

APPLICABILITÀ DEL MODELLO DI ZONA COESIVA IN SIMULAZIONI DELLA FRATTURA PER DIVERSE GEOMETRIE DI GIUNTI INCOLLATI

A. Pironi, D. Fersini, E. Perotti, F. Moroni

Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Parma, Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, Italia

alessandro.pironi@unipr.it

fersini@pulsar.eng.unipr.it

fab.moroni@tiscali.it

SOMMARIO

L'obiettivo del lavoro consiste nella simulazione di frattura in giunzioni incollate mediante l'utilizzo di un modello di zona coesiva implementato in ABAQUS. I risultati delle simulazioni agli elementi finiti sono stati confrontati con dati sperimentali ottenuti da diversi test su giunti incollati con 2 diversi adesivi strutturali epossidici (Loctite Hysol 9514 e Loctite Hysol 9466).

In una prima fase sono state realizzate simulazioni di prove di frattura su giunti con geometria Double Cantilever Beam (DCB), al fine di ottenere i parametri coesivi che meglio permettono di riprodurre i dati sperimentali. In seguito si è tentato di trasferire i parametri ottenuti dalla modellazione dei giunti per simulare test di pelatura. Per quel che riguarda i modelli impiegati per la taratura sono state eseguite due serie di simulazioni: la prima in cui l'adesivo e la propagazione della frattura si sono simulate con un unico strato di elementi coesivi; la seconda in cui è stato modellato contemporaneamente sia l'adesivo, sia la zona coesiva dove avviene la propagazione.

Dai risultati delle simulazioni su giunti DCB si nota come la modellazione contemporanea di adesivo e zona coesiva non fornisca risultati migliori rispetto alla modellazione del solo strato coesivo. Per quel che riguarda le prove di pelatura, i risultati delle simulazioni di taratura eseguite per giunti DCB non sono applicabili in modo ottimale, ma variando opportunamente i parametri coesivi si ha una buona riproduzione dei dati sperimentali. I valori di energia a frattura assegnati allo strato coesivo mediante i quali si ha una buona riproducibilità dei dati sperimentali, sono inferiori, anche se abbastanza prossimi ai valori di energia di frattura (G_C) ricavati sperimentalmente da test di pelatura.

1 INTRODUZIONE

In ambito ingegneristico gli adesivi sono utilizzati per realizzare collegamenti, ovvero sistemi che permettono la giunzione di un complesso meccanico. I vantaggi che la tecnica dell'incollaggio offre rispetto ai tradizionali metodi di giunzione sono svariati. Ad esempio si possono citare:

1. Leggerezza del manufatto;
2. Elevata resistenza nei confronti di alcuni tipi di sollecitazione;
3. Economicità di fabbricazione;
4. Estetica migliorata;
5. Possibilità di unire materiali diversi, che possono differire per composizione, coefficienti di dilatazione, moduli elastici e spessore;
6. Una più uniforme distribuzione delle tensioni sull'intera superficie incollata, con la conseguente riduzione delle concentrazioni di tensioni;
7. Le caratteristiche elettriche degli adesivi sono tali da isolare gli aderenti.

Generalmente i giunti incollati cedono a causa della propagazione di fessure, che si generano e si espandono nella zona di incollaggio. Il percorso da esse seguito può essere concentrato nell'adesivo (frattura coesiva) o sull'interfaccia adesivo-substrato (frattura adesiva), o ancora, la propagazione può avvenire sia nell'adesivo che all'interfaccia (frattura mista). La valutazione dell'integrità meccanica di

ogni struttura con difetti richiede lo sviluppo di approcci e metodologie che possono essere applicate non soltanto in semplici situazioni di carico, ma anche in situazioni complesse, incluse estese plasticità, sollecitazioni composte (modo misto I/II/III) ed eventuali condizioni di non isotermità. Due tipologie di approccio sono state sviluppate per questi scopi. Il primo chiamato “approccio macromeccanico” è essenzialmente basato sulle teorie MFLE (meccanica della frattura lineare elastica) e MFEP (meccanica della frattura elasto plastica): l'ipotesi di base è che la resistenza alla frattura possa essere misurata in termini di un solo parametro (G_c , K_c , J_c o CTOD). Questo approccio è estremamente pratico, ma si scontra con certe limitazioni, soprattutto quando si incontrano larghe scale di plasticità. Il secondo approccio chiamato “approccio micromeccanico” si è sviluppato negli ultimi trenta anni. In questa metodologia la modellazione della frattura è basata sull'evoluzione micromeccanica del danno all'apice del difetto.

