

# ANALISI STATICA E A FATICA DI GIUNZIONI IBRIDE CO-CURED METALLO-COMPOSITO A SEMPLICE E A DOPPIA SOVRAPPOSIZIONE

R. Paolotti, D. Scibetta, D. Tumino, B. Zuccarello

Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze  
90128 – Palermo, Italy

E-mail: [zuccarello@dima.unipa.it](mailto:zuccarello@dima.unipa.it)

## SOMMARIO

Obiettivo di questo studio è l'analisi delle giunzioni ibride metallo-composito realizzate con la tecnica co-cured, cioè incollando i materiali con la stessa resina adoperata per la manifattura del laminato composito. E' stata studiata in particolare la giunzione fra alluminio e composito in fibra di vetro (Al/GFRP), accoppiamento che trova applicazioni in svariati ambiti del settore dei trasporti navali e terrestri. Sono stati analizzati giunti a semplice sovrapposizione (Single Lap Joint) e a doppia sovrapposizione (Double Lap Joint) sottoposti a carichi statici e di fatica. Tramite analisi numeriche FEM nonché prove sperimentali eseguite variando la lunghezza di sovrapposizione del giunto, si è indagato sul criterio più attendibile di previsione della rottura statica e del comportamento a fatica di tali giunzioni.

## 1. INTRODUZIONE

L'incollaggio, nella sua concezione più tradizionale, prevede l'utilizzo di un adesivo da interporre tra le due parti da unire dopo che queste sono state opportunamente preparate. Nel caso in cui almeno uno degli aderenti sia in materiale composito, a questa tecnica di giunzione tradizionale, nota con il termine anglosassone *adhesive bonding*, se ne può aggiungere una seconda, più recente, che dà luogo ai cosiddetti giunti *co-cured*. Nei giunti co-cured la resina del composito non ancora curato funge essa stessa da adesivo. Con questa tecnica, la cura del composito e della giunzione non avvengono più in due fasi separate bensì simultaneamente (co-cured).

La tecnica del co-curing ha il vantaggio di non richiedere il trattamento superficiale del composito in quanto di fatto non esiste più un'interfaccia netta adesivo/composito. Lo strato di resina rilasciato durante la cura ha uno spessore dell'ordine di 10 $\mu$ m cioè un ordine di grandezza più piccolo dello spessore minimo ottenibile con la tecnica dell'incollaggio tradizionale con adesivo.

La nuova tecnica è nata e si è sviluppata in campo aeronautico dove le giunzioni ibride metallo/composito sono sempre più frequenti.

Alcuni autori hanno studiato il giunto co-cured come un giunto incollato classicamente mediante adesivo, per il quale però l'adesivo è rappresentato dalla resina in eccesso estratta dal materiale composito durante la polimerizzazione. Tale approccio semplifica il progetto e l'analisi dei giunti co-cured (Shin et al., 2000) [1].

Giunti co-cured utilizzati nella unione pannello-longheroni compositi di un'ala di aeroplano sono stati investigati sia numericamente che sperimentalmente da Cope and Pipes (1982) [2], al fine di ottimizzarne la resistenza fuori dal piano. Un'analisi agli elementi finiti di tali giunti è stata condotta al fine di prevedere la resistenza del giunto attraverso l'applicazione dei

criteri di resistenza di Tsai-Wu, della massima tensione normale e della massima tensione di taglio [3].

Uno studio sistematico su giunti co-cured composito-composito è stato condotto nel 1995 da Kim H.S. et al. [4] i quali hanno realizzato e testato a trazione giunti co-cured a semplice sovrapposizione a gradino analizzando l'influenza della lunghezza di sovrapposizione del gradino sulla resistenza statica e a fatica di tali giunti; è mostrato come la resistenza di tali giunti aumenta all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione, così come avviene per il giunto incollato classico.

Vari lavori su giunzioni co-cured ibride, formate da un aderendo composito e un aderendo metallico, sono state condotte recentemente da vari ricercatori. Nell'accoppiamento metallo-composito, particolare importanza deve essere prestata alla preparazione superficiale dell'aderendo metallico. Lawcock G. et al. (1997) [5] hanno investigato sull'influenza del trattamento superficiale dell'alluminio in laminati metallo-CFRP. Essi hanno modificato una procedura classica di trattamento superficiale e hanno testato dei provini DCB ottenendo una resistenza alla rottura all'interfaccia (interfacial fracture toughness) sei volte maggiore. Lee S.W. et al. nel 1997 [6] hanno investigato su giunti tubolari a semplice sovrapposizione acciaio-composito sottoposti a carico torsionale o assiale. Essi hanno studiato sia sperimentalmente che numericamente le caratteristiche torsionali di tali giunti confrontandole con quelle dei giunti incollati convenzionali. Inoltre, sono stati studiati in dettaglio alcuni parametri caratteristici del giunto quali la rugosità superficiale dell'aderendo metallico, la lunghezza di sovrapposizione degli aderendi e la sequenza di impacchettamento delle lamine dell'aderendo composito, mostrando che sia la resistenza statica che a fatica di tali giunti co-cured è maggiore di quella dei giunti tubolari convenzionali incollati mediante adesivo.

