

CAPITOLO 5

MISURA DELLA TENACITA' ALLA FRATTURA

In questo capitolo vengono descritte le prove che sono state eseguite seguendo le indicazioni degli Standard [5.1] e [5.2], per la misura della tenacità alla frattura, espressa in termini di K_{IC} e G_{IC} , su due tipologie di materiali: PMMA e resina epossidica tenacizzata e curata per irraggiamento. Le prove sono state eseguite preparando provini di tipo SENB. Dopo aver fornito ulteriori dettagli generali sull'attrezzatura sperimentale impiegata, e sul tipo di post-processamento dei dati misurati, si descrivono criticamente i risultati delle prove. Si descriveranno per primi i risultati ottenuti sui provini in PMMA, essendo le prove su questi materiali state eseguite in fase preliminare per la messa a punto del procedimento. Nella seconda parte del capitolo invece si descriveranno le prove eseguite sui provini in resina epossidica, obiettivo finale dell'oggetto di questa tesi.

5.1 Obiettivo delle prove sperimentali.

Le prove sperimentali implementate in questo lavoro hanno l'obiettivo di caratterizzare la tenacità alla frattura in materiali plastici con comportamento prevalentemente fragile, quali in genere sono le comuni resine termoindurenti (*Thermoset Resins*) impiegate in campo strutturale, ad esempio come matrici per materiali compositi per strutture primarie¹.

Come introdotto nel paragrafo precedente, quando il materiale in esame ha un comportamento prevalentemente elastico lineare, i parametri della Meccanica della Frattura Lineare Elastica che definiscono la tenacità alla frattura del materiale sono: il

¹ In questo contesto il termine strutture primarie ha il significato tipico dato a questo termine in ingegneria strutturale, dove *primary structures* (al contrario delle *secondary structures*) sono quelle strutture il cui cimento meccanico e la resistenza e rigidezza strutturale sono gli aspetti prevalenti in fase di progettazione.

Fattore di Intensificazione delle Tensioni Critico K_{IC} (*Critical Stress Intensity Factor* ovvero *Fracture Toughness*) ed il Tasso di Rilascio di Energia Critico G_{IC} (*Critical Strain Energy Release Rate*).

In base al carattere di parametro di similitudine di K e G [5.3], descritto nel capitolo 4, queste proprietà sono importanti in quanto stabiliscono le relazioni tra resistenza residua del materiale e dimensioni del difetto.

In generale la metodologia di misura riportata in [5.1] e [5.2] consiste nel sollecitare in modo quasi-statico, con carichi monotoni crescenti, provini di forma unificata in cui è stata creata una cricca di dimensioni unificate. Dalla conoscenza delle relazioni analitiche di K e G , e dalla misura della curva Carico-Spostamento, e del carico massimo di rottura, si ottengono quindi i valori di K_{IC} e G_{IC} .

Affinché i procedimenti per il calcolo di K_{IC} e G_{IC} indicati in [5.1] e [5.2] conducano a risultati significativi, una serie di condizioni devono verificarsi, di seguito riassunte:

Il materiale oggetto della prova deve presentare nella zona all'apice della cricca uno stato piano di deformazione (SPD);

La cricca prodotta nel provino deve essere molto acuminata (raggio di curvatura all'apice della cricca $< 10\div 20\ \mu\text{m}$);

La zona plastica all'apice del difetto deve essere di dimensioni ridotte, minori dello spessore, come indice di applicabilità della MFLE;

Il non soddisfacimento in particolare delle prime due condizioni porta alla determinazioni di valori del fattore di intensificazione delle tensioni $K_Q > K_{IC}$.

Nelle norme citate sono indicati una serie di criteri di controllo (*size e cross check criteria*) il cui compito è quello di stabilire se le condizioni di sopra sono verificate e quindi il valore determinato di K , ovvero il valore detto anche di tentativo ed indicato nelle formule con K_Q , sia in effetti il valore di K_{IC} tipico del materiale.

5.2 Implementazione delle norme nel caso di provini SENB

La prima norma per la misura della tenacità alla frattura nelle materie plastiche è stata quella rilasciata dall'ASTM. Questa è stata una evoluzione della norma analoga valida per i metalli [5.4]. La norma ISO [5.2] segue temporalmente la [5.1], seppure riproducendola in modo sostanzialmente invariato. La [5.2] in particolare ripropone la [5.1] trascrivendola secondo il classico stile delle norme ISO. E' comunque interessante sottolineare che l'edizione della [5.2] ha seguito un attento processo di revisione condotto dal comitato ESIS TC4, concentrato prevalentemente nel decennio 1990-2000, in seno al quale diversi esercizi di *round robin* sono stati condotti implementando la prova su diversi materiali plastici e conducendola in diversi laboratori [5.5].

Rispetto alla [5.4] le differenze presenti nella [5.1] e [5.2] sono poche ma sostanziali:

- Viene indicato un procedimento per la valutazione dell'energia critica G_{Ic} , un parametro di tenacità di tipo energetico molto utile nei materiali plastici;
- Vengono suggerite modalità di produzione di fronti di cricca sostanzialmente diverse da quelle impiegate per i metalli;
- Sono proposti soltanto due provini unificati per la conduzione della prova: il provino CT (*Compact Tension*) ed il provino SENB (*Single Edge Notched Bending*).

In particolare mentre il provino CT è sollecitato a trazione, con il carico di trazione decentrato che produce una sollecitazione di flessione deviata nella sezione resistente a fianco dell'intaglio, il provino SENB (vedi fig. 5.1) è invece sollecitato in flessione a tre punti, con il provino appoggiato su un lato (la distanza tra gli appoggi è la luce o *span* del provino) e caricato sull'altro in corrispondenza della mezzzeria del provino.

Inoltre il provino SENB presenta un intaglio (*notch*) in corrispondenza della sezione caricata, dal lato opposto a quello di applicazione del carico. Il *notch* può essere realizzato sia mediante una fresa a V (*V-notch*), che con una sega a lama sottile

(*sawed-in slot*). In genere gli intagli prodotti in questo modo non sono sufficientemente acuminati da poter creare uno stato di tensione singolare quale quello tipico di una cricca. E' quindi necessario produrre un fronte di cricca. Il suggerimento dato nelle norme al riguardo è quello di utilizzare una lama di rasoio.

Tre sono le modalità di impiego della lama di rasoio per creare il fronte di cricca:

- Appoggiando la lama di rasoio sul fondo dell'intaglio e colpendola con un oggetto impattante (*razor tapping*). Questo procedimento è soprattutto suggerito per materiali molto fragili e duri. Il rischio è quello di rompere il provino, o comunque di non riuscire a controllare la corretta introduzione del fronte di cricca;
- Facendo scorrere una sola volta ed in una sola direzione la lama pressata contro il fondo dell'intaglio (*sliding motion*). Va bene per materiali più duttili, ma non si deve pressare troppo sulla lama per non introdurre tensioni residue che possono portare ad una sovrastima del valore di K_{Ic} ;
- Segando il materiale con la lama di rasoio (*sawing motion*). Valgono le stesse considerazioni fatte per lo *sliding motion*;

In ogni caso, indipendentemente dal metodo che si rivela più efficace, il fronte di cricca deve avere una profondità maggiore di due volte la larghezza del *sawed-in slot*, o maggiore di due volte il valore del raggio di curvatura alla radice del *V-notch*.

La profondità complessiva data dalla somma della profondità dell'intaglio più il fronte di cricca, definiscono la quantità a , considerata come lunghezza complessiva di cricca. Durante la prova di flessione vengono quindi misurati e diagrammati uno rispetto all'altro il carico applicato in mezzzeria ed il relativo spostamento del punto di applicazione del carico (*mid-span displacement*).

Nel presente lavoro si è adottato il provino SENB per la conduzione delle prove.

Questo infatti è di più semplice preparazione. Inoltre anche l'attrezzatura sperimentale è di più facile reperimento ed impiego, essendo il sistema di carico (*loading rig*) piuttosto semplice da realizzare e predisporre per la prova. Inoltre i valori di carico e spostamento per il rilevamento della relativa curva sperimentale

possono essere direttamente misurati mediante la cella di carico ed il trasduttore di spostamento della traversa in genere a corredo di qualsiasi macchina di prova, ad esempio di tipo elettrostatico, purché tali trasduttori abbiano la risoluzione e campo di misura appropriati per il tipo di materiale e dimensioni di provino da analizzare.

In figura 5.1 è raffigurata la forma del provino SENB, le cui dimensioni tipiche sono proporzionali allo spessore B . In figura 5.2 e 5.3 sono invece riportate le immagini di provini SENB montati sul rig di flessione a tre punti impiegato in questo lavoro.

Tolleranze sulle quote w e a	
w	$4B < w \leq 2B$
a	$0.45w < a < 0.55w$

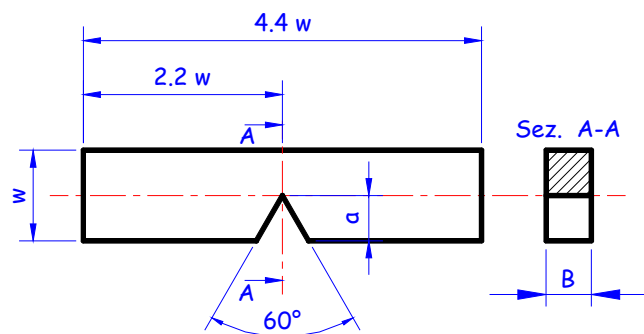


Figura 5.1: Tutte le dimensioni lineari sono multipli dello spessore, indicato con B .

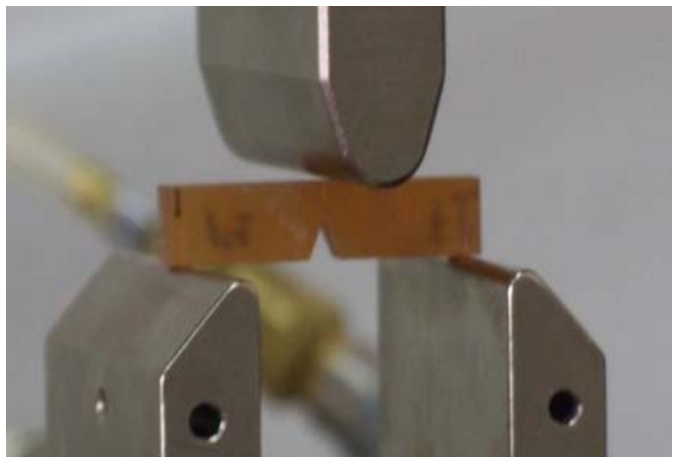


Figura 5.2: Immagini del provino SENB montato sul *loading rig* di flessione a tre punti.

