

## **Sull'applicabilità della prova CENS allo studio della tenacità interlaminare in modo II di laminati in composito**

Francesco Caimmi

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"  
Politecnico di Milano  
P.zza Leonardo da Vinci, 32, I-20133 Milano  
Tel.+39.02.2399.3207 Fax +39.02.7063.8173 e-mail: francesco.caimmi@polimi.it

### **SOMMARIO**

Viene presentata la prova CENS (compact edge notch shear) per la determinazione della tenacità interlaminare in modo II di materiali compositi a rinforzo fibroso unidirezionale a diverse velocità di sollecitazione. La prova è analizzata mediante analisi agli elementi finiti statiche e dinamiche e viene confrontata sperimentalmente con più tradizionali prove in flessione. La validità e l'applicabilità del test vengono discusse.

### **ABSTRACT**

The CENS (compact edge notch shear) test for the determination of mode II interlaminar toughness in unidirectional fibre reinforced materials at different loading speeds is presented. The test is studied through static and dynamic finite element analysis and experimentally compared with more conventional bending tests. Test's validity and applicability are discussed.

### **1. INTRODUZIONE**

La suscettibilità al danneggiamento per delaminazione dei laminati in composito a rinforzo continuo è uno dei fattori più limitanti per quel che concerne il loro utilizzo in elementi strutturali, e la previsione della resistenza in presenza di questi difetti deve poter essere effettuata disponendo di strumenti e dati affidabili.

In particolare le delaminazioni si prestano ad essere inquadrare e trattate coi metodi propri alla meccanica della frattura [1]. Nel caso di compositi a rinforzo continuo la particolare microstruttura, dà luogo a direzioni preferenziali per il propagarsi dei difetti macroscopici, che in linea di principio coincidono con gli assi di simmetria del materiale. Pertanto il modo di propagazione delle cricche non è controllato soltanto dalla modalità di applicazione dei carichi esterni e dalla resistenza del materiale in modo I, come per i materiali isotropi. Per caratterizzare la resistenza a delaminazione dei materiali compositi è dunque necessario determinare la tenacità anche in modo II e III [2].

Di speciale interesse è la determinazione della tenacità interlaminare in modo II, poiché le sollecitazioni antisimmetriche rispetto al piano di una eventuale delaminazione sono quelle dominanti nel caso della flessione di elementi sottili (si vedano per es. [3,4]). Spesso questo tipo di sollecitazione è generata da impatti a bassa velocità, dell'ordine di qualche metro al secondo, e vi è pertanto la necessità di disporre di dati ottenuti in queste condizioni.

Vari metodi di prova sono stati sviluppati negli anni per la determinazione della tenacità interlaminare dei materiali compositi [5,6]; quelli oggi più utilizzati impiegano provini snelli tipo trave, sollecitati in flessione e contenenti una delaminazione iniziale. Questi metodi di prova presentano però una serie di problemi interpretativi quali l'attrito tra le facce della cricca (non ancora sufficientemente analizzato nonostante la numerosa letteratura disponibile sull'argomento [5]) e i grandi spostamenti a frattura che si hanno con materiali particolarmente tenaci.

Con l'intento di evitare questi problemi è stata recentemente sviluppata presso il Laboratorio di Ingegneria dei Polimeri del Politecnico di Milano la prova CENS (Compact Edge Notch Shear) [7]. Come suggerisce il nome essa è una rivisitazione delle prove compact shear (si veda per es. [8] per una breve presentazione di prove di questo tipo), ma pensata per poter essere impiegata nelle ristrette camere di prova di dardi strumentati, così da poterla utilizzare per generare dati in condizioni di impatto a bassa velocità, che sono, come sopra sottolineato, di grande interesse ingegneristico.

Nel prosieguo presenteremo la prova CENS, i primi risultati sperimentali ottenuti e ne discuteremo l'applicabilità alla determinazione della tenacità interlaminare di materiali compositi. Benché la prova nasca con l'obiettivo di essere impiegata in condizioni di impatto, una caratterizzazione statica è d'obbligo e la presente tratta principalmente di questa. Sono però presentati anche alcuni risultati e analisi riguardanti il caso dinamico.

