

Studio del comportamento di laminati compositi quasi isotropi soggetti ad impatto a bassa velocità

A. Zucchelli, G. Minak, F. Cesari, V. Dal Re, S. Curioni

DIEM – Facoltà di Ingegneria - Università degli Studi di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna

Sommario

Il presente studio illustra i risultati preliminari di una ricerca che si inserisce all'interno di un più ampio contesto nazionale inerente l'analisi del comportamento dei laminati in materiale composito. In particolare i risultati che vengono presentati riguardano gli studi condotti sul comportamento all'impatto a bassa velocità da parte di laminati compositi a matrice polimerica e rinforzati mediante fibre. Gli studi sono stati sviluppati sia mediante indagini sperimentali che mediante lo sviluppo di modelli numerici. Le indagini sperimentali sono state condotte in due fasi ed hanno interessato laminati compositi in configurazione quasi isotropa. La prima fase sperimentale ha riguardato le prove di impatto a bassa velocità. Le prove sperimentali di indentazione sono state monitorate mediante la tecnica delle emissioni acustiche al fine di poter valutare il progredire del danno e di poter definire una funzione che stima il danno accumulato. La seconda fase sperimentale è stata condotta eseguendo prove di trazione sui compositi indentati al fine di poterne valutare la resistenza residua. Grazie alle informazioni raccolte nel corso delle due fasi sperimentali è stato possibile identificare una correlazione tra il danno complessivo indotto durante l'indentazione ed il carico di rottura residuo in condizione di trazione. Lo sviluppo dei modelli numerici ha riguardato lo studio di una metodologia tale da riprodurre il comportamento dei laminati compositi soggetti ad impatto a bassa velocità ed a carichi di trazione. La modellazione numerica è stata eseguita mediante l'impiego congiunto di elementi ortotropi ed equazioni di vincolo tra gli elementi stessi grazie ai quali è stato possibile ricostruire in modo organico la struttura dei laminati compositi. Sono stati sviluppati anche algoritmi di simulazione del comportamento del materiale soggetto ad indentazione tali da tenere conto del progredire del danno all'interno dei laminati secondo i tre principali modi di guasto: rottura della matrice, delaminazione e rottura delle fibre. Gli algoritmi si basano su criteri di rottura derivati dalla teoria di Hashin generalizzata e contengono lacune costanti che devono essere determinate mediante il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali. La conoscenza di tali costanti è la premessa essenziale per rendere operativa la metodologia sviluppata anche per la progettazione di componenti a morfologia complessa.

1 – Introduzione

Da alcuni anni a livello nazionale è stato sviluppato un intenso programma di ricerca finalizzato allo studio del comportamento dei laminati compositi in differenti configurazioni costruttive e di assemblaggio e soggetti a differenti condizioni operative. In particolare lo studio che viene qui presentato riguarda il comportamento di laminati compositi in configurazione quasi isotropi soggetti ad impatto a bassa velocità e della loro resistenza residua a trazione. La letteratura inerente lo studio del comportamento all'impatto a bassa velocità dei laminati in composito presenta importanti studi sia di carattere sperimentale [1-25] che numerico [26-39]. Collocandosi nello scenario internazionale il presente lavoro approfondisce i seguenti temi sperimentali e numerici:

- lo studio del progredire del danno indotto dal processo di indentazione mediante il rilevamento delle emissioni acustiche;
- la definizione di una funzione che tiene conto delle informazioni di natura meccanica ed acustica e che raccoglie la storia del danno indotto al materiale;
- il legame esistente tra il livello del danno indotto dall'indentazione con la resistenza residua del laminato stesso rispetto a carichi agenti sul suo piano principale
- lo studio di una metodologia parametrica per la modellazione numerica del danneggiamento progressivo di un laminato composito soggetto ad indentazione

2 – Analisi sperimentale

Il lavoro sperimentale è stato sviluppato in due fasi: nel corso della prima fase sono state indentate le lastre in laminato composito; nella seconda fase sono state condotte prove con carichi agenti nel piano principale del laminato al fine di determinarne la resistenza residua. Le prove condotte sono state monitorate mediante trasduttori per il rilevamento delle emissioni acustiche (EA). Il lavoro ha

permesso di evidenziare una correlazione tra il danno indotto durante la fase di impatto a bassa velocità e la resistenza residua a trazione nel piano principale del laminato.

