

modello, validato sperimentalmente e applicabile su vasta scala, è argomento di alcuni lavori, che saranno esposti in questa memoria. La carenza di letteratura scientifica trova giustificazione nella complessità dei meccanismi di frattura interfacciale che rendono difficile la definizione e determinazione dei parametri di frattura, in quanto la propagazione di una fessura nelle interfacce polimeriche è spesso accompagnata da un comportamento meccanico non lineare e da grande dissipazione di energia elastica. Il comportamento a rottura dei laminati è inoltre complicato dagli effetti combinati di decoesione interfacciale vetro-polimero e grandi deformazioni.

In tali studi l'analisi della propagazione della fessura viene effettuata seguendo sia i metodi tradizionali, rateo di rilascio di energia o fattore di intensificazione degli sforzi, sia i modelli di zona coesiva.

L'analisi della propagazione di fessure nei polimeri e nelle interfacce con i metodi convenzionali, difficoltosi da utilizzare a causa del comportamento meccanico non lineare, della decoesione e della dissipazione di energia, necessita di numerose ipotesi semplificative; i metodi di zona coesiva invece forniscono direttamente il lavoro necessario a separare l'interfaccia, sebbene richiedano la conoscenza di alcuni parametri che, come le caratteristiche di apertura o lo sforzo di picco, governano la lunghezza della zona coesiva che definisce la regione all'apice della fessura rappresentante diversi processi di frattura.

2. APPROCCIO ENERGETICO

Gli effetti dell'adesione vetro polimero sono stati valutati da Muralidhar et al. [6] attraverso una prova di trazione su laminati con intagli praticati ad arte sulle due lastre. In tale lavoro, che fornisce il modello di legame a ponte, viene analizzata la propagazione di una fessura interfacciale, tenendo in conto le grandi deformazioni nel polimero ma non il suo comportamento viscoso, per cui il valore di adesione interfacciale è tratto da una misura globale del rateo di rilascio di energia.

Il campione è costituito da due lastre di vetro su ciascuna delle quali è presente una fessura posta simmetricamente rispetto all'intercalare, PVB, che le tiene insieme. L'estremità superiore del campione è ammortata e fissa mentre il carico, ovvero lo spostamento impresso a velocità costante, è applicato all'estremità inferiore. L'obiettivo della prova è quello di determinare la sollecitazione generata nell'intercalare dallo spostamento applicato ed, in base a questa e alla misura della zona decoesa, la tensione all'interfaccia.

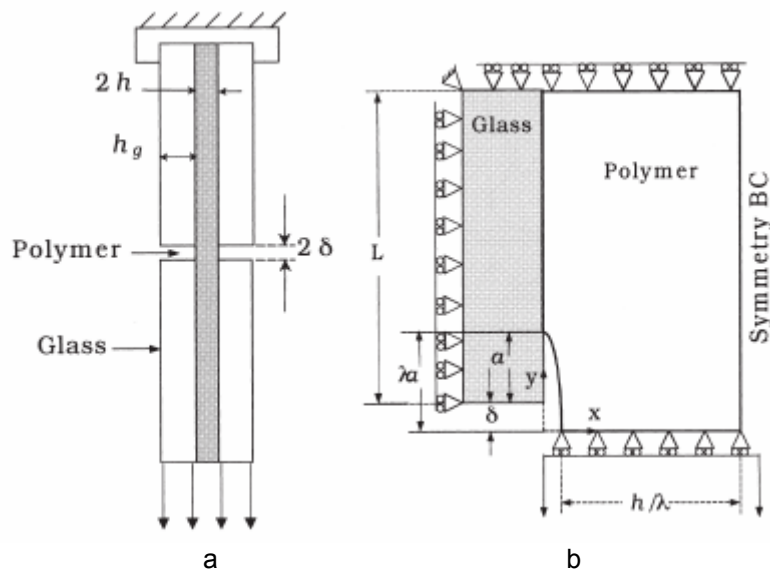


Fig. 1. a – Schema del campione [6]. b La simmetria del campione consente di considerarne solo un quarto.