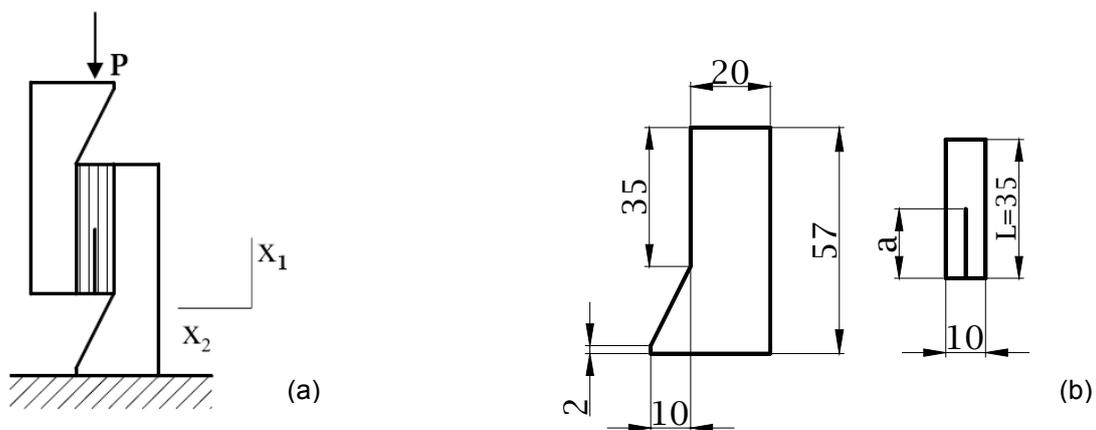


Figura 1: (a) Schema della prova CENS. A tratto il laminato in composito; (b) Dimensioni del provino e del supporto non vincolato della prova CENS. Misure in mm.

## 2. LA PROVA CENS

Il test proposto è schematicamente rappresentato in figura 1-a. Esso prevede di incollare tra due supporti in acciaio un campione di un laminato in composito contenente una delaminazione introdotta sul piano medio del laminato in fase di produzione; uno di tali blocchi è solidale con un morsetto collegato alla macchina di prova, mentre l'altro può essere facilmente sollecitato con l'impiego di un convenzionale punzone per prove in flessione o con il maglio di un dardo a caduta, così che il test possa essere impiegato in un intervallo di velocità di sollecitazione molto ampio, da quelle quasi statiche a quelle impattive. Le dimensioni del provino e dei supporti sono date in figura 1-b; lo spessore dei componenti fuori dal piano  $x_1$ - $x_2$  è stato arbitrariamente fissato pari a  $B=10$  mm.

Per semplicità l'analisi seguente è limitata al caso di laminati con rinforzo fibroso unidirezionale, trattati come materiali omogenei, lineari elastici e trasversalmente isotropi; potrebbe essere applicata, mutatis mutandis, anche al caso di laminati simmetrici rispetto al piano della cricca ma perde di significato in casi più generali.

Il rinforzo fibroso può essere diretto come  $x_1$  oppure come  $x_3$  (perpendicolare al piano della figura 1); considerato l'elevato modulo di elasticità dei compositi di interesse ingegneristico, il sistema non presenta un comportamento assimilabile a quello di un sandwich e sorge pertanto il problema di minimizzare gli sforzi normali trasmessi al laminato pur mantenendo ridotta l'area dei supporti perché essi possano essere inseriti nelle camere di prova di dardi a caduta. Gli sforzi normali sul piano della cricca determinano infatti il modo di frattura.

Per dimensionare i supporti in maniera da ottenere un puro modo II si è deciso di ricorrere ad un'analisi agli elementi finiti della geometria di prova<sup>1</sup>. Per mantenere limitato il numero di parametri liberi in quest'analisi preliminare, ci si è limitati al caso statico.