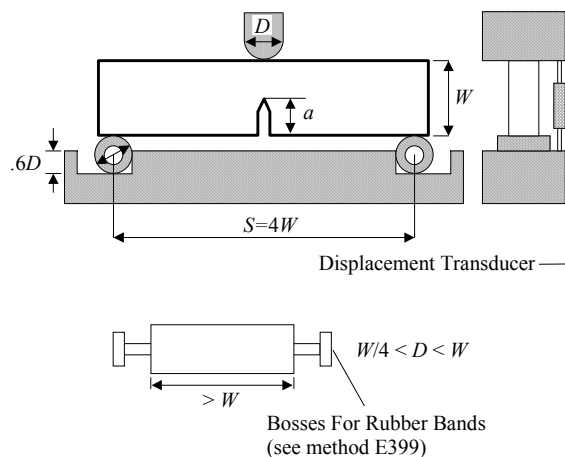


Figura 5.3: *Loading Rig* per la flessione a tre punti, usato per le prove su provini SENB.

5.2.1 Determinazione dei parametri di tenacità K e G

La determinazione di K_{IC} e G_{IC} secondo [5.1] e [5.2] segue i seguenti passi:

- Determinazione della curva Forza-Spostamento $P-u$:

Tutti i materiali presentano un primo tratto di tale curva di tipo elastico lineare la cui inclinazione definisce la rigidità del materiale in tale campo. Con il crescere del carico si può verificare un abbandono dalla linearità che è tanto più pronunciato quanto più il materiale è duttile. Un materiale idealmente fragile ha un comportamento elastico lineare sino al punto di rottura, corrispondente al punto in cui la cricca si propaga di schianto.

- Determinazione dei parametri di lavoro dalla curva Forza Spostamento:

Tali parametri sono rappresentati dalla cedevolezza C , dal carico massimo P_Q , e dall'area sottesa dalla curva sino al valore di carico massimo, U_Q . L'impiego di tali parametri è funzionale al calcolo dei parametri di tentativo K_Q e G_Q descritti più avanti.

In particolare i parametri indicati prima hanno il seguente significato:

Cedevolezza - è definita dall'inverso della rigidità, e rappresenta il rapporto u/P nel tratto elastico lineare (per questo indica appunto quanto è cedevole il provino).

Carico Massimo P_Q - il carico massimo è definito come il massimo valore di carico nella curva $u-P$, che cade tra la retta con inclinazione pari all'inverso della cedevolezza e la retta con inclinazione minore del 5% rispetto alla precedente (vedi fig. 5.4 per un esempio grafico).

Area U_Q : area sottesa dalla curva $u-P$ sino al valore di P_Q . Tale parametro è legato all'energia di deformazione accumulata dal provino sino a rottura e quindi correlato al valore di tasso di rilascio energetico critico G_{IC} .

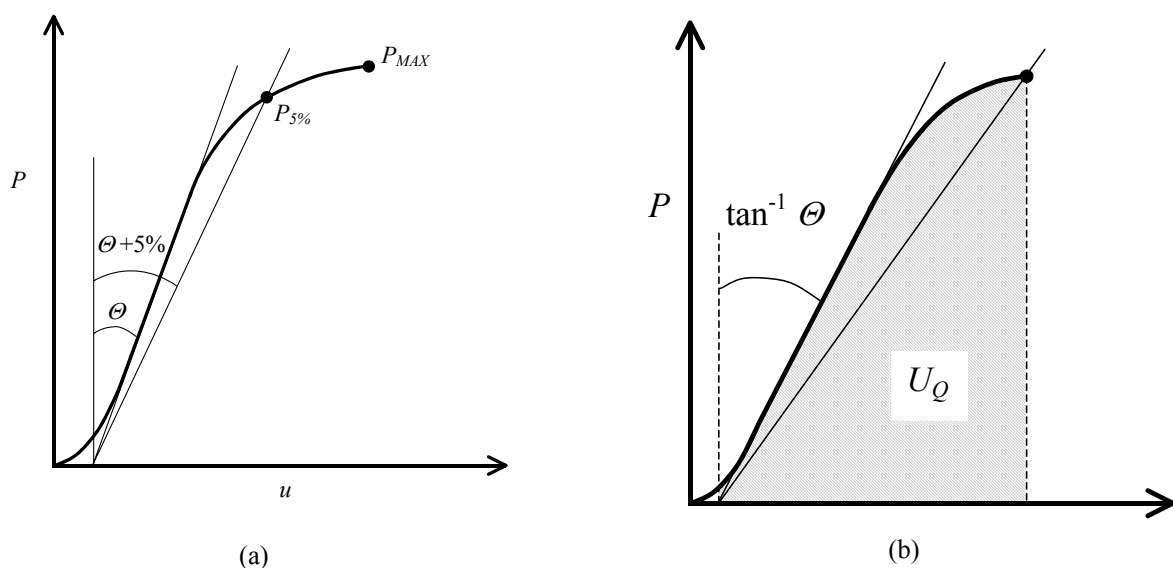


Figura 5.4: (a) Definizione delle rette di cedevolezza e cedevolezza 5%, (b) Determinazione dei parametri U_Q , e P_Q .

- Determinazione dei parametri di lavoro dalla curva Forza Spostamento in assenza di intaglio:

Parte dell'energia di deformazione introdotta è spesa per indentare localmente il materiale, soprattutto in corrispondenza del punto di carico e in secondo luogo in corrispondenza dei due punti di contatto presso i supporti. Anche la cedevolezza complessiva del sistema di carico inoltre può influire in uguale maniera. I valori di energia e cedevolezza da imputare alla propagazione della cricca, sono dati quindi dai valori da C_Q e U_Q decurtati degli equivalenti valori relativi all'indentazione ed alla cedevolezza del sistema di carico, C_i ed U_i . Questi valori si possono ricavare dalla

misura della curva $u-P$ su di un provino non intagliato e non deformato a flessione, e quindi disposto come in figura 5.5.

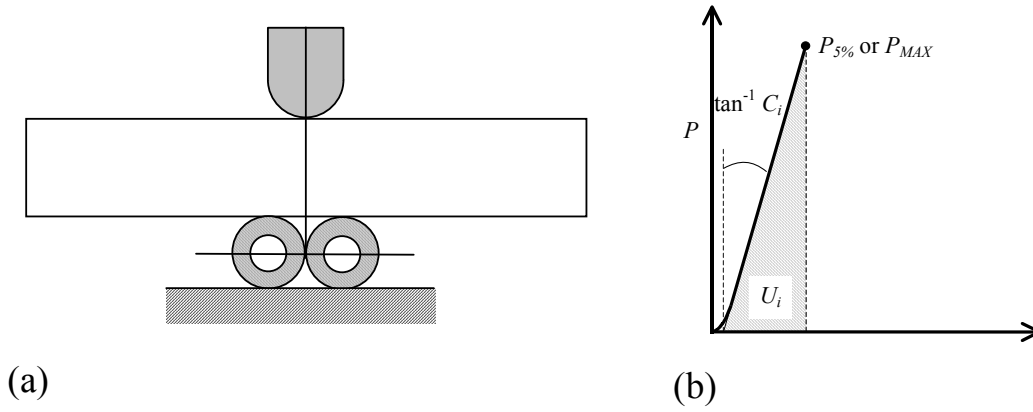


Figura 5.5: (a) Configurazione del provino e del carico nella prova di indentazione. (b) Determinazione dei parametri U_i e C_i .

- Determinazione dei parametri di tentativo K_Q e G_Q :

Espressioni analitiche approssimate del Fattore di Intensificazione delle Tensioni e del Tasso di Rilascio Energetico sono state ricavati da diversi ricercatori per il caso di provini SENB, a partire dallo stesso Irwin. In particolare le espressioni usate per K e per la cedevolezza C negli standard [5.1] e [5.2] sono quelle di Bakker [5.6].

Per quanto riguarda K , le espressioni di Bakker sono riportate nella norma ASTM e in quella ISO in una forma leggermente diversa, data da:

$$(K_Q)_{ASTM} = \left(\frac{P_Q \cdot S}{B \cdot w^{3/2}} \right) \cdot f(x) = \left(\frac{P_Q \cdot 4w}{B \cdot w^{3/2}} \right) \cdot f(x) = \left(\frac{P_Q}{B \cdot w^{1/2}} \right) \cdot 4f(x) = \left(\frac{P_Q}{B \cdot w^{1/2}} \right) \cdot f^*(x) \quad (5.1)$$

$$(K_Q)_{ISO} = \left(\frac{P_Q}{B \cdot w^{1/2}} \right) \cdot f(x) \quad (5.2)$$

dove per entrambe x è pari ad a/w ed f è un fattore di calibrazione geometrico, specifico quindi per il provino SENB o CT (inoltre f è anche adimensionale).

a/w	$f(x)^{1,2}$	$f^*(x)^3$
....		
0.40	7.93	1.98
0.45	9.14	2.29
0.50	10.65	2.66
0.55	12.57	3.14
0.60	15.09	3.77
....		

Tabella 5.1: ^{1,2}Valori di f tratti da Bakker [5.6] e adottati nei protocolli ASTM ed ISO [5.1-5.2]. ³ Valori di f secondo la formula A1.1 dello standard ASTM D5045-96.

Nelle formule precedenti S è la distanza tra gli appoggi, o *span length*. Per essa le norme prescrivono una lunghezza pari a $4W$, ove W è l'altezza del provino.

La funzione $f(x)$ è definita in modo leggermente diverso per i due standard, e fornita sia in forma tabellare (vedi tabella 5.1), che analitica.

Nel contesto del lavoro sperimentale svolto in questa tesi, si è scoperto un errore presente nella versione della norma ASTM del 1996 (ASTM D 5045-96). In questa infatti, se si vuole usare la formula di K_Q data in appendice A1.5.3, i valori del termine $f(x)$ che compare in essa, vanno calcolati analiticamente con la formula A1.1, mentre i valori di $f(x)$ dati in tabella 1a sono sbagliati (in particolare sono moltiplicati per un fattore 4 e sono gli stessi usati correttamente nella formula di K_Q riportata nello standard ISO). Non si è avuto modo di verificare se successive edizioni della norma ASTM D 5045 (in particolare quella riportata in letterature, del 1999) contengono o meno l'incongruenza evidenziata prima.

