

GRUPPO ITALIANO FRATTURA (IGF)
VIII Convegno Nazionale
Genova, 27, 28 e 29 maggio 1992

RESISTENZA A FRATTURA DI MATERIALI PLASTICI RINFORZATI CON FIBRE DI VETRO CORTE E LUNGHE

R. Doglione*, A. Marcelli*, E. Ilia**, A. Burdese*

- * Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino
- ** Universiteti Politeknik i Tiranes, Fakulteti i Inxhinierise Mekanike, Tirana, Albania

INTRODUZIONE

La tecnologia dei materiali compositi utilizzanti fibre di vetro come rinforzo ha avuto, negli ultimi anni, un forte sviluppo in numerose applicazioni strutturali. In particolare, giustificati dal loro basso costo, sono stati ampiamente utilizzati materiali del tipo GRP (glass reinforced plastics), costituiti da resine poliestere insature rinforzate con fibre di vetro lunghe e materiali del tipo SMC (sheet molding compound), costituiti da resine poliestere insature contenenti cariche inerti e rinforzati con fibre corte.

Per questi materiali sono usualmente conosciute e studiate le caratteristiche tensili, mentre poco è noto a proposito del loro comportamento in presenza di difetti o discontinuità strutturali. Ma, in effetti, i pericoli di cedimento dei quali è necessario tener conto nella progettazione di componenti strutturali, derivano in larga misura dai fenomeni di fatica e dalla presenza di concentratori di sforzo in corrispondenza di fori o di intagli. Nel caso specifico del comportamento a fatica, è noto da molto tempo [1] che i materiali compositi rinforzati con fibre sono quasi insensibili agli effetti d'intaglio, manifestando in tale situazione un abbassamento del limite di fatica mai superiore al 10%. Di ben altra rilevanza è invece l'effetto delle discontinuità nel caso di carico statico. Per tale motivo vari ricercatori hanno tentato di formulare previsioni sulla resistenza dei manufatti mediante l'applicazione di principi di Meccanica della Frattura.

In generale, della problematica del danneggiamento tensionale dei materiali compositi, si occupa la cosiddetta Meccanica del Danno

[2], che si differenzia dalla Meccanica della Frattura classica per il fatto che nei materiali compositi spesso i difetti non sono assimilabili a cricche, ma assumono la forma di zone danneggiate diffuse. Di conseguenza i concetti di singolarità dei campi tensionali vengono a cadere, oppure le singolarità si attenuano. L'applicazione della Meccanica del Danno, per quanto più appropriata al caso in esame, non ha portato ad identificare parametri di uso generale e di impiego relativamente facile in progettazione, a differenza di quanto è invece possibile in termini di Meccanica della Frattura. Per tale ragione, nonostante il materiale esaminato sia assai lontano dalle condizioni di omogeneità e isotropia, l'approccio al problema sulla base della Meccanica della Frattura Lineare Elastica può talora portare a qualche successo.

Nonostante le perplessità di fondo legate al fatto che il materiale non sia omogeneo (le difficoltà legate all'anisotropia sono abbastanza semplicemente aggirabili), anche con comportamento elastico non ben definito l'applicazione della Meccanica della Frattura ha avuto uno sbocco pratico nella determinazione sperimentale di valori di tenacità a frattura K_{IC} per alcuni materiali. La convalidazione del significato della tenacità a frattura nei suddetti casi appare giustificata dall'evidenza sperimentale, ove si ricorra a criteri quali la riproducibilità sperimentale dei valori ottenibili e se ne riferisca l'entità a considerazioni relative al meccanismo di danneggiamento. Sviluppo e morfologia del danno nei materiali compositi sono stati un argomento molto studiato e dibattuto, di cui si trovano ampie notizie in letteratura (per una recente rassegna sull'argomento si rimanda al riferimento [3]); nonostante l'approfondita conoscenza delle caratteristiche del danno, criteri di frattura basati sullo stato tensionale e di danneggiamento locale, aventi quindi maggior valore euristico dell'applicazione brutale della Meccanica della Frattura Lineare Elastica, non hanno incontrato il favore dei ricercatori, principalmente per le difficoltà e i costi richiesti dall'applicazione di metodi di calcolo tridimensionali.

Ferma restando in prospettiva la necessità di approcci che leghino la Meccanica della Frattura a criteri di tipo locale, i soli che possano tenere conto della reale natura dei materiali, è evidente la necessità di consolidare maggiormente l'applicazione dei criteri della Meccanica della Frattura ai materiali compositi, sia considerando nuove classi di materiali o nuove varianti di materiali già esistenti, sia approfondendo il dibattito sul significato fisico che i valori di tenacità a frattura possono rivestire per materiali già provati.