La propagazione stabile delle fessure lunghe ed il modello iperelastico, usato per simulare il comportamento costitutivo del polimero, permettono, ricorrendo ad un'equazione di bilancio energetico, di stimare l'energia di frattura misurando i valori di carico e di deformazione allo stato stazionario, dipendenti dalle proprietà elastiche e dalla misura dell'adesione interfacciale. Invece, per le fessure corte la stima dell'energia di frattura necessita, per i processi che si innescano, della conoscenza del fattore di intensificazione degli sforzi; per stimare questo si ricorre alla meccanica

della frattura interfacciale, poiché la fessura non si propaga in un mezzo omogeneo ma all'interfaccia tra due materiali diversi.

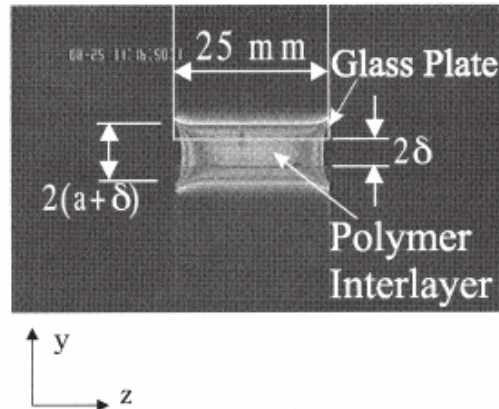


Fig. 2. Deformazione del polimero visualizzata attraverso la luce polarizzata [6]. La deformazione è seguita da delaminazione lungo l'interfaccia vetro-polimero.

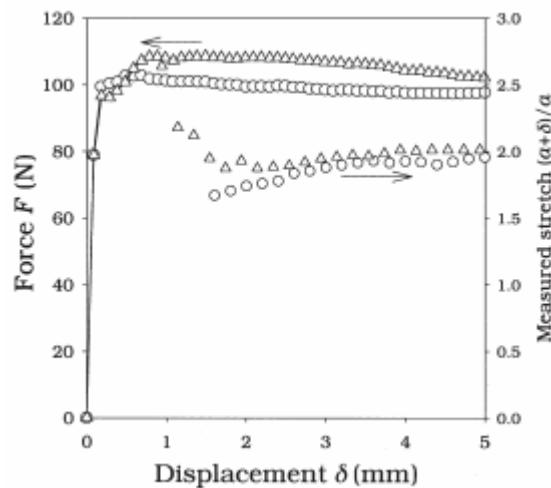


Fig. 3. Diagramma sperimentale carico-spostamento e allungamento misurato [6].

Nell'approccio numerico la simulazione della propagazione della fessura viene fatta sia utilizzando il metodo del rateo di rilascio di energia sia quello di zona coesiva. L'interfaccia è modellata in ogni caso impiegando elementi coesivi che connettono gli elementi atti a simulare il substrato rigido ed il polimero. Il valore del rateo di rilascio di energia, per le fessure corte, è legato alla misura della lunghezza della fessura ottenuta numericamente rilasciando i nodi in successione; nel caso invece delle fessure lunghe gli elementi coesivi, implementati dal modello di zona coesiva, forniscono direttamente il valore dell'energia di frattura.

La scelta di modellare l'intercalare come materiale iperelastico implica che i valori di adesione interfacciale comprendono anche i contributi dell'energia dissipata attraverso il volume del polimero; i risultati che così si ottengono sono necessariamente approssimati.

I risultati del lavoro di Seshadri et al. [8] forniscono anch'essi un valore globale dell'energia di frattura, in quanto anche qui il polimero viene modellato come materiale iperelastico. La determinazione sperimentale della resistenza meccanica di piastre laminate regolari, costituite da vetro-polimero e non vetro-polimero-vetro - escludendo così tutte le complicazioni derivanti dalla non coincidenza delle fessure su ciascun lato del polimero - viene effettuata su lastre semplicemente appoggiate e fratturate tramite carichi monotoni in n frammenti triangolari identici.

I campioni sono posti sul banco di prova con la lastra di vetro, preincisa, rivolta verso il basso. In questo modo i frammenti di vetro, il cui numero è controllato dalla presenza del difetto, si allontanano gli uni dagli altri non intaccando il polimero; oltre a ciò la preincisione riduce la quantità di energia necessaria a rompere la lastra. Tale configurazione fa sì che la deformazione post-frattura sia a membrana per il polimero e di moto rigido per i frammenti.