2.1 – Materiali e Metodi per le prove sperimentali

I materiali utilizzati per lo studio sono laminati compositi quasi isotropi e simmetrici costituiti da 8 lamine con lay-up $[0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ]_s$ in grafite-epossido (fibre T-300) con spessore complessivo pari a 1.6 mm le cui caratteristiche principali sono riassunte in tabella 1.

tabella 1: proprietà di ciascuna lamina nel riferimento locale

V_f	E_l	E_t	G_{lt}	ν	σ_{lTR}	σ_{lCR}	σ_{tTR}	σ_{tCR}	τ_{lTR}	σ_{zTR}	σ_{zCR}	τ_{lzR}	τ_{tzR}
	GPa	GPa	GPa		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
60%	138	11	5.5	0.28	1270	1130	30	141	63	94	290	63	30

Per le prove di impatto a bassa velocità, nel seguito indicate come prove di indentazione, sono state utilizzate lastre quadrate aventi lunghezza di 250 mm per lato. Le prove sono state condotte mediante l'utilizzo della attrezzatura rappresentata in figura 1 che consente di ottenere un'area utile del provino di forma circolare e condizioni di vincolo di incastro perfetto. L'indentatore utilizzato è sferico e di diametro 14mm. L'attrezzatura è stata dotata di fissaggi elastici per il posizionamento dei trasduttori per il rilevamento delle emissioni acustiche.

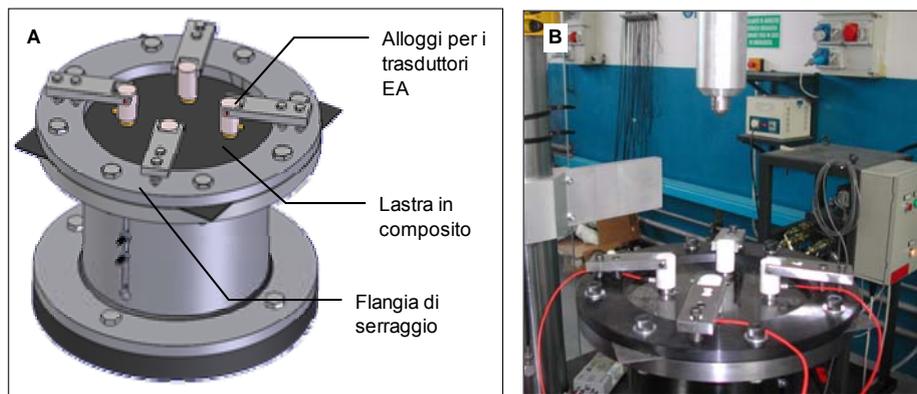


Figura 1: Complessivo dell'afferraggio per lastre utilizzate in prove d'indentazione (A) e configurazione sperimentale (B)

La macchina di prova utilizzata è una INSTRON servo idraulica modello 8033 abbinata ad una cella di carico da 25kN. Per il monitoraggio delle emissioni acustiche si è utilizzata un'attrezzatura della Physical Acoustic Corporation (PAC); sono stati utilizzati 4 trasduttori della serie PAC R15 con preamplificazione pari a 40 dB posizionati sulla superficie della lastra da indentare come mostrato in figura 1. La soglia di rilevamento delle emissioni acustiche è stata fissata a 40 dB e sono state condotte prove di taratura mediante un dispositivo di pulsazione a frequenza ed ampiezza nota e seguendo la prova standard di Nielsen per determinare l'attenuazione dei segnali e le risposte in frequenza dei trasduttori. Le prove sono state svolte in controllo di spostamento ad una velocità di 0.05 mm/sec e interrotte al raggiungimento di prefissati livelli di indentazione. I livelli di indentazione raggiunti sono tre: bassa indentazione (serie B), indentazione media (serie M) ed indentazione profonda (serie P), dove questa ultima



Figura 2: apparato sperimentale per le prove di trazione con particolare di montaggio dei trasduttori per le emissioni acustiche

corrisponde alla condizione di sfondamento della lastra da parte dell'indentatore.

Per quanto riguarda le prove di resistenza residua le lastre già indentate sono state tagliate seguendo tre differenti direzioni di resezione ottenendo quindi tre lay-up per le lastre da sottoporre a test di trazione. In particolare sono stati ricavati provini le cui dimensioni sono 40mm x 250 mm e per i quali l'orientamento delle fibre poste negli strati superficiali è 0°, a 90° e a 45°. I campioni deputati allo studio della resistenza residua sono stati ricavati dalle lamine materiale già danneggiate sezionandole nella parte centrale ovvero quella interessata dal danno provocato dall'indentatore secondo tre direzioni.

I provini ottenuti sono quindi stati dotati alle estremità di tabs in alluminio per evitare effetti di intaglio dovuti al fissaggio del provino negli afferraggi. Le prove di resistenza residua sono state condotte applicando il carico nel piano principale del provino tramite l'utilizzo di un'apposita attrezzatura mostrata in figura 2. Anche per queste prove è stata effettuata l'acquisizione delle emissioni acustiche mediante l'utilizzo di due trasduttori dello stesso tipo di quelli impiegati nelle prove di indentazione che sono stati fissati nella zona centrale dei provini. I test di trazione sono stati condotti impostando il controllo di spostamento con una velocità di 0.02 mm/sec.