Il criterio utilizzato è stato quello del minimo rapporto tra fattori di intensificazione degli sforzi [8,9]  $K_I/K_{II}$  al variare della geometria. Questo criterio si presta anche a tenere in conto l'influenza dell'attrito sulla misura: è infatti possibile correlare un eventuale valore di  $K_I$  negativo<sup>2</sup> ottenuto dalle simulazioni, indicante una tendenza delle facce della cricca compenetrarsi e quindi contatto e attrito tra le facce della stessa, con il valore di  $K_{II}$  che effettivamente domina il campo di sforzo all'apice della cricca. In prima approssimazione (cricca in un semispazio) si può scrivere [10]

$$K_{II}^{eff} = K_{II}^{app} + \mu K_I \quad \text{se } K_I < 0 \quad (1)$$

in cui  $\mu$  è il coefficiente di attrito tra le facce della cricca.

L'analisi numerica, condotta a spostamento del punto di applicazione del carico imposto, è stata ripetuta per vari materiali di interesse ingegneristico per verificare che il test fosse applicabile a più sistemi compositi ed ha portato ad individuare la geometria schematizzata in figura 1-b. Per il caso particolare di un composito unidirezionale fibra di carbonio/PEI (tabella 1), su cui sono state eseguite le indagini sperimentali che presentiamo nel seguito, viene riportato in figura 2 l'andamento del rapporto  $K_I/K_{II}$  in funzione della lunghezza di cricca; andamenti simili sono stati riscontrati anche per gli altri materiali [7].

Tabella 1

Costanti elastiche per il laminato usato nelle simulazioni e nell'indagine sperimentale. Moduli in GPa.

Fibra di carbonio – PEI unidirezionale		
$E_{11}=84.8$	$E_{22}=8.5$	$E_{33}=8.5$
$\nu_{12}=0.35$	$\nu_{13}=0.35$	$\nu_{32}=0.35$
$G_{12}= 1$	$G_{13}= 1$	$G_{23}= 3.14$

Come si vede il rapporto resta al di sotto del 3% in un'ampia gamma di lunghezze di cricca; possiamo pertanto ritenere trascurabile l'influenza delle sollecitazioni normali, generino esse apertura delle facce della cricca o attrito tra le stesse (cfr. con [9]).

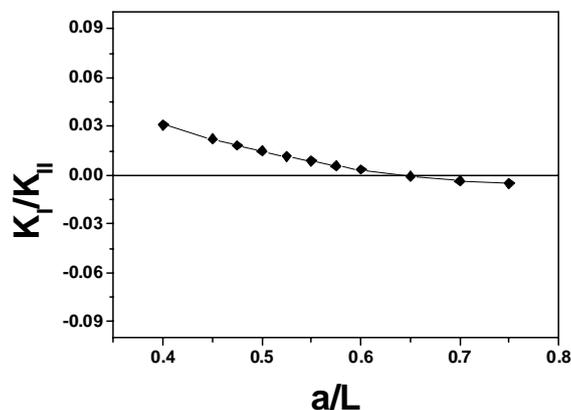


Figura 2. Variazione del rapporto  $K_I/K_{II}$  in funzione della lunghezza di cricca normalizzata (Materiale:Carbon/PEI).

### 3. PARTE SPERIMENTALE

Prove sperimentali sono state condotte su laminati unidirezionali di composito fibra di carbonio/PEI ottenuti per stampaggio a compressione. Delaminazioni iniziali sono state ottenute ponendo sul piano

<sup>1</sup> Tutte le analisi sono state condotte utilizzando il pacchetto software ABAQUS®, Versione 6.5

<sup>2</sup> Ovviamente un valore minore di zero per  $K_I$  non ha senso fisico. Se però emerge dal calcolo è possibile farlo in corrispondenza, oltre che con una tendenza delle facce della cricca a compenetrarsi, con lo sviluppo di sforzi normali di compressione sul piano della cricca. [8]

medio del laminato un film distaccante di 50  $\mu\text{m}$  di spessore. Sono state condotte prove a differenti velocità di spostamento del punto di applicazione del carico,  $V$ : 1 mm/min (quasi statiche), 0.5 m/s e 1 m/s.

Come confronto sono stati anche condotti test CNF (centre notch flexure) [4] sullo stesso materiale. Si tratta di convenzionali prove di flessione in tre punti con delaminazione simmetrica rispetto al punto di carico centrale.

Per quel che concerne le prove quasi-statiche, la determinazione della tenacità può essere effettuata a partire dall'equazione di Irwin-Kies

$$J_{IIC} = \frac{P_c^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

in cui compaiono il carico di innesco  $P_c$  e la cedevolezza del sistema  $C$ . Questa può poi essere agevolmente convertita ad un fattore degli sforzi critico con le relazioni date in [1].

