

UN MODELLO GENERALE DI DANNEGGIAMENTO NELLE PIASTRE LAMINATE COMPOSITE

F. Greco^a, P. Lonetti^a, P. Pedace^a

^a *Dipartimento di Strutture, Università della Calabria, Via Ponte P. Bucci 39b - 87030 Arcavacata di Rende (CS)*

e-mail: f.greco@unical.it, lonetti@unical.it, p.pedace@strutture.unical.it

SOMMARIO

Viene proposto un modello di danneggiamento applicato ai materiali compositi multistrato a matrice polimerica (PMC). La formulazione fa riferimento ad un approccio multiscala ed in coerenza con il metodo delle variabili interne, fa uso di particolari parametri di danneggiamento, al fine di valutare modalità di degradazione accoppiate di natura intralaminare ed interlaminare. Il modello generale è sviluppato in contesti teorici differenti, che afferiscono alla Meccanica del Danneggiamento Continuo (MDC), per quanto concerne la degradazione intralaminare, ed alla Meccanica della Frattura (MF) per ciò che riguarda i processi di delaminazione. Il modello di delaminazione fa uso di una formulazione multiscala di piastra deformabile a taglio e modelli di interfaccia. Tale descrizione garantisce una notevole accuratezza nella valutazione delle componenti modali dell'Energia di Rilascio (ERR), con conseguente riduzione dell'onere computazionale coinvolto nel processo di soluzione. Si presentano alcune applicazioni, che mettono in luce le interazioni tra i diversi modi di danneggiamento nella valutazione dell'energia di rilascio e delle curve di carico.

ABSTRACT

A damage model for polymeric matrix composite laminate (PMC) based on a multiscale approach under general loading processes is developed. The damage description is based on both intralaminar and interlaminar variables related to in plane and out of plane failure mechanics. The general model is developed in different theoretical frameworks, which refers to Continuum Damage Mechanics (CDM) and Fracture Mechanics (FM), in order to predict both in-plane distributed microcracks and finite interface cracks produced by delamination processes. The laminate description is based on a multilayer first-order shear deformable laminate plate theory and the interface methodology, which guarantee good accuracy in Energy Release Rate (ERR) under mixed mode predictions and low computational cost in the numerical analysis. Some applications are proposed to point out the interaction between different damage modes in the evaluation of the fracture energy and load displacement curves.

1. INTRODUZIONE

I compositi multistrato a matrice polimerica trovano largo impiego in diversi campi dell'ingegneria strutturale, tuttavia sono vulnerabili al danneggiamento, che determina una progressiva riduzione di resistenza e di rigidezza con modalità di collasso di tipo catastrofico. Opportune osservazioni sperimentali hanno evidenziato come i materiali compositi sono spesso caratterizzati, anche per livelli di carico non elevati, dalla formazione e dalla crescita di microfratture distribuite nei piani delle lamine e da meccanismi di delaminazione di natura interfacciale. Quest'ultimi determinano un progressivo

distacco delle lamine a partire da un difetto iniziale, che coinvolge per evoluzione zone del laminato sempre più ampie.

A tal fine, si propone un modello generale multiscala, che si pone l'obiettivo di valutare le interazioni che sussistono tra modalità di degradazione differenti sia nella valutazione dell'ERR che nella stima del percorso di frattura. In particolare, i meccanismi di danneggiamento e la loro interazione durante il processo di carico sono descritti attraverso variabili di caratterizzazione dello stato interno del materiale. La formulazione si basa su un modello termodinamicamente consistente, che fa uso del metodo delle variabili interne (MVI), sia per la stima dei processi di degradazione intralaminari che dei meccanismi di delaminazione. Il modello proposto è consistente con la Meccanica del Danneggiamento Continuo (MDC) per quanto concerne il danneggiamento intralaminare, e con la Meccanica della Frattura (MF) per quello che riguarda la degradazione interlaminare. La descrizione intralaminare affinisce ad un approccio locale, che introduce opportune variabili di plasticità e danneggiamento su un elemento rappresentativo del volume, e la sua formulazione affinisce ad una teoria costitutiva sviluppata in precedenti lavori [1,2]. Tale modello descrive la formazione e l'evoluzione delle microfratture attraverso un domino istantaneo di danneggiamento ed un potenziale di dissipazione, che, in coerenza con il formalismo termodinamico proprio del metodo delle variabili interne, sono espressi nello spazio duale delle variabili di danneggiamento.

