



Analisi numerico-sperimentale sull'influenza dell'attrito nella delaminazione in Modo II

G. Marannano, A. Pasta, M. Terranova

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica e Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128, Palermo

G. Borino, F. Parrinello

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128, Palermo

ABSTRACT. In this paper the influence of friction process in Mode II delamination tests was studied, especially when the compression of the two interfaces enhances the energy dissipation due to friction.

Several delamination tests of fatigue were carried out on E-glass/epoxy composite specimens in order to provide the necessary data to study the friction process. Numerical analyses were performed using a FEM open-source code (FEAP) in order to validate the experimental results. A frictional-cohesive model (Parrinello-Failla-Borino, 2009) was implemented in different routines and the FEM analysis has shown that the friction process is very important for evaluate the mechanisms of the Mode II energy dissipation.

SOMMARIO. Il lavoro valuta l'influenza dei fenomeni attritivi nei processi di delaminazione in Modo II, laddove la compressione delle due interfacce esalta la dissipazione energetica dovuta all'attrito.

Sono state effettuate diverse prove sperimentali su compositi in fibra di vetro e resina epossidica soggetti a condizioni di carico cicliche e valore medio crescente, tali da mantenere le lamine del composito in continua aderenza. Al fine di valutare l'incidenza dell'attrito interlaminare nella delaminazione per Modo II, i risultati delle prove sperimentali sono stati riprodotti per mezzo di analisi agli elementi finiti utilizzando il programma di calcolo FEAP (con codice sorgente aperto), nel quale è stato implementato il modello coesivo attritivo di Parrinello-Failla-Borino. La simulazione ha confermato i risultati sperimentali e suggerisce che, in una delaminazione in Modo II, la componente attritiva svolge un ruolo determinante nella dissipazione energetica e risulta, pertanto, non trascurabile.

KEYWORDS. Modo II, test di fatica, Finite Element Method (FEM), elementi coesivi, materiali compositi.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è assistito all'impiego massivo dei materiali compositi in quasi tutti i campi dell'ingegneria strutturale dovuto principalmente ad esigenze di economicità, leggerezza e rigidità sempre più spinte. La diffusione e l'utilizzo di tali materiali richiede però una buona conoscenza del comportamento e dei meccanismi di degrado, che sono notevolmente complessi e necessitano di studio adeguato.

La propagazione di un difetto interlaminare è una delle cause più frequenti di danneggiamento e, forse, la modalità di rottura più critica nei laminati compositi. Ad oggi, uno degli approcci più comuni per lo studio di un processo di



delaminazione è rappresentato dall'utilizzo di elementi di interfaccia nell'ambito del metodo di calcolo agli elementi finiti. Essi permettono di descrivere il comportamento non lineare della superficie di adesione interlaminare e in particolare di modellare i complessi fenomeni che si manifestano nella cosiddetta zona di processo, in prossimità dell'apice della frattura. Un aspetto di particolare importanza nella modellazione costitutiva delle interfacce di adesione è l'evoluzione progressiva dal comportamento coesivo iniziale, che caratterizza il materiale integro, al comportamento finale del materiale completamente delaminato, che tuttavia presenta una residua resistenza a taglio per attrito. Molti modelli sono in grado di descrivere il comportamento del materiale perfettamente integro e di quello completamente danneggiato, pochi di questi sono in grado di cogliere il comportamento intermedio, quello di transizione.

La formulazione considerata nel presente lavoro fa riferimento al modello coesivo-attritivo di Parrinello-Failla-Borino [1] che permette di simulare l'intera transizione del processo di delaminazione mettendone in chiara evidenza il fondamentale ruolo svolto dall'attrito (finora trascurato).

Lo scopo del lavoro è quello di valutare l'influenza dei fenomeni attritivi nei processi di delaminazione in Modo II, laddove la compressione delle due interfacce esalta la dissipazione energetica dovuta all'attrito.