I metodi di approccio micromeccanico al danneggiamento e frattura sono fonte di interesse crescente. Il principale vantaggio, rispetto alle classiche teorie sui meccanismi di frattura, è che, nella legge di danneggiamento, i parametri di questi modelli dipendono solo dal materiale e non dalla geometria. Per questo motivo tali approcci garantiscono in principio una migliore trasferibilità di dati tra risultati di prove di laboratorio e strutture reali. L'identificazione e determinazione di parametri richiede metodologie ibride che combinano test di laboratorio e simulazioni numeriche.

Tra i modelli micromeccanici il modello di zona coesiva è stato principalmente utilizzato per le giunzioni incollate [1-9]. L'idea che sta alla base di questo approccio è quello di combinare un criterio energetico con un criterio basato sulle tensioni. La frattura viene descritta come un fenomeno di progressiva separazione lungo un'estesa porzione di materiale, detta appunto zona coesiva, nella quale agiscono trazioni all'interfaccia delle superfici di frattura (Figura 1.1).

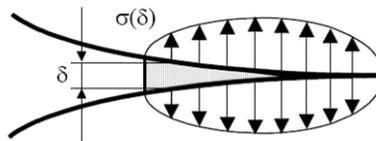


Figura 1.1: zona coesiva.

La propagazione della frattura può essere descritta da diverse relazioni che legano l'apertura con la tensione agente di fronte ad essa.

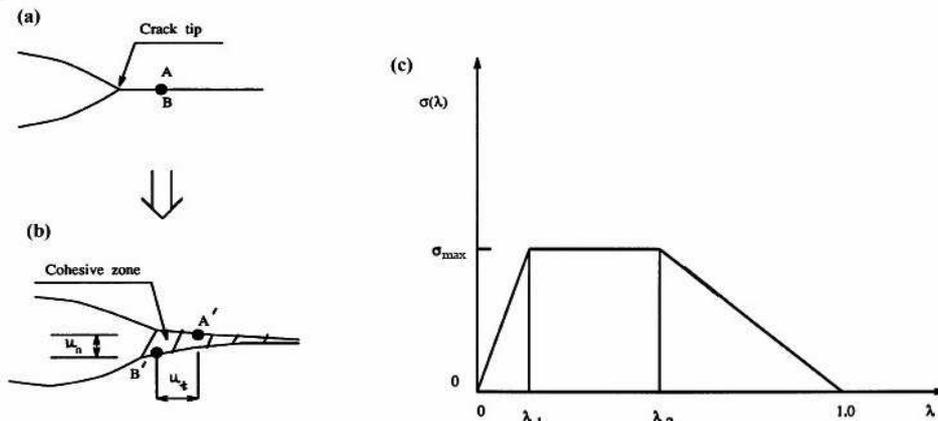


Figura 1.2: a) indeformata, b) configurazione deformata in prossimità dell'apice della frattura, c) corrispondente legge trazione-deformazione per l'interfaccia.

Gli studi condotti da Tvergaard e Hutchinson [11-13] hanno portato ad uno sviluppo del modello di Needleman [14,14]. In particolare facendo riferimento alla Figura 1.2, indicando con u_n e u_t le componenti normale e tangenziale dello spostamento relativo delle due opposte superfici di frattura, ed individuando in u_n^c e u_t^c i rispettivi valori critici, può essere definita un'unica misura adimensionale della separazione tale che la tensione σ si annulla quando λ assume valore unitario:

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{u_n}{u_n^c}\right)^2 + \left(\frac{u_t}{u_t^c}\right)^2}$$

Il lavoro di separazione per unità d'area d'interfaccia vale:

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^c [1 - \lambda_1 + \lambda_2]$$

Da ciò si evince che i parametri che governano la legge di separazione dell'interfaccia sono l'energia di frattura Γ_0 , il massimo valore della tensione di separazione σ_{\max} ed il rapporto critico dello spostamento normale e tangenziale δ_n^c/δ_t^c , unitamente ai fattori λ_1 e λ_2 governanti la pendenza della funzione di separazione. In questo lavoro si è considerato solo il modo I.

2 MATERIALI E METODI

Il lavoro si compone di una prima fase in cui sono stati determinati i parametri coesivi, a cui segue una seconda in cui viene simulato il comportamento di giunti con una geometria diversa, impiegando in prima battuta i parametri coesivi precedentemente individuati, allo scopo di verificarne la trasferibilità.

Prove sperimentali

Per determinare i parametri di zona coesiva caratteristici dei due adesivi, sono state effettuate prove di frattura su provini DCB, secondo la norma ASTM D 3433-99. Nella Figura 2.1-a sono riportate le dimensioni dei provini.