2.2 – Risultati delle prove sperimentali

Al termine delle prove di indentazione sono state condotte analisi visive relative alla zona danneggiata.

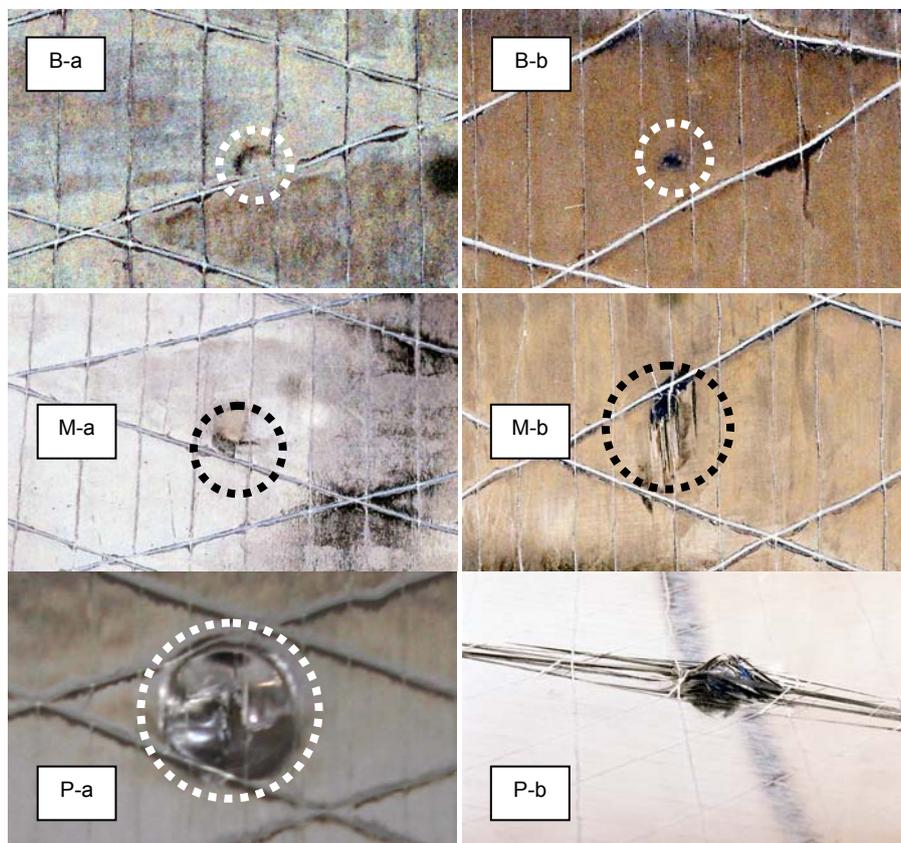


Figura 3: particolari della zona danneggiata per i tre livelli di indentazione (B, M e P) sul lato indentato (a) e quello opposto (b)

In figura 3 sono evidenziate sei immagini relative all'impronta residua lasciata dall'indentatore sulla lamina rispettivamente sul lato superiore (a diretto contatto con l'indentatore) e sul lato inferiore nei casi di bassa indentazione (B-a, B-b), indentazione media (M-a, M-b) ed indentazione profonda (P-a, P-b). Sul lato superiore del provino è sempre possibile riscontrare una impronta concava ben definita e localizzata, inoltre dall'ispezione visiva non sono riscontrabili altri particolari effetti di danno. Sul lato opposto si riscontra invece una impronta convessa ben definita ed in aggiunta si rilevano consistenti rotture di matrice e distacchi di lamine, distacchi di parti di lamine nel loro stesso piano principale e rotture di fibre. Questo fatto è stato imputato all'effetto di sfondamento che l'indentatore produce nelle lamine con le quali non è a diretto contatto fin dall'inizio della prova. In tal caso infatti si tende a generare un preliminare stato di tensione flessionale accompagnato da una modesta componente

membranale, con l'aumentare dell'entità del carico applicato lo stato di tensione membranale tende ad assumere un'importanza crescente e quasi dominante. La componente membranale finale è da ritenersi la causa primaria dei distacchi di parti di lamine nel loro stesso piano principale e della rottura di alcune fibre.