Nella prima parte è presentato uno studio sperimentale mediante sistema di caricamento ENF (*End Notched Flexure*) condotto su provini in composito fibra di vetro e resina epossidica soggetti a condizioni di carico cicliche a valore medio crescente; tale condizione di carico consente il mantenimento delle lamine del composito in continua e crescente aderenza durante lo svolgimento della prova. Sotto tali condizioni, la delaminazione in Modo II risulta infatti accompagnata da rilevanti condizioni di attrito interlaminare. Al fine di valutare l'incidenza di tali fenomeni, i risultati delle prove sperimentali sono stati riprodotti attraverso una analisi agli elementi finiti utilizzando il programma di calcolo FEAP (con codice sorgente aperto), nel quale è stato in precedenza implementato il modello costitutivo in studio.

PROVE SPERIMENTALI

I provini sono stati realizzati attraverso la tecnica del sacco a vuoto, sovrapponendo 16 lamine in fibra di vetro unidirezionale di tipo E (*E-Glass*) e resina epossidica. La delaminazione iniziale è stata realizzata interponendo durante il processo di laminazione e in posizione centrale uno strato sottile (0,25 mm di spessore) di materiale antiaderente (Mylar 20). La percentuale in volume di fibra calcolata dopo la cura dei provini è pari al 45%. I valori delle caratteristiche elastiche (modulo di elasticità longitudinale E_x e coefficiente di Poisson ν_{xy}) sono stati valutati elaborando i dati di 5 prove di trazione statica; i valori delle restanti caratteristiche ortotrope sono state ottenuti da dati di letteratura [2](tab.1).

E_x [GPa]	E_y [GPa]	E_z [GPa]	G_{yz} [GPa]	G_{xz} [GPa]	G_{xy} [GPa]	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
35,3	9,2	9,2	4,1	4,5	4,5	0,3	0,35	0,35

Tabella 1: Caratteristiche elastiche ortotrope dei provini in composito.

Sono state realizzate tre prove sperimentali cicliche su provini con lunghezza di delaminazione iniziale pari a 25 mm.

La geometria e le dimensioni dei provini, nonché il modo di applicazione del carico e il posizionamento rispetto agli appoggi, sono riportati in Fig. 1 e Tab. 2.

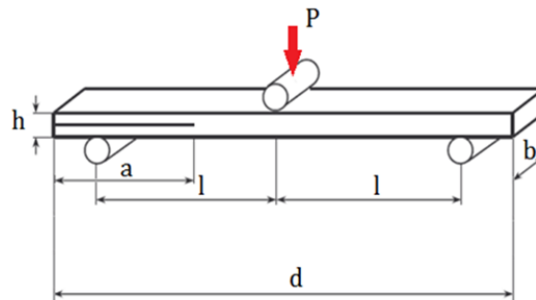


Figura 1: Geometria dei provini utilizzati per le prove ENF.

Dimensioni caratteristiche dei provini [mm]	
l	50
d	110
b	25
h	5,4
a	25

Tabella 2: Dimensioni dei provini.

La lunghezza del difetto è stata monitorata mediante utilizzo di una videocamera ad elevata risoluzione (Fig. 2(A)). Per meglio interpretare la lunghezza del difetto, le superfici laterali dei provini sono state preliminarmente colorate con vernice bianca sulla quale sono state tracciate delle linee nere ortogonali all'asse e distanti 1 mm l'una dall'altra. Per una maggiore precisione nella valutazione della lunghezza corrente della cricca, la dimensione del difetto è stata determinata dal numero dei pixel che intercorrono tra l'apice iniziale della cricca e quello corrente, direttamente rilevato dalle immagini digitali registrate dalla videocamera.