Per quanto riguarda la valutazione di G , le formule indicate in [5.1] e [5.2] sono le stesse, ovvero:

$$G = \frac{U}{B \cdot W \cdot \phi} \quad (5.3)$$

dove $U = U_Q - U_i$ è il dell'area sottesa dalla curva $u-P$ sino al valore di P_Q , corretto per l'influenza dell'indentazione elastica e la cedevolezza del sistema di carico, mentre Φ è un fattore di calibrazione dell'energia, funzione della cedevolezza e della variazione di cedevolezza per avanzamento infinitesimo del fronte di cricca, che determina il valore di tasso di rilascio di energia G dal valore di energia immagazzinata al momento in cui la cricca cresce, ovvero U . Valori di ϕ validi per il provino SENB nello specifico sono dati in [5.1,5.2] in forma sia tabellare che analitica. Sia f che ϕ sono ricavati dal lavoro di Bakker [5.6], e sono dimensionali per definizione.

Al fine di valutare se i parametri di tentativo K_Q e G_Q sono effettivamente i parametri di tenacità alla frattura del materiale K_{Ic} e G_{Ic} , bisogna effettuare una serie di verifiche espresse in forma analitica, ed indicate come *size* e *cross-check criteria*.

5.2.2 Criteri di verifica dei risultati

I criteri di verifica proposti dalle norme [5.1] e [5.2] si possono dividere in due gruppi:

1. Criteri per la verifica di Stato Piano di Deformazione (*size criteria*);
2. Criteri di verifica della consistenza dei risultati ottenuti (*cross-check criteria*).

5.2.2.1 Criteri per la verifica di SPD

Nel primo caso viene dato un criterio analitico il cui significato è quello di confrontare lo spessore ed altre variabili geometriche caratteristiche con l'entità della zona plastica, quest'ultima proporzionale al ben noto valore di $(K_I/\sigma_y)^2$ suggerito da Irwin [5.3], dove σ_y è la tensione di snervamento del materiale. Si deve garantire infatti che la zona plastica abbia una estensione opportunamente minore ad esempio dello spessore e della lunghezza della cricca. In questo modo, oltre ad avere uno stato di tensione prevalentemente elastico lineare anche nella zona della singolarità, si ha

anche uno stato tensionale tale da favorire l'instaurarsi di un regime di SPD. La relazione analitica data in [5.1,5.2], relativamente a quanto detto, è la seguente:

$$B, a, (w - a) > 2.5 \left(\frac{K_q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (5.4)$$

Nella eq. (5.4) compare quindi anche la tensione di snervamento del materiale, che bisogna conoscere a priori, per esempio misurandola in prove di trazione condotte sullo stesso materiale. Al riguardo è importante sottolineare che la tensione di snervamento della (5.3) non è a rigore la stessa definita in [5.7], ovvero nello standard ASTM per prove di trazione su provini plastici. Infatti in [5.4] la tensione di snervamento è definita come il valore di tensione in corrispondenza del primo punto del grafico tensione deformazione avente tangente orizzontale). In [5.1] invece la tensione di snervamento di riferimento è la tensione corrispondente al carico massimo applicato nella prova di trazione. A volte risulta abbastanza difficile condurre una prova di trazione su un provino plastico in cui il provino stesso si rompa a trazione al valore di resistenza a rottura del materiale. Infatti ciò avviene solo se le superfici laterali del provino di trazione hanno valori particolarmente bassi di rugosità. Altrimenti tale rugosità funge da innesco di cricche, e data la notevole fragilità del materiale, questo giunge a rottura per frattura e quindi innesco e propagazione di schianto della cricca. In questi casi, molto frequenti, riscontrati anche nelle prove di caratterizzazione a trazione eseguite in questo lavoro, il valore misurato di tensione massima non è quello di snervamento ma un valore più basso, di resistenza residua in presenza di difetti superficiali. Qualora comunque questo valore misurato di tensione massima, usato alla stregua di un valore di tensione di snervamento, soddisfa comunque già la disuguaglianza data in eq. 5.4, allora non occorre inseguire valori più precisi di σ_y , in quanto quelli già adottati sono tali da essere in condizioni di sicurezza e conservative.

Un modo alternativo di ricavare un valore di tensione di snervamento per il criterio di eq. (5.3) è quello di prendere il valore di snervamento misurato nella prova monoassiale di compressione, ridotto di un fattore 0.7 [5.8].

In particolare una tale prova di compressione si esegue su provini di sezione quadrata (di lato a e spessore h). Effetti di attrito tra le facce del provino e i piatti della macchina vanno ridotti usando opportuni grassi lubrificanti. Nonostante ciò potrebbe ancora esserci una differenza tra la tensione reale di compressione, σ_T , e quella applicata σ_A . Secondo la raccomandazione ISO R604 1967 una correzione si può applicare mediante la seguente formula:

$$\sigma_A = \sigma_T \left(1 + \frac{\mu a}{4h}\right) \quad (5.4)$$

Dove μ è il coefficiente d'attrito. Un modo efficace di procedere è quello di eseguire diverse prove su diversi provini, ognuno con diversi valori del lato a , e diagrammando i valori di σ_A rispetto ad $a/4h$, e quindi estrapolando il valore di σ_T come il valore di σ_A posto nel punto di intercetta con l'asse delle ordinate. La tensione di snervamento a trazione si può quindi ottenere secondo la regola empirica di considerare il valore a compressione più elevato di un fattore pari ad 1.3 rispetto a quello di trazione [5.8].

5.2.2.2 Criteri per la verifica di consistenza dei risultati.

I criteri appartenenti a questo gruppo si basano sul fatto di poter determinare alcuni parametri in diversi modi indipendenti tra di loro. In particolare i parametri in questione sono due: G ed E' , dove quest'ultimo in particolare è un parametro elastico ricorrente nello SPD, e pari a:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (5.5)$$

dove E è il Modulo di Young e ν il Coefficiente di Poisson del materiale.

In particolare il parametro elastico E' definito in eq. (5.5) si può calcolare in tre modi tra loro alternativi:

- mediante misure sulla cedevolezza della curva carico-spostamento $P-u$. In particolare il valore così ricavato è denominato E'_{stiff} , e la formula data in [5.1] per la sua valutazione è di seguito riportata:

$$E'_{stiff} = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)_{stiff} = \frac{2f^2\phi}{B \cdot C} \quad \text{dove } C = C_Q - C_i \text{ cedevolezza corretta} \quad (5.6)$$

Valori del termine $2f^2\Phi$ sono dati anche in forma tabellare in [5.1, 5.2].

- sfruttando la ben nota relazione dimostrata da Irwin [5.3], che lega il parametro energetico G con quello tensionale K . In particolare il valore così ricavato è denominato E'_{fract} , e la formula data in [5.1-5.2] è di seguito riportata:

$$E'_{fract} = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)_{fract} = \frac{K_{Ic}^2}{G_{Ic}} = \frac{K_Q^2}{G_Q} \quad (5.7)$$

Nelle norme è detto che in genere i valori di E'_{stiff} sono tendenzialmente più elevati rispetto ad E'_{fract} . Se comunque la differenza supera il 15%, allora è possibile che vi siano stati degli errori nell'esecuzione della prova o nell'analisi dei dati.

- Misurando direttamente, mediante provini di trazione opportunamente strumentati, i parametri E e ν . Va detto che questo terzo ed indipendente modo di ricavare E' , è in realtà proposto e utilizzato in questo lavoro, non trovando invece menzione nelle norme utilizzate. Il valore misurato di E' viene di seguito indicato con E'_{meas} .

Per quanto riguarda il valore di G_Q calcolato mediante la eq. (5.3), questo può essere confrontato con un valore di $(G_Q)_{fract}$ calcolato mediante la formula inversa rispetto a quella data in (5.8), ovvero:

$$G_Q = (G_Q)_{fract} = \frac{K_Q^2}{E'_{stiff}, E'_{fract}, E'_{meas}} \quad (5.9)$$

Si nota che nel calcolo di $(G_Q)_{fract}$, al denominatore può essere usato uno dei valori di E' definiti in precedenza. Tuttavia tale confronto alla fine è equivalente a quello effettuato confrontando direttamente tra loro i tre valori di E' .

I cross-check criteria consistono quindi nel ricavare E' con i tre metodi descritti in precedenza e procedere al confronto diretto dei valori trovati. Questo si può riassumere in:

$$\begin{cases} E'_{stiff} = E'_{frac} \\ E'_{stiff}, E'_{frac} = E'_{meas} \end{cases} \quad (5.10)$$

5.2.3 Considerazioni sulle unità di misura

Nell'implementare le diverse formule introdotte nei paragrafi precedenti, è bene tenere presente quali sono le unità di misura impiegate, e come renderle consistenti al fine di ottenere i valori dei parametri di tenacità in una unità di misura convenzionalmente usata. In particolare nel Sistema Internazionale le unità di misura impiegate per i parametri di interesse presenti nelle norme [5.1-5.2], cioè E , K_{IC} e G_{IC} , sono di seguito ricordati:

$$E = [GPa], K_{IC} = [MPa \cdot \sqrt{m}], G_{IC} = \left[\frac{KJ}{m^2} \right] \quad (5.11)$$

I fattori di calibrazione f e ϕ nonché il termine $2f^2\Phi$ della formula (5.6), sono tutti dimensionali, e quindi non influenzano l'unità di misura delle formule. Attenzione va invece posta al fatto che spesso le variabili geometriche B , w , S , $w-a$ sono espresse in cm , mentre è conveniente esprimere le coordinate degli assi cartesiani del diagramma $P-u$ rispettivamente in kN per il carico in ordinata, e mm per lo spostamento in ascissa. In questo caso è necessario considerare dei fattori correttivi per ottenere i risultati secondo le unità di misura indicate in (5.11). Tali fattori si ricavano da una semplice analisi dimensionale. Di seguito è fornito un esempio:

$$G_{Ic} = \frac{1}{E'} \cdot (K_{Ic})^2 = \frac{MPa^2 \cdot m}{GPa} = \frac{MPa^2 \cdot m}{10^3 \cdot MPa} = \frac{MPa \cdot m}{10^3} =$$

$$= 10^6 \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{10^3} = \frac{10^3 N \cdot m}{m^2} = \frac{KJ}{m^2} \quad (5.12)$$

$$G_{Ic} = \frac{U}{\phi \cdot B \cdot w} = \frac{KN \cdot mm}{cm^2} = \frac{N \cdot m}{10^{-4} \cdot m^2} = \frac{10^{-3} \cdot KJ}{10^{-4} \cdot m^2} = 10 \cdot \frac{KJ}{m^2} \quad (5.13)$$

$$E_{stiff} = \frac{2f^2\phi}{B \cdot C} = \frac{1}{cm \cdot \frac{mm}{KN}} = \frac{10^3 N}{(10^{-2} \cdot m) \cdot (10^{-3} \cdot m)} = \frac{10^8 \cdot N}{m^2} = 10^{-1} \cdot GPa \quad (5.14)$$

5.2.4 Dati di prova da riportare

Di seguito, in tabella 5.2, si riporta un piccolo estratto dalla norma ISO [5.2], in cui si riassumono le informazioni che in genere è necessario fornire nel rapporto di prova, per un esauriente e approfondito significato dei risultati. Ovviamente l'elenco è suggerito e non sempre è possibile essere nelle condizioni di riportare tutte queste informazioni. Per quanto riguarda i risultati delle prove condotte in questa tesi, questi saranno presentati cercando comunque di rispettare la scaletta fornita in tabella 5.2.