Per applicare il carico con velocità di spostamento costante, viene utilizzata una sfera di acciaio in grado di trasmettere solo forze di contatto fino a produrre frammentazione istantanea delle lastre di vetro e deformazione nel polimero.

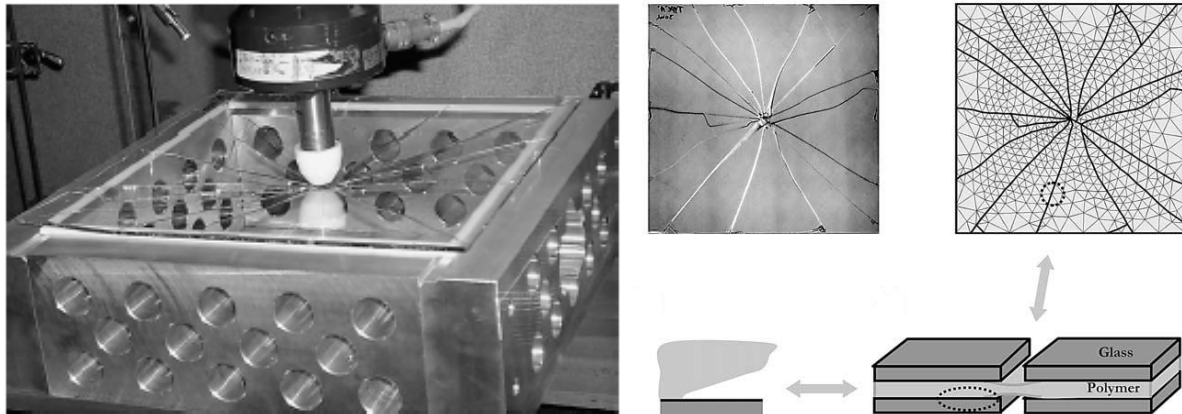


Fig. 4. Immagine di un campione sul banco di prova e modello assunto per il laminato frammentato [8].

Nell'approccio analitico il modello geometrico di frammentazione del vetro è assunto come noto, anche se in realtà la fessurazione di lastre di vetro è influenzata dagli stati di coazione, dalla dimensione di difetti preesistenti, dal tipo di carico, dalle condizioni di vincolo. L'analisi post-rottura, che assume fessure radiali e frammenti di vetro triangolari, identici tra loro e agenti come unghie, viene sviluppata sulla base del modello di legame a ponte [6], considerando anche gli effetti dell'attrito. Infatti, l'allineamento perfetto tra due frammenti connessi da un legame elastomerico è solo ideale, in realtà la decoesione tra substrato e legame non è simmetrica sulle due facce del polimero e produce fenomeni di attrito locali. L'obiettivo è quello di ottenere una equazione che leghi le condizioni di carico, agenti sul composito con lastre fessurate, al numero di frammenti, alla loro geometria ed alle proprietà adesive.

L'equazione di equilibrio del singolo frammento, estesa poi agli n frammenti, esprime l'uguaglianza tra la somma dei momenti prodotti dalle tensioni che agiscono sui lati di un frammento ed il momento prodotto dalla forza applicata al centro della lastra dalla sfera; la sua scrittura è preceduta dalla determinazione di due quantità, apertura - $\delta(r)$ - e braccio del momento - $z(r)$ - valutate con considerazioni di carattere cinematico, mentre le tensioni agenti sul frammento sono state determinate attraverso un'equazione di bilancio energetico tra il lavoro compiuto dai carichi esterni, l'energia di deformazione conservata nel legame polimerico, il lavoro compiuto per vincere l'attrito e l'energia di frattura dell'interfaccia associata alla creazione di nuove superfici di fessura.