Il danneggiamento interlaminare si basa su un approccio che utilizza la metodologia degli elementi di piastra e di interfaccia e fa uso di un criterio di crescita della frattura secondo condizioni di modo misto [3,4]. Quest'ultimo necessita una corretta valutazione delle componenti modali dell'energia di rilascio, in funzione delle quali è possibile stimare adeguatamente il percorso di frattura di natura interlaminare.

Nel presente lavoro si propone un modello multiscala, basato su una descrizione tridimensionale del danneggiamento, mediante il quale è possibile valutare accuratamente modalità di danneggiamento di tipo interlaminare ed intralaminare. In particolare, quest'ultima determina una progressiva riduzione delle proprietà meccaniche del materiale nei piani delle lamine e quindi una variazione dello stato di deformazione al tip della delaminazione. La formulazione è stata sviluppata facendo uso di una tecnica agli elementi finiti, modellando i piani delle lamine mediante elementi piastra deformabili a taglio con legame costitutivo elasto-plastico danneggiato, mentre in corrispondenza dei piani di delaminazione sono introdotti elementi di interfaccia con elevata rigidità, al fine di simulare il comportamento singolare delle tensioni al tip della delaminazione. Le procedure di integrazione delle equazioni costitutive fanno uso di un algoritmo numerico di tipo return-mapping secondo schemi alla "Backward-Euler". I risultati numerici sono presentati in termini di valutazione dell'energia di rilascio per geometrie e condizioni di carico complesse. Inoltre, sono proposti confronti che mostrano i fenomeni di interazione tra le diverse modalità di danneggiamento coinvolte nell'analisi sulla valutazione delle condizioni di avanzamento e sul percorso di carico.

2. MODELLO DI DELAMINAZIONE MULTISCALA

I materiali compositi si presentano secondo configurazioni di piastre multistrato, con orientazione arbitraria dei singoli elementi che compongono il laminato. Il modello di riferimento assume un difetto iniziale di natura superficiale, arbitrariamente posizionato lungo lo spessore del laminato. Si assume quindi che da punto di vista geometrico il laminato multistrato sia composto da lamine rinforzate con fibre unidirezionali, e da una generica superficie piana in fase di delaminazione Ω_d con contorno Γ_d , che divide la struttura in due sublaminati di diverso spessore, i.e. h_1 ed h_2 (Fig.1). Indicando con n_u ed n_l gli elementi di discretizzazione dei sublaminati superiore ed inferiore, la cinematica del generico elemento piastra è descritta in funzione delle componenti di spostamento di piano e trasversali (u_i, v_i, w_i), nonché dalle corrispondenti rotazioni rispetto agli assi x ed y (ψ_{xi}, ψ_{yi}):

$$\begin{aligned} U_j(x, y, z) &= u_j(x, y) + (z - z_i) \cdot \psi_{xj}(x, y) \\ V_j(x, y, z) &= v_j(x, y) + (z - z_i) \cdot \psi_{yj}(x, y) \quad \text{con } 1 \leq j \leq n_u + n_l. \\ W_j(x, y, z) &= w_j(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

Nell'ipotesi di piccoli spostamenti, lo stato di deformazione di un elemento piastra è descritto dalle seguenti deformazioni di natura membranale e trasversale:

$$\varepsilon_j(x, y) = u'_j(x, y), \quad \kappa_j(x, y) = \psi'_j(x, y), \quad \gamma_j(x, y) = \psi_j(x, y) + w'_j(x, y). \quad (2)$$