<u>Elenco di dati essenziali da riportare nel rapporto di prova:</u>	
i)	Configurazione del provino e dimensioni;
ii)	Metodo per creare il fronte di cricca (<i>notching method</i>);
iii)	Temperatura e velocità di applicazione del carico;
iv)	Almeno un esempio di un diagramma di curva carico-spostamento;
v)	P_Q o $P_{5\%}$ sia per il provino intagliato che per quello integro, ed il tempo totale per raggiungere tale valore di carico;
vi)	Il valore di K_Q secondo la formula (5.1) o (5.2);
vii)	Il valore della tensione di snervamento σ_y al valore di carico Massimo nella prova di trazione, e il tempo di carico;
viii)	Il risultato dei <i>size criteria</i> definiti in (5.4)
ix)	I valori di Energia U_Q ed U_i .
x)	Il valore di G_Q calcolato secondo la (5.3)
xi)	Il valore di E'_{stiff} ed E'_{fract} secondo le formule (5.6) e (5.7)

Tabella 5.2: Dati di prova da riportare nel rapporto.

5.2.5 Alcuni dati presentati in letteratura

Di seguito si riportano due set di dati relativi a prove eseguite implementando gli standard [5.1,5.2] in alcuni provini plastici. In particolare la tabella 5.3 è un estratto dal riferimento [5.4], riporta i dati di K_{Ic} , G_{Ic} , E'_{stiff} ed E'_{fract} misurati su provini in Nylon nell'ambito di un round robin test condotto dal gruppo ESIS TC4 durante la fase di stesura della norma [5.2]. In appendice alla tabella è detto che la scelta del materiale Nylon è dovuta al fatto che questo materiale è estremamente difficile da adoperare per quanto riguarda la creazione del fronte di cricca.

Group No	Specimen type	Notching	K_{IC} (mean) $MPa \cdot \sqrt{m}$	G_{IC} (mean) kJ / m^2	E'_{stiff} GPa	E'_{fract} GPa
1	SENB	RS	4.14 ± 0.17	4.76 ± 0.98	3.65	3.65
		RT	4.03 ± 0.10	3.92 ± 0.15	4.14	4.14
2	SENB	RT	3.79 ± 0.08	4.01 ± 0.17	2.24 ^a	3.58
3	SENB	RS	3.84 ± 0.17	4.48 ± 0.70	3.32	3.33
		RT	4.21 ± 0.26	4.82 ± 0.73	3.64	3.71
4	SENB	RT	4.10 ± 0.35	5.14 ± 0.67	3.30	3.28
5	SENB	RS	3.82 ± 0.21	4.20 ± 0.41	3.63	3.32
6	CT	RT	4.46 ± 0.13	5.82 ± 0.24	3.57	3.42
7	SENB	RT	3.99 ± 0.10	4.80 ± 0.46	-	3.32
8	SENB	RT	3.9 ± 0.3	4.7 ± 0.8	3.22	3.21
9	SENB	RT	4.10 ± 0.22	6.40 ± 0.8^b	-	2.63 ^b
		Mean	4.03 ± 0.19	4.82 ± 0.56		
a: error suspected, b: without indentation correction, RS: razor sliding, RT: razor tapping. $E'_{stiff} = \frac{2f^2\phi}{B \cdot C} ; E'_{fract} = \frac{K_{Ic}^2}{G_{Ic}}$						

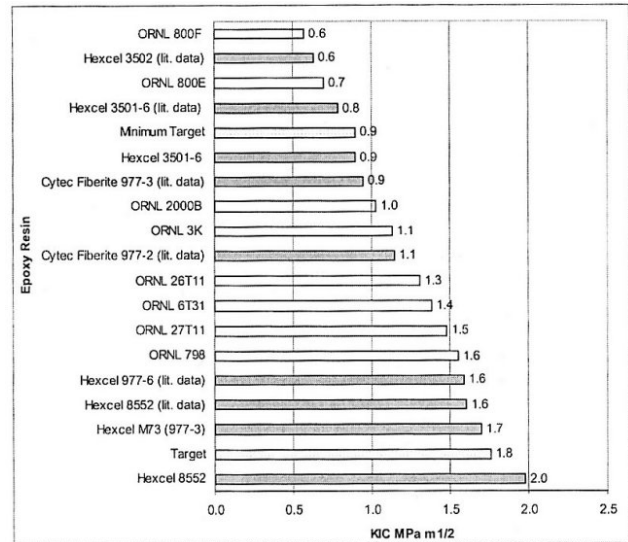
Tabella 5.3: Risultati delle misure di K_{IC} e G_{IC} per provini in Nylon, misurati da nove gruppi indipendenti, facenti parte del comitato ESIS TC4 [5.5].

In figura 5.6 sono invece riportati i valori di K_{Ic} , E e la deformazione a rottura, misurati su diversi tipi di resine commerciali e non. Si nota in particolare come alcune delle resine considerate sono particolari formulazioni epossidiche tenacizzata e curate per irraggiamento, ovvero materiali molto simili a quelli che costituiscono l'oggetto principale delle prove di tenacità eseguite in questo lavoro e descritte più avanti. Si fa notare inoltre che la deformazione a rottura è un altro parametro significativo della tenacità del materiale, anche se in senso più generale. Elevati valori di deformazione a rottura sono tipici di materiali duttili e quindi molto tenaci, per i quali molto probabilmente si ha anche un elevato valore di tenacità alla frattura K_{Ic} . Sia i dati in tabella 5.3 che i dati in figura 5.6 sono quindi utili per dare una prima idea degli ordini di grandezza dei parametri di tenacità alla frattura in plastiche

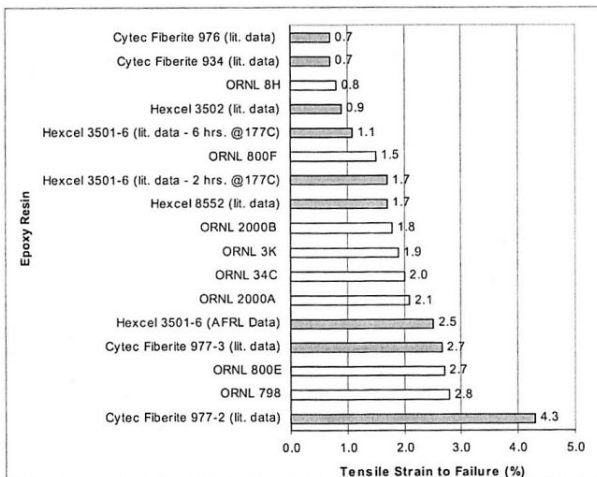
tendenzialmente da fragili e molto fragili. La tabella 5.3 in particolare è significativa anche per i dati di riproducibilità e precisione associati alle misure.

Resin and Testing Origin Information	Epoxy Type	Source of Tensile Data	Source of K_{Ic} Data
Hexcel 8552	Thermally curable toughened epoxy	Hexcel	Hexcel
Hexcel 977-6	Thermally curable toughened epoxy		Hexcel
Hexcel 3501-6 (cured 6 hrs @177C)	Thermally curable untoughened epoxy	Hexcel	Hexcel
Hexcel 3501-6 (cured 2 hrs @177C)	Thermally curable untoughened epoxy	Hexcel	
Hexcel 3502	Thermally curable untoughened epoxy	Hexcel	Hexcel
Cytec Fiberite 977-2	Thermally curable toughened epoxy	Cytec Fiberite	Cytec Fiberite
Cytec Fiberite 977-3	Thermally curable toughened epoxy		Cytec Fiberite
Cytec Fiberite 934	Thermally curable untoughened epoxy	Cytec Fiberite	
Cytec Fiberite 976	Thermally curable untoughened epoxy	Cytec Fiberite	
Hexcel 8552	Thermally curable toughened epoxy		YLA
Hexcel M73 (977-3)	Thermally curable toughened epoxy		YLA
Hexcel 3501-6	Thermally curable untoughened epoxy		YLA
Hexcel 3501-6	Thermally curable untoughened epoxy	AFRL	
798	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
27T11	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
6T31	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
26T11	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
3K	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
800E	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
800F	Electron beam curable toughened epoxy	ORNL	YLA
2000B	Electron beam curable untoughened epoxy	ORNL	YLA
34C	Electron beam curable untoughened epoxy	ORNL	
2000A	Electron beam curable untoughened epoxy	ORNL	
8H	Electron beam curable untoughened epoxy	ORNL	

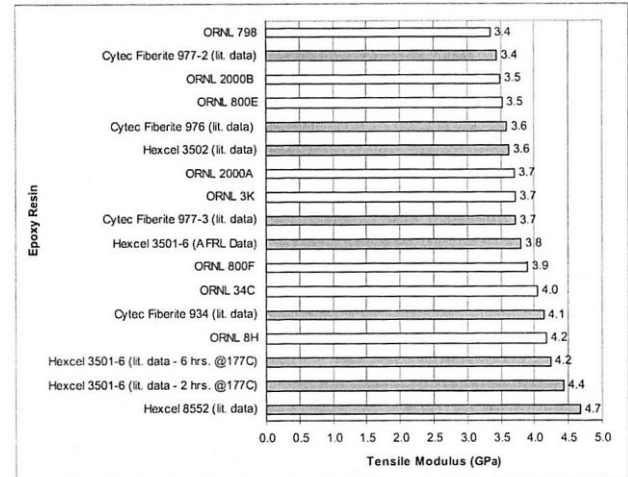
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.6: parametri misurati su alcune resine descritte brevemente in (a). (b) valori di tenacità alla frattura. (c) Deformazione a rottura. (d) Modulo di elasticità.

