

FENOMENI DI FRATTURA IN LAMINATI SOTTILI INDOTTI DA IMPATTO A BASSA VELOCITÀ

G. Caprino e V. Lopresto

Dip. di Ingegneria dei Materiali e della Produzione – Univ. degli Studi di Napoli "Federico II" – P.le Tecchio, 80, 80125 Napoli

ABSTRACT

Il presente lavoro riguarda la nascita e la crescita di diversi tipi di danno indotti in un laminato sottile in carboresina da un impatto a bassa velocità. In particolare, dopo una discussione sulle tipologie di rottura che si verificano in seguito all'urto, vengono affrontati gli argomenti della prima rottura, della propagazione della delaminazione e dello sviluppo dell'indentazione. Si mostra come, mentre esistono formule semiempiriche o empiriche per la previsione della forza di prima rottura e dell'indentazione, le conoscenze sono molto meno sistematiche per quanto riguarda la delaminazione. Sono presentati dei dati sperimentali originali sia a supporto delle formule presentate, sia per individuare i parametri che influenzano i fenomeni trattati.

1. INTRODUZIONE

Sebbene i materiali compositi offrano delle proprietà specifiche molto attraenti per manufatti in cui il peso sia un fattore determinante di successo, la loro vulnerabilità all'impatto pone notevoli problemi, in quanto costringe ad adottare elevati coefficienti di sicurezza, penalizzando l'efficienza della struttura. E' infatti ampiamente

documentato in letteratura che livelli di energia innocui per un metallo possono indurre in un laminato rotture, quali fessurazioni intralaminari e delaminazioni, che determinano cospicue perdite di resistenza a compressione [1-15].

Nonostante gli sforzi di numerosi ricercatori, il problema della previsione della geometria del danno in funzione delle condizioni d'urto rimane aperto. Sono stati tuttavia prodotti molti dati sperimentali e modelli di tipo teorico, empirico o numerico utili a individuare i parametri che influenzano il comportamento del materiale e illustrare i modi di rottura coinvolti.

In questo lavoro, che si limita all'impatto a bassa velocità di compositi in carboresina, vengono dapprima richiamate le caratteristiche fondamentali dei danni da impatto. Sono poi discussi, soprattutto sulla base di esperienze originali condotte presso il Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università di Napoli "Federico II", aspetti che riguardano la prima rottura di un laminato, la crescita delle delaminazioni, e le leggi che governano lo sviluppo dell'impronta nel punto di contatto.

2. DANNI DA IMPATTO A BASSA VELOCITA'

C'è un sostanziale accordo fra i diversi ricercatori sui meccanismi di generazione e crescita del danno in un laminato composito sottoposto ad impatto a bassa velocità [16,17]. Generalmente, il materiale ha un comportamento elastico fino a un livello caratteristico di energia, U_i , spesso indicato come "energia limite", al di là del quale si manifestano fratture intralaminari nella matrice o all'interfaccia fibra-matrice. Tali fratture possono essere di due tipi (Fig. 1): a) fratture normali, posizionate nelle lamine più distanti dal punto di contatto pannello-percussore e orientate secondo la direzione dello spessore; b) fratture taglienti, presenti nelle lamine più interne e orientate approssimativamente a 45° rispetto alla direzione dello spessore. La denominazione delle due tipologie di fessurazione è legata alla loro origine: le fratture normali sono provocate dalle sollecitazioni normali legate al momento flettente, che eccedono la resistenza della lamina in direzione trasversale; quelle taglienti sono dovute alle sollecitazioni derivanti dalle forze di taglio, che superano la corrispondente resistenza del singolo strato.

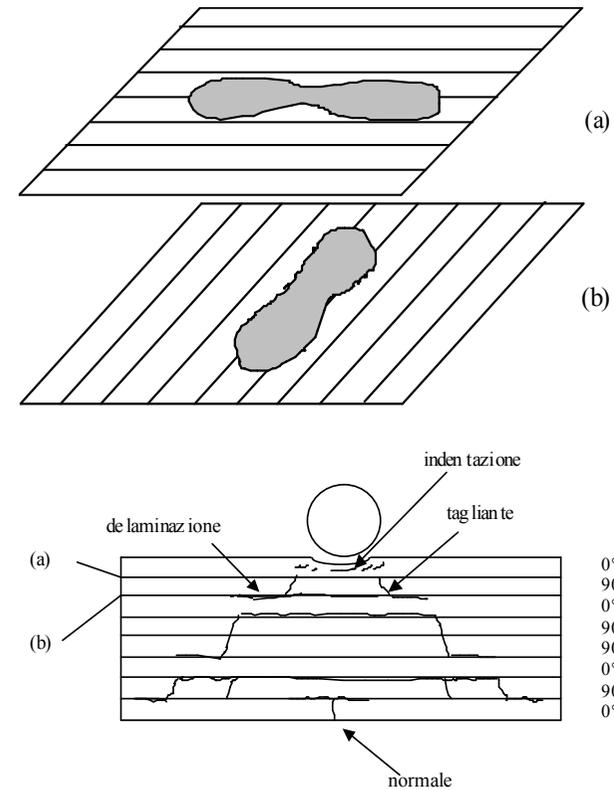


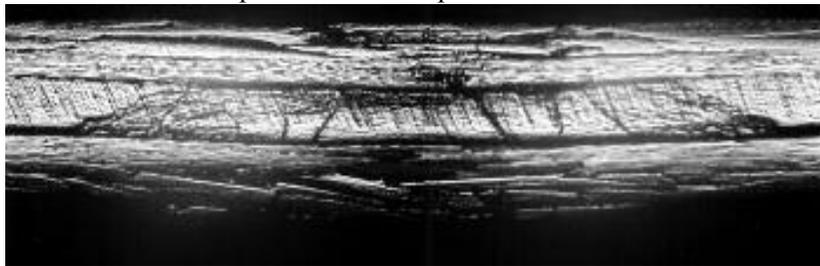
Fig. 1: - Schematizzazione dei modi di rottura tipici in un laminato sottoposto a impatto.

Solitamente, le fratture appena descritte attraversano completamente lo spessore della lamina in cui si generano, e si bloccano all'interfaccia con lamine ad orientazione differente. Qui tendono a propagarsi sotto forma di delaminazione, di forma lenticolare allungata secondo la direzione delle fibre della lamina inferiore (Fig. 1). Questo meccanismo

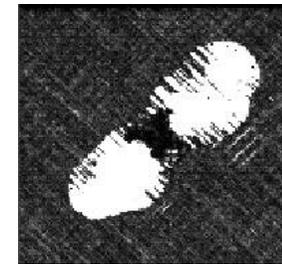
fa in modo che non si osservi delaminazione fra lamine adiacenti eventualmente caratterizzate dalla stessa orientazione del rinforzo.