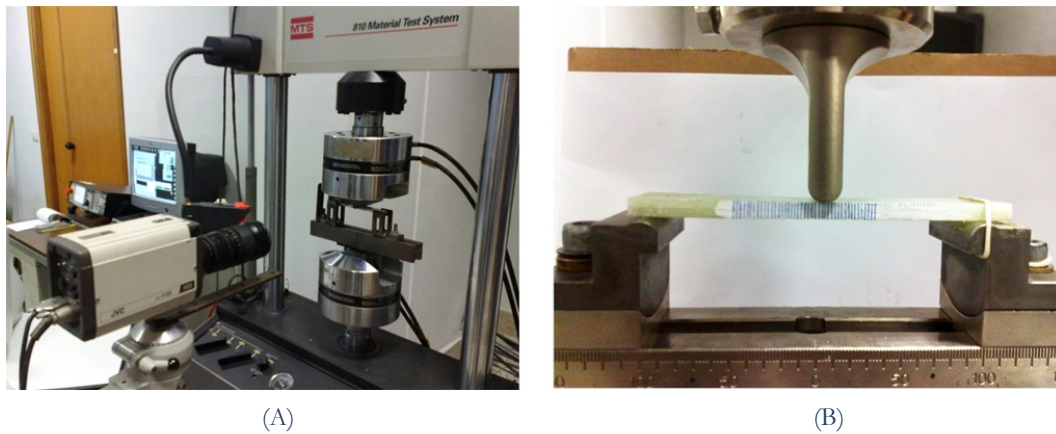


Figura 2: A) Videocamera ad alta risoluzione utilizzata per monitorare la lunghezza del difetto; B) Sistema di caricamento ENF.

I test sperimentali sono stati condotti su una macchina servoidraulica MTS 810. In Fig. 2(B) è mostrato il sistema di caricamento per flessione a tre punti utilizzato per l'esecuzione delle prove. Sono state effettuate 5 prove statiche preliminari al fine di valutare il valore dello spostamento iniziale che realizza il primo avanzamento improvviso della delaminazione. Le prove dinamiche sono state condotte in controllo di spostamento con frequenza di sollecitazione di 1 Hz e valore iniziale di spostamento imposto corrispondente al 70% dello spostamento di rottura statico. Per meglio valutare l'effetto dell'attrito sull'avanzamento della delaminazione, si è scelto di sollecitare i provini attraverso due particolari funzioni di avanzamento della traversa, descritte in Fig. 3 e Tab. 3.

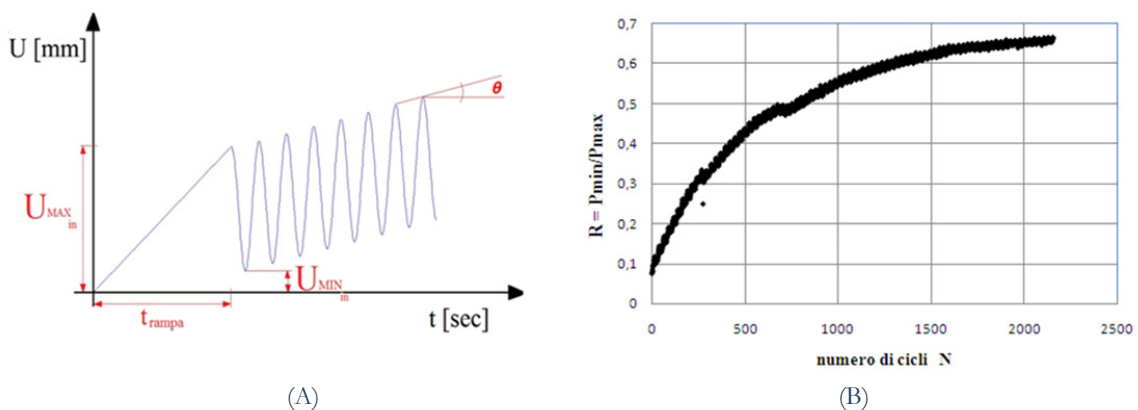


Figura 3: A) Funzione di avanzamento della traversa in funzione del tempo; B) rapporto di carico R in funzione del numero di cicli.



Parametri della funzione di avanzamento	Tipo 1	Tipo 2
T_{rampa} [s]	120	120
$U_{\text{max}_{\text{in}}}$ [mm]	2	2
$U_{\text{min}_{\text{in}}}$ [mm]	0,3	0,3
$\tan\theta$ [mm/min]	0,87	0,174
Frequenza [Hz]	1	1

Tabella 3: Parametri della funzione di avanzamento utilizzata.

Sono state effettuate 3 prove cicliche per ognuna delle tipologie di funzione di avanzamento della traversa. La Fig. 4 mostra gli andamenti tipici del carico massimo in funzione della posizione del punzone relativi alle prove con funzione di avanzamento di Tipo 1 (fig. 4(A)) e di Tipo 2 (fig. 4(B)).