In generale, ai fini dell'applicabilità della Meccanica della Frattura nel modo I, si possono suddividere i materiali compositi caricati con fibre in grosse famiglie: con fibre perpendicolari alla direzione del carico, fibre orientate con angoli diversi e fibre parallele alla direzione del carico. Nel primo caso, l'applicazione della suddetta metodologia non ha incontrato sostanziali difficoltà sperimentali, in quanto, dal punto di vista macroscopico, il piano di frattura è perpendicolare alla direzione del carico. Anche da un punto di vista più strettamente

fisico, l'approccio al problema tramite parametri come K_C o G_C sembra giustificato dal fatto che il tipo di frattura, che è essenzialmente una delaminazione, è governato da criteri di massima tensione di taglio all'interfaccia fibra-matrice. Ben diverso è il caso in cui le fibre non sono perpendicolari alla direzione del carico: molti tipi di comportamento sono ora possibili, in correlazione con la geometria del rinforzo e l'adesione fibre-matrice. La matrice, di per se, gioca un ruolo trascurabile. E' noto infatti che se l'interfaccia matrice-rinforzo è molto forte [4,5], caso tipico dei compositi fibra di carbonio-matrice epossidica, l'energia di frattura viene spesa per alimentare fenomeni di danno quali scollamento e sfilamento con rottura conseguente delle fibre, che però rimangono confinati in una sorta di zona di processo all'apice del difetto, portando ad un cedimento con le tipiche caratteristiche della frattura in elasticità lineare. Al contrario, se l'adesione fra matrice e rinforzo è scarsa, come per compositi vetro-poliestere, e soprattutto se le fibre sono lunghe, i meccanismi di scollamento e rottura successiva provocano una crescita su larga scala della zona di danno, finendo per rendere non più significativo l'effetto di concentrazione di sforzo dovuto alla presenza del difetto. Qualora ciò si verifici, l'applicazione della Meccanica della Frattura è molto dubbia.

Queste perplessità, che attualmente non sono ancora superate, hanno acceso la discussione sulla cosiddetta zona di processo [3,6]. Essa non è assimilabile alla zona plastica dei materiali metallici, ed ha un'estensione almeno di un ordine di grandezza più grande di quella che sarebbe calcolabile con le formule di Irwin. Inoltre, non è affatto chiaro se le sue dimensioni varino con il quadrato del fattore d'intensificazione degli sforzi applicato, come dovrebbe accadere se la singolarità all'apice della cricca avesse ordine d'infinito corrispondente ad un mezzo e fosse cioè K il fattore controllante il processo di frattura. Ciononostante, la relativamente buona riproducibilità delle condizioni sperimentali ha spinto alcuni ricercatori [6, 7, 8] a parlare di cedevolezza e quindi di cricca equivalente al danno, ed infine a proporre di caratterizzare il comportamento a frattura mediante una curva R .

Ulteriori perplessità emergono considerando il fatto che fibre orientate in direzione non perpendicolare a quella di applicazione del carico inducono localmente modi di frattura misti I, II e III (per il modo misto I e II, si veda ad esempio il riferimento [9]).

Questo articolato panorama di esperienze mostra comunque, in maniera chiara ed inequivocabile, che la mancanza di risultati solidi ed universalmente accettati dipende da incertezze di fondo non ancora risolte in merito all'applicabilità della Meccanica della Frattura ai materiali compositi. L'incertezza è inoltre più forte nel caso dei plastici rinforzati con fibre di vetro. Si rende quindi necessario, prima di introdurre discorsi basati sulle curve R , approfondire sulla base di valori sperimentali e considerazioni teoriche le conoscenze sull'attendibilità e sul significato fisico, in queste applicazioni, della tenacità a frattura. In questo lavoro ci proponiamo pertanto, sulla base di

prove effettuate variando la natura del carico applicato e le dimensioni dei campioni, di portare un contributo sperimentale allo studio della fondatezza e della riproducibilità dei valori di K_C di materiali plastici rinforzati con fibre di vetro corte e lunghe, correlandoli, ove possibile, con la natura e la geometria del rinforzo.