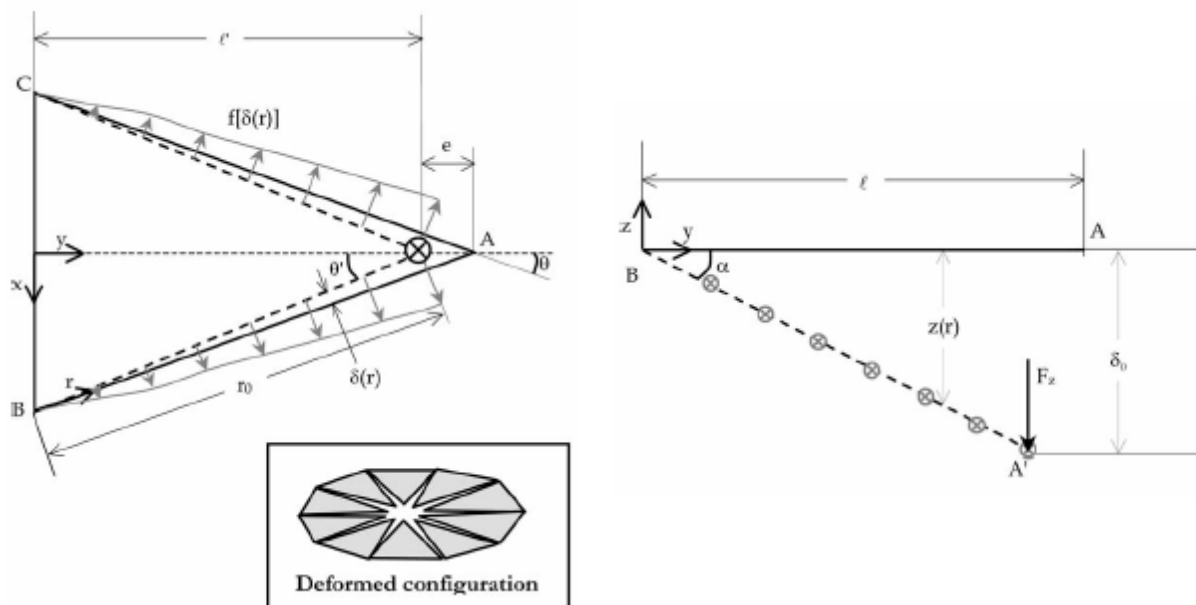


Fig. 5. Variabili cinematiche e forze nel frammento della lastra laminata [8].

I risultati sperimentali ed analitici vengono confrontati con quelli provenienti dalla simulazione numerica, nel cui contesto i frammenti di vetro sono modellati come elementi shell ed il polimero come elemento d'interfaccia tra due elementi shell per il quale è stato definito il comportamento a ponte, inserito nel codice numerico attraverso la determinazione della matrice delle rigidezze e del vettore delle forze.

3. ELEMENTI COESIVI

Muralidhar et al. [6] utilizzano gli elementi coesivi per modellare l'interfaccia tra vetro e polimero nell'ambito della simulazione numerica, come Sha et al. [9] ricorrono al modello di zona coesiva per simulare analiticamente la decoesione e la deformazione dell'interfaccia. Il valore di adesione tra vetro e polimero, determinato mediante prove di flessione su tre punti condotte su laminati con intagli praticati ad arte sulle due lastre, viene in seguito impiegato in un modello agli elementi finiti per trovare la tenacità di rottura dell'interfaccia e la sua resistenza tangenziale e normale.