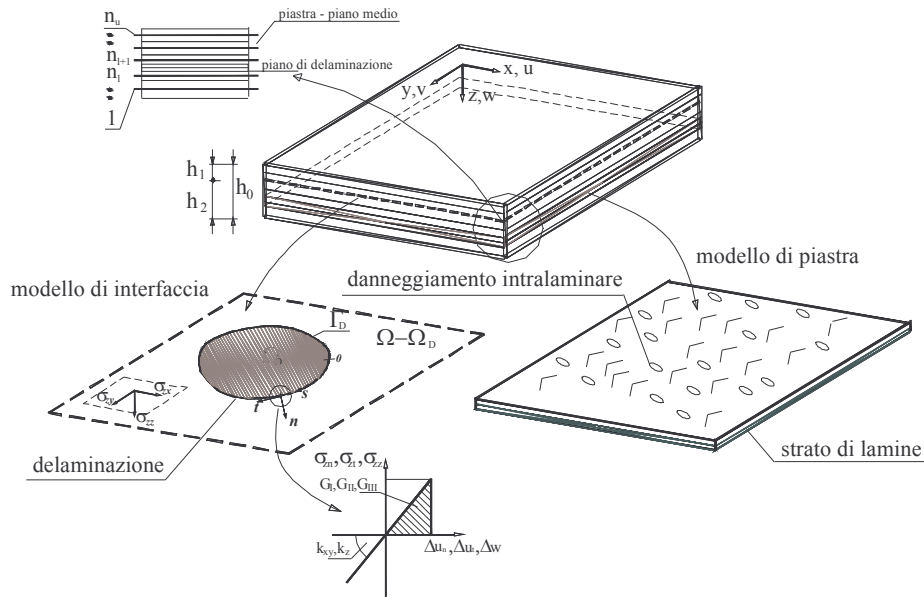


Fig. 1 - Modellazione di piastre ed interfacce nelle strutture composite delaminate

Inoltre, la condizione di perfetta adesione nella regione non soggetta a delaminazione, i.e. $\Omega - \Omega_d$, è verificata mediante l'utilizzo di elementi di interfaccia che, in coerenza con un approccio penalty, evitano fenomeni di compenetrazione o di distacco, ed inoltre riproducono il comportamento singolare delle tensioni all'apice del difetto. Il modello costitutivo fa riferimento ad un legame elastico lineare, che, attraverso le costanti di rigidezza di piano e fuori piano (i.e. k_{xy} k_{zz}), definisce le seguenti relazioni:

$$\sigma_{zz} = k_z \Delta w, \quad \sigma_{xz} = k_{xy} \Delta u, \quad \sigma_{yz} = k_{xy} \Delta v. \quad (3)$$

Allo scopo di prevenire fenomeni di compenetrazione in corrispondenza del piano di delaminazione, sono stati introdotti elementi di interfaccia, che impongono le condizioni di contatto di tipo interlaminare. Inoltre, le condizioni di perfetta adesione tra le lamine, in corrispondenza dei piani non soggetti a delaminazione, è assicurata facendo uso del metodo dei moltiplicatori di Lagrange, riducendo il campo cinematico mediante equazioni di vincolo in forma esplicita.

Le componenti modali dell'energia di rilascio si possono valutare direttamente in termini di variabili interfaciali, come lavoro delle tensioni interlaminari per i corrispondenti spostamenti di apertura e di scorrimento, secondo le relazioni seguenti [3,4,5]:

$$G_I = \begin{cases} \lim_{k_{yy} \rightarrow \infty} \frac{1}{2} k_{yy} \Delta w^2 & \Delta w \geq 0 \\ 0 & \Delta w < 0 \end{cases}, \quad G_{II} = \lim_{k_{xy} \rightarrow \infty} \frac{1}{2} k_{xy} \Delta u_n^2, \quad G_{III} = \lim_{k_{xy} \rightarrow \infty} \frac{1}{2} k_{xy} \Delta v_t^2 \quad (4)$$

3. FORMULAZIONE TEORICA

Il modello di danneggiamento si basa su un approccio termodinamico di tipo fenomenologico, introducendo nella formulazione costitutiva variabili di natura interna per la valutazione dei meccanismi di danneggiamento di tipo interlaminare ed intralaminare. In accordo con osservazioni sperimentali i meccanismi di degradazione sono descritti mediante una formulazione ortotropa del danneggiamento, e quindi utilizzando un tensore del secondo ordine, D , che simula adeguatamente la riduzione di area secondo tre giaciture tra loro ortogonali. Inoltre, i meccanismi legati alla produzione di deformazioni irreversibili nella configurazione effettiva sono stati analizzati in forma classica, facendo uso di una variabile tensoriale del secondo ordine, i.e. $\tilde{\varepsilon}^p$. La valutazione dei fenomeni di natura interlaminare è descritta assumendo come variabile di stato del materiale l'area di frattura, in funzione della quale è possibile rappresentare, in modo consistente, l'energia dissipata a cause di processi di delaminazione. Le equazioni di evoluzione dei diversi fenomeni dissipativi devono

verificare la disuguaglianza Clausius-Duhem, che nello specifico viene soddisfatta a priori, assumendo le leggi di normalità e potenziali di evoluzione di tipo convessi. Lo stato termodinamico locale è, quindi, rappresentato, dal punto di vista cinematico, delle seguenti quantità:

$$\varphi^d = (D, \delta)^d, \quad \varphi^p = \left(\tilde{\varepsilon}^p, p \right)^p, \quad \varphi^f = (\Omega_d), \quad (5)$$

in cui Ω_d è il valore corrente dell'area di frattura (Fig.1), e (δ, p) sono le variabili evolutive di danneggiamento e di plasticità.

