

ANALISI SPERIMENTALE E METODOLOGIE DI PREVISIONE DELLA RESISTENZA A FATICA DI GIUNZIONI INCOLLATE IN MATERIALE COMPOSITO

M. Quaresimin, M. Ricotta

*Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali
Università di Padova, Stradella S. Nicola 3, 36100
Vicenza; e-mail: marino.quaresimin@unipd.it*

SOMMARIO

Il lavoro presenta un'indagine bibliografica sulle metodologie di previsione della resistenza a fatica di giunzioni incollate in materiale composito. Vengono quindi discussi i risultati di un'attività sperimentale volta all'analisi del comportamento statico e a fatica di questo particolare tipo di giunzione. L'analisi del danneggiamento a fatica ha individuato nell'innescò di una cricca e nella sua successiva propagazione all'interfaccia aderendo-adesivo il meccanismo che controlla la resistenza ad alto numero di cicli della giunzione. Si è riscontrato inoltre che la frazione di vita spesa per la fase di innescò non è mai inferiore al 25% dell'intera vita a fatica.

ABSTRACT

After a discussion about different models on bonded composite connections reported in the literature, the paper presents the results of an experimental investigation on static and fatigue behaviour of bonded composite joints. A careful damage evolution analysis identifies in crack initiation and in its subsequent propagation in the adherend/adhesive interface the mechanism controlling the high cycle fatigue strength. It has

been found that the fraction of the life spent in the crack initiation is not lower than 25% of total fatigue life.

1. INTRODUZIONE

La presenza di giunzioni, aperture o inserti metallici è uno dei problemi tipici che il progettista deve affrontare durante lo sviluppo o la riparazione di un prodotto in materiale composito a matrice polimerica [1-2]. Molto spesso le diverse parti di una struttura sono collegate tra loro, dopo stampaggio, mediante giunzioni incollate, ma la presenza di zone di giunzione può anche essere dovuta ad esigenze produttive legate alla geometria del componente da realizzare. In questo ultimo caso le giunzioni sono ottenute con una limitata sovrapposizione dei singoli strati e vengono realizzate durante lo stampaggio stesso del componente. Come esemplificato dai lavori riportati in [3-12], lo sviluppo di metodologie previsionali della resistenza e della vita a fatica di giunzioni in composito è da lungo tempo oggetto dell'attenzione della comunità scientifica. Tuttavia, i modelli disponibili sono difficilmente generalizzabili e la loro applicazione a componenti industriali risulta ancora poco agevole; questo è in parte dovuto anche alla notevole influenza dei diversi parametri progettuali sul comportamento strutturale e sulle modalità di danneggiamento delle giunzioni, come ampiamente illustrato nella estesa ed accurata analisi bibliografica riportata in [13]. Esiste quindi il pericolo che molti dei vantaggi legati all'utilizzo dei compositi a matrice polimerica, quali ad esempio leggerezza ed elevate proprietà specifiche, siano vanificati da giunzioni sovradimensionate o dall'adozione di coefficienti di sicurezza troppo elevati. Risulta quindi auspicabile lo sviluppo di adeguate metodologie progettuali e, con questa finalità, è stato messo a punto un progetto di ricerca congiunto tra le sedi di Bologna, Padova e Cagliari che ha ottenuto il supporto del MURST. Obiettivo principale del progetto è lo sviluppo di metodologie e procedure di calcolo per giunzioni composito-composito in grado di

trasferire i dati di resistenza ottenuti in laboratorio su campioni e giunzioni di dimensioni contenute alla progettazione di componenti reali. L'attività sperimentale del progetto è finalizzata allo studio e all'analisi di giunzioni composito-composito incollate e stampate. In questo lavoro verranno discussi i risultati relativi alle giunzioni incollate mentre nel successivo [14] verranno presentati i risultati ottenuti per le giunzioni stampate.

2. STATO DELL'ARTE SULLE METODOLOGIE DI PREVISIONE

Una estesa ricerca bibliografica sulle giunzioni in materiale composito incollate ha messo in evidenza un gran numero di dati sperimentali disponibili, grazie alla notevole attenzione posta al problema da molti ricercatori negli ultimi venticinque anni. La maggior parte dei dati presenti sono relativi, però, ad analisi di propagazione proprie della meccanica della frattura e solo un numero ridotto si riferisce a prove di tipo classico orientate, cioè, all'analisi della capacità portante della giunzione; si considerino ad esempio i lavori [5, 7, 9, 15-25]. Quanto appena detto è giustificato dalla modalità di danneggiamento a fatica tipica dei giunti incollati in materiale composito, per i quali il principale meccanismo di danneggiamento è l'innescò di una cricca e la sua successiva propagazione, fino al loro cedimento finale.