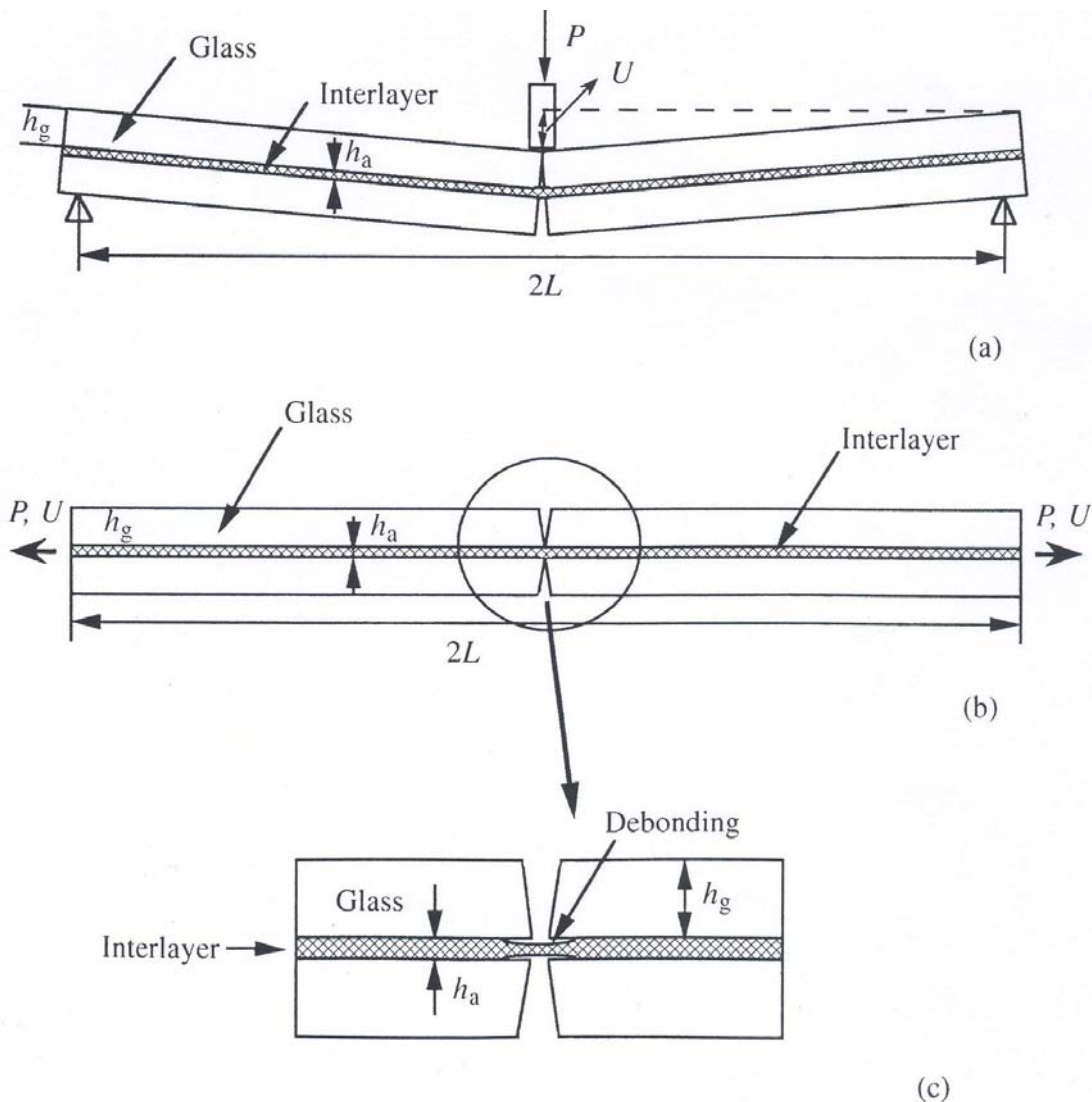


Fig. 6.a – Schema della prova di adesione per flessione. b – Schema della prova di adesione per trazione. c – Modello che simula la decoesione tra vetro ed intercalare nella prova di adesione per trazione [9].

A tal fine, i punti materiali in prossimità dell'interfaccia sono stati ipotizzati connessi da una serie di molle non lineari, tangenti e normali alla superficie. La somma della forza per unità di area agente su ogni singola molla fornisce il valore di resistenza normale e tangenziale dell'interfaccia, questi valori moltiplicati rispettivamente per l'apertura e lo scorrimento critici forniscono il valore dell'energia di frattura necessaria alla decoesione nei due diversi modi, I e II, mentre la loro somma è la tenacità dell'interfaccia.