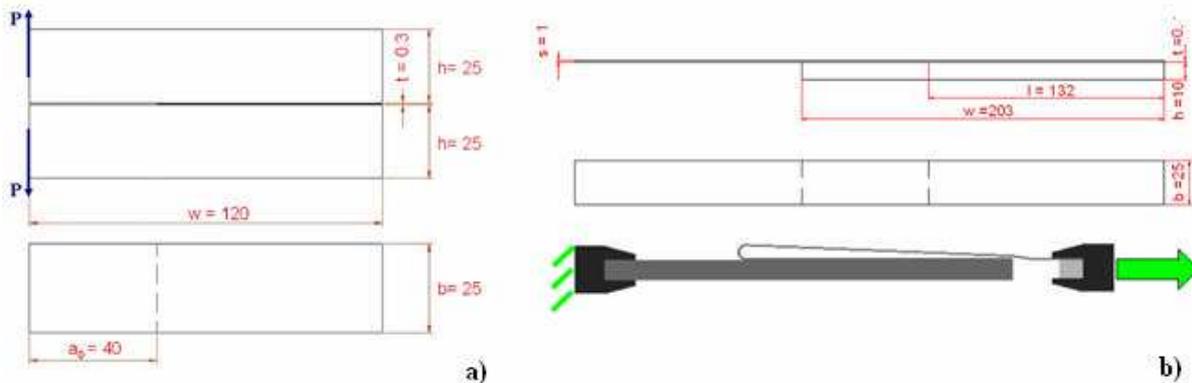


Figura 2.1: Geometria dei giunti e modalità di sollecitazione

Per quel che riguarda invece la simulazione delle fratture in prove di pelatura, la norma di riferimento è la ASTM D 903-98 (in Figura 2.1-b) sono riportate le dimensioni e il modo di sollecitazione). In particolare la lamiera sottile è stata ripiegata su se stessa a 180° mediante l'interposizione di una lamina di spessore 2mm prima che i campioni venissero provati.

Tutti i giunti sono stati realizzati con substrati metallici in Acciaio Fe 360 e le superfici sono state carteggiate, sgrassate e lavate prima dell'applicazione dell'adesivo. I giunti prodotti con adesivo Hysol 9514 (monocomponente) sono stati curati in forno a 180° per 45 minuti, mentre i giunti prodotti con adesivo 9466 (bicomponente) sono stati curati a 120° per 45 minuti.

Modellazione con elementi finiti

Per quel che riguarda le analisi agli elementi finiti, sono stati proposti differenti modelli. In tutte le simulazioni si è scelto di realizzare i modelli utilizzando elementi solidi bidimensionali, fissando uno spessore fuori piano di 1mm. Al fine di tarare i parametri coesivi si è realizzato un modello di giunto DCB con un solo strato di elementi coesivi e, sfruttando la simmetria geometrica, si è modellato solo metà giunto (Figura 2.3).

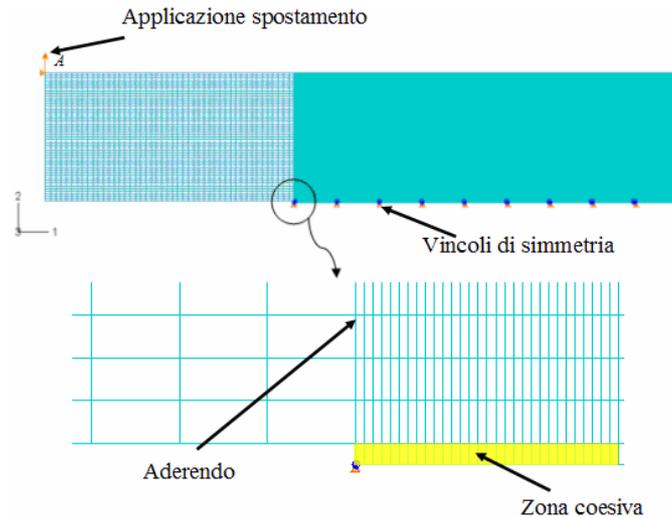


Figura 2.2: Modello di giunto DCB con solo strato coesivo

Sono poi stati proposti 2 modelli per introdurre l'adesivo. Il primo si pone l'obiettivo di simulare l'avanzamento del difetto all'interno dello strato adesivo (frattura coesiva); la conseguenza, come mostrato in Figura 2.4-a, è che il modello presenta lo strato adesivo interposto tra l'aderendo e lo strato di elementi coesivi. Il secondo modello cerca invece di simulare l'avanzamento del difetto all'interfaccia (frattura adesiva), presentando, di conseguenza, lo strato di elementi coesivi tra l'aderendo e l'adesivo (Figura 2.4-b)

In entrambi i casi si è modellato solo metà giunto: nel primo caso si è imposto un vincolo di simmetria al lato inferiore dello strato coesivo, mentre nel secondo, ai nodi sullo spigolo inferiore, è stata impedita la traslazione lungo 2 e il loro movimento relativo lungo 1. Questa semplificazione nella realtà non è pienamente rispettata nel caso di giunti con frattura adesiva, ma può essere ritenuta comunque valida vista la rigidità del substrato inferiore.