I dati presenti non sono, tuttavia, sufficienti per definire regole e metodologie di progettazione affidabili, né sono utilizzabili per validare modelli previsionali già esistenti, poiché si riferiscono a geometrie, materiali base e adesivi troppo differenti tra loro. La rianalisi sistematica dei dati disponibili ha suggerito i parametri più critici per la successiva attività sperimentale.

Numerosi approcci sono stati proposti per la previsione della resistenza a fatica di giunzioni in materiale composito:

Ishii et al. [5] hanno suggerito che la resistenza a fatica ad alto numero di cicli per giunzioni in CFRP/metallo in condizioni di stato di tensione multiassiale può essere stimata facendo riferimento alla massima tensione principale presente all'interno dello strato di adesivo. Nayeb-Hashemi et al. [4] hanno proposto un modello di previsione di vita a fatica sulla base di un parametro di danneggiamento che tiene conto degli effetti combinati dei campi di tensione dovuti a condizioni di carico esterne di tipo multiassiale.

In un altro lavoro, Ishii et al. [7], per tenere conto della singolarità del campo di tensione dovuta alla presenza dell'interfaccia aderendo-adesivo, hanno formulato un modello di previsione di vita a fatica fondato sulla stima di due valori "apparenti" del fattore di intensificazione delle tensioni e del grado di singolarità del campo di tensione nella zona critica del giunto.

E' opinione degli autori che un metodo più promettente e affidabile per descrivere e stimare il comportamento a fatica sia quello di considerare la reale evoluzione del danneggiamento: una fase di innescò o nucleazione di una cricca seguita da quella della sua propagazione. E' già stato comunque riscontrato che la frazione di vita spesa nelle due fasi dipende da diversi parametri come la geometria delle giunzioni, il campo di tensione, il rapporto di sollecitazione, il tipo di adesivo ed il suo spessore, le condizioni ambientali ed altri ancora. Nelle giunzioni incollate solitamente una cricca innesca e propaga nell'adesivo o all'interfaccia adesivo-aderendo e quindi la vita spesa per la sua nucleazione può essere stimata utilizzando un approccio basato sulla meccanica della frattura, come già proposto in [6, 10]. La durata della successiva fase di propagazione può essere stimata, come consuetudine in meccanica della frattura, integrando una legge di potenza che legghi la velocità di rilascio dell'energia di deformazione alla velocità di propagazione della cricca [3, 8, 12].

3. MATERIALE E METODOLOGIA

L'attività sperimentale è orientata all'analisi del comportamento statico e a fatica di giunzioni incollate a semplice sovrapposizione in materiale composito. I principali parametri che sono stati studiati sono l'influenza del lay-up, in termini di variazione dell'interfaccia aderendo-adesivo, la lunghezza di sovrapposizione e due diverse tipologie di finitura superficiale delle superfici da incollare.

Le giunzioni sono state realizzate incollando pannelli laminati a partire da un tessuto prepreg SEAL – TEXIPREG® CC206 - ET442 costituito da una resina epossidica tenacizzata CIBA 5021 rinforzata con un tessuto di fibra di carbonio T300 twill 2x2 con frazione di volume di fibre $V_f=60\%$. L'adesivo utilizzato è un bicomponente epossidico Scotch Weld 9323 B/A. Per variare l'interfaccia aderendo-adesivo, i pannelli sono stati realizzati con due lay-up diversi e precisamente $[0]_6$ e $[45/0_2]_s$. La variabilità dell'interfaccia è stata ottenuta anche considerando aderendi con presenza o meno di peel-ply. Nei casi in cui non è stato utilizzato il peel-ply, le superfici sono state preparate per l'incollaggio mediante abrasione con carteggiatura manuale; in entrambi i casi le zone di giunzione sono state sgrassate prima dell'incollaggio con metil-etil-ketone (MEK). Le lunghezze di sovrapposizione considerate sono state di 20, 30 e 40 mm mantenendo una larghezza dei campioni di 24 mm ed una lunghezza di 260 mm. Alle estremità della giunzione è stato realizzato uno smusso (fillet) per ridurre la criticità locale del campo di tensione [10] (Figura 1-A); per quantificare i suoi effetti benefici, sono state effettuate alcune prove comparative anche su geometrie non smussate (square-edge) (Figura 1-B).