I grafici riportano inoltre gli andamenti di alcuni cicli di isteresi registrati a parità di lunghezza di delaminazione. E' possibile osservare che le curve di isteresi presentano ampiezza maggiore al crescere della lunghezza del difetto; ciò è conseguente del fatto che all'aumentare della dimensione delle superfici libere corrisponde una dissipazione energetica maggiore.

Le prove mostrano che la dispersione massima dei dati sperimentali si manifesta nella fase corrispondente al repentino avanzamento del difetto ed evidenziano cicli di isteresi paragonabili (differenze percentuali massime non superiori al 4%).

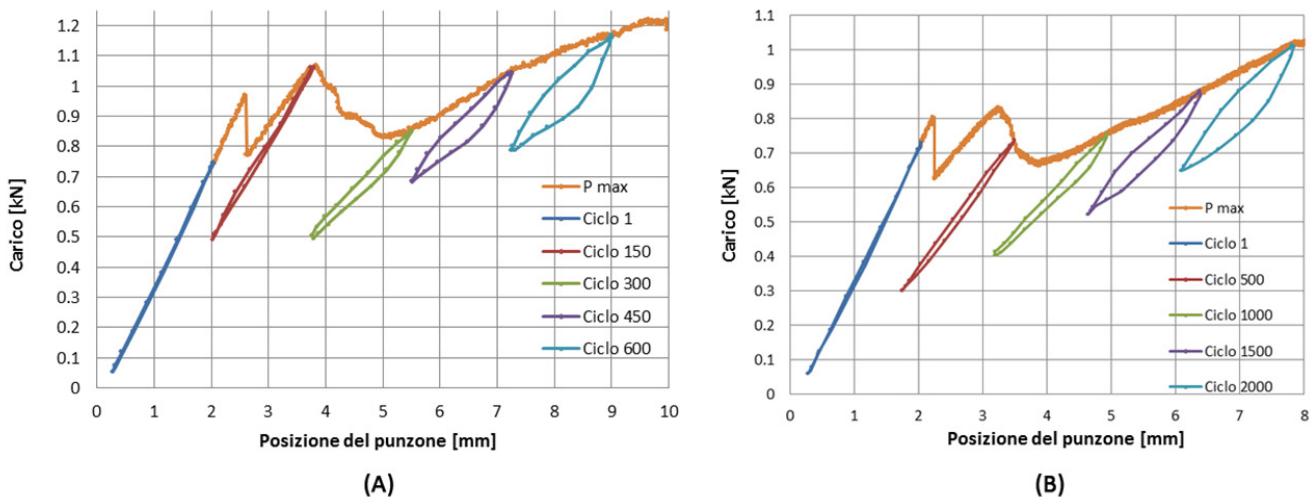


Figura 4: Andamento del carico massimo in funzione dello spostamento della traversa per funzione di avanzamento di Tipo 1 (A) e Tipo 2 (B). Sono evidenziati diversi cicli di isteresi a parità di lunghezza di delaminazione.

ANALISI NUMERICA

L'analisi numerica è stata condotta in ambiente FEAP, un codice open-source con moduli integralmente accessibili e modificabili, che lo rendono estremamente flessibile e maneggevole rispetto agli altri software reperibili in commercio. Il composito è stato modellato utilizzando elementi triangolari piani con comportamento elastico; l'interfaccia di giunzione tra le due lamine è stata modellata come discontinuità all'interno degli elementi piani implementando il modello costitutivo di tipo coesivo-attritivo di Parrinello-Failla-Borino. In generale, un modello coesivo è caratterizzato dalla presenza della cosiddetta zona di processo. La zona di processo è posizionata a valle dell'apice della cricca dove il danneggiamento è già iniziato, con un distacco parziale delle due superfici, le quali, tuttavia, conservano ancora una resistenza ridotta. Questi modelli possono essere formulati a livello microscopico, con l'inconveniente di un elevato onere computazionale agli elementi finiti. Il modello utilizzato nel lavoro prevede una formulazione di tipo mesoscala che riproduce il comportamento medio di un *elemento rappresentativo di superficie* (RSE) di giunzione tra le lamine. Il

modello citato permette di descrivere la transizione del materiale da un comportamento puramente coesivo che caratterizza il materiale integro, ad un comportamento attritivo che caratterizza il materiale nello stato di completo danneggiamento. La curva coesiva utilizzata è di tipo bilineare, mostrata in Fig. 5.