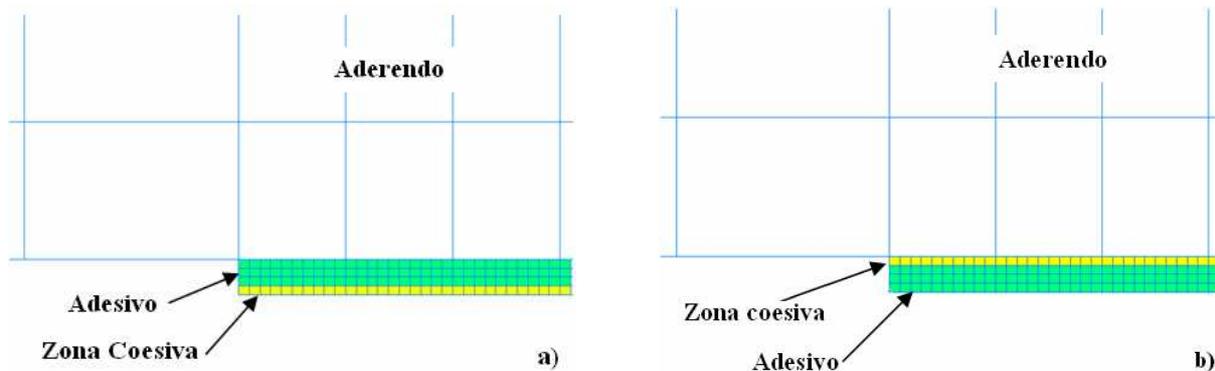


Figura 2.3 – Particolare dei modelli di frattura coesiva(a) e frattura adesiva (b)

Per permettere di ridurre i tempi di calcolo, ma allo stesso tempo descrivere bene quanto accade nello strato coesivo e nell'adesivo, si rende necessaria una transizione di mesh molto marcata. In particolare tra questa zona e l'aderendo, la dimensione degli elementi ha un fattore transizione di 1:10. Per fare ciò si rende necessario un vincolo "tie" che lega gli spostamenti della superficie inferiore dell'aderendo (superficie Master) con quelli dei nodi della superficie superiore degli elementi a questa affacciata (superficie Slave). Si è anche svolta un'analisi di convergenza sulle dimensioni dell'elemento. Nei modelli di provini DCB, vista la sollecitazione nel in solo modo I, viene definita come accennato in precedenza, una legge trapezoidale.

Nelle simulazioni che implicano la presenza dell'adesivo, sono state assegnate al materiale proprietà elasto-plastiche, ricavate sperimentalmente da test di trazione su campioni di adesivo indotti a polimerizzare a forma di provino di trazione (ASTM D 638). Anche nelle simulazioni di prove di pelatura si è adottato, per il substrato, un comportamento del materiale elasto-plastico ricavato sperimentalmente da prove di trazione. Di contro per le simulazioni di provini DCB, vista la notevole sezione resistente, si è adottato un modello che tiene conto del solo comportamento elastico del metallo.

Nelle simulazioni delle prove di pelatura la base rigida può non essere modellata, poiché questa risulta essere sostanzialmente non deformata durante la prova, svolgendo esclusivamente una funzione di supporto per l'incollaggio.

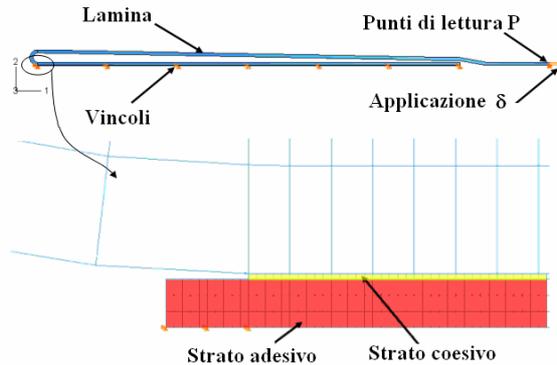


Figura 2.4 – Modelli del giunto di e particolare della zona di innesco della propagazione

Si è quindi definito un criterio di inizio ed evoluzione del danno tale da tenere in considerazione le condizioni di modo misto I e II che si sviluppano nel modello. Per ciò che riguarda il criterio di inizio del danneggiamento si è scelto il criterio quadratico delle tensioni, mentre per l'evoluzione del danneggiamento si è scelto il criterio basato sull'energia.

I test sperimentali hanno presentato, nel caso di peel, fratture esclusivamente adesive per cui si è studiato solo questo caso.

3 RISULTATI

Di seguito si riportano i confronti tra i risultati sperimentali e delle simulazioni .