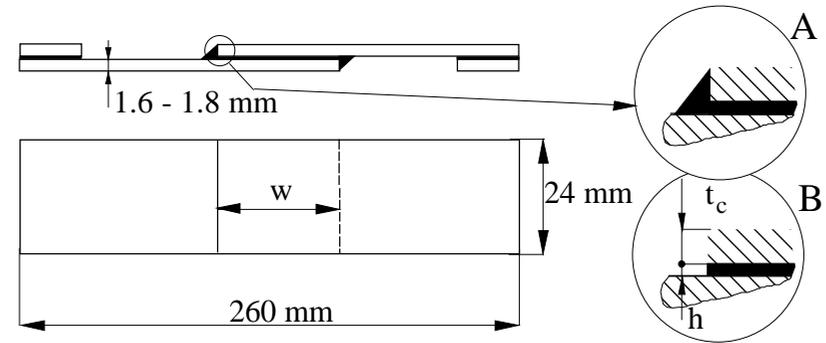


Figura 1 Geometria delle giunzioni

Le prove sono state eseguite su una macchina di prova servoidraulica MTS 809 con cella di carico 10/100 kN, operante in controllo di spostamento, per determinare le caratteristiche statiche del materiale, in controllo di forza per le prove di fatica.

In particolare, i test statici sono stati eseguiti applicando una rampa in controllo di spostamento con velocità della traversa pari a 2 mm/min, mentre, per quelli a fatica, si sono scelte due modalità distinte di prova: nella prima, finalizzata all'ottenimento del curve Wöhler le prove sono state eseguite in continuo fino alla rottura dei campioni; nella seconda, finalizzata allo studio dell'evoluzione del danneggiamento a fatica mediante osservazione al microscopio ottico, le prove sono state realizzate a blocchi di carico successivi fino a rottura, ad ampiezza di sollecitazione costante e al termine di ogni blocco di carico, uno dei bordi del campione, precedentemente lucidato, è stato osservato al microscopio ottico. I blocchi di carico sono stati scelti in base all'ampiezza di sollecitazione applicata e la relativa vita a fatica prevista.

Sia le prove in continuo sia quelle a blocchi di carico sono state realizzate in controllo di forza, scegliendo una forma d'onda sinusoidale ed una frequenza variabile da 10 a 15 Hz in funzione del lay-up e del livello di tensione applicato.

3.1 Preparazione dei provini

Per garantire le caratteristiche ottimali di resistenza dell'adesivo fornite dal produttore e riportate in Tabella 1, è necessario realizzare un particolare ciclo di curing (2 ore a 65A2 °C con una pressione di 0,1MPa), e assicurare uno spessore di incollaggio costante e pari a circa 150 µm. A tal fine sono state miscelate all'adesivo, nella percentuale dell'1% in peso, sfere di vetro del diametro di circa 150µm e i campioni sono stati stretti mediante opportune pinze assicurando così la pressione richiesta. Il ciclo termico è stato quindi realizzato in forno.

Tabella 1. Caratteristiche dell'adesivo Scotch Weld 9323 B/A

E [MPa]	G [MPa]	ν	$\tau^{(1)}$ [MPa]
2870	1070	0,37	39,6

¹⁾ il valore della tensione di rottura a taglio è relativa ad un ciclo termico di 2 ore a 65A2 °C con una pressione 0,1MPa ed è stata valutata dal produttore secondo AECMA EN 2243-1, utilizzando piastre di alluminio di 1,6 mm di spessore le cui superfici sono state trattate con il metodo FPL.

4. PROVE STATICHE

I valori ottenuti dalle prove statiche eseguite per ogni lay-up e lunghezza di sovrapposizione sono riassunti nella Tabella 2 e Tabella 3; nella prima sono riportate le caratteristiche statiche del materiale in assenza di zone di giunzione; nella seconda, la resistenza statica σ_{UTS} al variare della lunghezza di sovrapposizione, calcolata dividendo la forza di rottura statica misurata dalla macchina di prova per la sezione resistente di uno dei due aderendi, la tensione di rottura tangenziale media τ_{UTS} , ottenuta dividendo la forza di rottura statica per l'area della zona incollata.

I dati sono stati espressi in tensione normale $\sigma=F/(t_p*b)$ e tensione tangenziale sull'adesivo $\tau=F/(w*b)$ per poter avere un indice sia della capacità di carico delle giunzione sia delle caratteristiche dello strato di adesivo. Come indicato in Tabella 3, si è riscontrata normalmente la rottura degli aderendi e solo in due casi la rottura è avvenuta per cedimento a taglio dell'adesivo.