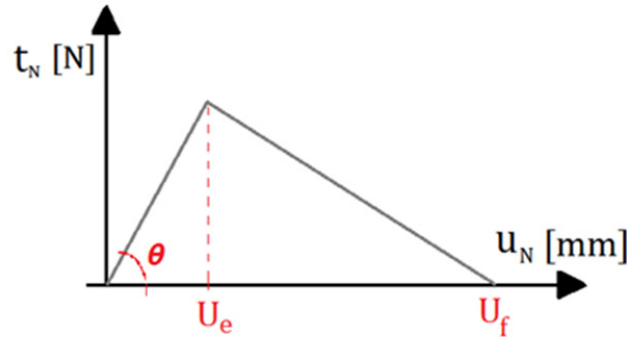


Figura 5: Rappresentazione schematica della legge coesiva bilineare.

Il modello è basato sull'interpretazione geometrica del danno (Eq. 1), che ne definisce il valore come rapporto tra l'area delle zone danneggiate ΔS_c e l'area totale ΔS misurata nell'intorno di un punto.

$$\omega = \frac{\Delta S_c}{\Delta S} \quad (1)$$

La legge costitutiva è data dalla sovrapposizione del modello elastico lineare (che caratterizza la frazione integra dell'RSE) e del modello attritivo (che caratterizza la frazione danneggiata). L'aspetto innovativo del modello utilizzato è un uso differente della variabile di danno ω . Se nei precedenti lavori [3-7] tale variabile era solo indicativa dello stato di danneggiamento, qui è utilizzata come "funzione peso" nella sovrapposizione dei due modelli elastico-lineare ed attritivo. Con riferimento alle Fig. 6 e 7, la distribuzione degli sforzi di tipo coesivo attritivo per il generico RSE è espressa dalla equazione 2:

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_s + \mathbf{t}_c \quad (2)$$

in cui \mathbf{t}_s e \mathbf{t}_c sono definiti come valori medi di sforzo (Eq. 3, 4) all'interno dell'elemento di superficie rappresentativo, di ampiezza ΔS .

$$\mathbf{t}_s = \frac{1}{\Delta S} \int_{\Delta S} \tau_s dS \quad (3)$$

$$\mathbf{t}_c = \frac{1}{\Delta S} \int_{\Delta S} \tau_c dS \quad (4)$$

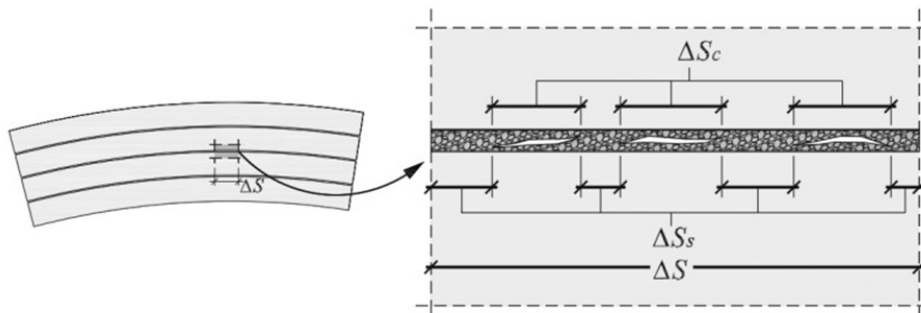


Figura 6: Interpretazione della variabile di danno ω .