All'aumentare dell'energia d'urto, le fessurazioni intralaminari si accrescono in numero, e le delaminazioni si estendono in dimensioni. In particolare, le fratture taglianti e le conseguenti delaminazioni descrivono lungo lo spessore del laminato un caratteristico percorso tronco-conico, con estensione delle delaminazioni via via maggiore all'allontanarsi dalla superficie direttamente esposta all'impatto. Sebbene più raramente, un percorso inverso viene seguito dalle delaminazioni generate dalle fratture normali. Alcune immagini reali delle superfici di frattura osservate sono riportate in Fig. 2.

Ai modi di rottura appena esposti si possono aggiungere fenomeni di cedimento nel volume di materiale immediatamente al di sotto della superficie di contatto laminato-percussore, a causa delle intense sollecitazioni generate dal carico localizzato. Il segnale esterno di questi fenomeni è un'impronta (indentazione, Fig. 1), la cui profondità cresce al crescere dell'energia impartita. Per valori sufficientemente elevati di quest'ultima, le fibre nella lamina disposta sulla superficie opposta a quella impattata iniziano a cedere, e il loro cedimento si propaga progressivamente a quelle più vicine alla superficie di contatto, fino a determinare la perforazione del pannello.



a)



b)

Fig. 2 - Rotture in un laminato in carbonio sottoposto a impatto a bassa velocità: a) immagine al microscopio ottico di una sezione trasversale; b) immagine di una delaminazione ottenuta all'analisi ultrasonica per C-scan.

La possibilità di prevedere la nascita delle fratture intralaminari, la loro estensione e localizzazione è di limitata utilità pratica di per sé, in quanto questi tipi di rottura influenzano in modo marginale le proprietà meccaniche di un laminato. Tuttavia, è stato dimostrato che la nascita delle fessurazioni normali e taglianti facilita l'insorgere delle delaminazioni [18], la cui crescita iniziale è solitamente instabile [5,8], e la cui presenza è la principale causa della riduzione di resistenza a compressione del materiale. Risulta quindi importante disporre di strumenti per la previsione delle condizioni che determinano la prima rottura in un laminato. Inoltre, poiché la perdita di resistenza è fortemente dipendente dall'estensione, dal numero e dalla posizione delle aree delaminate, sarebbe desiderabile uno strumento analitico in grado di fornire queste informazioni per condizioni d'impatto fissate. Infine, nelle applicazioni aeronautiche riveste un particolare interesse il comportamento del materiale a indentazione. L'impronta lasciata dall'oggetto contundente è infatti il primo segno visibile ad occhio nudo

dell'avvenuto impatto, e permette quindi di percepire una situazione potenzialmente critica al semplice esame visivo. Ovviamente, perché ciò avvenga è necessario che l'alterazione superficiale sia sufficientemente evidente: da questa esigenza deriva la definizione di "Barely Visible Impact Damage" (BVID), che lega generalmente il concetto di visibilità alla profondità dell'indentazione.

Lo studio del comportamento dei laminati compositi in condizioni d'impatto a bassa velocità viene condotto quasi esclusivamente con macchine strumentate a caduta libera di grave: un pannello piano viene opportunamente supportato lungo i bordi e viene colpito da un percussore di geometria e massa definite che cade da un'altezza assegnata. La storia dell'urto è ricostruita attraverso la curva forza-tempo, che permette di risalire alla curva forza-spostamento mediante opportune integrazioni numeriche. Eseguendo prove d'impatto a diversi livelli di energia (variando l'altezza di caduta e/o la massa del percussore), si possono indurre nel materiale differenti gradi di danneggiamento. Analisi di tipo non distruttivo (es. ultrasuoni in scansione di tipo C) registrano usualmente l'immagine in pianta dell'area delaminata, ma evidenziano con difficoltà fratture intralaminari; versioni più sofisticate possono mostrare la distribuzione delle delaminazioni attraverso lo spessore, la loro forma ed estensione. Analisi distruttive, basate su tecniche di tipo metallografico, rivelano i particolari più minuti delle fratture, ma sono limitate a una singola sezione trasversale. Confrontando le informazioni raccolte sul danno con la risposta macroscopica del pannello (la curva forza-spostamento), si correlano le caratteristiche di quest'ultima con lo sviluppo dei modi di rottura.

Ovviamente, i parametri che possono essere scelti arbitrariamente nell'esecuzione di una prova d'impatto sono molteplici. A parte la natura della lamina di base, il numero e l'orientazione delle lamine, la sequenza di laminazione, la geometria del pannello, le sue dimensioni in piano e le condizioni di vincolo possono essere scelti in modo differente; il materiale costitutivo e la geometria dell'impattatore, la sua massa e velocità possono assumere i valori più disparati. Ognuno dei fattori appena elencati, in misura maggiore o minore, può influenzare il comportamento del materiale. Di fatto, questo rende difficile sia il confronto diretto fra risultati sperimentali provenienti da fonti diverse, sia il trasferimento di esperienze acquisite in laboratorio a casistiche di strutture reali mediante opportuni fattori di scala.

Nell'affrontare il problema dell'urto, uno degli effetti più complicati da razionalizzare è quello della velocità, che può avere una duplice influenza: a) sul comportamento del materiale in prova, nel caso la sua curva σ - ε sia sensibile alla velocità di carico; b) sul comportamento della struttura, a causa di fenomeni vibrazionali. Per quanto riguarda il materiale, è stato mostrato che laminati in vetroresina rispondono in modo differente se caricati staticamente o impattati a bassa velocità, probabilmente a causa della natura viscoelastica delle fibre di rinforzo, più che della matrice. Viceversa, la carboresina appare poco o per nulla sensibile a variazioni anche cospicue nella velocità di applicazione del carico. L'insorgere di fenomeni dinamici è invece la base per un'utile distinzione fra bassa ed alta velocità, che sarà adottata implicitamente nel seguito del presente lavoro: in condizioni di bassa velocità, la risposta della struttura è essenzialmente governata dalla sua deformata statica, e può quindi essere assimilata a un caso quasi-statico; al contrario, nel campo dell'alta velocità essa è dominata dalle oscillazioni

di natura dinamica, che non possono essere trascurate per un'analisi accurata del problema. Ovviamente questa definizione, che prescinde dal valore assoluto della velocità del corpo contundente, implica che l'impatto a bassa velocità su un materiale insensibile agli effetti dello strain-rate possa essere completamente trattato mediante un'analogia statica.