Assumendo un sistema puramente meccanico ed una crescita quasi-statica dei meccanismi interlaminari, lo stato termodinamico attuale viene descritto attraverso il potenziale di "Helmholtz", che risulta strettamente dipendente dai parametri interni precedentemente introdotti e da variabili osservabili:

$$\psi = \psi \left(\tilde{\varepsilon}, \varphi^p, \varphi^d, \varphi^f \right). \quad (6)$$

Si assume inoltre, che la funzione energia libera sia descritta secondo leggi disaccoppiate, in cui i diversi potenziali di evoluzione risultano tra loro indipendenti:

$$\psi = \phi \left(\tilde{\varepsilon}, D, \tilde{\varepsilon}^p \right) + I(u) + \Pi(\delta, p) + \omega(\Omega_d), \quad (7)$$

e dove ϕ è l'energia di deformazione dell'elemento piastra su entrambe le zone delaminata e non delaminata, I è l'energia di deformazione dell'interfaccia, rappresentante il funzionale di penalizzazione, Π è il funzionale di evoluzione, afferente al danneggiamento e alla plasticità, ed ω è l'energia di dissipazione, dovuta ai processi di delaminazione. L'energia di deformazione si assume funzione delle variabili osservabili e delle variabili interne secondo la seguente espressione :

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\tilde{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}^p \right) E \left(\tilde{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}^p \right) = \frac{1}{2} \left(\varepsilon - \varepsilon^p \right) M E M \left(\varepsilon - \varepsilon^p \right). \quad (8)$$

dove, in accordo con la MDC [1,2],

$$\tilde{\varepsilon} = M \varepsilon, \quad \tilde{\varepsilon}^p = M \varepsilon^p, \quad (9)$$

$$M = \text{diag} \left[(1-d_1) \quad (1-d_2) \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1/2\sqrt{(1-d_1)}\sqrt{(1-d_2)} \right]. \quad (10)$$

Inoltre, il funzionale di evoluzione dei fenomeni di danneggiamento e di plasticità di tipo intralaminare, assume la seguente forma:

$$\Pi(\delta, p) = \frac{c_1^p}{2} p^2 + \left[c_1^d \delta - c_1^d c_2^d \exp \left(\frac{\delta}{c_2^d} \right) \right], \quad (11)$$

dove c_1^p e c_1^d, c_2^d sono dei parametri interni dipendenti dalla comportamento del materiale. Si osserva altresì, che il funzionale di penalizzazione, afferente agli elementi di interfaccia nella zona di perfetta adesione, può essere espresso in funzione degli spostamenti relativi di tipo interlaminare e dei coefficienti di rigidità del legame costitutivo :

$$I = \int_{\Omega - \Omega_d} \frac{1}{2} \left(k_{zz} \Delta w_{n_1}^2 + k_{yx} \Delta u_{n_1}^2 + k_{yx} \Delta v_{n_1}^2 \right) dA, \quad (12)$$

con $\Delta w_{n_1} = w_{n_1} - w_{n_1+1}$, $\Delta u_{n_1} = u_{n_1} - u_{n_1+1}$, $\Delta v_{n_1} = v_{n_1} - v_{n_1+1}$ ed n_1 posizione del piano di delaminazione (Fig.1). Infine, l'energia dissipata a causa dei processi di delaminazione, è valutata considerando un

avanzamento secondo la direzione normale al fronte di delaminazione. Seguendo il formalismo termodinamico proprio del MVI, tale quantità può essere descritta considerando, come variabile associata all'area di frattura, l'energia di rilascio, che verosimilmente corrisponde alla forza termodinamica associata alla variabile Ω_d :

$$\omega(\Omega_d)_{,\Omega_d} \dot{\Omega}_d = \int_{\Gamma} G(s) \cdot \dot{\Omega}_d ds . \quad (13)$$