5.3 Descrizione dell'attrezzatura impiegata, preparazione e caratterizzazione dei provini.

Nei paragrafi precedenti si sono descritti con un certo dettaglio i principali aspetti legati alla misura dei parametri di tenacità alla frattura mediante gli standard [5.1] e [5.2]. Nel seguito del capitolo verranno invece descritte le prove eseguite presso i laboratori del DICPM e del DIMA, presso la facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo, per implementare le norme richiamate nello studio della tenacità alla frattura di provini plastici.

Due tipologie di provini sono state analizzate.

La prima è costituita da provini in plexiglass (PMMA), ricavati da lastre di vario spessore di plexiglass commerciale, facilmente reperibile. Le prove su PMMA sono state condotte fondamentalmente per tre ragioni:

- Poter fare esperienza nella messa a punto del test, su un materiale poco costoso ed abbondante. Particolarmente utile al riguardo è stato l'impiego di questo materiale per provare diverse modalità di produzione del fronte di cricca;
- Molti lavori in letteratura sono disponibili relativamente allo studio di fenomeni di meccanica della frattura in plastiche fragili impiegando proprio il PMMA. Tale abbondanza di fonti bibliografiche può essere una preziosa fonte di dati di confronto in corso di messa a punto delle prove;
- Infine la trasparenza del materiale plexiglass si è rilevata molto utile al fine di capire come il fronte di cricca si produceva mediante la lama di rasoio al variare ad esempio di alcuni parametri quali: tipologia di intaglio, tipo di lama, forza di impatto applicata durante il *razor tapping*, ecc...

I risultati sulle prove con il Plexiglass sono quindi riportate per prime. Solo un numero limitato di prove è stato analizzato quantitativamente e quindi riportato per iscritto nella tesi. Molte altre prove eseguite hanno avuto appunto lo scopo di

impraticabile l'operatore e non si è ritenuto opportuno descriverle tutte con lo stesso livello di dettaglio.

La seconda tipologia di materiale analizzato è costituita da provini in resina epossidica realizzati nel dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali di Palermo. In particolare i due lotti sono stati curati mediante radiazioni ionizzanti. Gli irraggiamenti con elettroni sono stati eseguiti con l'acceleratore lineare ISO-CNR di Bologna (vedi fig. 5.7). Detto acceleratore, può erogare impulsi di elettroni con energia massima pari a 12 MeV. Inoltre è possibile variare l'impulso da 10 ns a 5 μ s ed il modo di operare a impulso singolo o a ripetizione (fino ad un massimo di 1000 impulsi al secondo).

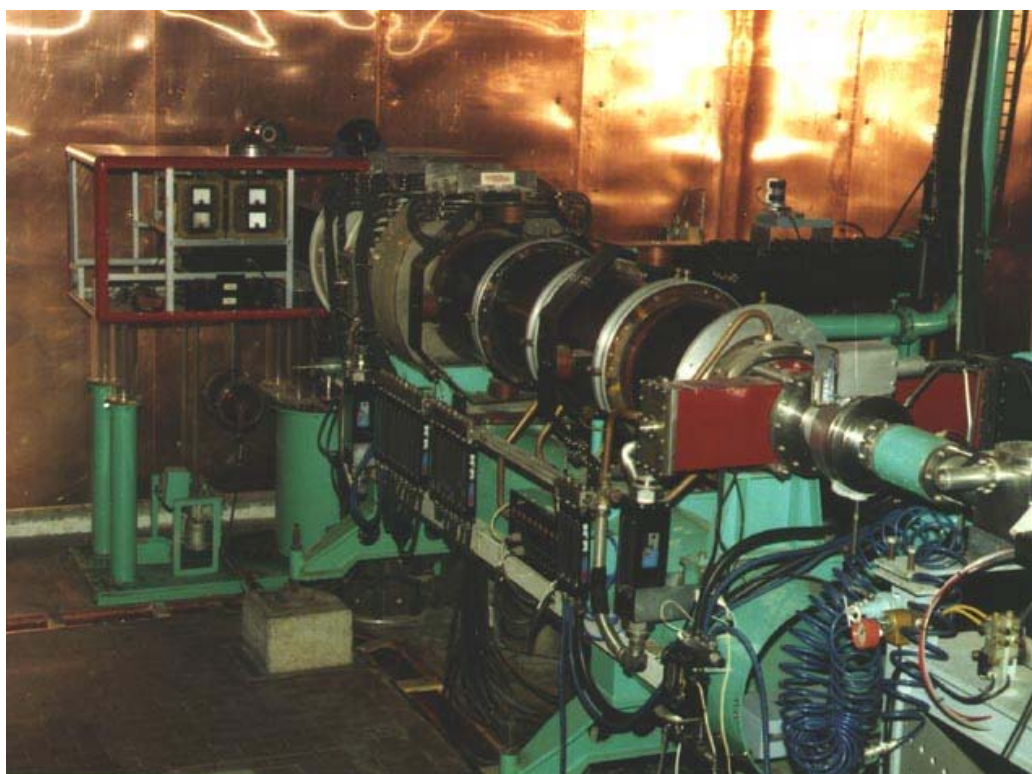


Figura 5.7: Acceleratore lineare del CNR di Bologna.

Gli irraggiamenti sono stati condotti in stampi delle dimensioni di 200 x200x4 mm su campioni del sistema base, del sistema base + 10% di PES/PEES e sul sistema a bassa concentrazione di RH. Tali irraggiamenti sono stati condotti con diverse frequenze (5,25 e 50 Hz) con impulso di 2 microsecondi. Al variare della frequenza varia l'intensità di dose come indicato nella tabella 5.4.

Frequenza	Intensità di dose [kGy/h]
5	84
25	420
50	840

Tabella 5.4: Intensità della dose di radiazione al variare della frequenza, usata nel processo di cura dei provini realizzati.

Dalle due lastre, con l'utilizzo di una sega a nastro, sono stati ricavati dei provini di forma rettangolare e dimensioni prossime a quelle prescritte dalla norma. I pezzi così realizzati, sono stati indicati con una sigla composta da una lettera ed un numero in modo da poter risalire alla posizione del particolare provino nella lastra ed infine sono stati lavorati alla fresa in modo da raggiungere le dimensioni e la forma desiderata rispettando le tolleranze e ottenendo una buona finitura di lavorazione.

I lotti in esame sono quelli indicati con le sigle CSA7 e CSA8 (il particolare codice alfanumerico non ha alcun significato per lo scopo di questa valutazione ma è solamente un riferimento interno); si è constatato che non vi è differenza alcuna nei risultati in dipendenza della posizione originaria nella lastra.

I provini in resina epossidica analizzati, al contrario del plexiglass, non sono trasparenti, per cui non è possibile intravedere il fronte di cricca prodotto con la lama di rasoio. Inoltre i provini sono tutti stati tagliati da piccole lastre rettangolari di spessore all'incirca sempre uguale a 4 mm. Tale basso valore di B ha influenzato tutte le altre dimensioni, parametrizzate su B (vedi fig. 5.1). Quindi i provini sono risultati piuttosto di dimensioni ridotte, rendendo difficoltosa una lavorazione di precisione con le normali macchine utensili per il taglio. L'intaglio è stato realizzato mediante frese di forma a V, con angolo di apertura di 30° . Purtroppo in alcuni casi le lastre di resina presentavano parecchi difetti soprattutto nella forma di piccole bolle superficiali. Tali piccoli microvuoti spesso costituivano un facile innesco di cricca, e data l'elevata fragilità del materiale, circa il 30% dei provini si è scheggiato in maniera seria durante la fase di preparazione, durante la lavorazione dell'utensile. Un

ulteriore 20% circa di provini è stato scartato in seguito perché le tolleranze di lavorazione non rispettavano le richieste delle norme. Dei provini rimasti, utili per la prova, circa il 50% si rompeva durante la fase di realizzazione del fronte di cricca mediante lama di rasoio.

Sono state usate lame di rasoio acquistate presso comuni negozi di ferramenta e colori. In particolare si sono rivelate migliori le lame Stanley 28-510 (*single edge razor blade*) mostrate in figura 5.8.



Figura 5.8: Lama Stanley 28-510.

5.3.1 Attrezzatura sperimentale

Le prove sono state condotte su una macchina di prova elettrostatiche, Instron 3365, equipaggiata con una cella di carico da 5 kN. Sia la lettura di carico che lo spostamento della traversa sono effettuati mediante trasduttori interni alla macchina e settati in remoto mediante il software di gestione del sistema, Instron serie IX S.

E' stato utilizzato un *loading rig* consistente in un supporto per prove di flessione a tre punti, sempre della Instron. Il punzone di carico e il sistema di collegamento alla cella di carico sono stati fissati con delle ghiera in modo da recuperare tutti i giochi a compressione, ed evitare fasi di recupero dei giochi durante la registrazione delle curve carico-spostamento.

Per quanto riguarda la velocità di esecuzione della prova, si è inizialmente provato con una velocità di carico di 10 mm/min (velocità suggerita nella norma ASTM [5.1]). Tale velocità tuttavia risultava eccessiva (i provini si rompevano quasi

istantaneamente, senza avere il tempo necessario per raccogliere dati significativi), soprattutto per i provini in resina epossidica, i cui carichi di rottura erano particolarmente bassi (compresi tra 20÷60 N). A seguito di ciò si è deciso di operare con una velocità di avanzamento della traversa di 0.25 mm/min.

Di seguito si riporta una tipica curva $P-u$ ottenuta su un provino le cui dimensioni sono descritte nella tabella 5.5.

$P_Q=0.0585$ [kN]	Nel caso in esame i provini in resina epossidica mostrano un comportamento fragile, ed il carico P_Q coincide con il picco di carico massimo.
$S=3.4$ [cm]	Distanza tra i supporti del provino (<i>span length</i>).
$B=0.38$ [cm]	Spessore del provino
$W=0.755$ [cm]	Altezza del provino
$f(x)$ con $x=a/w$ ed $a=0.335$ [cm]	È una funzione del parametro dimensionale a/w , ove a è la profondità dell'intaglio, misurata con cura dopo che il provino si è rotto.
$a/w=0.4437$	La norma dice che affinché la prova sia valida, deve essere $0.45 < a/w < 0.55$. Si vede quindi come in questo caso il difetto sia leggermente troppo piccolo.

Tabella 5.5: alcuni dati relativi a provino in resina epossidica la cui curva carico-spostamento è riportata in figura (5.6).

