

Studio del comportamento di laminati compositi quasi isotropi soggetti ad impatto a bassa velocità

A. Zucchelli, G. Minak, F. Cesari, V. Dal Re, S. Curioni

DIEM – Facoltà di Ingegneria - Università degli Studi di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna

Sommario

Il presente studio illustra i risultati preliminari di una ricerca che si inserisce all'interno di un più ampio contesto nazionale inerente l'analisi del comportamento dei laminati in materiale composito. In particolare i risultati che vengono presentati riguardano gli studi condotti sul comportamento all'impatto a bassa velocità da parte di laminati compositi a matrice polimerica e rinforzati mediante fibre. Gli studi sono stati sviluppati sia mediante indagini sperimentali che mediante lo sviluppo di modelli numerici. Le indagini sperimentali sono state condotte in due fasi ed hanno interessato laminati compositi in configurazione quasi isotropa. La prima fase sperimentale ha riguardato le prove di impatto a bassa velocità. Le prove sperimentali di indentazione sono state monitorate mediante la tecnica delle emissioni acustiche al fine di poter valutare il progredire del danno e di poter definire una funzione che stima il danno accumulato. La seconda fase sperimentale è stata condotta eseguendo prove di trazione sui compositi indentati al fine di poterne valutare la resistenza residua. Grazie alle informazioni raccolte nel corso delle due fasi sperimentali è stato possibile identificare una correlazione tra il danno complessivo indotto durante l'indentazione ed il carico di rottura residuo in condizione di trazione. Lo sviluppo dei modelli numerici ha riguardato lo studio di una metodologia tale da riprodurre il comportamento dei laminati compositi soggetti ad impatto a bassa velocità ed a carichi di trazione. La modellazione numerica è stata eseguita mediante l'impiego congiunto di elementi ortotropi ed equazioni di vincolo tra gli elementi stessi grazie ai quali è stato possibile ricostruire in modo organico la struttura dei laminati compositi. Sono stati sviluppati anche algoritmi di simulazione del comportamento del materiale soggetto ad indentazione tali da tenere conto del progredire del danno all'interno dei laminati secondo i tre principali modi di guasto: rottura della matrice, delaminazione e rottura delle fibre. Gli algoritmi si basano su criteri di rottura derivati dalla teoria di Hashin generalizzata e contengono lacune costanti che devono essere determinate mediante il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali. La conoscenza di tali costanti è la premessa essenziale per rendere operativa la metodologia sviluppata anche per la progettazione di componenti a morfologia complessa.

1 – Introduzione

Da alcuni anni a livello nazionale è stato sviluppato un intenso programma di ricerca finalizzato allo studio del comportamento dei laminati compositi in differenti configurazioni costruttive e di assemblaggio e soggetti a differenti condizioni operative. In particolare lo studio che viene qui presentato riguarda il comportamento di laminati compositi in configurazione quasi isotropi soggetti ad impatto a bassa velocità e della loro resistenza residua a trazione. La letteratura inerente lo studio del comportamento all'impatto a bassa velocità dei laminati in composito presenta importanti studi sia di carattere sperimentale [1-25] che numerico [26-39]. Collocandosi nello scenario internazionale il presente lavoro approfondisce i seguenti temi sperimentali e numerici:

- lo studio del progredire del danno indotto dal processo di indentazione mediante il rilevamento delle emissioni acustiche;
- la definizione di una funzione che tiene conto delle informazioni di natura meccanica ed acustica e che raccoglie la storia del danno indotto al materiale;
- il legame esistente tra il livello del danno indotto dall'indentazione con la resistenza residua del laminato stesso rispetto a carichi agenti sul suo piano principale
- lo studio di una metodologia parametrica per la modellazione numerica del danneggiamento progressivo di un laminato composito soggetto ad indentazione

2 – Analisi sperimentale

Il lavoro sperimentale è stato sviluppato in due fasi: nel corso della prima fase sono state indentate le lastre in laminato composito; nella seconda fase sono state condotte prove con carichi agenti nel piano principale del laminato al fine di determinarne la resistenza residua. Le prove condotte sono state monitorate mediante trasduttori per il rilevamento delle emissioni acustiche (EA). Il lavoro ha

permesso di evidenziare una correlazione tra il danno indotto durante la fase di impatto a bassa velocità e la resistenza residua a trazione nel piano principale del laminato.