Tabella 2. Resistenza statica e proprietà elastiche dei laminati al variare del lay-up
(valori medi ottenuti da tre prove statiche per ogni configurazione)

Lay-up	σ_{UTS} [MPa]	c.o.v [%]
[0] ₆	655,6	5,15
[45/0 ₂] _s	533,7	2,46
Lay-up	ϵ_{UTS} [%]	c.o.v [%]
[0] ₆	1,46	3,81
[45/0 ₂] _s	1,41	2,79
Lay-up	E [MPa]	c.o.v [%]
[0] ₆	54331	1,92
[45/0 ₂] _s	44426	1,89

Per valutare l'effetto della presenza o meno del fillet sul comportamento della giunzione, sono state eseguite prove statiche di trazione per il lay-up [0]₆ e 40 mm di lunghezza di sovrapposizione: i valori medi ottenuti dalle prove su giunzioni senza fillet (definite square-edge) sono riportati ancora in Tabella 3.

Si può notare subito il notevole beneficio derivante dalla presenza del fillet che porta ad un aumento di resistenza statica di circa il

25%. Per le geometrie con fillet si nota come per entrambi i lay-up, vi sia un aumento della resistenza statica della giunzione all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione e che la riduzione delle caratteristiche statiche rispetto al corrispettivo materiale liscio sia minore per il lay-up $[45/0_2]_s$. Questo è giustificabile analizzando i campi di tensione locali: infatti, a parità di tensione esterna applicata, il campo per il lay-up $[45/0_2]_s$ è meno intenso in quanto minore è la differenza fra le caratteristiche elastiche di adesivo e aderenti rispetto al lay-up $[0]_6$.

Tabella 3. Resistenza statica al variare di lay-up e della lunghezza di sovrapposizione (valori medi ottenuti da tre prove statiche per ogni configurazione; superfici abrasi)

Lay-up	Overlap [mm]	σ_{UTS} [MPa]	c.o.v. [%]	τ_{UTS} [MPa]	c.o.v. [%]	Modalità di rottura ⁽³⁾
$[0]_6$ <i>S.E.</i> ⁽¹⁾	40	392,2	3,46	16,44	4,24	FG
	20	375,2	4,05	31,0	3,74	FG
	30	426,2	7,65	23,6	8,24	FG
$[0]_6$ <i>F</i> ⁽²⁾	40	491,3	1,05	20,3	0,61	FG
	20	322,9	20,6	25,8	20,58	A
	30	340,9	17,5	18,9	19,46	A
$[45/0_2]_s$ <i>F</i> ⁽²⁾	40	429,2	13,6	17,0	13,50	FG

¹⁾S.E.: square edge

²⁾F: con fillet

³⁾FG: rottura a filo giunzione; A: rottura nell'adesivo

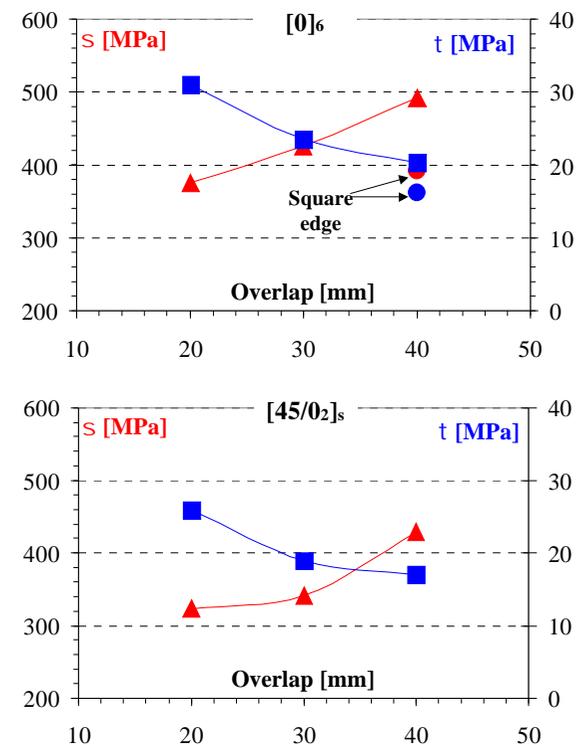


Figura 2. Confronto fra le caratteristiche statiche al variare del lay-up e della lunghezza di sovrapposizione (superfici abrasi)

Dai grafici di Figura 2 si può vedere come, all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione, varino le tensioni normali e tangenziali nella giunzione.

In Figura 3 vengono infine presentati i risultati relativi a prove di giunzioni $[0]_6$ realizzate con preparazioni superficiali diverse e si può notare come le variazioni di resistenza siano sostanzialmente limitate.