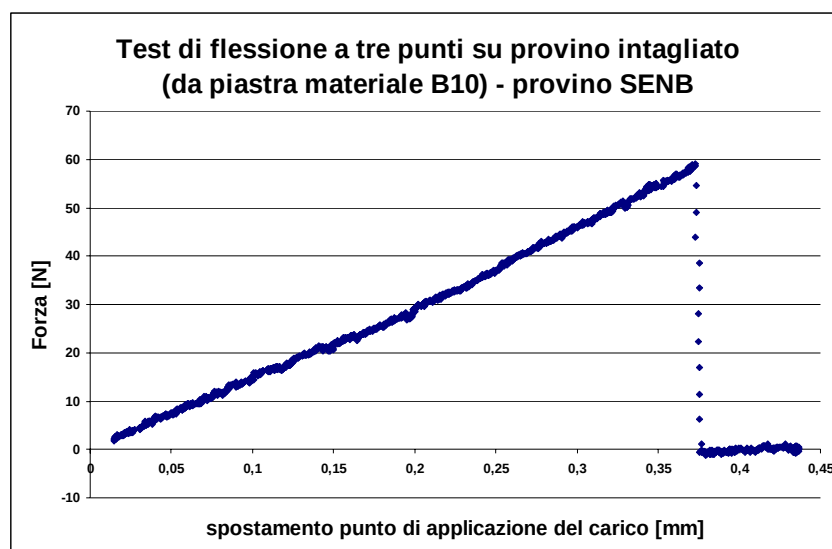


Figura 5.9: Diagramma con l'andamento carico-deformazione misurato su provino SENB in resina epossidica.

5.3.2 Caratterizzazione dei provini

Al fine di poter effettuare i controlli descritti nella sezione 5.2.2, due prove di trazione sono state condotte su un provino in PMMA ed un provino in resina epossidica, seguendo le indicazioni dello standard ASTM D638 [5.7] per quanto riguarda la preparazione dei provini di trazione. Da tali prove in particolare si sono ricavati il modulo di Young E , ed il coefficiente di Poisson, ν , misurando le deformazioni longitudinale e trasversali per mezzo di estensimetri a coltelli ed estensimetri elettrici collegati a centraline di misura. In figura 5.10 sono riportati i diagrammi tensione-deformazione misurati sui due provini, ed una immagine di uno dei due provini, strumentato e sollecitato dalla macchina di prova.

La tensione ultima di rottura, sebbene si sia verificata a seguito di formazione di cricca laterale, è stata considerata ed utilizzata come valore di tensione di snervamento nel *size criterion* di eq. 5.4.

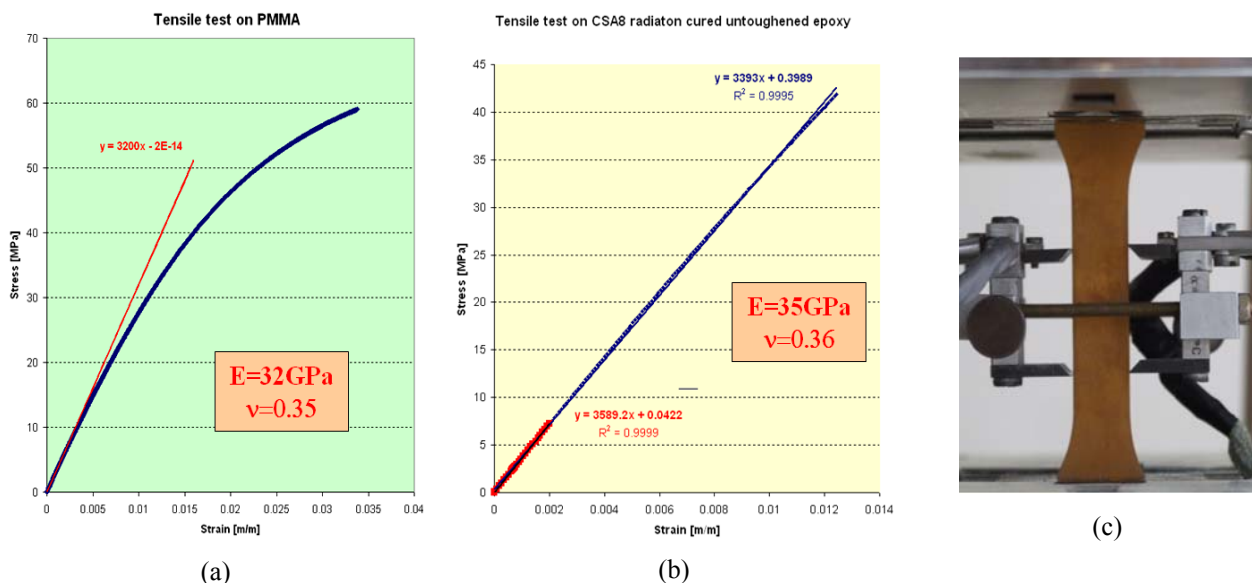


Figura 5.10: (a) diagramma di trazione per PMMA, (b) diagramma di trazione per resina epossidica, (c) figura del provino di trazione in resina epossidica con estensimetro a coltelli contrapposti montato per la misura della deformazione longitudinale.

Per entrambe i materiali testati a trazione la rottura fragile si è verificata al di fuori della zona di misura della deformazione (*extensometer gauge length*), in prossimità

dell'area di afferaggio. Si pensa che la superficie laterale non perfettamente liscia a seguito del taglio alla fresa, abbia innescato cricche laterali che hanno determinato la rottura. Le prove effettuate hanno quindi verificato che in effetti prove di trazione non sono adatta per misurare i valori richiesti di tensione di snervamento, ed il valore di tensione di rottura ricavato rappresenta solamente una stima per difetto del vero valore di snervamento. Sebbene probabilmente prove di compressione sono più utili per la tensione di snervamento (vedi sezione 5.2.2.1) le prove di trazione hanno consentito una misura abbastanza affidabile di E e ν , valori che possono quindi essere usati per valutare E'_{meas} e fare un ulteriore confronto con i dati calcolati dalla prova SENB.

I dati misurati per il provino di resina epossidica analizzato, in particolare, sono stati utilizzati come valori rappresentativi anche dei provini SENB realizzati con *batches* di diversa resina epossidica. Si è ritenuto infatti che le proprietà elastiche misurate non cambiassero significativamente tra i vari *batches* analizzati. Tale scelta è stata adottata considerando come realizzare prove di trazione per ogni piastra curata di resina epossidica risultasse troppo esoso in termini di utilizzo di materiale.

5.3.3 Realizzazione del fronte di cricca

Il fronte di cricca è stato realizzato come suggerito dalle norme mediante l'utilizzo di una lama di rasoio sulla quale è stato applicato un colpo con un martello. Per migliorare l'esecuzione delle prove si è fatto ricorso anche ad alcuni colpi di prova su materiale di scarto in modo da effettuare una sorta di taratura del colpo di martello (vedi fig. 5.11).



Figura 5.11: Fase di realizzazione dell'intaglio e prova di flessione.

5.4 Prove su PMMA.

Le prove sono state effettuate su provini realizzati a partire da comuni lastre di PMMA disponibili in commercio. Le dimensioni dei provini, dettate dallo spessore di 7.5 mm sono le seguenti: $B=7.5\text{mm}$, $S=60\text{mm}$, $w=15\text{mm}$; la geometria dei provini è quella SENB. Il fronte di cricca è stato realizzato mediante l'utilizzo di lama di rasoio cui è stata applicato un colpo di martello. Può essere necessario colpire in modo molto differente la lama di rasoio in funzione delle dimensioni del campione.

Sono stati anche realizzati alcuni campioni con un intaglio realizzato mediante sega il luogo del *notch* a V. La sua realizzazione, come si può intuire immediatamente, è molto più veloce e inoltre questo tipo di *notch* costituisce una sorta di guida per la lama di rasoio e questo può aiutare a dirigere meglio la frattura. Nella Fig.5.12 si può osservare un tipico fronte di cricca propagatosi all'interno del materiale.

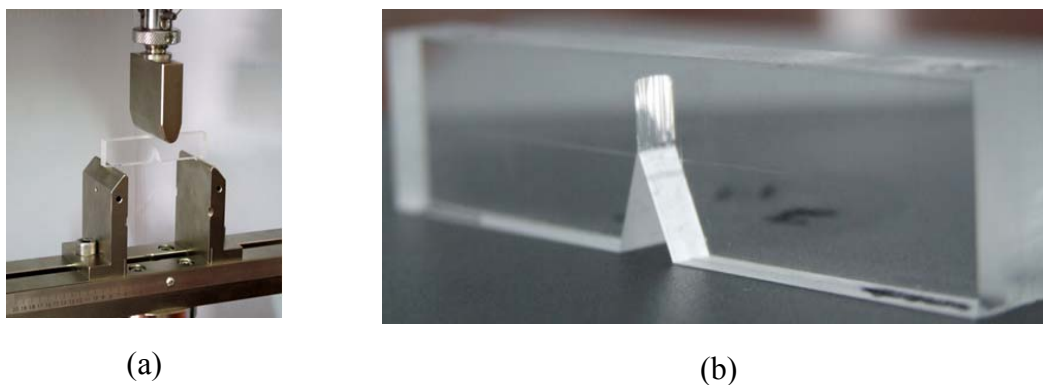


Figura 5.12: a) Prova di flessione a tre punti; b) avanzamento del fronte di cricca.

La velocità di spostamento della traversa è stata settata a 0.5 mm/min. Le prove sono state realizzate a temperatura e umidità non controllate. I risultati delle prove sono indicati nella Fig. 5.13 e tab 5.6. In particolare dalla figura 5.13 si osserva per tutti i provini un andamento perfettamente elastico sino alla rottura che avviene a valori differenti per i tre provini; si osserva che il provino che non è stato sottoposto a colpo con lama di rasoio, si è rotto ad un valore più elevato e determina così un valore più elevato di K_{IC} . Con VN sono indicati i provini per i quali è stato realizzato solamente il *notch* a V ma non è stato inferto il colpo con la lama di rasoio, con RB o anche RT sono statti indicati i provini sui quali è stato inferto il colpo.