Le equazioni costitutive si ottengono dalla disuguaglianza di Clausius-Duhem, introducendo variabili di natura statica, associate in senso termodinamico alle corrispondenti quantità cinematiche:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\partial \psi}{\partial \tilde{\epsilon}^e}, \quad V^d = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \phi^d}, \quad V^p = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \phi^p}, \quad G = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \Omega_d}. \quad (14)$$

dove $V^d = V^d(Y^D, \gamma)$, $V^p = V^p(\sigma, R)$, mentre $\tilde{\sigma}$ ed Y^D sono rispettivamente la tensione effettiva e la variabile associata al danneggiamento intralaminare. Quest'ultima, rappresenta la forza corrispondente ad un incremento dell'area di frattura nei piani delle lamine e quindi può essere vista come una misura dell'energia di rilascio di tipo intralaminare. Le equazioni evolutive per le variabili cinematiche di danneggiamento intralaminare si basano sull'introduzione di domini elastici istantanei di danneggiamento e di plasticità, e su potenziali di dissipazione, definiti nello spazio delle forze statiche associate [1,2]:

$$g^d(V^d) = (Y^D \cdot JY^D)^{1/2} + |HY^D|^{1/2} - \gamma(\delta) - \gamma_0 \quad (15)$$

$$f^d(V^d) = [Y^D \cdot JY^D]^{1/2} - \gamma(\delta) - \gamma_0 \quad (16)$$

dove $\gamma(\delta)$ è la funzione di evoluzione del danneggiamento, i.e. $\gamma(\delta) = c_1^d \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta}{c_2^d}\right) \right]$, e γ_0 è la soglia di danneggiamento. I tensori J ed H , ed i parametri (c_1^d, c_2^d, γ_0) sono strettamente connessi al comportamento di una singola lamina. Analogamente per i fenomeni plasticità si fa riferimento ad una formulazione associativa, secondo cui il potenziale ed il dominio coincidono con il criterio di Tsai-Wu, nello spazio delle tensioni efficaci:

$$g^p(V^p) = f_{ij} \sigma_i \sigma_j + f_i \sigma_i - (c_1^p p) - R_0, \quad (i,j=1..6) \quad (17)$$

dove c_1^p, R_0 rappresentano le soglie dei parametri evolutivi e della plasticità iniziale, mentre (f_{ij}, f_i) sono entrambi funzione dei valori di resistenza di una singola lamina. Maggiori dettagli circa la procedura di identificazione e confronto con i dati sperimentali sono recuperabili nei lavori [1,2].

Lo stato termodinamico attuale è ottenuto assumendo leggi di evoluzione consistenti con un incremento secondo la direzione normale al dominio elastico istantaneo e potenziali di evoluzione di tipo convessi:

$$\dot{\phi}^p = \lambda^p \frac{\partial g^p}{\partial V^p}, \quad \dot{\phi}^d = \lambda^d \frac{\partial f^d}{\partial V^d}, \quad \dot{\Omega}_d = \lambda^f . \quad (18)$$

4. MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI ED ALGORITMO NUMERICO

La formulazione proposta è stata sviluppata numericamente mediante il metodo degli elementi finiti, facilitando quindi l'analisi di laminati multistrato per condizioni geometriche e di carico complesse. In particolare, i sublaminati sono stati modellati mediante elementi isoparametrici a quattro nodi deformabili a taglio ed elementi di interfaccia ad elevata rigidità. Quest'ultima condizione riproduce il comportamento singolare delle tensioni al tip della delaminazione e dal punto di vista cinematica impone la condizione di perfetta adesione tra le lamine non caratterizzate da

meccanismi interlaminari. Infine in corrispondenza dei piani non soggetti a fenomeni di delaminazione, le condizioni di continuità di natura interfacciale sono state imposte mediante equazioni di vincolo in forma esplicita. Il modello è stato sviluppato sottoforma user subroutine in un programma generale agli elementi finiti (Ansys, 2003). In particolare, la formulazione costitutiva assembla la soluzione localmente in corrispondenza dei punti di integrazione di Gauss, in cui opportune variabili di natura interna vengono monitorate al fine di valutare al generico passo di carico la risposta del materiale. La soluzione procede internamente mediante un algoritmo numerico di integrazione, che determina in forma incrementale le variazioni delle quantità statiche e cinematiche introdotte nella formulazione costitutiva. La procedura di integrazione numerica delle equazioni costitutive affinisce ad uno schema alla Backward-Euler pienamente implicito, in cui gli incrementi delle variabili interne e le condizioni di consistenza sono analizzate alla fine del passo di carico.