La figura 3-a riporta il tipico andamento della curva carico-spostamento della traversa per le prove CENS, che si dimostrano in buon accordo con le simulazioni. Il comportamento a frattura è instabile, come si osserva tipicamente per le geometrie di tipo compact shear.

La derivata della cedevolezza è stata determinata interpolando i dati misurati sperimentalmente a partire dal diagramma dei carichi, in funzione della variabile  $1/(L-a)$  con un polinomio di secondo grado. Questo consente di ottenere valori della tenacità interlaminare critica in perfetto accordo con quelli determinabili da simulazioni numeriche con il metodo dell'integrale  $J$  [7].

In figura 3-b è riportata invece una curva carico-tempo per prove di impatto. La presenza di un ampio picco inerziale all'inizio del test impedisce di applicare a questi dati le stesse tecniche di elaborazione del caso quasi-statico, come invece è uso fare quando gli effetti inerziali sono di minore entità. Per determinare la tenacità interlaminare si è ricorso ad una tecnica mista sperimentale e numerica, che consiste nell'utilizzare il segnale di carico sperimentale come input per delle analisi dinamiche agli elementi finiti. La tenacità all'innesco viene determinata utilizzando una estensione dell'integrale  $J$  al caso in cui le forze inerziali non siano trascurabili [11]. L'innesco viene identificato con il massimo della curva di carico, come suggerito anche dalla coincidenza tra questo massimo e il massimo nel segnale ottenuto da estensimetri posizionati all'apice della delaminazione.

Il coefficiente di attrito tra il materiale e il film distaccante, lasciato all'interno della delaminazione proprio per ridurre l'attrito, è stato determinato con il metodo del piano inclinato essere pari a  $\mu=0.3\pm 0.03$ .

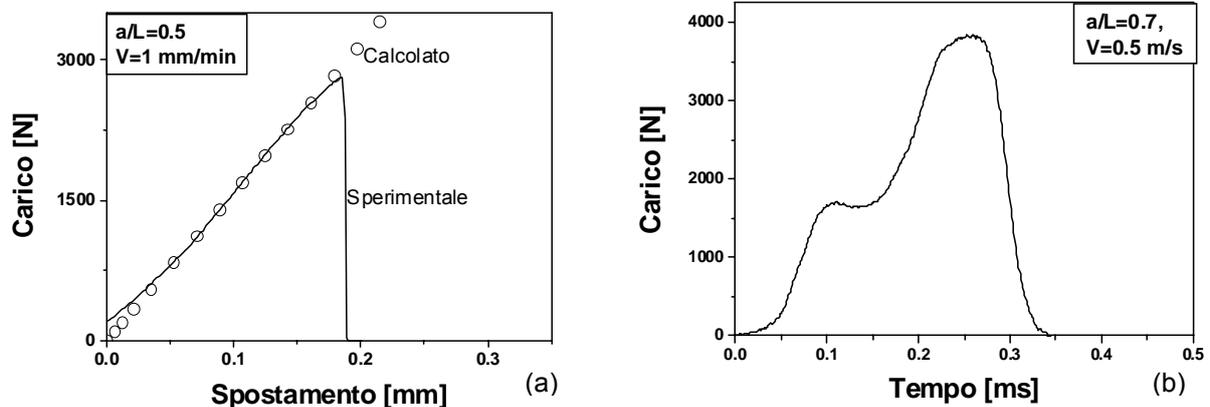


Figura 3. (a) Andamento carico-spostamento della traversa tipico di prove CENS in condizioni quasi statiche. (b) Andamento carico-tempo tipico delle prove CENS in condizioni di impatto a bassa velocità.

#### 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

In condizioni quasi statiche la prova CENS ha fornito risultati più conservativi per la tenacità interlaminare rispetto alle prove CNF (figura 4). Si è pensato che la ragione di questa discrepanza potesse essere ricondotta alla diversa influenza dell'attrito nei due casi.