Giunti DCB: modelli con sola zona coesiva

Viste le esperienze passate [7,10] riguardanti l'influenza dei parametri della zona coesiva sui risultati delle simulazioni, si può intuire come sia difficoltoso seguire in modo completo l'andamento sperimentale. L'elevato valore di σ_m necessario per dare la sufficiente rigidità nel tratto iniziale, causa un picco con conseguente rapido crollo dei valori del carico, mentre le prove sperimentali presentano un plateau in seguito al raggiungimento del valore massimo. Nelle stesse esperienze passate si è potuto osservare come i valori di Γ_0 siano prossimi alla tenacità a frattura del materiale (G_C), di conseguenza sono questi i valori di primo tentativo che si attribuiscono allo strato coesivo. Le simulazioni che hanno rappresentato il miglior compromesso sono caratterizzate dai parametri di zona coesiva mostrati in Tabella 3.1 e Figura 3.1

Tabella 3.1 – Tenacità a frattura e parametri coesivi individuati nelle prove di taratura

Parametri caratteristici	Hysol 9514	Hysol 9466
$G_C [J/m^2]$	905	490
$\Gamma_0 [J/m^2]$	925	680
$\sigma_m [MPa]$	90	60
λ_1	0.2	0.2
λ_2	0.5	0.5

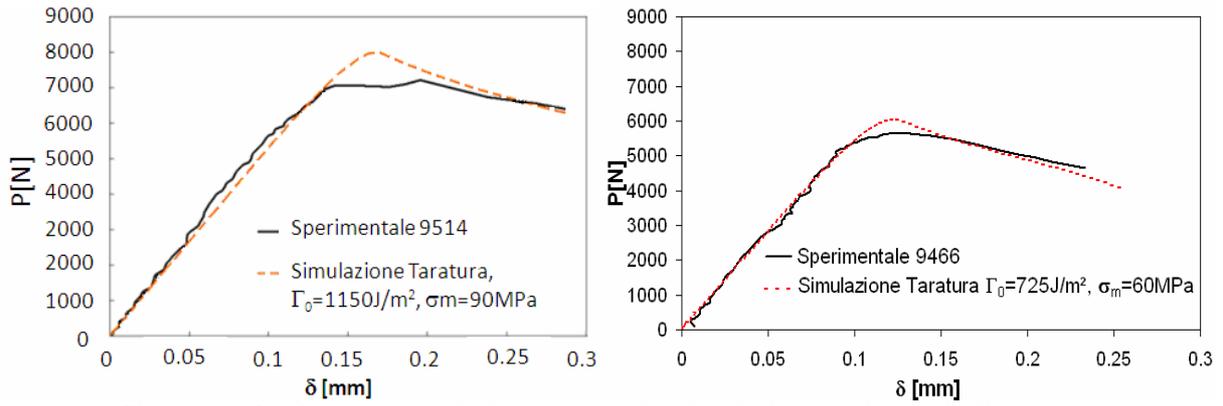


Figura 3.1: Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni per i modelli di taratura

Giunti DCB: modelli di frattura coesiva

Come si può vedere in Figura 3.2, l'aggiunta nel modello dello strato di adesivo comporta a parità di parametri dello strato coesivo, delle variazioni nei risultati. Si osserva principalmente un calo della pendenza del tratto iniziale, un aumento del carico massimo ed una variazione del tratto decrescente della curva, che presenta una pendenza più accentuata. La minore pendenza del tratto crescente è imputabile alla presenza dell'adesivo, che determina una maggiore cedevolezza del giunto. Infatti, rispetto alla taratura, si ottiene un sistema complessivamente più cedevole; sono state mantenute inalterate infatti le caratteristiche di aderendo e zona coesiva ed è stato aggiunto l'adesivo, caratterizzato da una bassa rigidezza. Il raggiungimento di un carico massimo superiore e un tratto decrescente traslato verso l'alto sono effetti attesi, in quanto l'energia necessaria per fratturare il giunto è, in questo caso, la somma dell'energia necessaria al completo danneggiamento della zona coesiva (che non varia rispetto alla simulazione di taratura) e dell'energia dissipata per deformazione plastica nell'adesivo