Altri studi riguardanti la capacità portante di giunti metallo-composito a singola e doppia sovrapposizione sottoposti a carico di trazione sono stati compiuti da Shin et al nel 2000 [7] che hanno testato sperimentalmente la resistenza a taglio di giunti co-cured acciaio-composito a singola sovrapposizione sottoposti a carico di trazione; tali prove sono state condotte al variare di diversi parametri caratteristici quali lunghezza di sovrapposizione, rugosità superficiale e sequenza di impacchettamento delle lamine dell'aderendo composito, definendo e classificando così quattro modalità di rottura:

- rottura adesiva (all'interfaccia tra l'aderendo di acciaio e il sottile strato di resina);
- rottura per delaminazione (tra le lamine dell'aderendo composito);
- rottura coesiva (nel sottile strato di resina all'interfaccia o nella prima lamina dell'aderendo composito);
- rottura a trazione dell'aderendo.

Tra queste modalità di rottura (escludendo la rottura dell'aderendo), quella a cui compete la maggiore capacità portante del giunto è quella coesiva. Il verificarsi di questa modalità di cedimento significa assenza di problemi/difetti nella preparazione della superficie di incollaggio dell'aderendo metallico e/o nella procedura di incollaggio.

Shin e Lee J.J. (2000) [8], facendo uso del metodo degli elementi finiti, hanno eseguito una analisi dello stato tensionale che si ha all'interfaccia tra gli aderendi di un giunto co-cured a singola sovrapposizione ed a doppia sovrapposizione soggetti a carico di trazione, considerando anche le tensioni residue termiche risultanti dal processo di cura. L'analisi dello stato tensionale ha permesso in questo caso di stabilire che per i giunti a semplice sovrapposizione le tensioni normali (*peeling stresses*) e di taglio all'interfaccia tra gli aderendi sono la principale causa di rotture all'interfaccia. Per quanto riguarda i giunti a doppia sovrapposizione, invece, è stato mostrato come il meccanismo di rottura tipico sia quello coesivo per rottura e delaminazione della prima lamina dell'aderendo composito. Inoltre l'analisi dello stato tensionale ha permesso di evidenziare che nei giunti a doppia sovrapposizione è la tensione di taglio a giocare un ruolo primario nella rottura di tipo coesivo di giunti co-cured acciaio-composito.

Nel 2002 Shin e Lee J.J. [9] hanno studiato sperimentalmente la resistenza a fatica di giunti co-cured acciaio-composito a singola sovrapposizione al variare della rugosità superficiale dell'aderendo metallico e dell'angolo di impacchettamento delle lamine dell'aderendo composito. L'analisi a fatica ha dimostrato che il giunto con aderendo composito con lamine a  $[\pm 45^\circ]$  ha in generale un miglior comportamento a fatica rispetto ad un giunto con aderendo in composito unidirezionale. Secondo questi autori, buoni metodi di previsione analitica della resistenza sono il criterio di resistenza di Ye [10] per il giunto a semplice sovrapposizione e il criterio di Tsai-Wu per quello a doppia sovrapposizione. In [11] gli stessi autori hanno investigato ulteriormente sulla vita a fatica di giunti co-cured a semplice e doppia sovrapposizione acciaio-CFRP, al variare di alcuni tra i principali parametri caratteristici. Considerando per singola e doppia sovrapposizione gli stessi lay-up e rugosità già considerati. L'analisi di fatica ha dimostrato che, per entrambi le configurazioni (singola e doppia sovrapposizione), tranne che per alti livelli di carico, il miglior comportamento a fatica è esibito dal giunto con aderendo composito  $[\pm 45^\circ]$ .

Un altro interessante lavoro sui giunti co-cured ibridi a doppia sovrapposizione è stato presentato da Park et al. nel 2006 [12], che hanno investigato sperimentalmente sulla resistenza statica e a fatica di giunti alluminio-CFRP al variare di alcuni dei principali parametri caratteristici del giunto quali la sequenza di impacchettamento delle lamine dell'aderendo composito e lo spessore dell'aderendo composito. I risultati di tali analisi hanno mostrato che al variare della sequenza di impacchettamento delle lamine del composito il valore ottimale del rapporto tra le rigidezze di composito e alluminio cui compete la massima resistenza statica e a fatica è 3.