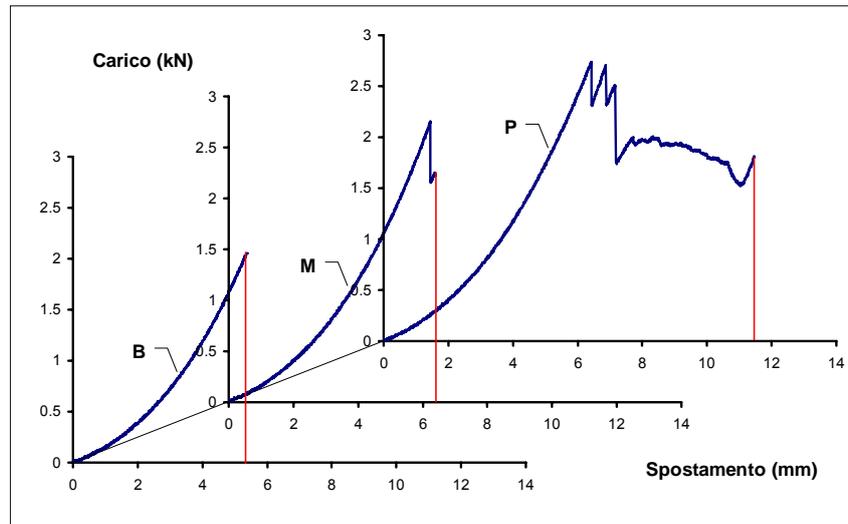


Figura 4: andamento del carico rispetto allo spostamento dell'indentatore per i tre livelli di indentazione scelti (bassa, B, media, M, e profonda, P)

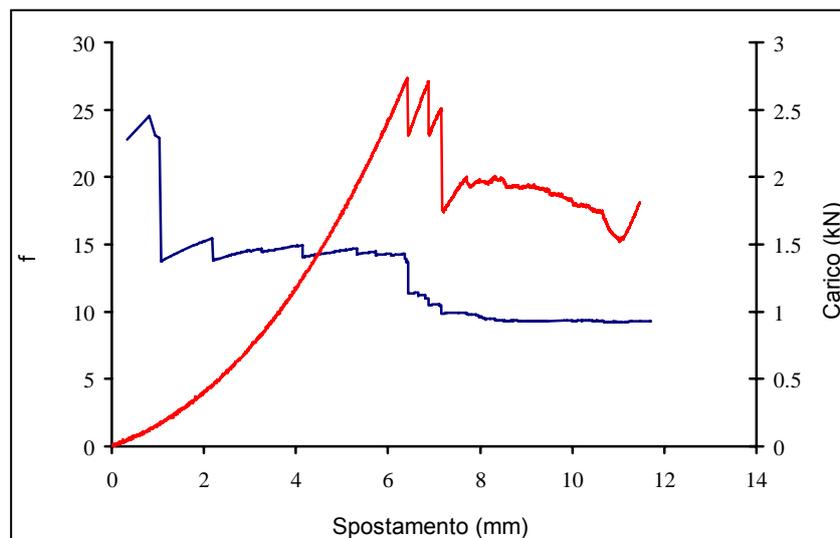


Figura 5: andamento della funzione f e del carico rispetto allo spostamento dell'indentatore

Sempre nell'ambito delle prove di indentazione risulta essere interessante considerare funzione che tiene conto della risposta meccanica ed acustica in modo congiunto. Tale funzione viene definita su base energetica considerando l'energia che il provino tende ad accumulare sotto forma di energia di deformazione (E_{str}) e l'energia che a causa del danneggiamento del materiale il materiale rilascia e viene misurata mediante gli eventi acustici (E_{ac}). In particolare la funzione considerata ha la seguente forma:

$$f = \ln(E_{str}/E_{ac})$$

Il rapporto tra i due contributi energetici, calcolati in forma cumulata, ha lo scopo di valutare la continua capacità del materiale di accumulare energia elastica rispetto agli eventi di danno che hanno generato il rilascio di "eventi acustici". Si osservi che tale rapporto energetico non contempla in modo esauriente il bilancio energetico del sistema (in tal senso risultano assenti i contributi dell'energia effettiva introdotta e dell'energia termica), tuttavia esso fornisce una chiara idea del continuo bilanciamento che si instaura nel laminato tra la capacità di sostenere il carico e la progressiva perdita

di integrità strutturale. In figura 5 viene riportato un esempio di andamento della funzione f confrontata con quella del carico rispetto allo spostamento dell'indentatore nel caso di una indentazione profonda. La funzione f sintetizza in sé tutte le informazioni relative al comportamento del materiale soggetto alla storia di carico e quindi può essere utilizzata come strumento per misurare anche il livello del danneggiamento. In tal senso è stata calcolato anche l'integrale della funzione f e si è potuto osservare una buona correlazione con i carichi ultimi a trazione ottenuti per i provini danneggiati dall'indentazione. In figura 6 vengono riportate le correlazioni tra i valori del carico ultimo a trazione dei provini danneggiati mediante indentazione ed il valore dell'integrale della funzione f corrispondente all'indentazione che ha generato il danno stesso.