3. PRIMA ROTTURA NEL LAMINATO

E' stato notato in precedenza che le prime rotture in un laminato sottoposto ad impatto sono di tipo intralaminare e interessano la matrice o l'interfaccia fibra-matrice. Naturalmente, il primo modo di rottura consisterà in fessurazioni normali, taglianti o localizzate nella zona di contatto a seconda dell'entità relativa delle sollecitazioni coinvolte. In generale, laminati sottili (il cui spessore sia cioè piccolo rispetto alle dimensioni in piano) privilegiano le sollecitazioni flessionali, e tendono perciò a sviluppare precocemente fessurazioni normali. D'altra parte, la forte localizzazione della forza di contatto dà luogo a notevoli tensioni taglianti, che favoriscono le rotture per taglio soprattutto quando il diametro dell'impattatore è piccolo. Infine, laminati spessi generano elevate sollecitazioni nel punto di contatto, mostrando fessurazioni localizzate nella zona adiacente alla superficie di applicazione del carico.

Diversi autori hanno notato che la prima rottura, più che dal livello di energia, dipende dalla forza di contatto; in altri termini, esiste una forza critica F_i , più che un'energia critica U_i , che dà luogo alla prima rottura in un laminato. Partendo da questa osservazione, Sjöblom [1] ha proposto un semplice modello per il calcolo di F_i , ipotizzando che la

prima rottura si verifichi quando la sollecitazione tagliente nella direzione dello spessore raggiunge un valore critico, τ_c , caratteristico del materiale. Per la valutazione della sollecitazione tagliente, l'autore ha assunto che essa sia uniformemente distribuita su una superficie cilindrica di altezza pari allo spessore t del laminato e raggio uguale a quello r della superficie di contatto materiale-percussore. Per il calcolo di r è stato adottato il modello di contatto hertziano, ottenendo la relazione:

$$F_i = \frac{(2\pi \cdot t \cdot \tau_c)^{0.5} \cdot D_t^{0.75}}{k_c^{0.5}}$$

(1)

in cui k_c è la rigidezza locale nel punto di contatto, e D_t il diametro del percussore.

L'eq. (1) è stata sviluppata in [19], dove la forza di prima rottura è stata espressa nella forma:

$$F_i = \delta \cdot D_t^{0.5} \cdot t^{1.5}$$

(2)

con δ costante.

Confrontando la (1) e la (2), si nota che entrambe prevedono una dipendenza della forza di prima rottura dallo spessore elevato alla potenza 1.5. Viceversa, sembra ci sia una discrepanza nell'effetto di D_t , che nella (1) è affetto dall'esponente 0.75, e nella (2) dall'esponente 0.5. L'apparente incongruenza è spiegata dal fatto che la rigidezza locale k_c

è funzione anch'essa del diametro del percussore, e questa funzionalità è stata esplicitata nella (2).

La Fig. 3 riporta i risultati sperimentali presentati in [19] per verificare l'applicabilità dell'eq. (2), ottenuti su laminati quasi-isotropi in carboresina T400/HMF 934. In accordo all'eq. (2), tutti i dati ricavati da prove eseguite utilizzando differenti diametri del percussore dovrebbero convergere in un'unica curva, se il termine $F_i/D_t^{0.5}$ viene impiegato in ordinata. La figura mostra che questo accade effettivamente, e che quindi l'effetto di D_t è modellato correttamente. Si noti inoltre che la stessa curva è sostanzialmente valida sia in condizioni di carico quasi-statico ("static" in figura) che a bassa velocità ("impact").

La curva a tratto continuo in Fig. 3 è la rappresentazione grafica dell'eq. (2), in cui la costante δ è stata ottenuta con il metodo dei minimi quadrati, fornendo $\delta = 0.152 \text{ KN/mm}^2$. Chiaramente, l'eq. (2) è in generale efficace nel prevedere il carico di prima rottura. La sola eccezione è costituita dal punto indicato dalla freccia: esso è relativo a pannelli di piccolo spessore caricati con un percussore di elevato diametro. In queste condizioni di prova, la rigidità flessionale è limitata, mentre la forza di prima rottura è relativamente elevata, a causa dell'efficace distribuzione del carico locale. Di conseguenza, il provino assume all'atto della prima rottura una forte curvatura, che altera sostanzialmente la legge di contatto penetratore-materiale rispetto all'ipotesi di contatto hertziano, su cui l'eq. (2) si basa.

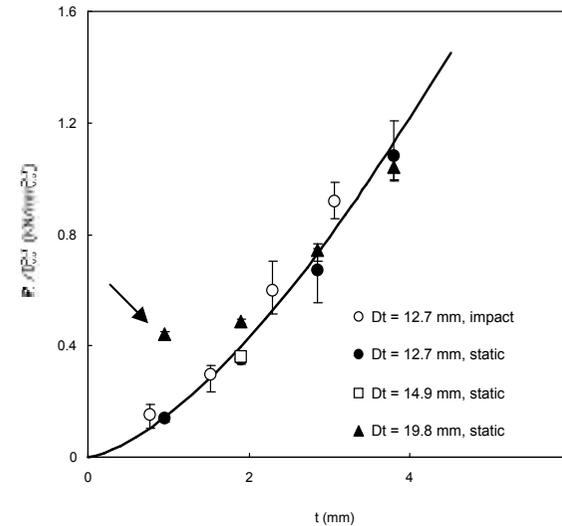


Fig. 3: - Effetto dello spessore t del laminato e del diametro D_t del penetratore sulla forza di prima rottura F_i .

Risultati simili a quelli di Fig. 3 sono stati presentati in [14], dove sono state esaminate circa 350 prove d'impatto a bassa velocità eseguite su laminati di differenti spessori e stratificazioni, ottenuti con tre tipi di lamina di base. Le condizioni di vincolo e la geometria del percussore erano in questo caso fissate. Tuttavia, i dati hanno confermato che la forza di prima rottura è dipendente secondo l'esponente $3/2$ dallo spessore, mentre è poco influenzata dalla stratificazione. Inoltre, la costante δ dell'eq. (2) è fortemente influenzata dal tipo di matrice [14]. Nel valutare i risultati disponibili in letteratura, occorre tener presente che l'individuazione del punto di prima rottura sul diagramma carico-

spostamento non è sempre agevole. Sebbene parecchi ricercatori abbiano infatti notato che l'inizio del danno comporta un'improvvisa caduta di carico [7,9], in [20] è stato anche dimostrato che questa caduta è tanto meno percepibile quanto minore è lo spessore del composito. In Fig. 4 sono riportate due curve di carico ottenute in [20], relative a pannelli di diverso spessore e uguale sequenza di laminazione sollecitati in condizioni quasi-statiche. Si può osservare che la discontinuità all'atto della prima rottura (individuata dalla freccia) è più limitata per lo spessore minore. La posizione del punto di prima rottura, comunque identificabile quando il carico è applicato lentamente, può divenire problematica a bassa velocità, a causa del disturbo provocato dalle vibrazioni proprie della struttura. E' inoltre probabile che, più che essere correlata alle prime rotture intralaminari, la caduta di carico segnali l'inizio delle rotture per delaminazione [4].