I MATERIALI ESAMINATI

Il composito qui preso in esame (GRP) è costituito da resina poliestere insatura stirenata rinforzata con tessuti o mat unifilo in fibra di vetro. Il tessuto è formato da fasci di sezione rettangolare (mm5x0.3) contenenti ciascuno migliaia di fibre continue di vetro del diametro compreso tra 16 e 18 μm (roving) tessuti (tipo tela) nelle direzioni $0^\circ/90^\circ$. Il mat unifilo è formato da fasci contenenti una cinquantina di fibre di vetro, disposti casualmente a formare una specie di tessuto non tessuto. La produzione finale del manufatto in GRP è avvenuta seguendo la tecnica di lavorazione di tipo artigianale "Hand lay-up", che consiste nel rivestire con un pennello od un rullo una preforma in tessuto o mat in fibra di vetro supportata su di un modello in materiale inerte trattato con un distaccante e nel lasciare quindi polimerizzare il materiale a temperatura ambiente. Tale tecnica è usata per produrre manufatti di grandi dimensioni o aventi forme molto regolari. Trattasi di tecnologia di tipo praticamente manuale, utilizzata pertanto in impianti con bassa produttività e automazione quasi nulla; il materiale prodotto ha caratteristiche che non sono mai perfettamente riproducibili.

Sono stati utilizzati anche compositi con carica inerte (tipo SMC) che differiscono dai precedenti GRP sia in parte per i componenti, sia, radicalmente, per la tecnologia di produzione. La resina è ancora di tipo poliestere insaturo stirenato, ma con aggiunta di cospicue percentuali di cariche inerti (carbonato di calcio), che hanno la funzione di abbassare il costo del materiale e di migliorare lo scorrimento delle fibre di vetro in fase di stampaggio. La percentuale di carbonato di calcio è del 60% nel caso del composito SMCR27, che contiene il 27% di vetro sotto forma di fasci di fibre della lunghezza di circa 25 mm, disposti su un piano in maniera totalmente casuale (quindi R sta per random, mentre il numero 27 della sigla specifica la percentuale in peso del vetro). Il composito SMCR33, molto simile al precedente, con il 33% di vetro, contiene circa il 50% di carbonato di calcio. Infine, il composito SMCC30R27 contiene solo il 15% di carica minerale, mentre contiene il 27% di vetro random e il 30% di fibra di vetro continua allineata in una sola direzione. Inoltre i due tipi di rinforzo sono disposti in strati sovrapposti (a sandwich, cioè il vetro continuo occupa il centro del manufatto, mentre le superfici contengono solo vetro random. Altri componenti che possono essere presenti sono:

- 1) resine termoplastiche in piccola quantità nei tipi R27 ed R33, il cui scopo è quello di migliorare l'aspetto superficiale di parti a vista;

- 2) agenti di distacco, utili a favorire il distacco del manufatto dagli stampi;
- 3) ispessenti, il cui compito è di ottimizzare la viscosità del materiale sotto l'azione della pressione permettendo uno scorrimento uniforme durante lo stampaggio;
- 4) catalizzatori di polimerizzazione.

I manufatti di SMC vengono prodotti a partire da una pasta costituita da resina e additivi, che viene combinata con le fibre di vetro per generare un foglio continuo (prepreg), che viene poi avvolto in rotoli e lasciato maturare. In seguito, raggiunto il necessario grado di consistenza, il prepreg viene tagliato e avviato alla pressatura. Lo stampaggio viene effettuato in presse idrauliche con stampi riscaldati a 150°C. Sotto l'effetto combinato di pressione e calore, il materiale scorre e assume la forma voluta. Normalmente prodotte con questa tecnica sono parti per l'industria dell'auto e del trasporto in genere.

Sia nel caso dell'SMC, sia in quello del GRP, le fibre di vetro destinate ad essere usate come rinforzo subiscono un trattamento superficiale di finitura. Scopo di questo trattamento è quello di migliorare l'adesione all'interfaccia tra fibra e matrice. Si tratta in genere di composti in grado di ancorarsi con legami stabili (veri e propri legami chimici) alla superficie del rinforzo vetroso e di possedere nell'ambito della propria molecola altri gruppi funzionali in grado di reagire chimicamente con gruppi funzionali presenti nella matrice resinosa. In questo caso il trattamento superficiale delle fibre è stato effettuato con miscele di silani e poliesteri a basso peso molecolare. Il meccanismo di azione di questi composti sulle interfacce è tuttora in discussione. L'effetto pratico del trattamento superficiale sul materiale composito fibra di vetro-resina poliestere è quello di incrementare le proprietà fisico-meccaniche e la resistenza all'umidità. E' confermato che la presenza di queste molecole permette una certa flessibilità all'interfaccia rinforzo-matrice, migliora il trasferimento delle tensioni e quindi in generale ne migliora le proprietà meccaniche.