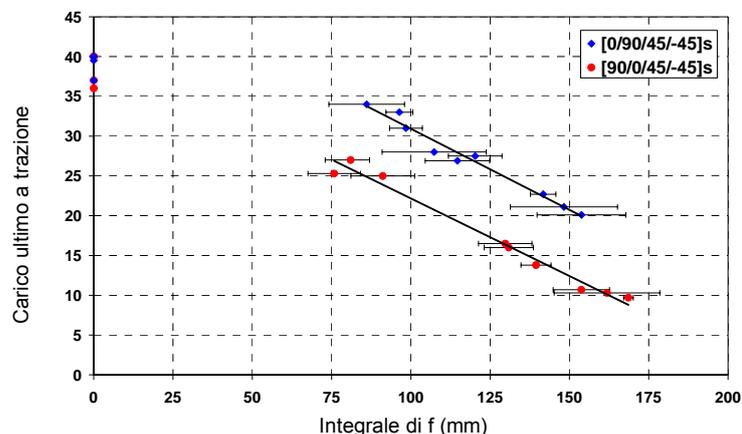


Figura 6: correlazioni tra il carico di rottura a trazione ed i valori assunti dall'integrale di f per i provini indentati

3 – Analisi numerica

3.1 – Materiale e Metodi per l'Analisi Numerica

Le lastre esaminate sono identiche a quelle utilizzate per le indagini sperimentali e sono costituite da materiale composito in fibra di carbonio T300 e resina epossidica disposte in configurazione quasi-isotropa, $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ]_s$, con otto lamine. Le proprietà meccaniche e le caratteristiche di resistenza del materiale sono riportate in Tabella 1.

Il modello geometrico utilizzato per l'analisi numerica è una piastra circolare di diametro 200 mm e spessore 1.6 mm soggetta a condizioni di incastro sul bordo esterno. Per simulare la condizione di indentazione è stato applicato un carico distribuito su un fissato numero di nodi posti su una circonferenza concentrica alla piastra stessa ed avente raggio pari al raggio della calotta sferica di indentazione intermedia valutata tra l'inizio della indentazione e la fine di tale processo. La metodologia adottata per l'analisi numerica si basa su cinque fasi successive, (1) applicazione di una fissata condizione di carico (i-esimo substep per il carico), (2) verifica dello stato di sollecitazione per ciascun elemento, (3) applicazione del criterio di riduzione della rigidità per gli elementi che non hanno superato il criterio di danno, (4) aggiornamento della configurazione deformata del modello per il successivo incremento di carico (aggiornamento delle coordinate nodali degli elementi), (5) eventuale incremento del carico e ripresa del ciclo di analisi.

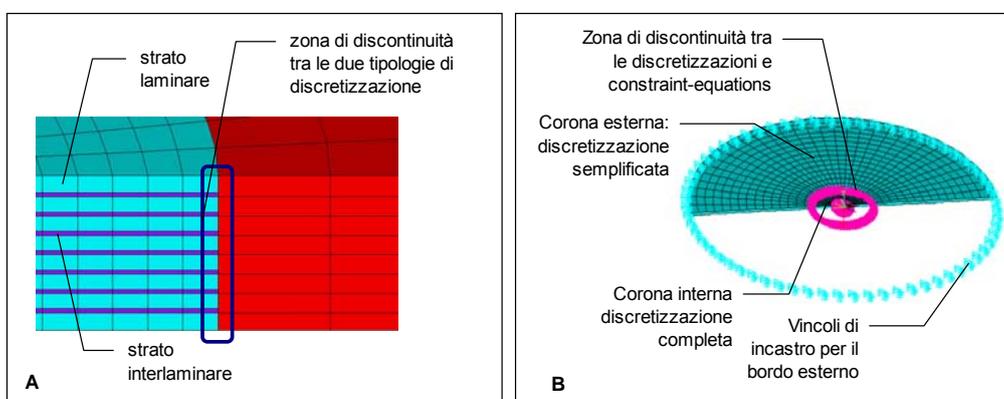


Figura 7: sezione del modello FEM (A), vista complessiva del modello (B)

L'elemento utilizzato per la discretizzazione del modello geometrico tiene conto delle caratteristiche di ortotropia e consente l'aggiornamento delle coordinate nodali (step 4). In ambiente ANSYS l'elemento che presenta tali caratteristiche è il SOLID45 a 8 nodi.

Il modello numerico della lastra è stato realizzato rappresentando mediante elementi SOLID45 ciascuno strato ortotropo del laminato. Inoltre per poter dare una possibile simulazione del fenomeno della delaminazione, sono stati inseriti elementi SOLID45 di interfaccia aventi proprietà di sola matrice e che rappresentano la zona di adesione tra le lamine. In figura 7-A viene rappresentato un particolare della discretizzazione del laminato nel suo spessore. In tale figura inoltre sono messi in evidenza gli elementi rappresentativi di ciascuno strato del laminato e gli elementi di interfaccia tra i vari strati. Tale modellazione risulta essere estremamente onerosa in termini di risoluzione del problema numerico. In tal senso si è adottato un modello caratterizzato da due tipi di discretizzazione, figura 7-B: nella zona centrale, maggiormente interessata dai vari tipi di danneggiamento, è stata eseguita una discretizzazione che utilizza gli elementi di interfaccia, mentre nella zona più esterna tali elementi sono stati trascurati. Sempre in figura 7-A viene posta in evidenza la discontinuità tra le due tipologie di discretizzazione. La continuità tra le due zone a differente discretizzazione è stata garantita applicando ai nodi degli elementi dello strato interlaminare le "constraint equations" che li legano agli elementi contigui posti nella corona esterna, figura 7-B.