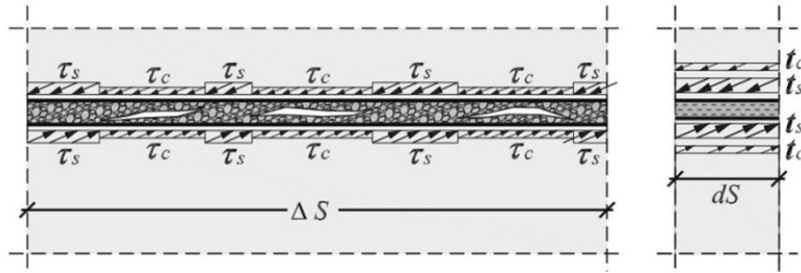


Figura 7: Interpretazione delle variabili t_s e t_c .

Gli sforzi t_s e t_c sono calcolati tramite le Eq. 5, 6:

$$t_s = (1 - \omega) K_s \delta_s^e \quad (5)$$

$$t_c = \omega K_c \delta_c^e \quad (6)$$

in cui δ_s^e e δ_c^e rappresentano rispettivamente la deformazione elastica dell'adesivo nella porzione integra e in quella danneggiata. K_s e K_c sono invece le matrici diagonali costituite dai moduli elastici della porzione integra e quella danneggiata.

La dissipazione di energia D (per unità di superficie) dev'essere sempre positiva:

$$D = (t_s + t_c)_T [\dot{u}] + Y \dot{\omega} - t_s^T \dot{\delta}_s^e - t_c^T \dot{\delta}_c^e - \chi \dot{\xi} \geq 0 \quad (7)$$

in cui:

- \dot{u} è la derivata del vettore spostamento, mostrato in Fig. 8;
- $Y = \frac{1}{2} \delta_s^{eT} K_s \delta_s^e + \frac{1}{2} \delta_c^{eT} K_c \delta_c^e$, è l'energia di rilascio elastico, variabile coniugata del danno;
- $\chi(\xi)$ è la variabile che governa l'evoluzione del danno.

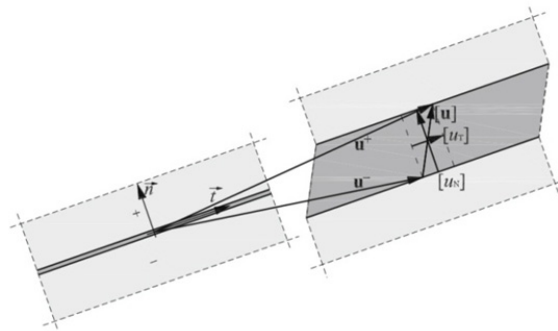


Figura 8: Interpretazione delle variabili cinematiche

L'evoluzione del danno può essere legata al parametro Y tramite la seguente legge di attivazione:

$$\phi_d = Y - \chi(\xi) - Y_o \leq 0 \quad (8)$$

in cui Y_o è assunto come soglia di energia iniziale.

Com'è possibile vedere dalle Eq. 5, 6 e 8, la variabile di danno ω governa l'intero processo di transizione.

La simulazione numerica è stata realizzata utilizzando la funzione di avanzamento di Tipo 1. In Fig. 9 sono mostrati i risultati numerici confrontati con quelli sperimentali.

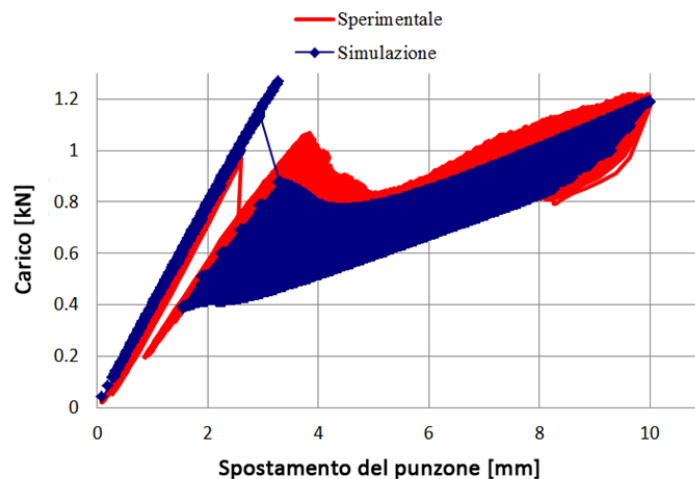


Figura 9: Confronto numerico-sperimentale.