Nel modello agli elementi finiti, le componenti modali dell'energia di rilascio sono valutate in funzione delle reazioni nodali degli elementi di interfaccia e degli spostamenti relativi dei nodi adiacenti al fronte di delaminazione. In particolare, indicando con $\bar{\Omega} = \Delta_l \Delta_n$ l'area in fase di delaminazione, per un generico nodo appartenente al fronte di delaminazione, i.e. $A \in \Gamma^D$, le componenti modali dell'ERR sono valutate secondo le seguenti espressioni che rappresentano una forma discreta del metodo di chiusura virtuale del crack:

$$G_I(A) = \frac{1}{2} \frac{R_A^z \Delta w_{B-B'}}{\bar{\Omega}}, \quad G_{II}(A) = \frac{1}{2} \frac{R_A^x \Delta u_{B-B'}}{\bar{\Omega}}, \quad G_{III}(A) = \frac{1}{2} \frac{R_A^y \Delta v_{B-B'}}{\bar{\Omega}}. \quad (19)$$

dove (R_A^x, R_A^y, R_A^z) rappresentano le reazioni nodali al fronte e $\Delta(u, v, w)_{B-B'}$, gli spostamenti relativi nei nodi adiacenti al fronte di delaminazione. La valutazione delle condizioni di avanzamento si basa su un criterio di frattura solitamente utilizzato per condizioni di carico da modo misto e strettamente dipendente dalle componenti modali dell'energia di rilascio secondo la seguente forma additiva:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^a + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^b + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \right)^c = 1 \quad (20)$$

dove a, b, c sono parametri materiali, unitari, mentre G_{Ic} ($i=I, II, III$) rappresenta i valori critici delle componenti modali dell'ERR.

Si riportano alcuni risultati numerici relativi ad uno schema DCB con materiale T300-914 [2], i cui parametri interni $(J, H, c_1^d, c_2^d, c_1^p, \gamma_0, R_0)$, riportati in Tab.1, sono stati ricavati da osservazioni sul comportamento di una singola lamina [1,2].

$G_{IC}, G_{IIc}=G_{IIIc}$ [N/mm]	0.1, 0.3
J_{11}, J_{22}, J_{33} [mm ⁴ /N ²]	2.45E-3, 5.75E-2, 0.114
H_1, H_2, H_3 [mm ² /N ²]	0.2124, -0.061704, 0.136
c_1^d, c_2^d, γ_0 [mm ² /N ²]	0.1, -0.89, 0

Tabella 1 Parametri meccanici intralaminari ed interlaminari relativi ad un T300-914

I risultati proposti si pongono l'obiettivo di valutare l'influenza dei fenomeni intralaminari sulla valutazione dell'energia di rilascio e quindi sulle condizioni di avanzamento del fronte di delaminazione. Sono stati sviluppato confronti tra soluzioni derivanti dal modello proposto e medesimi risultati coerenti con un approccio basato sulla meccanica della frattura in ambito elastico lineare. In particolare, in Fig.2, si riporta la distribuzione dell'energia di rilascio lungo il fronte di delaminazione considerando una condizione di carico da modo I, afferente a un laminato simmetrico caratterizzato da un lay-up omogeneo con orientazione $\Theta=45$ e $\Theta=90$ (fig.2). Inoltre, in fig.3 si riporta per differenti fattori di carico, il massimo valore dell'energia di rilascio in forma dimensionale al variare dell'angolo di orientazione del laminato. I risultati evidenziano una reale sottostima da parte delle soluzioni afferenti alla teoria elastica nella valutazione dell'energia di rilascio e nella conseguente previsione di avanzamento della frattura. Questa sottostima è particolarmente significativa nei laminati con angolo

di orientazione delle fibre prossimo a 90°, dove gli effetti di degradazione di natura intralaminare sono verosimilmente maggiori