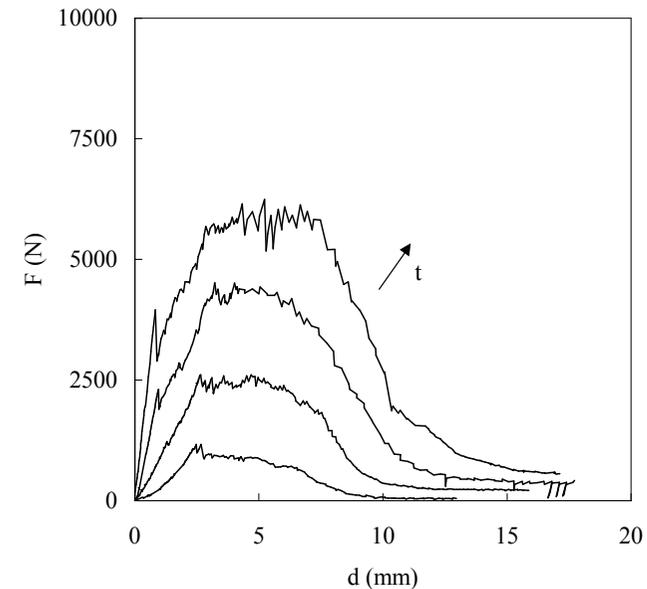


Fig. 4: - Curve carico spostamento ottenute da prove quasi-statiche su laminati in carbonio di differente spessore t , ma uguale sequenza di laminazione [20].

4. SVILUPPO DELLE DELAMINAZIONI

Per definire la sensibilità all'impatto di un laminato composito, è stata conosciuta l'etichetta di "resistenza al danno"; un materiale è ovviamente tanto più resistente al danno quanto più limitato è il danno sofferto da un contundente che lo percuote in condizioni di prova fissate. Il termine "resistenza al danno" non deve essere confuso con quello di "tolleranza

al danno", legato invece all'aliquota di resistenza che il materiale è in grado di garantire in presenza di un danno da impatto.

Generalmente, la resistenza al danno viene misurata attraverso l'estensione dell'area delaminata, così come rivelata da un'indagine ultrasonica in C-scan. Ciò deriva dal fatto che la perdita di resistenza è in qualche modo dipendente da questo parametro. Alcuni autori hanno tuttavia correlato la resistenza residua, più che all'area della delaminazione, alla sua larghezza valutata trasversalmente alla direzione del carico applicato [5,11]. Naturalmente, qualunque sia il parametro assunto per quantizzare il danno, esso è intrinsecamente limitato, in quanto non ha la capacità descrivere la morfologia reale delle delaminazioni che, come mostrato in precedenza, si sviluppano su piani differenti con diversa orientazione.

Un tentativo di spiegare l'origine e la forma che le delaminazioni assumono è stato effettuato da Liu [2]. L'autore ha attribuito questo fenomeno di rottura al fatto che le lamine, data la loro ortotropia, tendono a curvarsi in modo differente l'una dall'altra quando la piastra è sottoposta a un carico trasversale. La necessità di assumere una deformata comune, dovuta ai legami interfacciali, si traduce in sollecitazioni normali e taglianti, che generano rottura. Liu postula quindi che la tendenza alla delaminazione fra due lamine adiacenti sia governata dalla differenza fra le rigidità flessionali, attraverso il coefficiente M (mismatch) definito come:

$$M = \frac{[D_{11}(\theta_b) - D_{11}(\theta_t)]}{[D_{11}(0^\circ) - D_{11}(90^\circ)]}$$

(3)

dove il simbolo D_{11} rappresenta il primo termine della matrice di rigidità flessionale, mentre θ_b , θ_t sono le orientazioni delle lamine rispettivamente al di sotto e al di sopra della superficie interlaminare considerata.

Utilizzando l'eq. (3), Liu è riuscito a ricostruire con buona approssimazione la forma che le delaminazioni assumono sulle singole superfici interlaminari, e a spiegare perché la loro dimensione dipende dal tipo di fibra di rinforzo e dalla sequenza di laminazione. Da quest'ultimo punto di vista, un'indicazione molto utile per la scelta della sequenza, ricavabile dal coefficiente M, è che un laminato è tanto più resistente al danno quanto più limitata è la differenza di orientazione fra lamine adiacenti. Ovviamente, quando $\theta_b = \theta_t$, $M=0$. L'eq. (3) prevede quindi, come ampiamente dimostrato dalle osservazioni sperimentali, che non ci sia possibilità di delaminazione fra lamine in cui le fibre siano disposte secondo la stessa orientazione.

Poiché la rigidità flessionale è funzione del cubo dello spessore, dal modello di Liu si desume che fra due laminati uguali in tutto, eccetto che nello spessore della lamina di base, il più spesso dovrebbe soffrire una delaminazione maggiore di quello più sottile. Per verificare questa ipotesi, l'autore sottopose a prove d'impatto tre compositi, rispettivamente di stratificazione [04/904], [08/908], [012/9012], e ne misurò la superficie delaminata. Egli notò che, secondo il suo modello, le aree delaminate avrebbero dovuto essere nel rapporto $4^3:8^3:12^3$ (cioè 1:8:27). L'esperienza fornì invece 1:2.8:11.5, confermando comunque la tendenza qualitativa desumibile dalla definizione di M. In realtà, nell'eseguire le sue prove, Liu mantenne costante l'energia d'impatto per unità di spessore, assumendo implicitamente che questo parametro determini l'estensione della delaminazione. Quali siano i

fattori a cui legare la crescita del danno è invece, a tutt'oggi, argomento di dibattito. Alcuni ricercatori hanno evidenziato una dipendenza lineare dell'area delaminata dall'energia d'urto [3,12]; altri hanno indicato la forza massima come la quantità meglio correlata al progredire del danno [8,15]. Saranno ora discussi alcuni risultati sperimentali, non pubblicati in precedenza, che sembrano confermare l'utilità della forza massima di contatto nella previsione del danno.