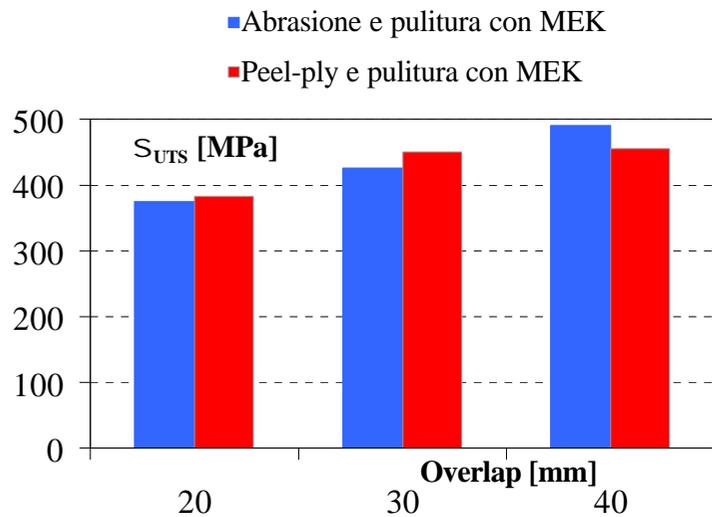


Figura 3. Confronto fra le caratteristiche statiche delle giunzioni $[0]_6$ per diverse preparazioni superficiali al variare della lunghezza di sovrapposizione

5. PROVE DI FATICA

Vengono ora riportati in Tabella 4 tutti i dati finora ottenuti dalla prove di fatica: i valori sono stati espressi in tensione normale $\sigma = F / (t_p * b)$ e tensione tangenziale sull'adesivo $\tau = F / (w * b)$ per poter avere un indice sia della capacità di carico delle giunzione sia delle caratteristiche dello strato di adesivo.

Tabella 4. Risultati dell'analisi statistica sui dati a fatica (resistenza a fatica valutata a $2 \cdot 10^6$ cicli)

Serie	n° dati	$\sigma_{\text{MAX-50\%PS}}$ [MPa]	k	T_σ	$\tau_{\text{MAX-50\%PS}}$ [MPa]
$[0]_6$ 40 mm <i>square edge</i>	5 (1 r.o.)	81,5	5,16	1,142	3,4
$[0]_6$ 20 mm <i>fillet</i>	12 (1 r.o.)	75,2	6,04	1,363	6,2
$[0]_6$ 30 mm <i>fillet</i>	11 (0 r.o.)	106,3	7,07	1,206	5,9
$[0]_6$ 40 mm <i>fillet</i>	12 (1 r.o.)	111,7	6,03	1,275	4,8
$[45/0_2]_s$ 30 mm <i>fillet</i>	10 (1 r.o.)	94,3	6,34	1,512	5,2

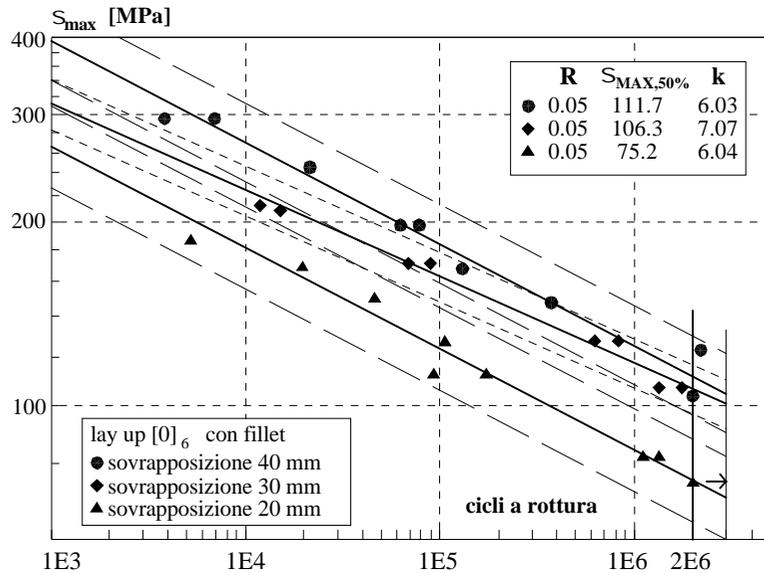


Figura 4. Dati di resistenza a fatica espressi in termini di tensioni normali massime