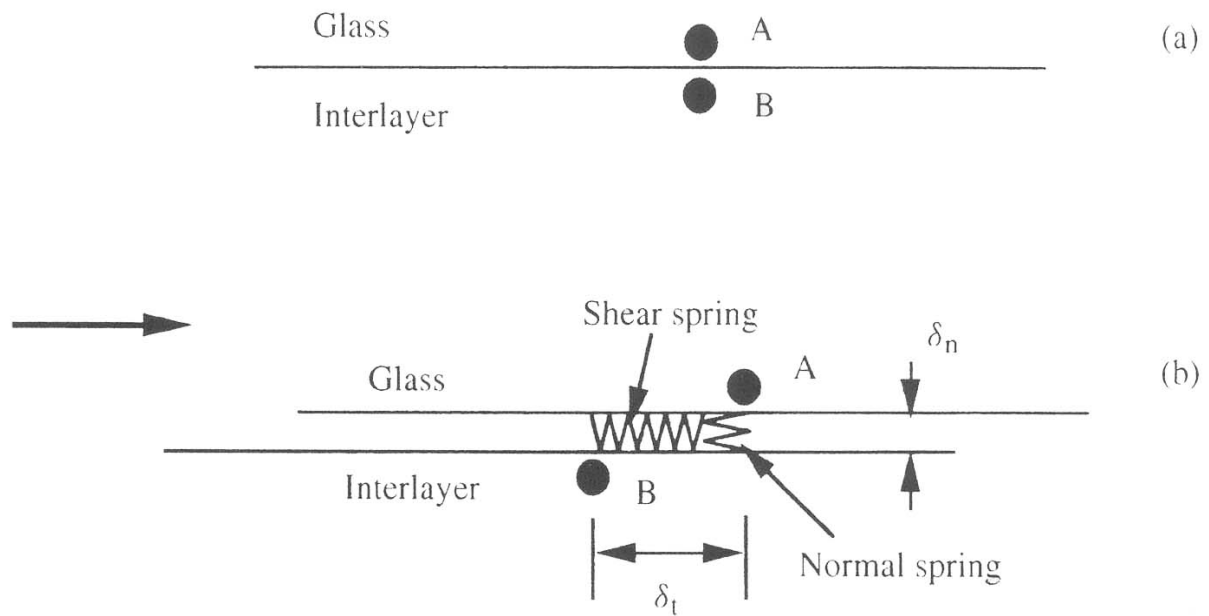


Fig. 7.a – A e B sono due punti materiali in corrispondenza dell'interfaccia. b – Schema di una molla posta a simulare la decoesione dell'interfaccia [9].

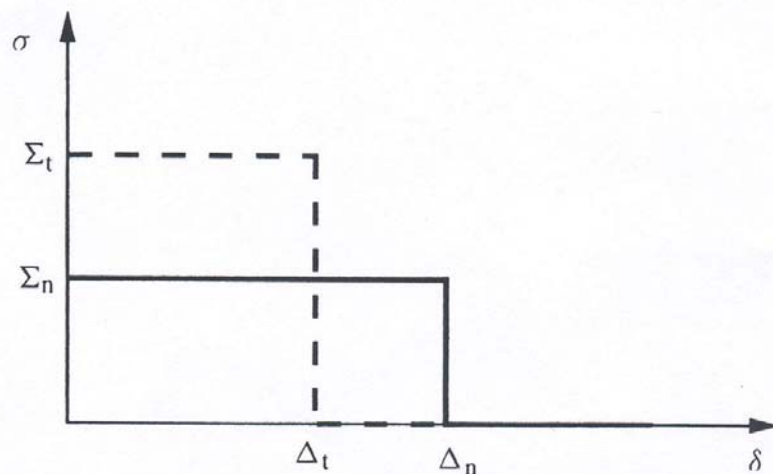


Fig. 8. Modello d'interfaccia che descrive la deformazione e la decoesione dell'interfaccia. La linea continua rappresenta la relazione tra la resistenza normale e l'apertura, mentre la linea tratteggiata rappresenta la relazione tra la resistenza tangenziale e lo scorrimento [9].

Nella simulazione agli elementi finiti il vetro è modellato come rigido mentre per l'intercalare viene assunto un comportamento elastico lineare che è ragionevolmente descrittivo del comportamento reale solo nell'ambito delle fessure corte, infatti in prossimità dell'apice della fessura interfacciale la diminuzione dello sforzo è maggiore per le fessure lunghe in quanto predomina il comportamento "viscoplastico" dell'intercalare essendo ridotta l'azione di confinamento esercitata dal vetro.

Gli elementi coesivi vengono impiegati anche da Rahul-Kumar et al. [7] che ne espongono i vantaggi nella compressione dei meccanismi di frattura interfacciale nei polimeri. La propagazione di fessure interfacciali viene analizzata attraverso una prova di compressione e taglio, generalmente usata per misurare l'adesione tra vetro e intercalare. I risultati sperimentali vengono utilizzati per validare il modello analitico e numerico che si basano ambedue su elementi coesivi.