Sono state pertanto condotte analisi agli elementi finiti delle prove CNF e si è calcolata una correzione dovuta all'attrito tra le facce della cricca (modellate come superfici rigide con attrito coulombiano)

secondo quanto proposto in [12], dove il contributo delle forze d'attrito al lavoro di frattura è così individuato:

$$J_{IIc,f} = \int_{\Gamma} \frac{\partial \tau}{\partial a} [u_1] d\Gamma \quad (3)$$

in cui  $\tau$  sono gli sforzi tangenziali,  $u_1$  gli spostamenti in direzione  $x_1$  e  $\Gamma$  il percorso individuato dai fianchi della cricca. La simulazione delle prove CNF è risultata in ottimo accordo con i risultati sperimentali in termini globali, il valor medio della rigidità della trave delaminata ottenuto sperimentalmente essendo pari a  $155.7 \pm 2.5$  N/mm ed essendo quello calcolato pari a 152.1 N/mm. Il confronto tra i diversi metodi di calcolo è presentato anch'esso in figura 4.

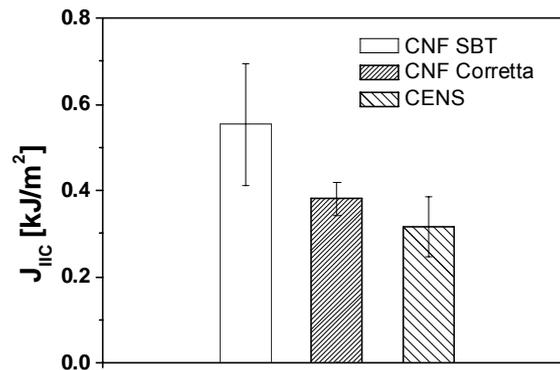


Figura 4. Tenacità interlaminare del composito fibra di carbonio/PEI determinata con tre diversi metodi: prova CNF e teoria delle travi (SBT)[4], prova CNF con SBT e correzione (3) per l'attrito, prova CENS.  $V=1$  mm/min

Non è stato possibile applicare la correzione ai risultati delle simulazioni per la prova CENS poiché per qualunque lunghezza di cricca e per carichi anche ben al di sopra dei carichi sperimentali non è risultato alcun contatto tra le superfici dell'intaglio iniziale.

L'applicazione del fattore correttivo dell'attrito ai risultati delle prove CNF rende confrontabili i valori ottenuti dalle due prove. Le rimanenti, piccole discrepanze, potrebbero essere imputabili ad una modellazione semplicistica dei vincoli nella simulazione della prova CNF: questi sono stati modellati semplicemente come appoggi puntuali, mentre è noto che si ottengono risultati migliori se si modellano anche i supporti cilindrici su cui si poggia il provino in flessione [13]. Questo punto verrà sviluppato ulteriormente in futuro.

Si può quindi concludere che le prove in flessione forniscono risultati comparabili con quelli delle prove CENS se nelle prime si tiene in debito conto il contributo dell'attrito alla tenacità.

Per quanto riguarda invece l'applicazione della prova al caso dinamico, si è dapprima verificata la purezza del modo di frattura. Con riferimento alla figura 5 è possibile fare le seguenti considerazioni. Nel corso della prova si verifica un'apertura delle facce della cricca oltre ad uno scorrimento delle stesse. Le simulazioni hanno permesso di individuare una lunghezza massima del difetto iniziale al disotto della quale la componente di apertura è trascurabile al tempo di frattura, pari a  $0.6L$ . Per lunghezze superiori la frattura invece avviene in modo misto. L'insorgere di questa componente di modo I è legata all'inerzia del supporto metallico colpito dal maglio a caduta.

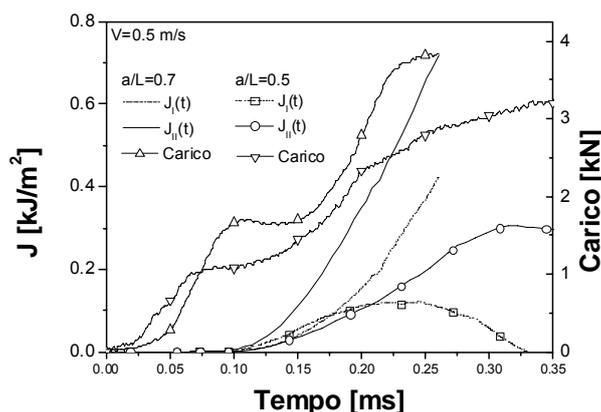


Figura 5. Andamenti del carico e delle componenti I e II dell'integrale J in funzione del tempo per prove CENS in condizioni di impatto, per due diverse lunghezze di cricca. I diagrammi si arrestano al tempo di frattura