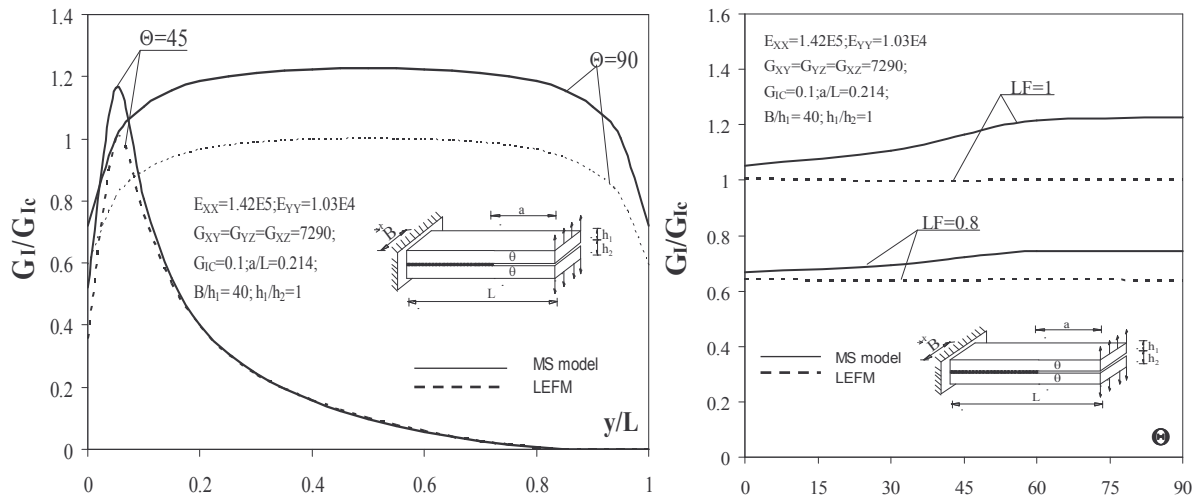


Fig. 2,3 – Condizione da modo I: Distribuzione in forma adimensionale dell'ERR. Legge di variazione tra ERR e angolo di orientazione del laminato.

Nelle fig.4,5 si propongono dei confronti in termini di curve di evoluzione tra carico e spostamento (fig.4) e leggi di variazione del modulo elastico attuale tra il modello proposto ed uno consistente con la LEFM. I risultati mostrano come la teoria elastica, priva di modalità di degradazioni intralaminari, determina sovrastime nel massimo carico ammissibile dal laminato e sottostime nella valutazione della rigidità attuale. (fig.5). Per valori crescenti del carico da modo I, applicato su uno schema DCB, i risultati ottenuti con il modello proposto sono più regolari di quelli afferenti alla LEFM.

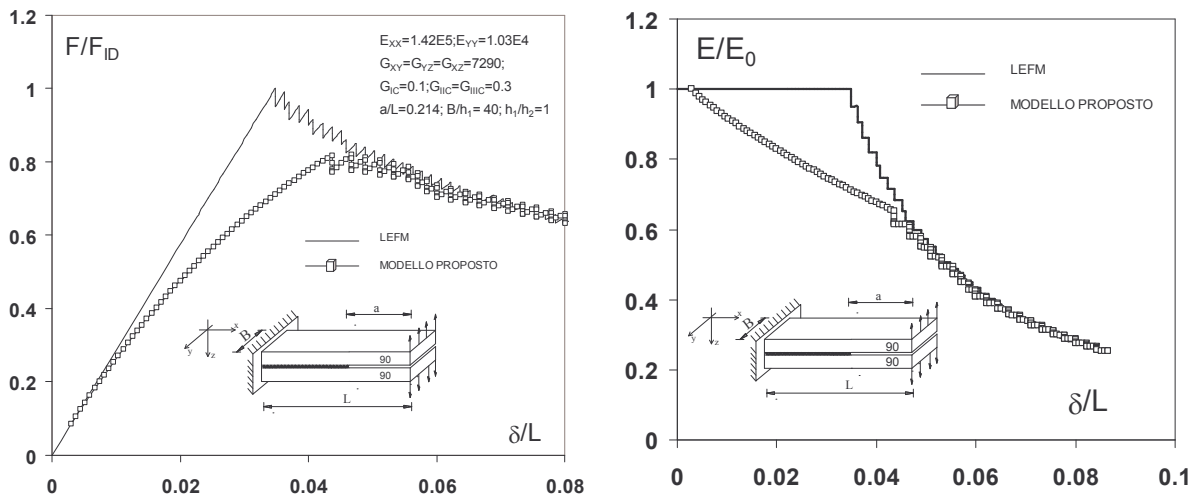


Fig. 4,5 – Condizione da modo I: Curve di evoluzione adimensionalizzate carico-spostamento e variazione della rigidità tangente ($\theta=90^\circ$).