In [21] sono state eseguite prove su laminati in carboresina T400/HMF 934 di stratificazione $[(0,90)_n/+45_n/-45_n]_s$, con $n = 2, 3$, corrispondenti rispettivamente a spessori $t = 1.90$ mm e 2.85 mm. Le parentesi tonde nella designazione della stratificazione denotano lamine in tessuto. I pannelli sono stati semplicemente appoggiati su una piastra dotata di foro circolare avente diametro di 50 mm e caricati al centro fino a livelli di carico predefiniti mediante un punzone emisferico. Per verificare l'effetto di D_t , sono stati adottati i tre valori $D_t = 6$ mm, 12.7 mm e 19.8 mm. La Fig. 5 riporta l'area delaminata, misurata mediante ultrasuoni in C-scan, in funzione dell'energia U impartita. La legenda indica lo spessore e il diametro del punzone, in mm, secondo la simbologia t/D_t .

Come predetto dal modello di Liu, la superficie del danno è tanto maggiore quanto più elevato è lo spessore della singola lamina (n più elevato, e quindi spessore totale t maggiore). Si può osservare che questo accade addirittura a parità di energia, per cui laminati più spessi soffrono una minore resistenza al danno a parità di condizioni di prova.

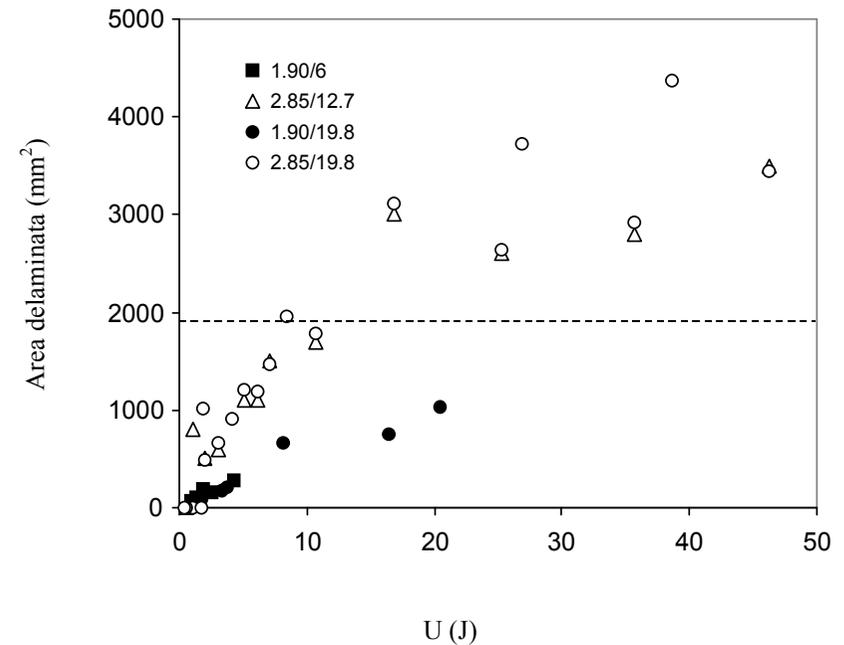


Fig. 5: - Area delaminata in funzione dell'energia d'impatto, U , per pannelli di spessore differente.

I dati in Fig. 5 sembrano essere in contrasto con l'incremento lineare dell'area delaminata in funzione di U , mostrato da altri autori [3,12]. Da essi si ricava piuttosto che, dopo una crescita rapida immediatamente al di là dell'energia di prima rottura, il tasso di incremento tende a livellarsi. A questo proposito, occorre rilevare che molti ricercatori hanno indagato il comportamento dei laminati per livelli di energia d'impatto ben lontani da quelli di perforazione, catturando quindi solo la prima parte della legge di crescita. Quando ci si è spinti a energie

significativamente superiori a quella di prima rottura [10,13], è stata evidenziata la stessa tendenza visibile in Fig. 5.

Si può infine osservare che l'influenza di D_t sullo sviluppo della delaminazione è piuttosto limitato: a parità di energia, pannelli di uguale spessore esibiscono la stessa area danneggiata, indipendentemente dal diametro del percussore.

La retta orizzontale tratteggiata in Fig. 5 rappresenta l'area del provino compresa all'interno del perimetro di supporto. La presenza di punti sperimentali al di sopra della retta segnala che, per i provini più spessi, la superficie delaminata interferisce con l'appoggio, superandone i confini. Ovviamente, i risultati ottenuti in queste condizioni devono essere considerati con cautela.

Gli stessi risultati di Fig. 5 sono utilizzati in Fig. 6 per correlare la superficie delaminata alla forza massima di contatto, F_{max} . Abbastanza sorprendentemente, tutti i punti sperimentali convergono con buona approssimazione su una singola curva, che viene seguita anche quando la superficie delaminata si estende al di là dei confini dell'appoggio. L'analisi della delaminazione in funzione della forza massima dà quindi una spiegazione al fatto, osservato in Fig. 5, che laminati spessi subiscono delaminazioni più estese a parità di energia: questo dipende dalla maggior forza di contatto sviluppata nell'urto, dovuta alla più elevata rigidità e resistenza della struttura.

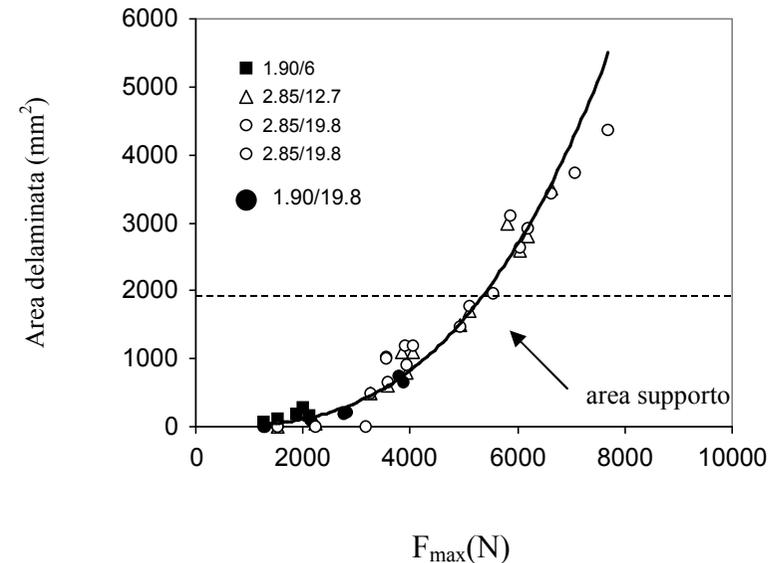


Fig. 6: - Area delaminata in funzione della forza massima di contatto, F_{max} , per pannelli di spessore differente. Diametro dell'appoggio 50 mm.