PARTE SPERIMENTALE

A partire da pannelli di compositi di spessore pari a circa 3 mm, è stata ricavata un'ampia serie di campioni di trazione e di meccanica della frattura. Questi ultimi, di tipo CT e CCT, sono stati preparati secondo i dettami delle norme ASTM E399-83 ed ASTM E561-86. Lo spessore dei provini era in tutti i casi pari a circa 3 mm, mentre la larghezza era $W = 25$ mm per i campioni CT e $W = 75$ mm per i campioni CCT. Per ogni tipo di materiale sono stati preparati almeno 6 campioni CT e 6 CCT; nel caso del materiale SMCC30R27 sono stati preparati campioni CT con fibre di vetro continuo perpendicolari e parallele alla direzione del carico, mentre sono stati provati solo provini CCT con fibre parallele alla direzione del carico. Le prove sono state eseguite mediante una macchina di prova servoidraulica universale MTS, svolgendo le prove in controllo di deformazione.

I risultati delle prove di trazione sono riportate nella Tabella 1, dove compare, oltre al valore del modulo elastico, il solo valore della tensione di rottura. La tensione di snervamento non è ben definibile nella maggior parte dei casi, considerato che in questi tipi di materiali compositi non esiste un comportamento elastico ben definito. L'allungamento a rottura oscilla, per tutte le combinazioni di materiali, fra il 2 e il 5%.

TABELLA 1: caratteristiche meccaniche tensili di GRP ed SMC.

	GRP(unif.)	GRP(tess.)	SMCR27	SMCR33	SMCC30R27
σ_r [MPa]	100	200 (100)	72	100	345(60)
E [GPa]	-	20.4 (13)	12.5	14	25

Nota: per l'SMCC30R27 le proprietà meccaniche sono state misurate sollecitando il materiale nella direzione delle fibre continue di vetro, il valore di resistenza a trazione riportato tra parentesi è relativo alla medesima proprietà misurata in direzione ortogonale alla direzione delle fibre di vetro continue. I valori riguardanti il GRP tessuto sono stati determinati lungo una delle due direzioni dei fasci di fibre e a 45 gradi (valore in parentesi).

TABELLA 2: tenacità a frattura K_C di SMC e GRP.

	GRP (unif.)	GRP (tess.)	SMCR27	SMCR33	SMCC30R27
K_{CCT} [MPa \sqrt{m}]	10 \pm 1	12 \pm 3	10 \pm 2	13 \pm 2	37 \pm 5*
K_{CT} [Mpa \sqrt{m}]	13 \pm 2	>15**	13 \pm 7	14 \pm 7	>25**

*) valori misurati applicando il carico parallelamente alla direzione delle fibre continue.

***) il significato della disuguaglianza indica che tali tipi di provini si sono rotti in prossimità dei fori dei perni degli afferraggi in corrispondenza del segnato valore del fattore d'intensità delle tensioni.

Le prove di meccanica della frattura sono state condotte su campioni non precriccati: nel caso specifico di questi materiali, l'affaticamento non produce una cricca ben definita come nel caso dei materiali metallici, ma provoca la formazione di una zona di danno diffuso che cresce al crescere del numero di cicli, e che

influenza l'andamento della successiva prova di frattura. Per svincolarsi comunque il più possibile dall'effetto del raggio di fondo intaglio, che comunque non è lo stesso del caso dei metalli, l'apice del difetto è stato appuntito manualmente tramite una lametta da rasoio, in accordo con la nuova proposta di norma dell'ESIS per la determinazione della tenacità a frattura nei materiali plastici [10]. I raggi di fondo intaglio sono stati trovati essere tutti dell'ordine dei 5 centesimi di millimetro. In Tabella 2 sono riportati i valori medi della tenacità a frattura per ciascun materiale: quest'ultima è stata simboleggiata con K_C , in quanto è rappresentativa solo per lo spessore di tre millimetri, non pretendendo di rappresentare anche la situazione di deformazione piana, posto che questa possa esistere in senso classico in questi materiali.

DISCUSSIONE

Come accennato nella parte sperimentale, i valori critici del fattore d'intensità delle tensioni sono denominati K_C per sottolineare il fatto che sono stati ottenuti in corrispondenza di manufatti di spessore pari a 3 mm. Occorre inoltre precisare che, a differenza di quanto prescritto nella norma ASTM E399 e nella proposta di norma dell'ESIS [10], le condizioni critiche vengono collocate in corrispondenza del massimo della curva carico-apertura della cricca, Figure 1 e 2. Quest'assunzione nasce da due fatti: il primo è che il diagramma non ha mai un tratto elastico lineare ben definito ed esteso come nel caso dei materiali metallici, per cui l'intersezione con la retta con pendenza corrispondente al 95% del tratto elastico porta a valori di K_C esageratamente dispersi ed irriproducibili. In secondo luogo, la vera instabilità globale del materiale si verifica al carico massimo, dove le seghettature manifestano il cedimento per rottura e sfilamento massivo delle fibre di vetro. L'attribuzione di valore critico al valore di K calcolato in corrispondenza del massimo gode inoltre del vantaggio che porta a valori decisamente più riproducibili del caso precedente. Per quanto riguarda invece il significato fisico di K_C come tenacità a frattura, si rimanda alla discussione sottostante.