2.1 – Materiali e Metodi per le prove sperimentali

I materiali utilizzati per lo studio sono laminati compositi quasi isotropi e simmetrici costituiti da 8 lamine con lay-up $[0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ]_s$ in grafite-epossido (fibre T-300) con spessore complessivo pari a 1.6 mm le cui caratteristiche principali sono riassunte in tabella 1.

tabella 1: proprietà di ciascuna lamina nel riferimento locale

V_f	E_l	E_t	G_{lt}	ν	σ_{lTR}	σ_{lCR}	σ_{tTR}	σ_{tCR}	τ_{lTR}	σ_{zTR}	σ_{zCR}	τ_{lzR}	τ_{tzR}
	GPa	GPa	GPa		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
60%	138	11	5.5	0.28	1270	1130	30	141	63	94	290	63	30

Per le prove di impatto a bassa velocità, nel seguito indicate come prove di indentazione, sono state utilizzate lastre quadrate aventi lunghezza di 250 mm per lato. Le prove sono state condotte mediante l'utilizzo della attrezzatura rappresentata in figura 1 che consente di ottenere un'area utile del provino di forma circolare e condizioni di vincolo di incastro perfetto. L'indentatore utilizzato è sferico e di diametro 14mm. L'attrezzatura è stata dotata di fissaggi elastici per il posizionamento dei trasduttori per il rilevamento delle emissioni acustiche.

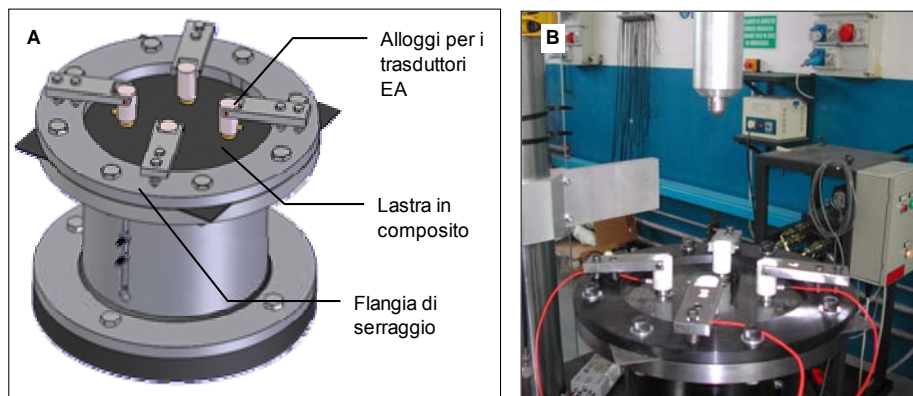


Figura 1: Complessivo dell'afferraggio per lastre utilizzate in prove d'indentazione (A) e configurazione sperimentale (B)

La macchina di prova utilizzata è una INSTRON servo idraulica modello 8033 abbinata ad una cella di carico da 25kN. Per il monitoraggio delle emissioni acustiche si è utilizzata un'attrezzatura della Physical Acoustic Corporation (PAC); sono stati utilizzati 4 trasduttori della serie PAC R15 con preamplificazione pari a 40 dB posizionati sulla superficie della lastra da indentare come mostrato in figura 1. La soglia di rilevamento delle emissioni acustiche è stata fissata a 40 dB e sono state condotte prove di taratura mediante un dispositivo di pulsazione a frequenza ed ampiezza nota e seguendo la prova standard di Nielsen per determinare l'attenuazione dei segnali e le risposte in frequenza dei trasduttori. Le prove sono state svolte in controllo di spostamento ad una velocità di 0.05 mm/sec e interrotte al raggiungimento di prefissati livelli di indentazione. I livelli di indentazione raggiunti sono tre: bassa indentazione (serie B), indentazione media (serie M) ed indentazione profonda (serie P), dove questa ultima



Figura 2: apparato sperimentale per le prove di trazione con particolare di montaggio dei trasduttori per le emissioni acustiche

corrisponde alla condizione di sfondamento della lastra da parte dell'indentatore.

Per quanto riguarda le prove di resistenza residua le lastre già indente sono state tagliate seguendo tre differenti direzioni di resezione ottenendo quindi tre lay-up per le lastre da sottoporre a test di trazione. In particolare sono stati ricavati provini le cui dimensioni sono 40mm x 250 mm e per i quali l'orientamento delle fibre poste negli strati superficiali è 0°, a 90° e a 45°. I campioni deputati allo studio della resistenza residua sono stati ricavati dalle lamine materiale già danneggiate sezionandole nella parte centrale ovvero quella interessata dal danno provocato dall'indentatore secondo tre direzioni.