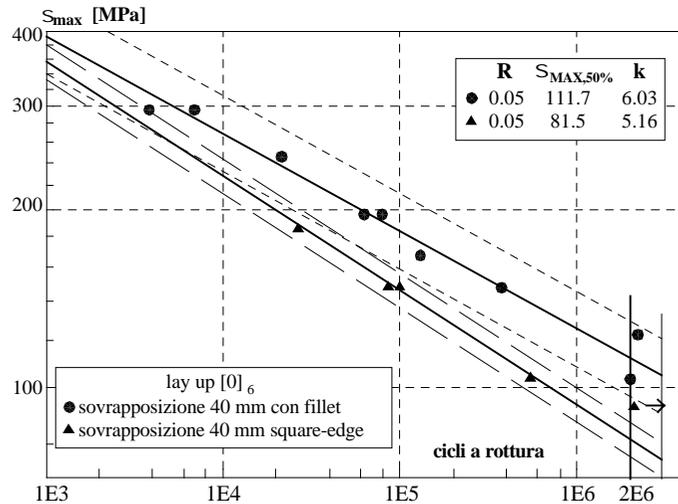


Figura 5. Dati di resistenza a fatica espressi in termini di tensioni

normali massime

I dati sono stati analizzati statisticamente nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura e per ciascuna serie è stato valutato il valore della tensioni massime di riferimento $\sigma_{MAX,50\%}$ e $\tau_{MAX,50\%}$ a $2 \cdot 10^6$ cicli, la pendenza inversa k della curva di Wöhler e la banda di dispersione associata, con probabilità di sopravvivenza 10-90% e un indice di confidenza 95%. I risultati dell'analisi statistica delle prove finora eseguite sono riassunti in Tabella 4, dove è riportato anche il parametro $T_\sigma = \sigma_{MAX,10\%} / \sigma_{MAX,90\%}$, rappresentativo della dispersione dei dati.

Per commentare alcuni dei principali risultati finora ottenuti, si riportano alcune curve di Wöhler. In Figura 4 è messo in evidenza l'effetto della lunghezza di sovrapposizione sulla resistenza a fatica della giunzione a parità di lay-up; dalle curve riportate in Figura 5, appare evidente l'effetto benefico della presenza del fillet anche sul comportamento a fatica.

Per valutare quantitativamente l'incremento di resistenza si può fare riferimento al rapporto di fatica ϕ , definito come rapporto fra la tensione massima σ_{MAX} calcolata a $2 \cdot 10^6$ cicli e la rispettiva tensione di rottura statica σ_{UTS} : si ottiene così che per i giunti square-edge $\phi=20,9\%$, per quelli con fillet, invece, $\phi=23,9\%$.

Osservando i dati riportati in Tabella 4 relativi ai lay-up $[0]_6$ e $[45/0_2]_s$ e lunghezza di sovrapposizione 30 mm, si nota come la resistenza a fatica del lay-up $[0]_6$ sia maggiore di quella del $[45/0_2]_s$. Occorre evidenziare, però, che la apparente ridotta resistenza di quest'ultimo lay-up è dovuta alla sua minore resistenza statica; se infatti si considera ancora il rapporto di fatica ϕ , si ottiene che per il lay-up $[0]_6$ $\phi=24,9\%$ e per il lay-up $[45/0_2]_s$ $\phi=27,7\%$ e quindi la riduzione della resistenza a fatica ad alto numero di cicli è minore per quest'ultimo lay-up, a conferma della minore criticità del suo campo di tensione.

6. ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO

Le prove per l'analisi dell'evoluzione del danneggiamento per fatica sono finalizzate alla definizione di un modello di previsione della vita a fatica di un giunto incollato a semplice sovrapposizione. È necessario quindi valutare l'opportunità di adottare un criterio per l'innescò, come proposto in [10], ed un modello per la successiva propagazione

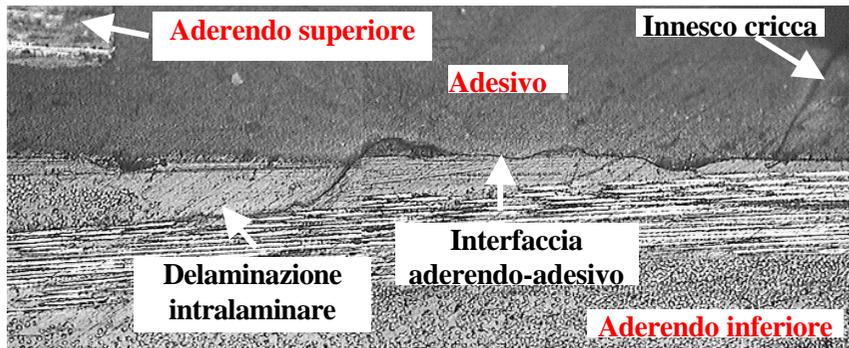


Figura 6. Danneggiamento a fatica della giunzione, sovrapposizione 30 mm, $\sigma_{\max}=40\% \sigma_{UTS}$

Nel caso in cui la percentuale di vita per l'innescò della cricca fosse trascurabile rispetto alla vita totale, come avviene per le giunzioni stampate [14], si potrebbe stimare la vita totale modellando solamente la fase di propagazione, sulla base di leggi di potenza [8], semplificando così il problema della previsione della resistenza a fatica dei giunti.