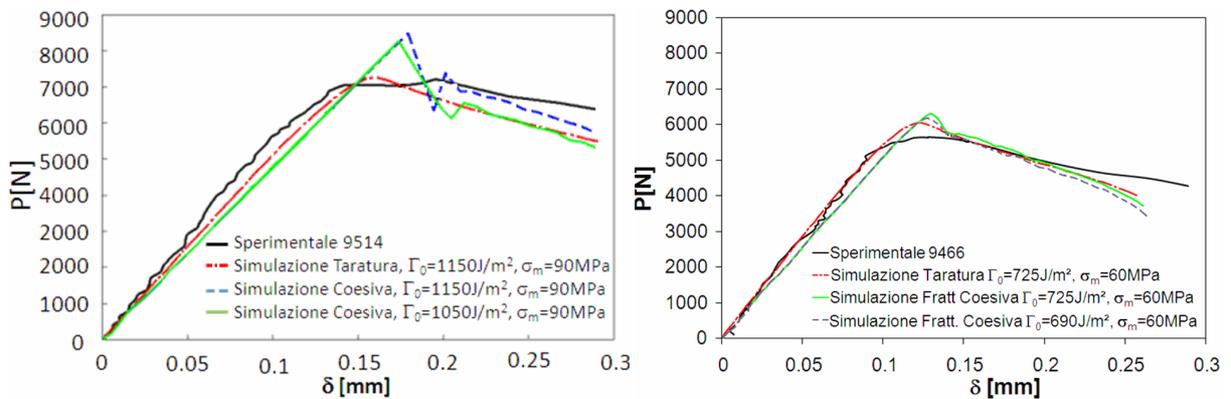


Figura 3.2: Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni per i modelli con frattura coesiva

Tabella 3.2 – Parametri coesivi delle prove di frattura coesiva

Parametri caratteristici	Hysol 9514	Hysol 9466
$\Gamma_0 [J/m^2]$	1050	690
$\sigma_m [MPa]$	90	60
λ_1	0.2	0.2
λ_2	0.5	0.5

In Tabella 3.2 sono riportati i valori dei parametri coesivi che hanno fornito i migliori risultati. Si evidenzia il fatto che l'aggiunta dello strato di adesivo comporta una diminuzione dell'energia di frattura rispetto alle simulazioni con solo strato coesivo. Questo proprio perché parte del lavoro che si effettua per portare a rottura il giunto, viene assorbito dalle deformazioni plastiche nello strato di adesivo.

Giunti DCB: modelli di frattura adesiva

Anche in questo caso l'aggiunta dello strato adesivo rispetto alle prove di taratura, causa le variazioni

gia evidenziate nel caso precedente. Nella Tabella 3.3 si riportano i valori dei parametri coesivi che hanno dato i migliori risultati in termini di ricoprimento del tratto iniziale, del tratto a carico discendente e di carico massimo. In Figura 3.3 è mostrato il confronto tra dati sperimentali e risultati delle simulazioni.

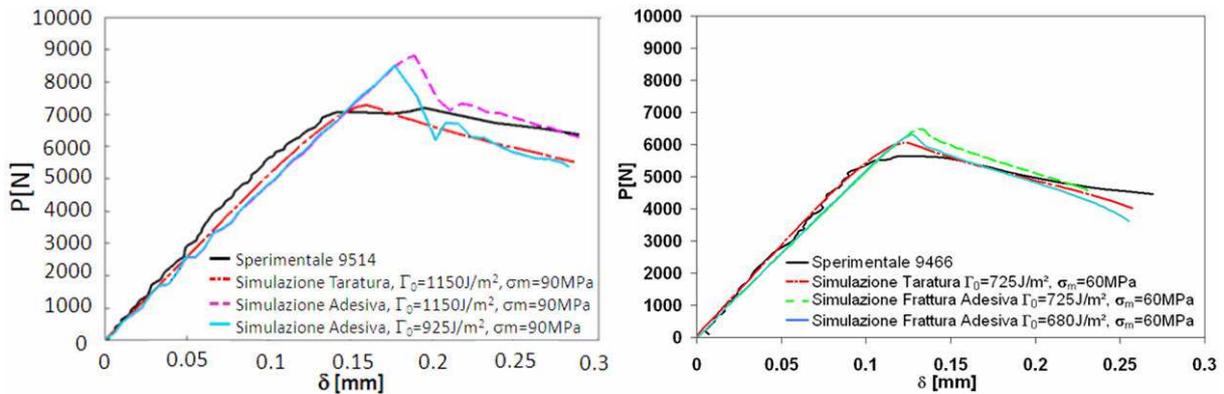


Figura 3.3: Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni per i modelli con frattura adesiva

Tabella 3.3 – Risultati delle prove di frattura adesiva

Parametri caratteristici	Hysol 9514	Hysol 9466
$\Gamma_0 [J/m^2]$	925	680
$\sigma_m [MPa]$	90	60
λ_1	0.2	0.2
λ_2	0.5	0.5

Prove di pelatura

Assumendo come parametri coesivi quelli individuati nei modelli di taratura, i risultati delle simulazioni si avvicinano abbastanza ai risultati sperimentali per quel che riguarda il valore massimo raggiunto dal carico, mentre sovrastimano notevolmente i carichi nella zona di propagazione stabile. Si è quindi reso necessario andare a ridurre i valori dei parametri della zona coesiva fino a quelli riportati in Tabella 3.4, cioè quelli in grado di fornire, come mostrato nella figura 3.5, un buon ricoprimento della fase di propagazione stabile del difetto.