I provini ottenuti sono quindi stati dotati alle estremità di tabs in alluminio per evitare effetti di intaglio dovuti al fissaggio del provino negli afferraggi. Le prove di resistenza residua sono state condotte applicando il carico nel piano principale del provino tramite l'utilizzo di un'apposita attrezzatura mostrata in figura 2. Anche per queste prove è stata effettuata l'acquisizione delle emissioni acustiche mediante l'utilizzo di due trasduttori dello stesso tipo di quelli impiegati nelle prove di indentazione che sono stati fissati nella zona centrale dei provini. I test di trazione sono stati condotti impostando il controllo di spostamento con una velocità di 0.02 mm/sec.

2.2 – Risultati delle prove sperimentali

Al termine delle prove di indentazione sono state condotte analisi visive relative alla zona danneggiata.

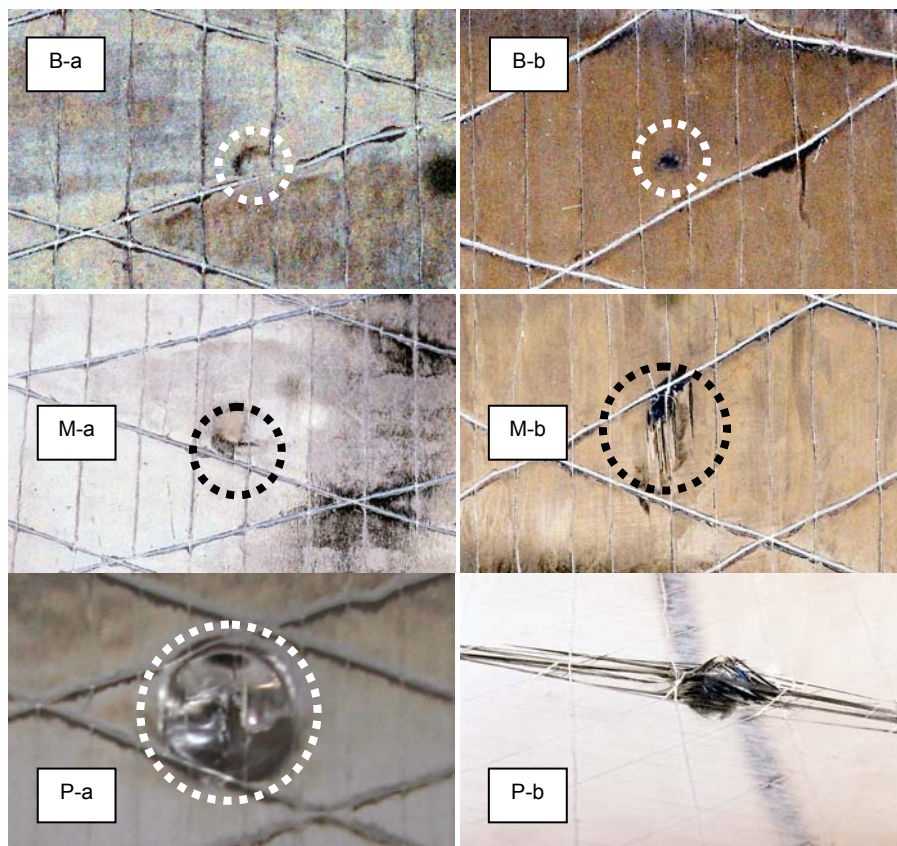


Figura 3: particolari della zona danneggiata per i tre livelli di indentazione (B, M e P) sul lato indentato (a) e quello opposto (b)

In figura 3 sono evidenziate sei immagini relative all'impronta residua lasciata dall'indentatore sulla lamina rispettivamente sul lato superiore (a diretto contatto con l'indentatore) e sul lato inferiore nei casi di bassa indentazione (B-a, B-b), indentazione media (M-a, M-b) ed indentazione profonda (P-a, P-b). Sul lato superiore del provino è sempre possibile riscontrare una impronta concava ben definita e localizzata, inoltre dall'ispezione visiva non sono riscontrabili altri particolari effetti di danno. Sul lato opposto si riscontra invece una impronta convessa ben definita ed in aggiunta si rilevano consistenti rotture di matrice e distacchi di lamine, distacchi di parti di lamine nel loro stesso piano principale e rotture di fibre. Questo fatto è stato imputato all'effetto di sfondamento che l'indentatore produce nelle lamine con le quali non è a diretto contatto fin dall'inizio della prova. In tal caso infatti si tende a generare un preliminare stato di tensione flessionale accompagnato da una modesta componente