La subroutine (nel seguito MACRO) sviluppata in linguaggio di programmazione interno ad ANSYS agisce direttamente sul modello discretizzato eseguendo tutti i passi previsti dalla metodologia già citata. La MACRO svolge tre funzioni base: caricamento ciclico del modello fino alla completa rottura del laminato, verifica dei criteri di crisi del materiale per ciascun elemento, degrado delle proprietà meccaniche degli elementi danneggiati.

I criteri di rottura utilizzati derivano dai modelli sviluppati da Hashin e risultano particolarmente adatti ad una implementazione numerica [35,36]. La verifica dei criteri adottati viene effettuata per ciascun piano di rottura; nel seguito viene fornito uno di tali criteri suddivisi in base al modo di danno: rottura matrice, rottura fibra e delaminazioni (nel seguito il sistema di riferimento x,y,z è da ritenersi sistema di riferimento locale per ciascun tipo di lamina).

Il processo continuo di danneggiamento [39] degli elementi che non hanno superato la verifica dei criteri avviene mediante assegnazione a ciascuno di essi di un materiale avente proprietà meccaniche degradate rispetto al materiale integro. Il nuovo materiale viene creato sulla base dello stato tensionale cui è soggetto ciascun elemento che non supera uno o più criteri di rottura. Da un punto di vista operativo, se si considera per esempio l'evento rottura della matrice per un generico elemento allora si ha che il modulo di Young del nuovo materiale che verrà assegnato a tale elemento sarà calcolato mediante la seguente relazione:

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{\ln(\text{criterio}) * \alpha + 1}$$

dove con E si indica il modulo elastico del materiale integro, con E' il modulo elastico del materiale danneggiato e α è un parametro il cui valore sarà determinato in conseguenza delle prove sperimentali. In particolare potranno essere calcolati E'_x, E'_y, E'_z ed i corrispondenti $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$

Si osservi che all'interno della procedura qui descritta la presenza dei coefficienti di danno α_i svolgono la funzione di pesi che determinano l'importanza del criterio, sono adimensionali ed inoltre dipendono dal modo di guasto considerato e dalla configurazione di carico.

3.2 – Risultati dell'Analisi Numerica

Le curve carico-spostamento ottenute numericamente sono state confrontate con dodici curve ottenute nel corso delle analisi sperimentalmente. I risultati ottenuti sperimentalmente hanno confermato la buona capacità da parte degli algoritmi sviluppati di rappresentare il danneggiamento progressivo che si può avere all'interno del laminato studiato e nella condizione di indentazione.

Nella figura 8 viene fornito un esempio nel quale sono poste a confronto le curve carico-spostamento ottenute mediante la simulazione numerica ed una prova sperimentale. Il caso indicato come No MACRO fa riferimento alla condizione nella quale la MACRO viene fatta operare con i coefficienti di danno nulli, in tal caso si può quindi osservare la importante differenza tra il risultato numerico e quello sperimentale. La curva indicata come "SIM4 PROVA4" è invece stata ottenuta variando in modo opportuno i coefficienti di danno, eseguendo cioè una prima taratura del metodo. Nel caso particolare in figura 8 si è potuto osservare un danneggiamento dominato dalla crisi della matrice e dalle delaminazioni.

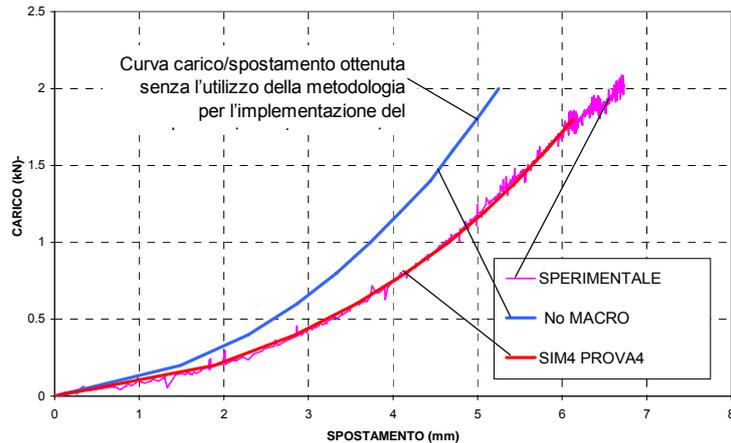


Figura 8: Confronto curve carico-spostamento ottenute numericamente ed un caso sperimentale