I risultati della Tabella 2 dimostrano innanzitutto le notevoli difficoltà dell'approccio di K_C quando le fibre sono parallele alla direzione del carico applicato (SMCC30R27 e GRP tessuto). In particolare, con campioni di tipo CT, non è stato possibile fratturare la provetta in modo I, mentre tale difficoltà è stata in qualche modo superata con i campioni CCT. Nei materiali qui esaminati, che dal punto di vista applicativo sono caratterizzati da basso costo derivante dall'impiego del poliestere al posto della ben più costosa resina epossidica, la scarsa adesione fibra-matrice scarica interamente sul rinforzo le tensioni che insorgono quando vengono applicati sforzi esterni. Come già accennato nell'introduzione, questo fenomeno è causa del mancato confinamento della zona di danno, che in questi materiali finisce per allargarsi in maniera indipendente dai valori di K applicati. Le sostanziali differenze di comportamento fra i campioni CT e quelli CCT, consiste nel fatto che nel primo caso il danno

propaga nella zona attorno ai fori dei perni degli afferraggi, zona che finisce per diventare la più debole e perciò la prima a cedere. Mentre nel caso dei campioni CCT invece, trascurando gli unici due casi in cui l'SMCC30R27 ha manifestato importanti fenomeni di danno nella zona degli afferraggi, il pull out delle fibre ha provocato l'estensione della zona di processo su vasta scala, (Figura 3), ha impedito il verificarsi di un piano di frattura di modo I e ha portato a fenomeni di scorrimento e rottura in una zona la cui estensione è dello stesso ordine di grandezza di quello riscontrato nelle prove di trazione.

Le prove sembrano dunque confermare per i materiali SMCC30R27 e GRP tessuto, anche nel caso più favorevole possibile dei campioni CCT, che il fattore d'intensità delle tensioni governa l'andamento del danno solo nelle prime fasi del carico, dove il diagramma carico-apertura della cricca (come esempio Figura 2 per il GRP tessuto) è continuo. Nella parte alta del diagramma, le discontinuità corrispondono a debonding e pull-out di fibre o di interi fasci di fibre, e quindi sono da riguardare come la manifestazione di danno su larga scala, non più correlabile ad un fattore d'intensità delle tensioni. Si può quindi affermare che il processo di frattura di un materiale composito a fibra continua parallela alla direzione del carico, caratterizzato da scarsa adesione fra fibra e matrice, è governato da una singolarità all'apice del difetto (fig. 4) che solo inizialmente ha ordine d'infinito corrispondente a un mezzo (K controlla il processo di frattura), mentre, man mano che il danno propaga, l'ordine d'infinito della singolarità si attenua, tendendo a zero per carichi vicini al carico massimo raggiunto nel corso della prova. Alla fine, quindi, è come se si stesse svolgendo una normale prova di trazione, in quanto non esiste più effetto di concentrazione delle tensioni, Figura 4. I valori di K_C riportati in Tabella 2 sono perciò inconsistenti con la realtà fisica del processo di frattura che, in questi materiali non può essere significativamente descritto in termini di Meccanica della Frattura.

La differente geometria del rinforzo nel caso dei materiali SMCR27, SMCR33 e GRP unifilo, sebbene sempre in presenza di scarsa adesione fibra-matrice, conferisce un comportamento a frattura decisamente più simile a quello dei materiali metallici. Valgono le constatazioni sperimentali che la frattura avviene macroscopicamente in modo I (Figura 5) e che la zona di processo rimane contenuta e comunque correlabile al fattore d'intensità delle tensioni applicato. Osservazioni microscopiche su campioni di frattura ottenuti interrompendo le prove a varie frazioni del carico massimo, e opportunamente lucidati con procedure metallografiche, hanno permesso l'osservazione della zona di danno e la verifica di una sua dipendenza dal K esterno applicato. Le difficoltà di definire in maniera precisa, quantitativa e misurabile la zona di danno, hanno però impedito la valutazione del suo tipo di correlazione con il fattore d'intensità delle tensioni; non si è quindi in grado di affermare con sicurezza documentata sperimentalmente che l'ordine d'infinito della singolarità all'apice della cricca è costantemente uguale a un mezzo per tutta la durata del processo di frattura.