La curva a tratto continuo in Fig. 6 è la rappresentazione grafica dell'equazione empirica:

$$A = \eta \cdot F_{max}^{\beta}$$

(4)

dove A indica l'area delaminata, e η , β sono due costanti che, calcolate con il metodo dei minimi quadrati, valgono $\eta = 3.13 \times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}^{\beta}$ e $\beta = 2.89$. In base ai risultati ottenuti, le due costanti dovrebbero essere indipendenti dal diametro del percussore e dallo spessore del pannello.

E' invece ipotizzabile che esse siano funzione del tipo di laminato, in quanto l'estensione della delaminazione è influenzata sia dalla natura della matrice [10] che dalla sequenza di laminazione [6]. In ogni caso, la validità dell'eq. (4) dovrebbe essere limitata, per ogni coppia di valori spessore-diametro del percussore, al campo in cui $F_{max} > F_i$, dove F_i è calcolato dall'eq. (2). Applicando quest'ultima al caso $t = 2.85$ mm, $D_t = 19.8$ mm (cerchi chiari in Fig. 6), si ricava $F_i = 3254$ N, che spiega la presenza dei tre punti a delaminazione nulla chiaramente visibili in figura. Tali punti sono stati esclusi dal calcolo delle costanti η , β .

Ovviamente, se si assume che l'eq. (4) sia valida solo quando $F_{max} > F_i$, la legge di variazione di A presenta una discontinuità nel punto individuato dall'uguaglianza $F_{max} = F_i$. Questa caratteristica non deve essere necessariamente interpretata come un'inefficiacia del modello: alcuni autori [5,8] hanno notato che la prima propagazione del danno interlaminare può essere instabile, per cui le sue dimensioni assumono valori relativamente elevati appena la forza di prima rottura viene superata.

La curva a tratto continuo di Fig. 6 viene riportata a scopo di confronto in Fig. 7, dove sono diagrammati i risultati di prove identiche a quelle appena discusse, fatta eccezione per il diametro del supporto, pari in questo caso a 100 mm, sui soli laminati di spessore $t = 2.85$ mm [21]. Si osserva innanzi tutto che non esiste una buona correlazione fra i dati di Fig. 6 e quelli di Fig. 7: l'area delaminata è sensibilmente più bassa per il diametro d'appoggio maggiore; si deve quindi concludere che le costanti che appaiono nell'eq. (4) sono funzione di questo parametro. La Fig. 7 mette però in evidenza anche un altro limite dell'approccio alla delaminazione basato sulla forza: quando quest'ultima raggiunge il valore di circa 6200 N, c'è un'elevata variabilità dell'area delaminata.

Questo fenomeno, più che essere attribuibile allo scarto sperimentale, dipende dal fatto che la delaminazione continua ad estendersi anche durante la perforazione, che si sviluppa al di là della massima forza sostenibile da parte del pannello.

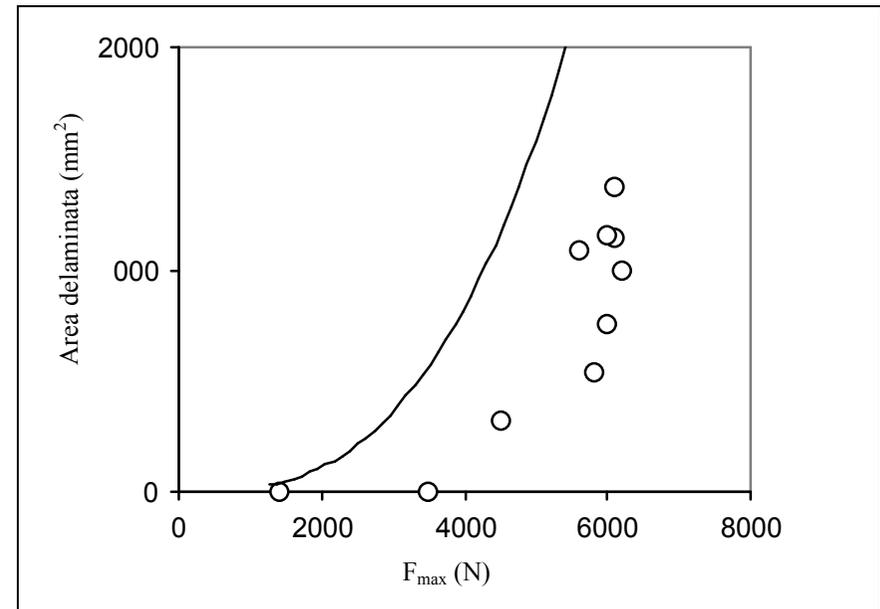


Fig. 7: - Area delaminata in funzione della forza massima di contatto, F_{max} , per pannelli di 2.85 mm di spessore. Diametro dell'appoggio 100 mm.

Le considerazioni precedenti sottolineano la complessità del problema della crescita delle rotture interlaminari, che a tutt'oggi è lontano dall'aver trovato una soluzione soddisfacente. Ciò impedisce di trasferire le esperienze di laboratorio a strutture di interesse

ingegneristico, costringendo a eseguire le relative prove in condizioni quanto più possibile vicine a quelle reali.

5. INDENTAZIONE

Nonostante il concetto di BVID sia normalmente utilizzato nella pratica aeronautica, non c'è accordo generale sulla sua definizione quantitativa. Si accetta che la visibilità sia legata alla profondità dell'impronta lasciata dal contundente sulla superficie del composito, ma il giudizio su quale valore di indentazione dia luogo a un danno al limite del visibile è largamente variabile. Da un punto di vista progettuale, è di primaria importanza stabilire quale sia l'energia che induce un BVID, perché una struttura aeronautica deve essere in grado di sopportare in sicurezza i carichi assegnati in presenza di un danno di questo tipo. Occorre quindi disporre di strumenti analitici che permettano di correlare l'energia d'urto all'indentazione I .