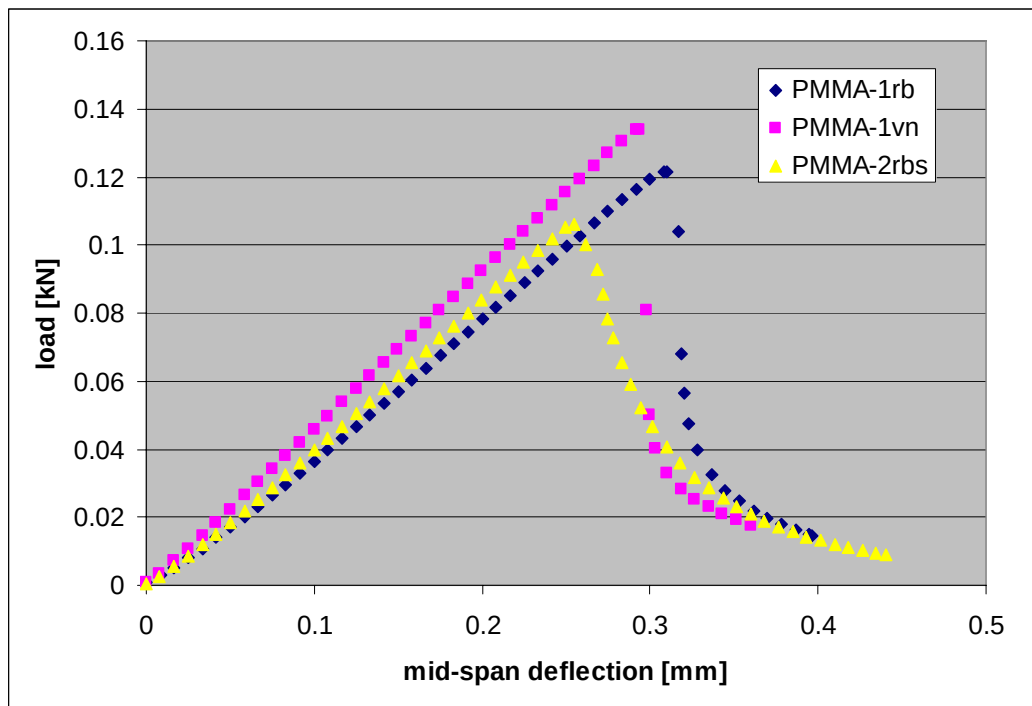


Figura 5.13: diagrammi carico-spostamento per PMMA.

Specimens nam	Notching	K_{IC} [MPa $\sqrt{m}$]	G_{IC} [kJ/m ²]	E_{stiff} [GPa]	E_{fract} [GPa]	E_{meas} [GPa]
PMMA-1rb	RT/VN	1.41	0.54	3.77	3.62	3.65
PMMA-1vn	VN	1.54	0.59	4.03	4.0	3.65
PMMA-2rbs	RT/SN	1.34	0.42	4.39	4.28	3.65

Tabella 5.6: alcuni valori sperimentali di K_{IC} , G_{IC} , E_{stiff} , E_{fract} , E_{meas} per PMMA.

5.5 Prove su resina epossidica.

Come detto in precedenza, i campioni sono stati ricavati da lastre dello spessore di 4 mm, ciò implica che i provini hanno dimensioni $B=4\text{mm}$, $S=32\text{mm}$, $w=8\text{mm}$.

La preparazione di provini così piccoli è particolarmente dispendiosa in termini di tempo di realizzazione a causa delle difficoltà nell'utilizzo degli accessori di lavoro per la creazione del *notch* e nel controllo dell'accuratezza geometrica.

La creazione del fronte di cricca è risultata particolarmente difficoltosa ed ha causato l'immediata rottura di un numero consistente di provini. Si sono rotti infatti dal 30 al 40% dei provini a causa di eccessiva forza nel colpo inferto. Il raggiungimento di una accettabile abilità manuale, si acquisisce attraverso l'esperienza e l'approccio per tentativi ed errori. La sensazione di avere effettuato un fronte di cricca efficace per lo studio in oggetto la si aveva quando dopo avere effettuato l'operazione, ed avendo comunque colpito una sola volta, la lama rimaneva leggermente conficcata dentro il provino. Al contrario se al primo colpo non si aveva questo risultato era molto probabile che un secondo colpo facesse rompere il provino o comunque che si creasse una cricca dalle dimensioni eccessive e dunque fuori del range di validità della prova. I risultati dei tests su questi provini sono riportati nei grafici seguenti e raccolti nella Tab. 5.7. Come ci si aspettava i valori di K_{IC} e G_{IC} per i campioni VN sono molto più alti dei campioni RTVN. È possibile individuare una coerenza di dati tra i campioni CSA7-4rb e CSA7-21rb per un tipo di epossidica e CSA8-6rb, CSA8-9rb, CSA8-12rb per l'altra.

Si è osservata una rottura prematura seguita da un arresto della cricca (*crack pop-in*) nei provini CSA8-2rb, CSA8-3rb e CSA8-8rb. Questo potrebbe essere dovuto alla bassa velocità applicata (0.25 mm/min). Per approfondire questo aspetto, è necessario studiare l'influenza della velocità sui tests. Si è osservato un valore elevato di K_{IC} e G_{IC} per CSA7-5rb, CSA8-11rb e CSA8-12rb. Una possibile spiegazione per questo comportamento potrebbe essere che il rasoio non ha prodotto un fronte di cricca nel materiale che quindi si comporta in modo intermedio tra VN e RTVN.

Specimens name	Notching	K_{IC} [MPa $\sqrt{m}$]	G_{IC} [kJ/m ²]	$(G_{IC})^*$ [kJ/m ²]	E_{stiff} [GPa]	E_{fract} [GPa]	E_{meas} [GPa]
CSA7-4rb	RT/VN	1.39	0.53		3.59	3.683	
CSA7-5rb	RT/VN	1.76	1.1		2.85	2.841	
CSA7-7rb	RT/VN			Early brake probably due to defects			
CSA7-17rb	RT/VN	1.41	0.46		4.239	4.394	
CSA7-21rb	RT/VN	1.35	0.52		3.482	3.482	
CSA7-20vn	VN	2.4	1.48		3.606	3.892	
CSA7-25vn	VN	2.36	1.34		4.114	4.166	
CSA7-26vn	VN	2.18	1.06		4.373	4.484	
CSA8-2rb	RT/VN	0.78		Early brake, crack pop in			
CSA8-3rb	RT/VN	0.69		Early brake, crack pop in			
CSA8-6rb	RT/VN	1.33	0.41	0.439	4.267	4.267	4.02
CSA8-9rb	RT/VN	1.34	0.45	0.447	4.0	4.0	4.02
CSA8-12rb	RT/VN	1.28	0.43	0.41	3.819	3.819	4.02
CSA8-1rb*	RT/VN	1.62	0.62	0.66	4.253	4.253	4.02
CSA8-8rb*	RT/VN	0.75		Early brake, crack pop in			
CSA8-11rb*	RT/VN	1.53	0.60	0.59	3.9	3.9	4.02
CSA8-4vn	VN	1.81	0.93	0.81	3.534	3.534	4.02
CSA8-10vn	VN	1.73	0.65	0.74	4.61	4.61	4.02
Cytec fiberite 977-2		1.1					
Hexcel 977-6		1.6					

Tabella 5.7: risultati delle prove realizzate presso il DICPM per due tipi di resine epossidiche.

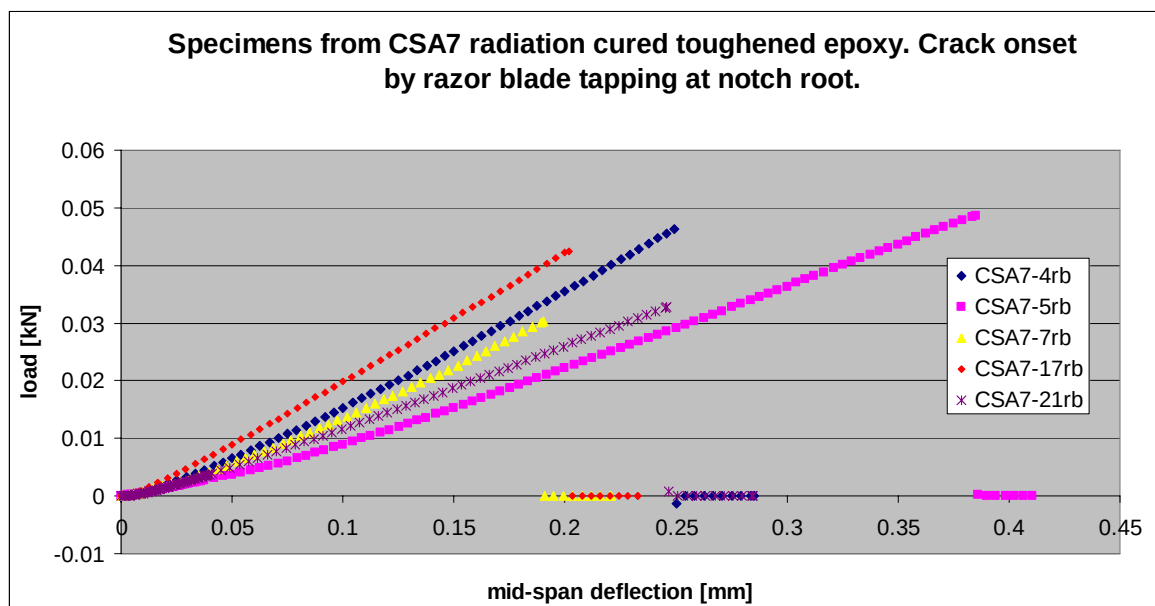


Figura 5.14: diagrammi carico-spostamento per alcuni campioni di epoxy CSA7.

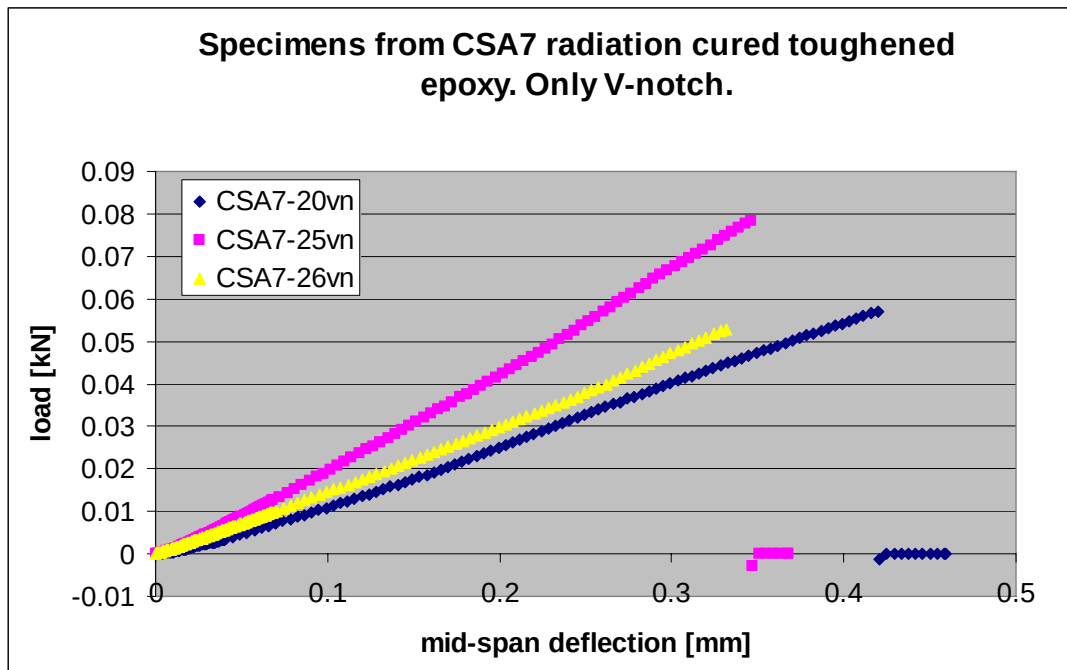


Figura 5.15: diagrammi carico-spuntamento per alcuni campioni con solo *notch*.