I risultati sperimentali evidenziano che la propagazione della fessura avviene in presenza di grandi deformazioni dipendenti dalla velocità di deformazione, ma poiché gli autori sono interessati a

dimostrare le capacità degli elementi coesivi a modellare le diverse modalità di propagazione di fessure osservate sperimentalmente, trascurano il fattore tempo ritenendo sufficiente assumere un modello iperelastico per simulare il comportamento costitutivo del polimero. La tenacità di frattura, calcolata con il rateo di rilascio di energia, comprende, in questo modo, i contributi provenienti dalla dissipazione viscosa e dai processi che si manifestano nelle zone coesive all'apice delle fessure; soltanto l'impiego dei modelli di zona coesiva descritti da elementi coesivi permette la separazione del lavoro intrinseco di frattura, considerato proprietà del materiale, dalle perdite viscosse che sono funzione della geometria del campione e della velocità di carico.

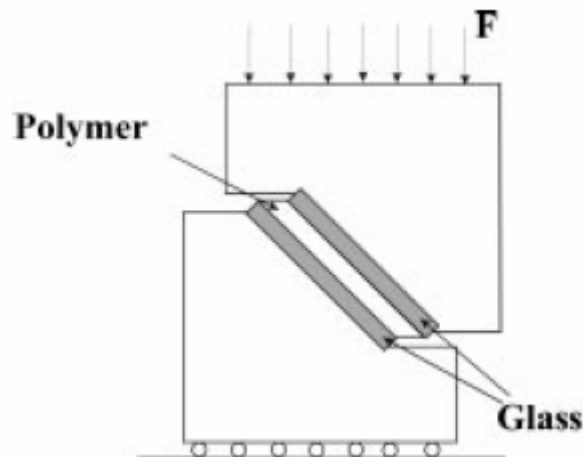


Fig. 9. Schema rappresentativo della prova di compressione e taglio [7].

L'indagine sperimentale evidenzia che in corrispondenza dei lati liberi del campione, per deformazioni monotone e bassa adesione tra vetro e polimero, si verifica una propagazione stabile, in modo I, della fessura lungo l'interfaccia seguita, in corrispondenza del livello critico di deformazione tangenziale, da propagazione instabile caratterizzata da grande scorrimento lungo l'interfaccia.

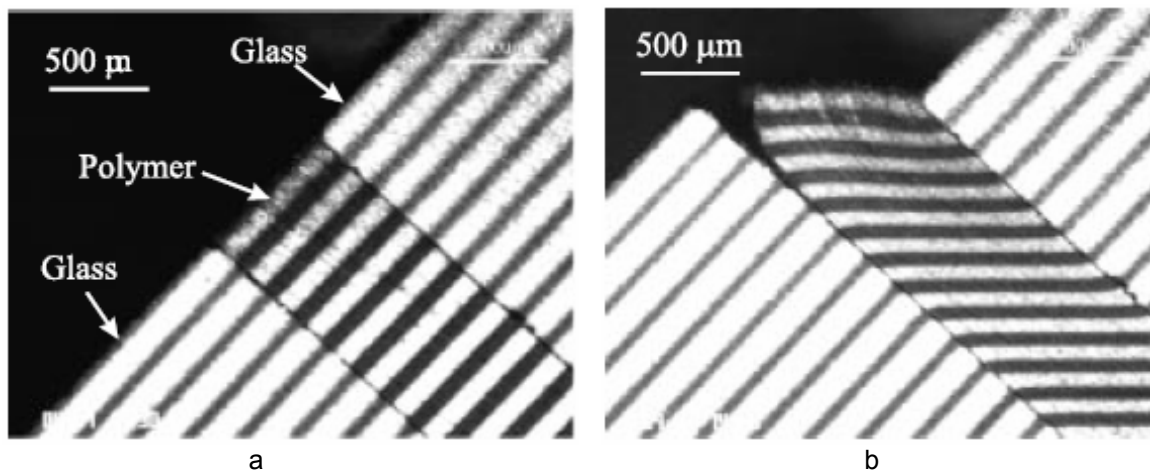


Fig. 10.a – Vista del lato libero del campione. b – Propagazione stabile della fessura lungo l'interfaccia prima che si verifichi l'instabilità, in corrispondenza della quale l'interfaccia cede [7].