Naturalmente, per assegnate condizioni d'impatto I sarà tanto maggiore quanto minore è lo spessore del laminato. Questo è mostrato in Fig. 8, dove sono raccolti i risultati di prove di indentazione eseguite in [22] su laminati caratterizzati dalla stratificazione già specificata nella discussione delle Figg. 5 e 6, utilizzando un percussore di 12.7 mm di diametro. Il motivo per cui laminati più spessi coprono un campo di energie più ampio dipende dal fatto che, al di là di un livello di energia crescente con lo spessore, il percussore penetra il pannello, attraversandolo e proseguendo la sua corsa.

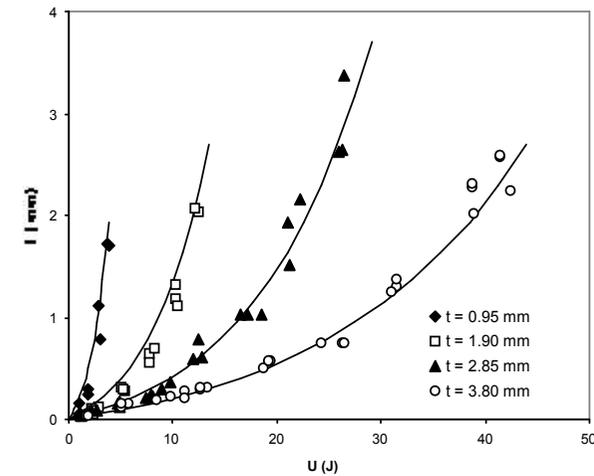


Fig. 8: - Variazione dell'indentazione, I , in funzione dell'energia d'urto, U , per laminati in carbonio di spessore t differente.

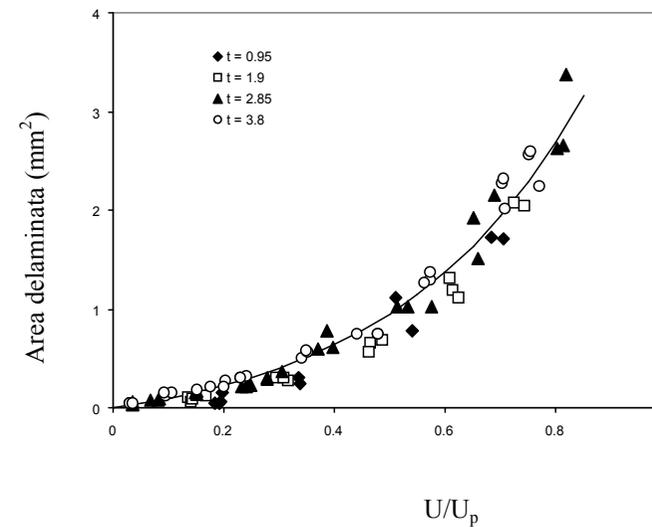


Fig. 9: - *Variazione dell'indentazione, I, in funzione dell'energia d'urto adimensionalizzata, U/U_p, per laminati in carboresina di spessore t differente. Gli spessori indicati in didascalia si intendono in mm.*

L'energia limite per la penetrazione, U_p, è stata misurata in [22] per tutti i laminati considerati. In Fig. 9, gli stessi dati di Fig. 8 sono diagrammati in funzione dell'energia adimensionalizzata U/U_p. Impiegando quest'ascissa, tutti i punti si raggruppano in un'unica curva maestra, mostrando che l'indentazione in laminati di spessore differente è identica quando ad essi viene impartita la stessa aliquota dell'energia di penetrazione.

La curva a tratto continuo in Fig. 9 è la rappresentazione grafica dell'equazione empirica:

$$I = k \cdot \left(10^{\gamma \cdot \frac{U}{U_p}} - 1\right) \quad (5)$$

proposta in [22] per il calcolo dell'indentazione. Nell'eq. (5) k, γ sono due costanti che, calcolate in base ai dati di Fig. 9, valgono k = 0.288 mm e γ = 1.269. Tali costanti sembrano indipendenti dalla stratificazione del laminato, dal tipo di matrice e dall'orientazione ed architettura delle fibre nelle diverse lamine, purchè l'anisotropia del composito sia moderata [22]. Inoltre, k e γ sono scarsamente sensibili alla velocità d'impatto e alle condizioni di vincolo; a tutt'oggi, non esistono esperienze che mostrino se esse siano influenzate dal diametro del percussore e dalla natura delle fibre.

Per determinare il livello di energia in corrispondenza del quale un laminato assegnato sviluppi un'indentazione al limite del visibile, nel settore aeronautico si eseguono solitamente prove ripetute ad energia crescente, fino ad ottenere il risultato desiderato. La disponibilità dell'eq. (5) semplifica notevolmente questa procedura: conoscendo l'energia di penetrazione, da essa si può valutare immediatamente l'energia U che determina l'indentazione assunta come limite del danno visibile. Peraltro, in [23] è stato mostrato che anche U_p può essere calcolata con buona approssimazione mediante la formula:

$$U_p = K \cdot (t \cdot V_f \cdot D_t)^\alpha \quad (6)$$

dove K, α sono due costanti dipendenti unicamente dal tipo di fibra, che nel caso specifico delle carboresine valgono rispettivamente K = 0.49 J/mm^{2α} e α = 1.40. Il simbolo V_f nella formula rappresenta invece il volume relativo di fibre.

Nelle stesse prove a cui si riferiscono le Figg. 8 e 9 sono state eseguite anche alcune misure dell'estensione dell'area delaminata. La Fig. 10 riporta la relazione esistente fra quest'ultima e l'indentazione per ognuno degli spessori presi in considerazione. E' evidentissima la dipendenza del legame funzionale fra le due grandezze dallo spessore del laminato: per laminati sottili, la delaminazione si estende relativamente poco, ed è accompagnata da un'impronta consistente; viceversa, laminati più spessi presentano aree delaminate di notevole estensione, pur non rivelando un chiaro segnale dell'urto all'analisi visiva. Da questo punto di vista, è emblematico il pannello di 3.8 mm di spessore: quando la dimensione di A supera i 2500 mm², l'indentazione

è di circa 0.3 mm, molto inferiore ai valori di I usualmente associati al limite del visibile. Da quanto appena esposto si ricava che l'analisi visiva è di gran lunga più problematica per strutture in composito di grosso spessore che per strutture costituite da laminati sottili.