Di particolare interesse risultano i valori dei coefficienti di danno che hanno permesso di riprodurre in ambito numerico le risultanze sperimentali. In particolare considerando il processo di degrado della matrice e considerando le informazioni sperimentali relative alle prove sperimentali, si è notato che i valori ottenuti per caratterizzare il danneggiamento della matrice presentano una modesta variabilità:

$$\alpha_x = (1.4 \pm 0.1)$$

$$\alpha_y = (1.1 \pm 0.1)$$

$$\alpha_z = (1.1 \pm 0.1)$$

Si osservi inoltre che il tipo di modellazione del problema ed il processo di simulazione adottati consentono anche di avere una dettagliata descrizione dell'evoluzione del danneggiamento attraverso il numero e la localizzazione degli elementi che non hanno superato i diversi tipi di controllo a rottura. Nella figura 9 viene riportato ad esempio il progredire della delaminazione in funzione del carico applicato.

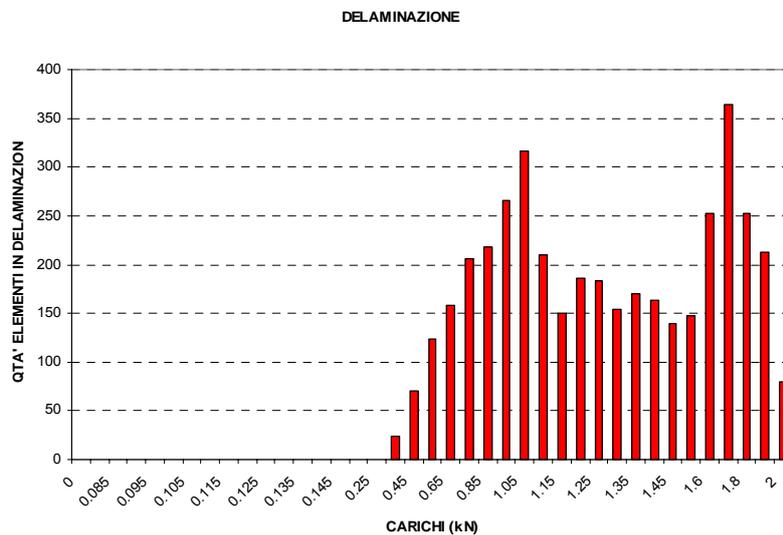


Figura 9: Numero di elementi delaminati per ogni incremento del carico applicato

4 – Conclusioni

Il lavoro sviluppato ha consentito di approfondire le conoscenze relative al comportamento dei laminati compositi soggetti ad impatto a bassa velocità. In particolare è stato possibile identificare delle correlazioni tra il “danno” indotto dall’indentazione ed il carico ultimo a trazione per i provini soggetti ad impatto a bassa velocità. Le simulazioni numeriche hanno permesso di riprodurre il comportamento del danneggiamento rilevato sperimentalmente. In particolare sono stati determinati i coefficienti per descrivere il danneggiamento progressivo di laminati compositi quasi isotropi soggetti ad un carico quasi statico agente ortogonalmente al piano principale.