Gli autori, basandosi sul rateo di rilascio di energia tratto dall'esperimento, prevedono tre diverse tipologie di fessura: fessure lunghe, stabili fino alla deformazione critica e che poi si propagano instabilmente; fessure intermedie, stabili fino alla deformazione critica applicata che crescono stabilmente ed eventualmente in seguito si propagano in modo instabile; fessure corte stabili fino alla deformazione critica applicata che crescono stabilmente ed eventualmente in seguito si propagano in modo instabile.

La propagazione dei difetti iniziali viene analizzata usando un'equazione costitutiva iperelastica descrittiva del comportamento del polimero ed elementi coesivi rappresentativi dell'interfaccia vetro-polimero.

Nella simulazione numerica, che tiene conto di un parametro che evita la compenetrazione tra le superfici coesive ed è attivo solo in compressione, i valori delle tensioni normali e tangenziali negli elementi coesivi si ottengono dalla generalizzazione tridimensionale del “potenziale fenomenologico di Xu e Needleman”.

4. CONCLUSIONI

Gli elementi coesivi si mostrano mezzi utili sia per descrivere la deformazione e la rottura dell'interfaccia tra vetro e polimero sia per l'analisi statica e dinamica di meccanismi di frattura non facilmente riconducibili a disamina con tecniche convenzionali. Occorre però precisare che questi devono essere collegati a modelli comportamentali dipendenti dal tempo per ottenere valori di energia di frattura depurati della quota associata alla dissipazione di energia che avviene attraverso il volume polimerico.

Il modello analitico e la simulazione numerica si rivelano strumenti utili nella progettazione di strutture di vetro laminato poiché permettono di valutare, anche nella fase fratturata, la resistenza residua ed i tempi entro i quali è necessario procedere alla sostituzione dei pannelli danneggiati. L'approccio progettuale tradizionale, basato su prove su prototipi ovvero su risultati strettamente legati alle circostanze di prova, viene così ad essere superato dalla disponibilità di un modello di comportamento della struttura che permette di prevederne la risposta per qualsiasi condizione di esercizio.

Tab. 1. Confronto tra i valori di energia di frattura misurati e tra i valori delle costanti iperelastiche usati per il materiale neo-Hookiano (tratti da Muralidhar et al. [6]):

	Costante iperelastica (MPa)	Energia di Frattura (J/m ²)
Muralidhar et al. [6]	0.1667	283.98
Sha et al. [9]	-	100-300
Rahul-Kumar [7]	0.1660	392.13

BIBLIOGRAFIA

- [1] Albrecht, G., et al., “Application and testing of laminated safety glass”, Costruire con strutture in vetro, Tipografia Editrice Pisana, 2004 Pisa
- [2] Briccoli Bati, S., Ranocchiali, G., Reale, C., Rovero, L., “Comportamento meccanico di lastre di vetro strutturale”, Workshop sulle strutture composite, Trieste 2004
- [3] Briccoli Bati, S., Ranocchiali, G., Reale, C., Rovero, L., “Comportamento di lastre di vetro stratificato”, XVII Congresso Aimeta di Meccanica Teorica e Applicata, Firenze 2005
- [4] Hooper, J. A., “On the bending of architectural laminated glass”, International Journal Mech. Sci., vol. 15, 1973, pgg. 309-328
- [5] Kott, A., Vogel, T., “Safety of Laminated Glass Structures after Initial Failure”, Structural Engineering International, n. 2, 2004, pgg. 134-138
- [6] Muralidhar, S., Jagota, A., Bennison, S. J., Saigal, S., “Mechanical behaviour in tension of cracked glass bridged by an elastomeric ligament”, Acta Materialia, n. 48, 2000, pgg. 4577-4588
- [7] Rahul-Kumar, P., Jagota, A., Bennison, S. J., Saigal, S., “Interfacial failures in a compressive shear strength test of glass/polymer laminates”, International Journal of Solids and Structures, n. 37, 2000, pgg. 7281-7305
- [8] Seshadri, M., Bennison, S. J., Jagota, A., Saigal, S., “Mechanical response of cacked laminated plates”, Acta Materialia, n. 50, 2000, pgg. 4477-4490
- [9] Sha, Y., Hui, C. Y., Kramer, E. J., Garrett, P. D., Knapczyk, J. W., “Analysis of adhesion and interface debonding in laminated safety glass”, Journal of Adhesion Science and Technologie, Vol. 11, n. 1, 1997, pgg. 49-63