L'analisi microscopica ha consentito di individuare due modalità di danneggiamento a fatica dei giunti:

- innescò di una cricca inclinata a 45° all'interno dell'adesivo costituente il fillet e sua successiva propagazione: quest'ultima interessa in successione l'interfaccia aderendo-adesivo per poi entrare spesso in uno degli aderendi come delaminazione inter o intralaminare (Figura 6).

– innescò di una cricca in prossimità del punto in cui si ha singolarità del campo della tensione di peeling e sua propagazione all'interfaccia fra fillet e adesivo (Figura 7).

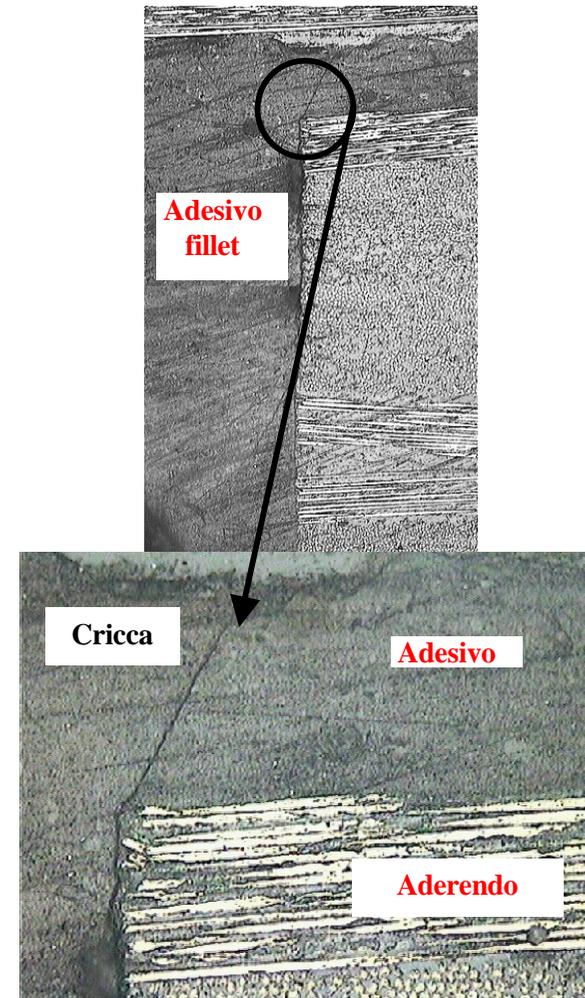


Figura 7. Innescò e propagazione di una cricca nella zona di massima tensione di peeling, sovrapposizione 20 mm, $\sigma_{\max}=35\% \sigma_{UTS}$

Si ritiene che quest'ultima modalità di danneggiamento sia favorita dalla procedura di incollaggio: la zona interessata, infatti, è di dimensioni ridotte e la geometria del fillet non è omogenea lungo la larghezza della giunzione e soprattutto verso i bordi del campione. La propagazione della cricca di fatto comporta una separazione del fillet dall'aderendo, riducendone o eliminandone completamente l'effetto benefico. Dalle prove finora eseguite si è visto come la frazione di vita a fatica spesa per la fase di innesco della cricca non sia mai inferiore al 25% circa e quindi appare necessario sviluppare un modello di previsione che tenga conto sia della fase di innesco sia della fase di propagazione.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati presentati e discussi i primi risultati di un'attività sperimentale volta a determinare il comportamento statico e a fatica di giunzioni incollate in materiale composito e ad analizzare le modalità di evoluzione del danneggiamento a fatica.

È stata riscontrata una sensibile influenza delle condizioni di interfaccia aderendo-adesivo, della lunghezza di sovrapposizione e della geometria delle estremità della giunzione sulla resistenza statica e quella a fatica delle giunzioni stesse.

L'innesco di una cricca all'estremità della giunzione la sua successiva propagazione è stato individuato essere il meccanismo che controlla il comportamento a fatica ad alto numero di cicli del giunto. Poiché la fase di innesco non è mai inferiore al 25% della vita a fatica, è necessario ipotizzare un modello previsionale che tenga conto di entrambe le fasi del danneggiamento.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto "Metodologie di progettazione a fatica di giunti in materiale composito" (MURST-2001)