5 – Bibliografia

- [1] R. Teti, G. Caprino, Prediction of composite laminate residual strength based on a neural network approach, *Applications of Artificial Intelligence in Engineering*, 1994, p 81-88
- [2] R. Teti, G. Caprino, Evaluation of impacted composite laminate residual strength through neural networks, *Applications of Artificial Intelligence in Engineering*, 1995, p 411-418
- [3] M.-H.R. Jen, Y. S. Kau, Y.S., J.M. Hsu, Initiation and propagation of delamination in a centrally notched composite laminate, *Journal of Composite Materials*, v 27, n 3, 1993, p 272-302
- [4] G. Caprino, R. Teti, I. De Iorio, Predicting residual strength of pre-fatigued glass fibre-reinforced plastic laminates through acoustic emission monitoring, *Composites Part B: Engineering*, v 36, n 5, July, 2005, p 365-371
- [5] Ernest F. Dost, Larry B. Ilcewicz, William B. Avery, Brian R. Coxon, Effects of stacking sequence on impact damage resistance and residual strength for quasi-isotropic laminates, *ASTM Special Technical Publication*, n 1110, 1991, p 476-500
- [6] G. Caprino, R. Teti, Residual strength evaluation of impacted GRP laminates with acoustic emission monitoring, *Composites Science and Technology*, v 53, n 1, 1995, p 13-19
- [7] B. Qi, I. Herszberg, Engineering approach for predicting residual strength of carbon/epoxy laminates after impact and hygrothermal cycling, *Composite Structures*, v 47, n 1, Dec, 1999, p 483-490
- [8] C.L. Ong, T.B. Hong, J.Y. Huang, Studies of impacted composite laminates, *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, v 38, n 1, *Advanced Materials: Performance Through Technology Insertion*, 1993, p 978-987
- [9] Abrate S. Impact on laminated composite materials. *Applied Mechanics Reviews* 1991;44(4):155-90.
- [10] Abrate S. Impact on laminated composites: recent advances. *Applied Mechanics Reviews* 1994;47(11):517-44.
- [11] Abrate S. Impact on composite structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [12] Lee SM, Zahuta P. Instrumented impact and static indentation of composites. *Journal of Composite Materials* 1991;25(2):204-22.
- [13] Kwon YS, Sankar BV. Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxy laminates. *Journal of Composites Technology and Research* 1993;15(2):101-11.
- [14] Wardle BL, Lagace PA. On the use of quasi-static testing to assess impact damage resistance of composite shell structures. *Mechanics of Composite Materials and Structures* 1998;5(1):103-21.
- [15] Sjöblom PO, Hartness TM, Cordell TM. On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of Composite Materials* 1988;22(1):30-52.
- [16] Lagace PA, Williamson JE, Tsang PHW, Wolf E, Thomas S. A preliminary proposition for a test method to measure (impact) damage resistance. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 1993;12(5):584-601.
- [17] Matemilola SA, Stronge WJ. Low speed impact damage in filamentwound CFRP composite pressure vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology* 1997;119(4):435-43.
- [18] Alderson KL, Evans KE. Failure mechanisms during the transverse loading of filament-wound pipes under static and low velocity impact conditions. *Composites* 1992;23(3):167-73.
- [19] Hirai Y, Hamada H, Kim JK. Impact response of woven glass-fabric composites. I. Effect of fibre surface treatment. *Composites Science and Technology* 1998;58(1):91-105.
- [20] Luo RK, Green ER, Morrison CJ. Impact damage analysis of composite plates, *Int. Journal of Impact Energy*, Vol.22, 1999, p 435-447
- [21] Found MS, Holden GJ, Swamy RN. Static indentation and impact behaviour of GRP pultruded sections, *Composite Structures*, Vol.39, 1997, 223-228
- [22] Found MS, Lamb JR, Damage assessment of impacted thin CFRP panels, *Composites: Part A* 35 (2004) 1039-1047
- [23] Symons DD. Characterisation of indentation damage in 0/90 lay-up T300/914 CFRP, *Composites Science and Technology* 60, 2000, p 391-401
- [24] A. Zucchelli, V. Dal Re, Experimental analysis of composite laminate progressive failure by AE monitoring, *ICEM12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics*, 29 August - 2 September, 2004 Politecnico di Bari, Italy
- [25] W. Leardini, G. Minak, A. Zucchelli, V. Dal Re, Determinazione della resistenza residua di lastre in materiale composito soggette ad impatto a bassa velocità, *XXXIV CONVEGNO NAZIONALE AIAS*, 14 -17 SETTEMBRE 2005, POLITECNICO DI MILANO
- [26] K.I. Tserpes, P. Papanikos and Th. Kermanidis, A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading, *Laboratory of Technology and Strength of Materials, University of Patras, Patras*, 2001
- [27] P. Pal, C. Ray, Progressive Failure Analysis of Laminated Composite Plates by Finite Element Method, *Civil Engineering Department Bengal Engineering College, India*, 2002
- [28] J.C. Zarco-Gonzales, N.A. Fellows, J.F. Durodola, A step-size independent method for finite element modelling of damage in composites, *School of Engineering, Oxford Brookes University, Headington, Oxford, UK*, 2004
- [29] M.F.S.F. de Moura, J.P.M. Concalves, Modeling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon-epoxy laminates under low velocity impact, *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Portugal*, 2003
- [30] Chien-Hua Huang, Ya-Jung Lee, Experiments and simulation of the static contact crush of composite laminated plates, *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taiwan, ROC*, 2002
- [31] F. Aymerich, P. Priolo, Modellazione del danneggiamento di fatica in laminati compositi intagliati, *XXXII convegno nazionale AIAS*, Salero 3-6 Settembre 2003.
- [32] David W. Sleight, Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures, *NASA/TP-1999-209107*, March 1999, pp. 94.
- [33] L. Iannucci, Progressive failure modelling of woven carbon composite under impact, *Imperial college of Science, Technology and Medicine, Department of Aeronautics, London, UK*, 2004
- [34] Z. Hashin, Analysis of cracked laminates: a variational approach, *Department of Solid Mechanics and Structures, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*, 1985
- [35] Seng C. Tan, A Progressive Failure Model for Composite Laminates Containing Openings, 1991
- [36] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fibre composites, *Department of Solid Mechanics and Structures, Tel Aviv University, Tel Aviv*, 1980, Israel
- [37] M. Casadei, A. Zucchelli, F. Ghezzi, F. Cesari, Determinazione della resistenza residua di lastre in materiale composito soggette ad impatto a bassa velocità, *XXXIV CONVEGNO NAZIONALE AIAS*, 14 -17 SETTEMBRE 2005, POLITECNICO DI MILANO