto sulla resistenza del composito, la possibilità di effettuare il riconoscimento, attraverso la localizzazione dei segnali, di zone di difficoltà del materiale, evidenziando il peso di tali difettosità nel comportamento meccanico a trazione.

BIBLIOGRAFIA

- (1) E. Gariboldi, C. Santulli, F. Stivali, M. Vedani.
Evaluation of tensile damage in particulate-reinforced MMCs by acoustic emission.
Scripta Materialia vol.35 no.2 pp.273-277 (July, 15th,1996)
- (2) C.Santulli.
Correlation between mechanical behaviour and acoustic emission data during tensile tests of metal matrix composites. Annual report 1995.
CEC-JRC Tech.Note No.I.96.33
- (3) A. Rotem, J. Baruch.
Determining the load-time history of fibre composite materials by acoustic emission.
J. of Materials Science no. 9 (1974) pp.1789 - 1798.
- (4) J.M. Berthelot, J. Rhazi.
Different Types of Amplitude Distributions in Composite Materials.
Proceedings of Second International Symposium on Acoustic Emission from Reinforced Plastics.
Montreal, Canada July 1986 pp.96 - 103.
- (5) J. Block.
Characterization of Damage Progression in Fibre - reinforced Composites by Acoustic Emission.
Engineering applications of new composites, 1986, pp. 341 - 346.
- (6) C. Santulli.
Significato strutturale delle distribuzioni degli eventi di emissione acustica durante prove di trazione di materiali compositi.
8a Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive monitoraggio diagnostica. Torino 17-19 ottobre 1995
- (7) O. Ceysson, M. Salvia, L. Vincent.
Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis.
Scripta Materialia vol.34 no.8 pp.1273-1280
- (8) C. Santulli.
Application of NDT techniques to real-time fatigue monitoring of carbon-epoxy composites
EU-JRC Tech.Note No.I.96.176
- (9) J.R. Mitchell, M.J.Fasnacht, J.E. Dombach, B.K.Winkler.
The development of a standard testing procedure to yield an acoustic emission versus strain curve.
AECM4, Seattle, Wa. - USA, 27 - 31 July 1992, pp.209-228.