BIBLIOGRAFIA

- [1] Davis M., Bond D., "Principles and practice of adhesive bonded structural joints and repairs", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, vol.19, pp.91-105.
- [2] Quaresimin M., Meneghetti G. and Verardo F., "Design and optimisation of a RTM composite bicycle crank", *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 2001, vol. 20, pp.129-146.
- [3] Kinloch A.J., Osiyemi S.O., "Predicting the Fatigue Life of Adhesively-Bonded Joints", *Journal of Adhesion*, 1993, vol. 43, pp.79-90.
- [4] Nayeb-Hashemi H., Rossettos J.N., Melo A.P., "Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1997, vol.17, pp.55-63.
- [5] Ishii K., Imanaka M., Nakayama H., Kodama H., "Fatigue failure criterion of adhesively bonded CFRP/metal joints under multiaxial stress conditions", *Composites Part A*, 1998, vol. 29A, pp. 415-422.
- [6] Lefebvre D.R. e Dillard D.A., "A stress singularity approach for the prediction of fatigue crack initiation in adhesive bonds. Part I: theory", *Journal of Adhesion*, 1999, vol. 70, pp. 119-138.
- [7] Ishii K., Imanaka M., Nakayama H., Kodama H., "Evaluation of the fatigue strength of adhesively bonded CFRP/metal single and single-step double-lap joints", *Composite Science and Technology* 1999, vol.59 pp. 1675-1683.
- [8] Curley A. J., Hadavinia H., Kinloch A. J., Taylor A. C., "Predicting the service-life of adhesively-bonded joints", *International Journal of Fracture*, 2000, vol.103, pp.41-69.

- [9] Krueger R., Paris I.L., O'Brien T.K., "Fatigue Life Methodology for Bonded Composite Skin/Stringer Configurations", In Proc. of the 15th ASC Technical Conference (2000) pp. 729-736, Technomic Publishing, ISBN 1-58716-053-6.
- [10] Lazzarin P., Quaresimin M., Ferro P., "A two-term stress function approach to evaluate stress distributions in bonded joints of different geometries", *Journal of Strain Analysis*, 2002, vol. 37, pp.385-398
- [11] Mortensen F., Thomsen O.T., "Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach", *Composites Science and Technology*, 2002, vol. 62, pp.1011 –1031.
- [12] Abdel Wahab M.M., Ashcroft I.A., Crocombe A.D., Smith P.A., "Numerical prediction of fatigue crack propagation lifetime in adhesively bonded structures", *International Journal of Fatigue*, 2002, vol.24, pp.705-709.
- [13] De Goeij W.C., van Tooren M.J.L., Beukers A., "Composite adhesive joints under cyclic loading", *Materials and design*, 1999, vol.20, pp.213-221.
- [14] Cristanini, S., Quaresimin, M., Ricotta, M. "Analisi del comportamento statico e a fatica di giunzioni stampate in materiale composito", *Atti del XXXII Convegno Nazionale AIAS*, Salerno, 3-6 Settembre 2003.
- [15] Renton W.J., Vinson J.R. Fatigue behavior of bonded joints in composite material structures, *Journal of Aircraft*, 1974, vol. 12, pp. 442-447.
- [16] Krause A. R., Holubka J. W., Chun W., The effect of adhesive chemistry on the fatigue resistance of adhesive bonds in service environment, *Advanced Composites: The Latest Developments*, Proc. of the 2nd Conference (1986), pp. 193-201.
- [17] Okuda S., Nishina S., Watanabe T., On Fatigue behaviours of bonded joints of FRP, Proc. of the 30th Japan Congress on Material Research (1987), pp. 253-256.
- [18] Reedy Jr. E. D., Guess T.R., Composite-to-metal tubular lap joints: strength and fatigue resistance, *International Journal of Fracture*, 1993, vol.63, pp. 351-367.
- [19] Kim H.S., Lee S.J., Lee D. G., Development of a strength model for the cocured stepped lap joints under tensile loading, *Composite Structures*, 1995, vol.32, pp.593-600
- [20] Knox E.M., Bowling M.J., Haschim S.A., Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes, *International journal of fatigue*, 2000, vol.20, 513-519.
- [21] Briskham P., Smith G., Cyclic stress durability testing of lap shear joints exposed to hot-wet conditions, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2000, vol. 20, pp. 33-38.
- [22] Ashcroft I.A., Abdel Wahab M.M., Crocombe A.D., Hughes D.J., Shaw S.J., The effect of environment on the fatigue of bonded composite joints. Part 1: testing and fractography, *Composites: Part A*, 2001, vol. 32, pp.59-69.
- [23] Potter K.D., Guild F.J., Harvey H.J., Wisnom M.R., Adams R.D., Understanding and control of adhesive crack propagation in bonded joints between carbon fibre composite adherends I. Experimental, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2001, vol. 21, pp.435–443.
- [24] Aymerich F., Priolo P., Fatigue behaviour of cocured stitched joints in composite material, Proc. of XXXI AIAS National conference, September 2002, Parma - Italy, (in Italian).
- [25] Ferreira J.A.M., Reis P.N., Costa J.D.M., Richardson M.O.W., Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints", *Composites Science and Technology*, 2002, vol. 62, pp. 1373-1379.