Rimandando a studi più approfonditi sulla zona di processo il compito di stabilire se il K_C possa essere considerato veramente rappresentativo come tenacità a frattura dal punto di vista della singolarità del campo tensionale, resta il fatto di una sua discreta riproducibilità sperimentale nel caso dei campioni CT, riproducibilità che diventa decisamente buona con l'impiego delle provette CCT. Si suggerisce pertanto, al fine di un uso ingegneristico dei dati ricavati per via sperimentale, di considerare i valori della Tabella 2 come validi nel caso dei materiali compositi non contenenti fibra continua in direzione parallela al carico e se ne ritiene interessante un'ulteriore conferma sulla base di un maggior numero di risultati sperimentali ottenuti anche in altri laboratori. E' tuttavia già significativo constatare che la dispersione dei risultati è assai contenuta nei campioni CCT: questo risultato si spiega considerando che la natura puramente di trazione degli sforzi applicati costringe il danno a concentrarsi in corrispondenza della sezione ristretta delle provette, senza influenza di altre parti deboli lontane del campione che possano in qualche maniera interagire con il processo di frattura principale. A tale proposito è significativo notare come i valori di K_C determinati con i provini CCT risultino sistematicamente più bassi: non intervenendo fenomeni di danneggiamento passivo, e di entità variabile da caso a caso, capaci di sottrarre energia al processo di frattura principale, questo rimane il solo presente e rappresenta esclusivamente la risposta del materiale. Infine, riguardando i risultati sperimentali in questa luce, emerge l'opportunità di considerare ingegneristicamente come veramente rappresentativi della tenacità dei materiali SMCR27, SMCR33 e GRP unifilo i valori di K_C determinati mediante campioni CCT. Per ottenere misure attendibili è invece opportuno escludere campioni di tipo CT, mentre ammissibili sono i campioni SENT (Single Edge Notched Tension), anche se i CCT sembrano preferibili per il fatto che due apici di difetto mediano meglio il comportamento di materiali aventi, per loro natura, struttura e comportamento molto variabili, con abbassamento conseguente della dispersione dei risultati sperimentali.

CONCLUSIONI

Sono state condotte prove di meccanica della frattura su materiali plastici rinforzati con fibre di vetro corte e lunghe e aventi impiego nell'industria. I risultati sperimentali dimostrano la non validità dell'approccio della Meccanica della Frattura nei casi in cui sono presenti fibre continue parallele alla direzione del carico (SMCC30R27 e GRP tessuto), che provocano un'estensione del danno su larga scala, vanificando la singolarità del campo tensionale all'apice della cricca. Negli altri casi (SMCR27, SMCR33, GRP unifilo), sembra invece confermata la validità ingegneristica dei valori di tenacità a frattura K_C . Le prove hanno inoltre posto in evidenza che i risultati più significativi, riproducibili con bassa dispersione di valori, si ottengono con l'impiego di campioni di frattura tipo CCT, che sono sollecitati esclusivamente a trazione.

RINGRAZIAMENTI

Ricerca eseguita con il contributo del CNR (Contratto n° 89.0061586 pos. 115.07725 P.F. Materiali Speciali per Tecnologie Avanzate).

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. V. Ramani, D. P. Williams "Notched and unnotched fatigue behavior of angle-ply graphite/epoxy composites", ASTM STP 638, pp. 27-46 (1977).
- [2] A. Corvi, S. Reale, D. Vangi "Cedimento, danno e frattura nei laminati in composito", Atti del V Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura, Trento 8-9 giugno 1989.
- [3] C. Bathias "Fracture and fatigue of high performance composite materials: mechanisms and prediction", Eng. Frac. Mech. Vol. 40, No. 4/5, pp. 757-783, 1991.
- [4] S. Bandyopadhyay, E. P. Gellert, V. M. Silva, J. H. Underwood "Microscopic Aspects of Failure and Fracture in Cross-Ply Fibre Reinforced Composite Laminates", J. of Composite Materials, Vol. 23, pp. 1216-1231, Dec. 1989.
- [5] O. Sbaizero "Curva R in compositi ceramici LAS/SiC", Atti del VII Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura, Firenze 13-14 giugno 1991, pp. 217-226.
- [6] C. R. Wachnicki, J. C. Radon "Fatigue crack growth measurement in a CSM composite using compliance and Moiré techniques", Composites, Vol. 15, No. 3, July 1984, pp.211-216.
- [7] S. Gaggar, L. J. Broutman "Crack Growth Resistance of Random Fiber Composites", J. of Composite Materials, Vol. 9, pp. 216-227, July 1975.
- [8] M. A. Solar, F. J. Belzunce "Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester", Composites, Vol. 20, No. 2, March 1989, pp. 120-124.
- [9] S. S. Wang, E. S. M. Chim, T. P. Yu, D. P. Goetz "Fracture of Random Short-Fiber SMC Composite", J. of Composite Materials, Vol. 17, pp. 299-315, July 1983.
- [10] "A Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) Standard for Determining K_C and G_C for Plastics", Testing Protocol, marzo 1990, proposto dal Task Group on Polymers dell'ESIS.