Benché il baricentro del sistema giaccia sull'asse di carico, quello del singolo supporto metallico cade al di fuori di quell'asse e un transitorio è necessario perché la risposta dinamica del provino CENS converga verso la soluzione quasi-statica in cui il contributo di modo I è trascurabile.

Questo transitorio può essere più lungo della durata della prova per valori di  $a/L$  maggiori di 0.6, per cui queste condizioni geometriche sono pertanto da evitare.

E' anche preferibile evitare che il materiale sopporti un carico in modo misto prima della frattura, nel caso lo sviluppo della zona danneggiata in modo misto possa avere un qualche effetto sulla misura della tenacità. E' attualmente in corso lo studio di una modifica alla forma del supporto impattato che serva a portarne il baricentro sulla linea di carico. La modifica consiste fondamentalmente nell'aggiunta di un "contrappeso" al supporto colpito dal maglio.

Le prime analisi numeriche in questo senso sono molto incoraggianti. In figura 6-a e in figura 6-b sono confrontate le configurazioni deformate a tempo  $t=0.22$  ms (corrispondente circa al tempo del massimo nel valore di  $J_I$  per la geometria di figura 2) per la geometria originale e per quella modificata. Come si vede, già a questi tempi, con la modifica proposta alla geometria del supporto impattato, l'apertura tra le facce della cricca è completamente assente, benché essa sia ancora presente a tempi molto brevi, forse inevitabilmente.

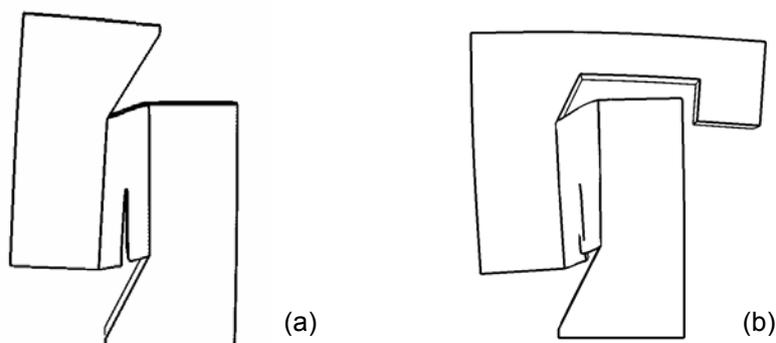


Figura 9. (a) Configurazione deformata a  $t=0,22$  ms,  $V=0.5$  m/s per la geometria di prova CENS. Fattore di scala per gli spostamenti: 40. (b) Configurazione deformata a  $t=0,22$  ms,  $V=0.5$  m/s per la geometria di prova CENS modificata per spostare il baricentro del supporto mobile sulla linea di carico. L'illusione della compenetrazione tra le facce della cricca è data dall'elevato fattore di scala per gli spostamenti.

I risultati ottenuti nel caso delle prove dinamiche sono presentati in figura 7. Come si può vedere, anche nel caso dinamico sono presenti discrepanze, sia per i valori sia per quanto riguarda la dipendenza dalla velocità, tra i risultati ottenuti con i due diversi test. Non è però nota, allo stato attuale delle conoscenze sulla prova CENS, la causa di queste differenze

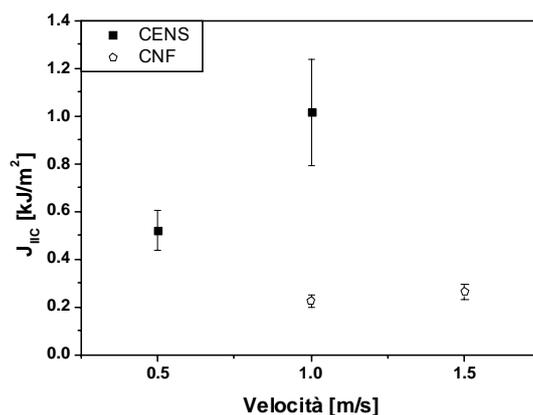


Figura 7. Tenacità interlaminare in funzione della velocità di applicazione del carico per prove di impatto.