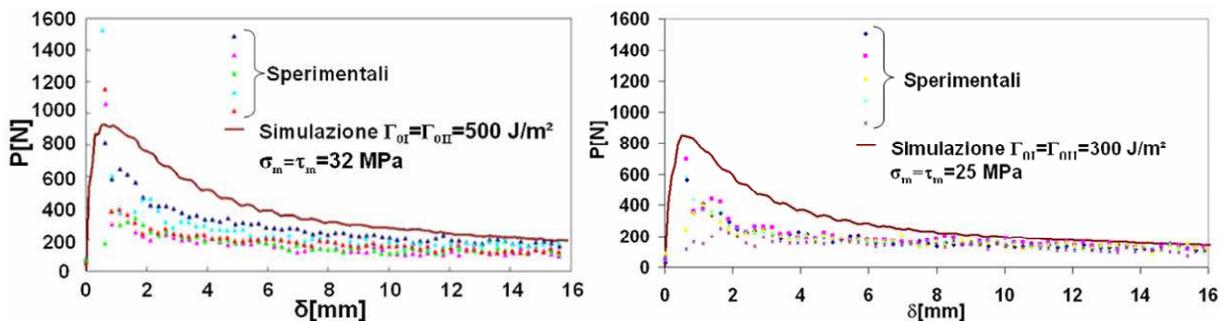


Figura 3.4: Confronto tra risultati sperimentali e simulazioni per i modelli di pelatura

Tabella 3.4 – Risultati delle prove di pelatura

Parametri caratteristici	Hysol 9514	Hysol 9466
$\Gamma_{0I} [J/m^2]$	500	300
$\sigma_m [MPa]$	32	25
$\Gamma_{0II} [J/m^2]$	500	300
$\tau_m [MPa]$	32	25

Un altro fattore significativo in questo genere di prova è il raggio di curvatura che assume il substrato sottile al termine della prova. In figura 3.6 sono riportate le configurazioni deformate di un giunto al

termine della simulazione e di un giunto sottoposto a prova sperimentale. Valori di curvatura simili per il caso sperimentale e simulato stanno a significare valori simili di energia impiegati per deformare plasticamente il substrato. Il ridotto scarto ottenuto in questo lavoro costituisce una ulteriore conferma della corrispondenza della simulazione alla prova sperimentale

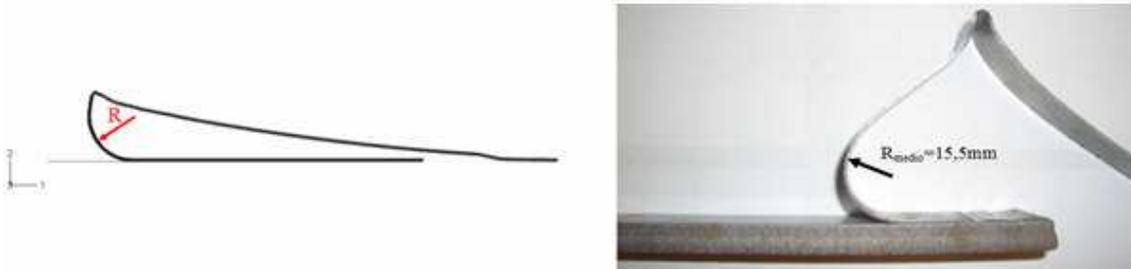


Figura 3.5: Deformata simulata e sperimentale della lamina e indicazione del raggio di curvatura

Tabella 3.5 – Raggio di curvature per prove sperimentali e simulazioni

Adesivo	Sperimentale	Simulazione	Differenza
9514	15.5 mm	15.8 mm	1.95 %
9466	21.9 mm	22.9 mm	4.56 %

Tabella 3.6 – Valori medi della tenacità a frattura ricavati sperimentalmente e Energia di frattura ricavata da analisi FEM per prove di pelatura

Adesivo	Tenacità a frattura sperimentale (G_c)	Energia di frattura da analisi FEM (Γ_0)
9514	645 J/m ²	500 J/m ²
9466	531 J/m ²	300 J/m ²

Ai fini di comprendere meglio la differenza tra il valore di Γ_0 utilizzato per simulare la geometria DCB e quello invece necessario per approssimare gli esperimenti di pelatura, da questi ultimi si è calcolata la tenacità a frattura (G_c) mediante il metodo proposto in [16,17]. Come si può notare dalla Tabella 3.5, la tenacità a frattura valutata dai test di pelatura è differente dai valori rilevati sui giunti DCB, mentre risulta relativamente vicina al valore di Γ_0 utilizzato nelle simulazioni dei giunti i pelatura stessi. Si può quindi supporre che l'insuccesso nella trasferibilità dei parametri coesivi dai giunti DCB ai giunti sottoposti a pelatura sia legata principalmente alla manifattura, che porta a valori i tenacità differenti.