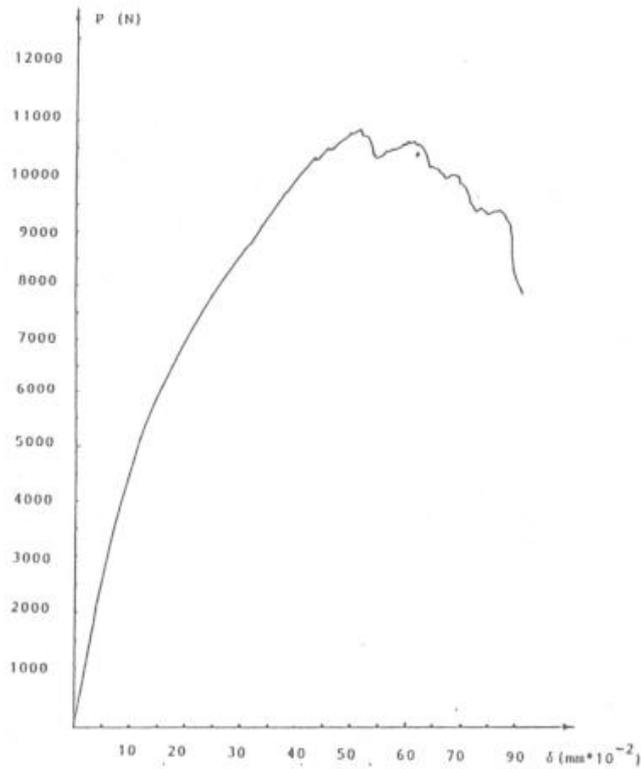


Fig. 1. Diagramma carico-apertura della cricca nel caso di un provino CCT (GRP rinforzato con stuoia bilanciata).

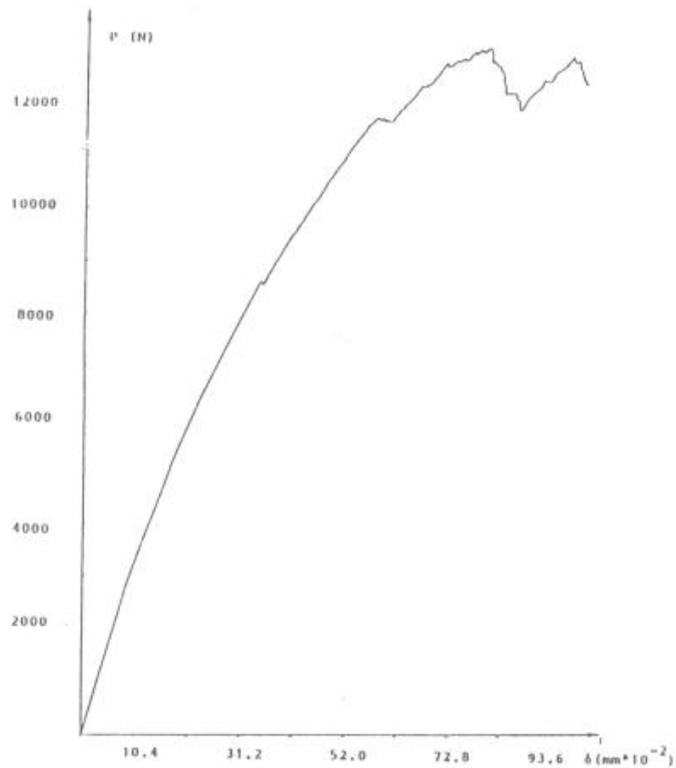


Fig. 2. Diagramma carico-apertura della cricca nel caso di un provino CCT (SMCR27).