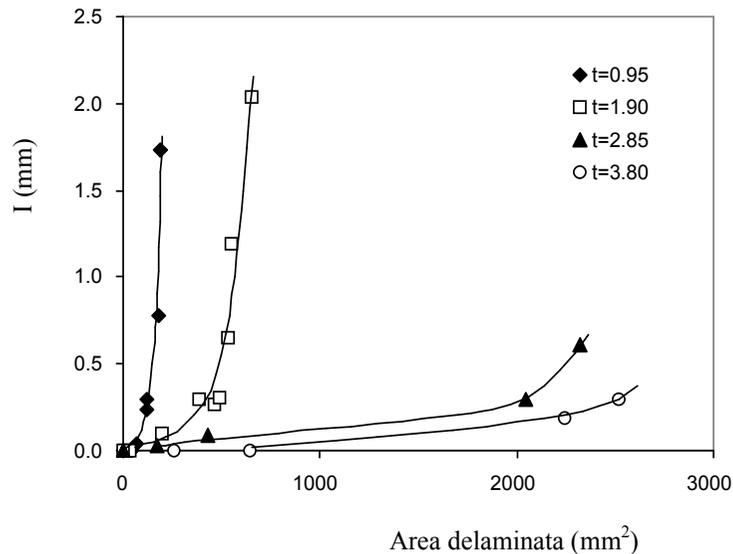


Fig. 10: - Indentazione I in funzione dell'area delaminata per laminati in carboresina di diverso spessore t . Gli spessori indicati in didascalia si intendono in mm.

6. CONCLUSIONI

I risultati presentati e discussi in questo lavoro, dedicato ai fenomeni di frattura che si verificano in laminati sottili in carboresina in seguito ad urti a bassa velocità, supportano le seguenti conclusioni:

- la prima rottura di un laminato, consistente in fratture intralaminari che coinvolgono la sola matrice, appare legata alla forza massima di contatto che si sviluppa fra materiale e percussore, più che all'energia impartita; la forza critica per la prima rottura può essere prevista mediante una semplice equazione basata sulla legge di contatto hertziano, che cade in difetto soltanto quando siano in esame laminati particolarmente sottili impattati con un punzone di diametro elevato;
- l'indentazione provocata da un percussore di diametro noto è associata all'aliquota di energia di penetrazione impiegata nell'urto, cioè al rapporto fra l'energia d'urto e quella di penetrazione che compete al pannello; l'utilizzazione di questo parametro adimensionale rende la profondità dell'impronta indipendente dallo spessore del laminato, e ne permette il calcolo mediante una formula empirica recentemente proposta in letteratura; ulteriori prove dovrebbero accertare se le costanti che appaiono nella formula dipendono dalla natura delle fibre di rinforzo e dal diametro del contundente;
- il problema della previsione dell'area delaminata in funzione dei parametri di prova è ancora irrisolto, e necessita di ulteriori sviluppi in termini sia di dati sperimentali che di modellazioni teoriche; i risultati a disposizione permettono tuttavia di affermare che sia la resistenza al danno da impatto che la visibilità del danno

decregono al crescere dello spessore del laminato, rendendo difficoltoso il controllo di strutture in composito a forte spessore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Sjöblom, "Simple design approach against low velocity impact damage", *Proc. 32th SAMPE Symp., Anaheim, 1987*, pp. 529-39.
- [2] D. Liu, "Impact-induced delamination - A view of bending stiffness mismatching", *J. Compos. Mater.*, Vol. 22, 1988, pp. 674-92.
- [3] W.J. Cantwell and J. Morton, "The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP", *Compos. Struct.*, Vol. 13, 1989, pp. 101-114.
- [4] A.D. Curson, D.R. Moore and D.C. Leach, "Impact failure mechanisms in carbon fiber/PEEK composites", *J. Thermopl. Compos.*, Vol. 3, 1990, pp. 24-31.
- [5] J.C. Pritchard and P.J. Hogg, "The role of impact damage in post-impact compression testing", *Composites*, Vol. 21, 1990, pp. 503-511.
- [6] E.F. Dost, L.B. Ilcewicz and W.B. Avery, "Effects of stacking sequence on impact damage resistance and residual strength for quasi-isotropic laminates", *ASTM STP 1110*, T.K. O'Brien Ed., 1991, pp. 476-500.
- [7] Y.S. Kwon and B.V. Sankar, "Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxy laminates", *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 15, 2, 1993, pp. 102-11.
- [8] W.C. Jackson and C.C. Poe, "The use of impact force as a scale parameter for the impact response of composite laminates", *J. Compos. Technol. Res.*, Vol. 15, 1993, pp. 282-9.
- [9] G.A.O. Davies, X. Zhang, G. Zhou and S. Watson, "Numerical modeling of impact damage", *Composites*, Vol. 25, 5, 1994, pp. 342-50.
- [10] D. Delfosse and A. Poursartip, "Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates", *Composites Part A*, Vol. 28A, 1997, pp. 647-55.
- [11] G.A. Bibo, P.J. Hogg, R. Backhouse and A. Mills, "Carbon-fibre non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 58, 1998, pp. 129-43.
- [12] Y.P. Siow and V.P.W. Shim, "An experimental study of low velocity impact damage in woven fiber composites", *J. Compos. Mater.*, Vol. 32, 1998, pp. 1178-202.
- [13] S.L. Gao and J.K. Kim, "Effect of cooling rate on impact performance of carbon fibre/PEEK laminates", *Proc. 8th Europ. Conf. Compos. Mater. (ECCM-8)*, Woodhead Publ., Cambridge, 1998.
- [14] G.A. Schoeppner and S. Abrate, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", *Composites Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 903-15.
- [15] R. Teti, P. Buonadonna, V. Lopresto, G. Caprino, "Volumetric Ultrasonic NDE of damaged CFRP laminates", *Acts of ECCM 10, Brugge, June 3-7 2002*, Paper n. 346.
- [16] M.O.W. Richardson and M.J. Wisheart, "Review of low-velocity impact properties of composite materials", *Composites Part A*, Vol. 27A, 1996, pp. 1123-31.
- [17] S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [18] S. Liu and F.-K. Chang, "Matrix cracking effect on delamination growth in composite laminates induced by a spherical indenter", *J. Compos. Mater.*, Vol. 28, 1994, pp. 940-77.
- [19] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Prediction of the first failure energy of circular carbon fibre reinforced plastic plates loaded at the centre", *Composites Part A*, Vol. 34, 2003, pp. 349-57.

[20] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Elastic behaviour of circular composite plates transversely loaded at the centre", *Composites Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 1191-1197.

[21] G. Caprino e V. Lopresto, dati non pubblicati.

[22] G. Caprino, A. Langella and V. Lopresto, "Indentation and penetration of carbon fibre reinforced plastic laminates", *Composites Part B*, Vol. 34, 2003, pp. 319-25.

[23] G. Caprino and V. Lopresto, "On the penetration energy of fibre reinforced plastics under low-velocity impact conditions", *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 61, 2001, pp. 65-73.