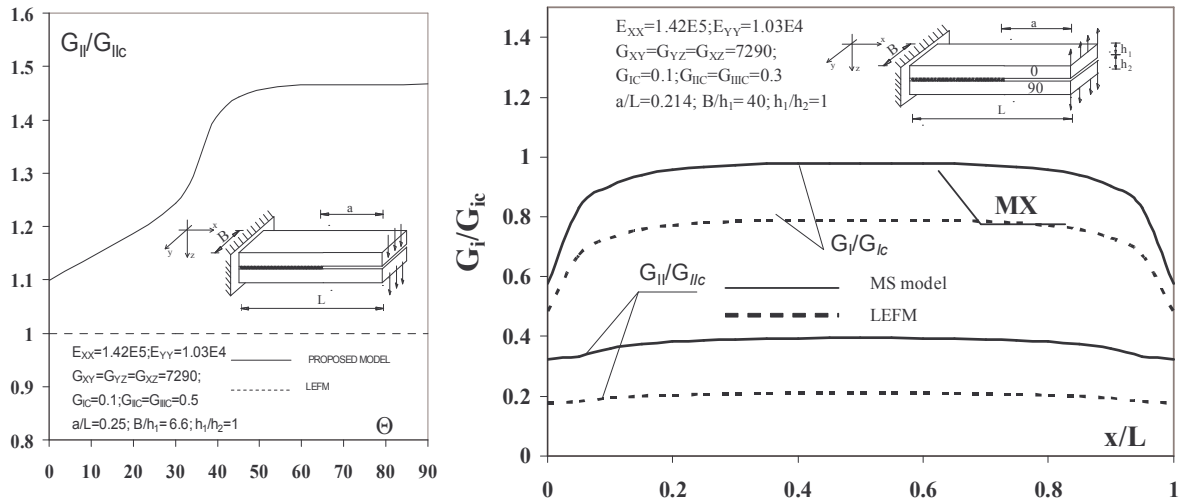


Fig. 6,7 – Condizione da II e da modo misto: Valori di ERR per varie orientazioni delle fibre, Distribuzione adimensionale delle componenti modali dell'energia di rilascio.

Infine, si riporta in Fig.6, la distribuzione dell'energia di rilascio adimensionalizzata sul valore critico, al variare dell'angolo di orientazione delle lamine, secondo una condizione di carico da modo II. Si nota anche in tale contesto particolari sottostime dell'ERR con errori di valutazione sulla stima delle energia di rilascio fino al 50%. Infine in Fig.7, si illustra la distribuzione dell'energia di rilascio lungo il fronte di delaminazione per una condizione da modo misto. I confronti in argomento, anche in tale contesto, mostrano una reale sottostima da parte delle soluzioni afferenti alla LEFM sia nella valutazione dell'energia di rilascio che nella determinazione delle condizioni di avanzamento.

5. CONCLUSIONI

Il modello di danneggiamento proposto si basa su un approccio multiscale, mediante il quale sono stati analizzati i fenomeni di interazione tra modalità di degradazione di tipo intralaminare ed interlaminare nell'ambito dei materiali compositi a matrice polimerica. L'approccio utilizzato è basato sulla Meccanica del danneggiamento al continuo e sulla meccanica della frattura, al fine di mettere in conto gli effetti di danneggiamento prodotto da microfratture di natura distribuita e modalità di degradazione proprie dei fenomeni di delaminazione. I risultati evidenziano che l'interazione tra modalità di degradazione di natura interlaminare ed intralaminare determina un sostanziale incremento dell'energia di rilascio e quindi una diversa previsione delle condizioni di avanzamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E.J. Barbero, P. Lonetti 2002. *An inelastic damage model for fiber reinforced laminates*. Journal of Composite Materials: 36 (8), 941-962,.
- [2] E.J. Barbero, P. Lonetti 2001. *Damage model for composites defined in terms of available data*, Mechanics of Composite Materials and Structures: 8 (4), 299-315.
- [3] D. Bruno, F. Greco 2001. *Mixed mode delamination in plates: a refined approach*. Int J Solids Structures: 38/50-51, 9149-9177.
- [4] D. Bruno, F. Greco, P. Lonetti 2003. *A coupled interface-multilayer approach for mixed mode delamination and contact analysis in laminated composites*. Int. J. Solids Structures: 40, 7245-7268.
- [5] D. Bruno, F. Greco, P. Lonetti 2005. *A 3D delamination modelling technique based on plate and interface theories for laminated structures*, European Journal of Mechanics A/Solids: 24, 127-149.
- [7] N. Hansen, H.L. Schreyer 1994. *A Thermodynamic consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage*, Int. J. Solids Structures: 31,359-389.
- [8] Z. Zuo, S.R. Reid, P.D. Soden, S. Li 2001. *Mode separation of energy release rate for delamination in composite laminate using sublaminates*, Int. J. Solids Structures 38, 2597-2613.