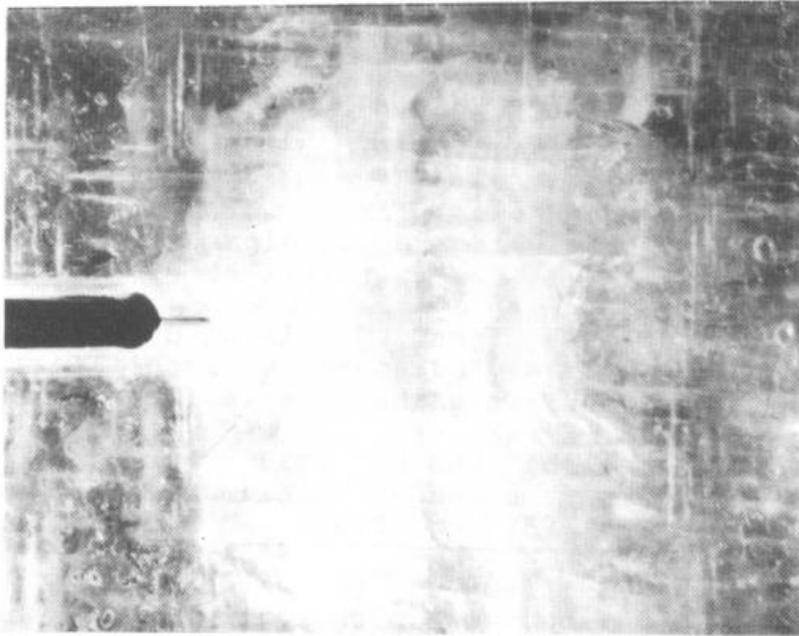


Fig. 3. Aspetto superficiale della zona di danno estesa su vasta scala su un provino CCT (GRP rinforzato con stuoia bilanciata)

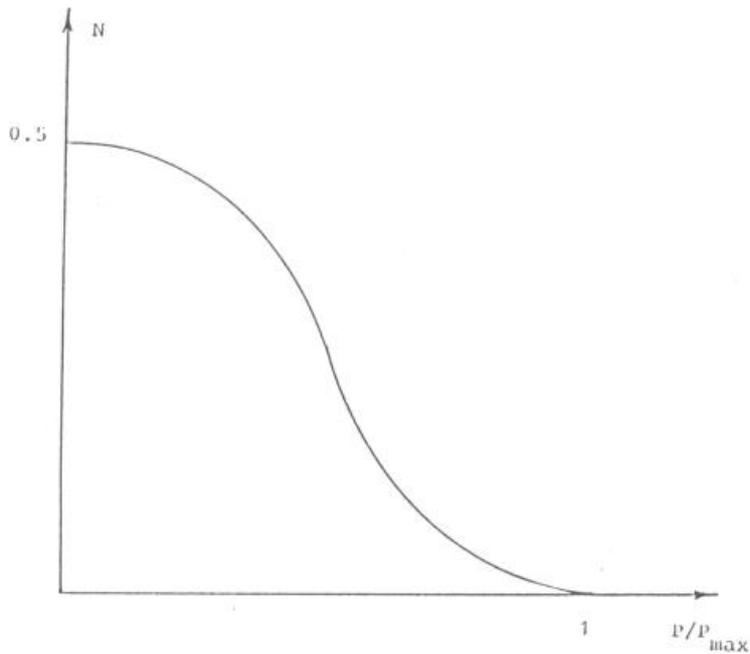


Fig. 4. Andamento qualitativo della singolarita' del campo di tensioni durante una prova di Meccanica della Frattura in un composito con fibra continua parallela alla direzione del carico.

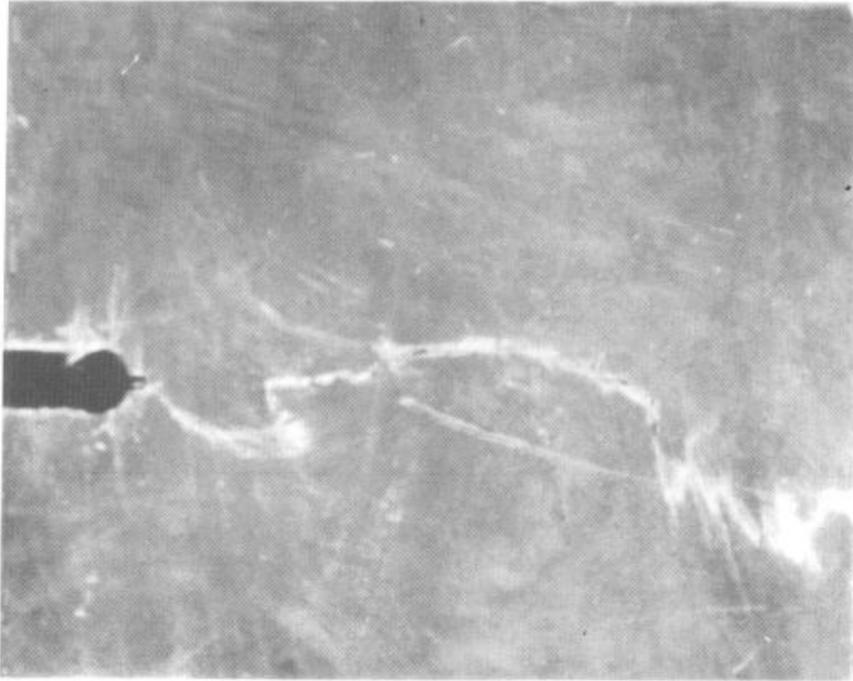


Fig. 5. Aspetto superficiale della cricca su un provino in SMCR33 dove si vede che la frattura avviene nel modo I.