## 5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

E' stata proposta la geometria CENS per la determinazione della tenacità interlaminare in modo II dei laminati compositi unidirezionali. La prova è pensata per poter essere impiegata sia in condizioni quasi statiche che di impatto a bassa velocità.

In condizioni quasi statiche, le analisi e la sperimentazione mostrano che:

- la geometria proposta genera una sollecitazione di puro modo II nel laminato.
- la prova è applicabile alla determinazione della tenacità in condizioni quasi statiche con un semplice metodo di calibrazione sperimentale della cedevolezza e fornisce risultati confrontabili con le più convenzionali prove in flessione, a condizione che in queste ultime si tiene in debito conto il contributo dell'attrito. Questa maggior semplicità nel processo di riduzione dei dati compensa la maggior complicazione dell'apparato sperimentale.

Per quel che riguarda invece le applicazioni a velocità più elevate, la prova ancora si presta alla determinazione della tenacità interlaminare, a condizione che siano soddisfatti alcuni vincoli sulla lunghezza di cricca che sono stati individuati in questo studio.

E' attualmente in fase di studio una modifica della geometria di prova che potrebbe consentire di ridurre al minimo la componente di modo I che si registra negli istanti immediatamente successivi all'impatto.

I futuri sviluppi della ricerca prevedono una semplificazione della procedura di analisi dei dati, che potrà implicare la costruzione di una curva di calibrazione dinamica per la tenacità interlaminare critica o l'uso di sistemi di smorzamento delle oscillazioni inerziali, e l'individuazione delle cause di discrepanza tra i risultati delle prove CENS e CNF nel caso dinamico.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Williams J.G. Fracture mechanics of anisotropic materials. In: Application of fracture mechanics to anisotropic materials, a cura di K. Friedrich. Elsevier, Amsterdam, 1989
- [2] O'Brien T.K., Composite interlaminar shear fracture toughness  $G_{IIc}$ : shear measurement or sheer myth? Memorandum tecnico NASA110280/1997
- [3] Todo M., Nakamura T., Takahashi K. Measurement of dynamic interlaminar fracture toughness of FRP laminates using dynamic displacement measuring apparatus. Adv. comp. mat. 1998; 7:285-297
- [4] Maikuma H., Gillespie J.W., Wilkins D. J. Mode II interlaminar fracture of the centre notch flexural specimen under impact loading. J. Comp. Mat. 1990; 24:124-149
- [5] Davies P., Blackman B.R. K., Brunner A. J. Standard test methods for delamination resistance of composite materials: current status. App. Comp. Mat. 1998; 5: 345-364
- [6] L. A. Carlsson, R. B. Pipes. Experimental characterization of advanced composite materials. Prentice-Hall, Edgewood Cliffs, 1987
- [7] Caimmi F. Tesi di Laurea in Ingegneria dei Materiali. Politecnico di Milano, 2005
- [8] Lo K. W., Gong Y.B., Tamiselvan T., Lai M.O. A proposed specimen for  $K_{IIc}$  testing. Int. J. Fracture 2003; 124: 127-137
- [9] Richard H.A. A new compact shear specimen. Int. J. Fracture 1981; 17: R105-R107
- [10] Fett T. Mixed-mode stress intensity factors for partially opened cracks. Int. J. Fracture. 2001;111: L67-L72
- [11] Kishimoto K., Aoki S., Sakata M. Dynamic stress intensity factors using J-integral and finite element method. Eng. Fract Mech. 1980; 13:387-394
- [12] Bach M., Khludnev A. M., Kovtunenkov V.A. Derivatives of the energy functional for 2D-problems with a crack under Signorini and friction conditions. Math. Meth. Appl. Sci. 2000; 23: 515-534
- [13] Davidson B.D., Sun X. Effects of friction, geometry and fixture compliance on the perceived toughness from three and four point bend end notch flexure tests. J. Reinf. Plast. Comp. 2005; 24: 1611-1628