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata verificata la trasferibilità dei parametri di zona coesiva tarati per una semplice prova su un classico giunto DCB a prove di pelatura di 180°, valutando anche l'influenza di alcune scelte in sede di modellazione. In particolare per il giunto DCB sono state modellati:

- Comportamento dell'adesivo modellato con soli elementi coesivi;
- Comportamento dell'adesivo rappresentato sinergicamente dalle caratteristiche elasto-plastiche nominali dell'adesivo (ricavate da precedente campagna sperimentale) e comportamento coesivo della cricca (propagazione all'interno dello spessore di adesivo);
- Modellazione adesiva della cricca (modello simile al punto precedente ma con propagazione all'interfaccia tra adesivo e aderendo) coerentemente a quanto osservato in alcune prove sperimentali.

Dall'analisi comparata dei parametri di zona coesiva ottenuti dalla precedente analisi si può concludere che:

- Tutti i modelli con i dati opportunamente tarati sono in grado di fornire un buon fitting dei dati sperimentali, soprattutto per il valore del carico massimo e della pendenza della curva nella prima fase della prova;
- La presenza dello strato di adesivo in genere riduce il valore dell'energia di frattura della zona coesiva;
- In genere la complicazione del modello non è giustificata da un miglior ricoprimento dei risultati sperimentali, tuttavia aggiunge una serie di informazioni rispetto a quanto effettivamente avviene durante il processo di frattura.

Effettuata la taratura dei parametri di zona coesiva per il ricoprimento dei valori sperimentali ottenuti

su provini DCB, si è verificata la capacità di questi stessi parametri di rappresentare il fenomeno di frattura su prove di pelatura.

I parametri coesivi che hanno fornito il miglior fitting dei dati sperimentali mostrano energie inferiori rispetto alla caso dei DCB (dell'ordine del 50%) anche a fronte di un certo scatter dei risultati sperimentali, soprattutto nella prima fase della prova. Il successivo confronto della tenacità a frattura, misurata sperimentalmente nelle prove di pelatura, con l'energia di frattura, ricavata invece dalle simulazioni FE, ha mostrato come questi due valori siano paragonabili. Si può quindi concludere che la difficoltà nel trasferire i dati sia dovuta principalmente alla fasi di preparazione e produzione dei giunti che possono portare a differenti valori di tenacità.

REFERENCE

- [1] Hutchinson, J.W., Evans, A.G., *Acta Mater.*, 48, 125-135, 2000.
- [2] Mohammed, I., Liechti, K.M., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 48, 735-764, 2000.
- [3] Tang, Q.D., Thouless, M.D., Ward, S.M., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, 1337-1353, 1999.
- [4] Knauss, W.G., Losi, G.U., *J. Appl. Mech.*, Vol. 60, 793-801, 1993.
- [5] Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Williams, J.G., In *Adv. in Fract. and Damage Mech. II*, M. Guagliano and M.H. Aliabadi eds., Hoggar, Geneva, 2001, 445-450.
- [6] Sorensen, B.F., *Acta Mater.*, 50, 1053-1061, 2002.
- [7] Pironi, A., Nicoletto, G., In *Proc. IGF 2000*, Bari, Italy, 2000.
- [8] Pironi, A., In *Proc. ECF 15*, Stockholm, Sweden, 2004.
- [9] Jacques Besson, *Local approach to fracture*. Les Presses de l'école des Mines; Paris 2004.
- [10] Pironi, A. Simulation of fracture in bonded joints with a cohesive zone model
- [11] V. Tvergaard, J. W. Hutchinson (1992). The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, 1377–1397.
- [12] V. Tvergaard, J. W. Hutchinson (1993). The influence of plasticity on mixed mode interface toughness. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 41, 1119–1135.
- [13] V. Tvergaard, J. W. Hutchinson (1994). Toughness of an interface along a thin ductile layer in elastic solids. *Philos. Mag.*, A70, 641–656.
- [14] A. Needleman (1987). A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding. *J. Appl. Mech.*, Vol. 54, 525–531.
- [15] A. Needleman (1990). An Analysis of Tensile Decohesion Along an Interface. *J. Mecc. Phys. Solids*, Vol. 38, 289-324.
- [16] Kinloch AJ, Lau CC, Williams JG, *International Journal of Fracture* (1994), 66, pp 45-70.
- [17] Georgiou I, Hadavinia H, Ivankovic A, Kinloch AJ, Tropsa V, Williams JG, *The Journal of Adhesion* (2003), 79, pp 1-27