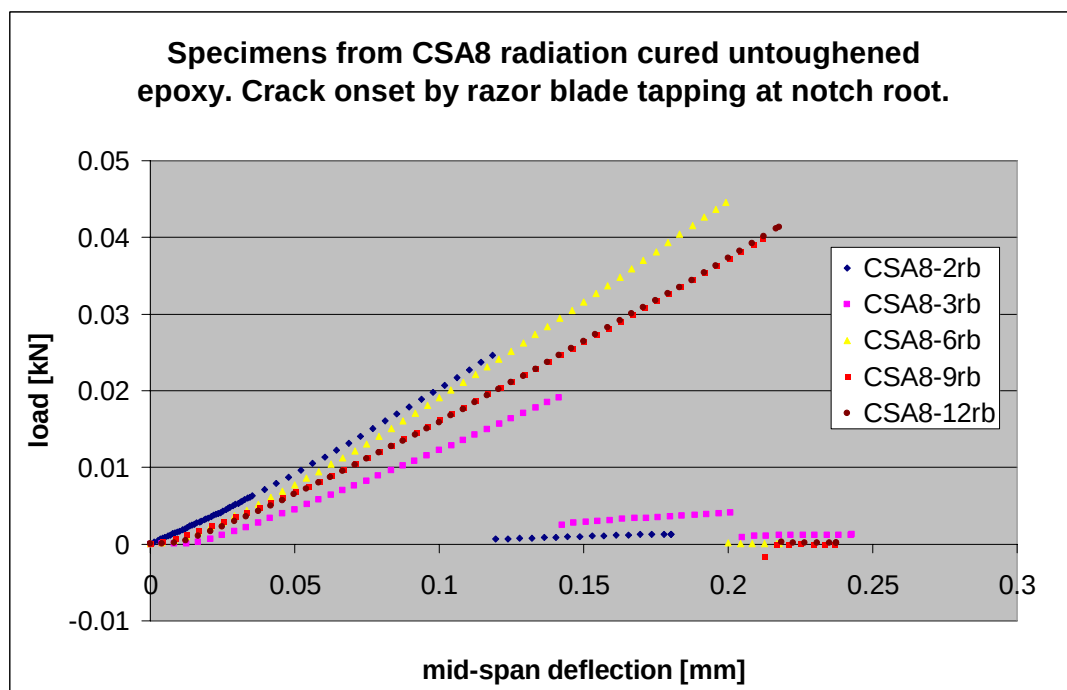


Figura 5.16: diagrammi carico-spuntamento per alcuni campioni di epoxy CSA8.

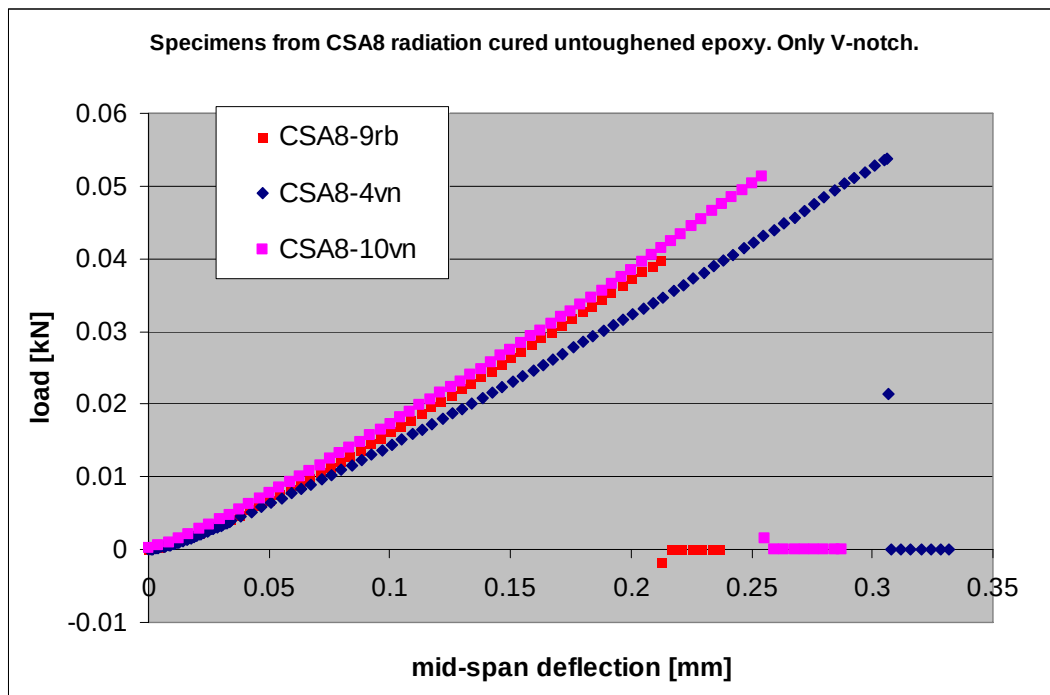
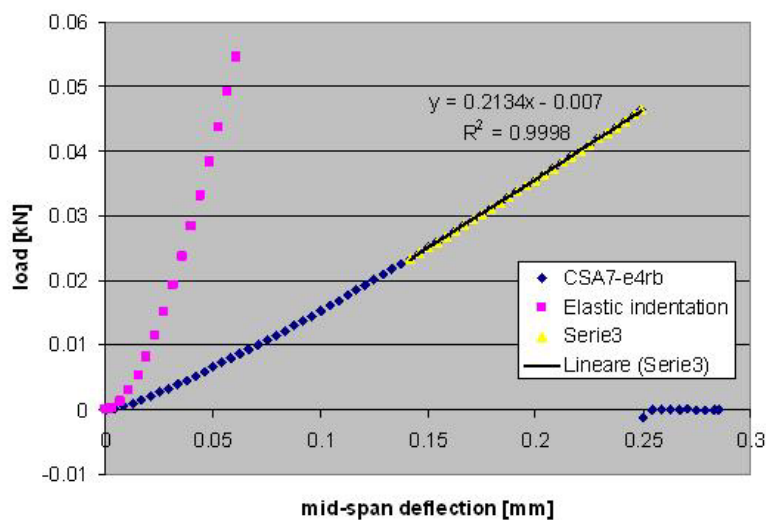
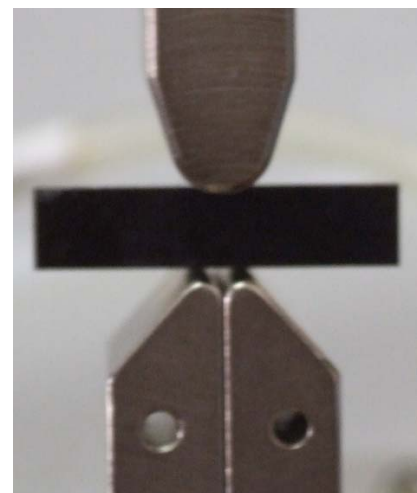


Figura 5.17: diagrammi carico-spostamento per alcuni campioni di epoxy CSA8.



(a)



(b)

Figura 5.18: a) diagramma carico-spostamento e curva di indentazione, b) prova di indentazione.

I grafici relativi alle diverse prove condotte sui provini di tabella 5.7 sono mostrati nelle figure da 5.15 a 5.17. In Fig. 5.18 si può osservare una tipica curva carico-

spostamento con la retta di una regressione lineare utilizzata per approssimare la curva. L'energia di rottura è calcolata dall'area di questa curva meno l'area della curva relativa alla prova eseguita sul provino non intagliato (vedi fi. 5.18b).

5.6 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come scopo quello di consentire una maggiore comprensione del fenomeno della meccanica della frattura di matrici polimeriche per materiali compositi strutturali realizzati mediante irraggiamento di sistemi a base di resine epossidiche. Il lavoro ha consentito di trovare valori di K_{IC} coincidenti con i dati disponibili in letteratura.

I campioni in cui è stato prodotto solo il *notch* a V ma non è stata usata la lama di rasoio, mostrano valori di K_{IC} più elevati.

I casi in cui si sono osservati valori non attesi, per la precisione più bassi, o in cui si è verificato il *pop-in* si pensa possano essere compresi meglio con ulteriori ricerche sull'influenza della velocità nei tests.

Nei casi invece dove sono stati riscontrati valori più elevati di quelli attesi, è probabile che ciò sia avvenuto per un fronte di cricca non idoneo cioè per una non riuscita utilizzazione del *razor tapping*.

Si è inoltre osservato che i criteri di *cross-check* funzionano bene anche se i parametri della MFLE sono interpretati come non idonei, per esempio E'_{fract} e E'_{stiff} sono ancora vicini l'uno all'altro.

Si ritiene che il lavoro qui presentato possa costituire una prima tappa di una attività di ricerca rivolta allo studio dei possibili miglioramenti delle caratteristiche dei materiali innovativi per un uso sempre più estensivo in vari campi dell'ingegneria industriale.

BIBLIOGRAFIA CAP. 5

- [5.1] **ASTM D 5045-99**: Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, 1999.
- [5.2] **ISO 13586**: “Plastics - Determination of fracture toughness (GIC and KIC) - Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach”, 2000.
- [5.3] **T.L. Anderson** – Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (third edition), CRC Press, 2005.
- [5.4] **ASTM E 399-90**: Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials (1990).
- [5.5] **Moore, D.R., Pavan, A., Williams, J.G.**, “Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites (Capitolo 1.1: K_C and G_C at Slow Speeds for Polymers, by J G Williams)”. ISBN 008 0436897, Elsevier 2001.
- [5.6] **Bakker, A.** Compatible Compliance and Stress Intensity Expressions for the Standard three-point Bend Specimen. *International Journal of Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 13 (2), 145, 1990.
- [5.7] **ASTM D 638-95**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (1995).
- [5.8] **Moore, D.R.**, private communication, 2006.