I risultati della simulazione numerica mostrano, da un punto di vista qualitativo, un buon accordo con quelli sperimentali. Nel confronto mostrato in Fig. 9 si denotano modeste differenze nei valori di carico massimo raggiunte nei vari cicli. Tali differenze risultano, tuttavia, inferiori alla dispersione dei risultati riscontrati tra omologhe prove sperimentali e si possono considerare, quindi, assolutamente accettabili. Nella Fig. 10 sono confrontati alcuni cicli di carico significativi.

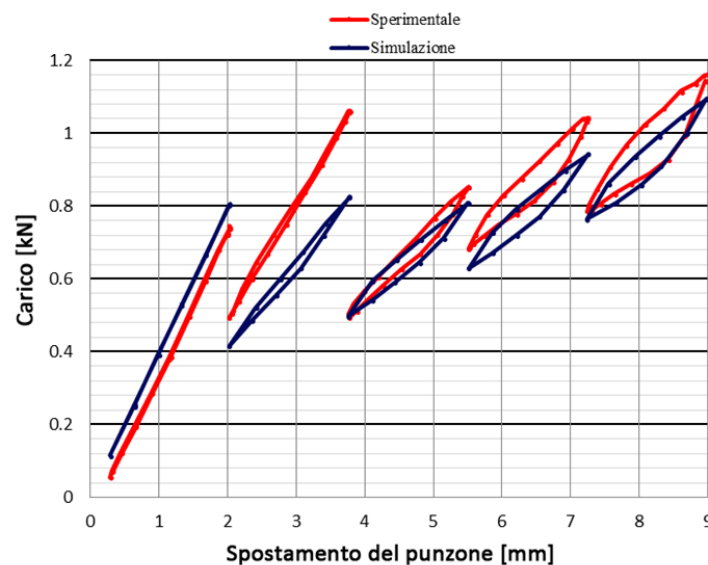


Figura 10: Confronto numerico-sperimentale tra alcuni cicli di carico significativi

Dal confronto diretto tra le ampiezze dei cicli di isteresi ottenuti sperimentalmente e calcolati numericamente si evidenzia che il modello costitutivo è in grado di riprodurre adeguatamente la dissipazione energetica dovuta ai fenomeni attritivi che si manifestano all'interfaccia tra le lamine.

CONCLUSIONI

Nel lavoro è stato condotto uno studio numerico-sperimentale sulla delaminazione interlaminare di un composito in fibra di vetro e resina epossidica. Lo studio è incentrato sulla determinazione del ruolo svolto dall'attrito nel processo di delaminazione in Modo II.



Sono state effettuate diverse prove sperimentali di fatica sollecitando i provini a condizioni di carico cicliche, a valore medio crescente con due diverse velocità di avanzamento. I risultati mostrano che i cicli d'isteresi hanno ampiezza crescente all'aumentare della lunghezza del difetto e non sono influenzati dalla velocità di avanzamento del punzone di carico.

Al fine di valutare l'incidenza dell'attrito interlaminare nella delaminazione per Modo II, è stata realizzata una routine in ambiente FEAP che implementa il modello numerico coesivo-attritivo di Parrinello-Failla-Borino. La simulazione ha confermato i risultati sperimentali e suggerisce che, in una delaminazione in Modo II, la componente attritiva svolge un ruolo determinante nella dissipazione energetica e che, quindi, non può essere trascurata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Parrinello, B. Failla, G. Borino, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (2009) 2680.
- [2] J.A. Quinn, *Composites-Design Manual*, (2002)
- [3] G. Alfano, M.A. Crisfield, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50 (2001) 1701.
- [4] G. Alfano, E. Sacco, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 68 (2006) 542.
- [5] L. Gambarotta, *Engineering Fracture Mechanics*, 71 (2004) 829.
- [6] V. Tvergaard, *Mater. Sci. Eng.*, 125 (1990) 203.
- [7] P.P. Camanho, C.G. Davila, M.F. De Moura, *Journal of Composite Materials*, 37 (2003) 1415.