Nel presente lavoro vengono esposti i risultati numerici e sperimentali di una analisi statica e a fatica di giunti co-cured Al/GFRP a semplice e a doppia sovrapposizione realizzati con la semplice tecnica dell'hand lay-up. In particolare si è studiata l'influenza della lunghezza di sovrapposizione sul carico di inizio rottura. È stata messa a punto una procedura numerica basata sul criterio di delaminazione di Ye per prevedere l'innescò della rottura. Le prove di fatica hanno permesso di analizzare il processo di danneggiamento cui sono sottoposti tali giunti con un carico applicato ciclicamente.

## 2. PREPARAZIONE DEI GIUNTI ANALIZZATI

Nei giunti studiati, l'aderendo metallico è costituito da alluminio 2024, mentre l'aderendo composito è costituito da un laminato unidirezionale ottenuto con tecnica *hand lay-up* utilizzando fibra di vetro tipo E da  $320 \text{ g/m}^2$  e resina epossidica. È stata eseguita una cura a temperatura controllata di  $24^\circ\text{C}$  e 30% di umidità, lasciando i provini in queste condizioni per circa 48 ore. Le caratteristiche dei due materiali sono state preliminarmente ottenute mediante prove di trazione, eseguite secondo le norme ASTM. Da tali prove si sono ricavate le caratteristiche elastiche riportate nelle tabelle 1 e 2.

**Tabella 1:** Caratteristiche elastiche dell'alluminio dei giunti

<b>Materiale</b>	<b>E</b> [GPa]	<b><math>\nu</math></b> [GPa]
Alluminio	72	0.29

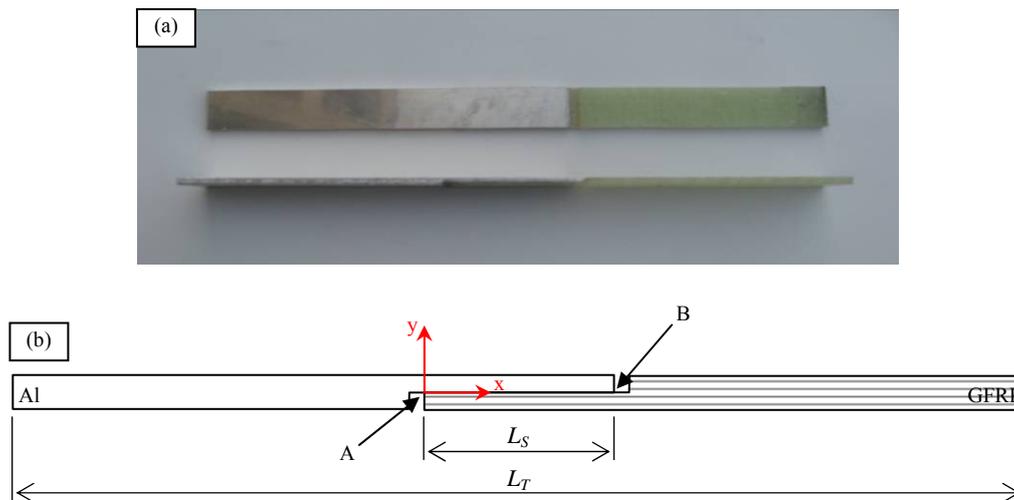
**Tabella 2:** Caratteristiche elastiche della vetroresina dei giunti

<b>Materiale</b>	$E_{11}$	$E_{22}=E_{33}$	$\nu_{12}=\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}=G_{13}$	$G_{23}$
	[GPa]	[GPa]			[GPa]	[GPa]
Vetroresina	25	4.6	0.32	0.38	1.3	1.1

In dettaglio, i giunti sono stati ottenuti laminando il composito direttamente sull'aderendo in alluminio e sottoponendo il giunto così ottenuto al processo di cura precedentemente descritto.

### 2.1. Single Lap Joint (SLJ)

Sono stati realizzati provini di giunti alluminio-GFRP, aventi larghezza di 25 mm e spessore di ciascun aderendo di 2 mm (fig.1a). Al fine di limitare gli effetti flessionali, al di là della zona di sovrapposizione lo spessore degli aderendi è stato appositamente raddoppiato (4 mm – vedi fig.1b). Per l'alluminio, ciò è stato ottenuto mediante lavorazione alle macchine utensili, mentre per il composito ciò è stato ottenuto riducendo il numero delle lamine. La superficie dell'alluminio è stata preliminarmente preparata con carta abrasiva e pulita con sgrassatore. Per ottenere delle estremità del giunto non rastremate, in corrispondenza dei punti di attacco degli aderendi sono state inserite, in fase di laminazione, delle bacchette di balsa successivamente rimosse a cura ultimata.

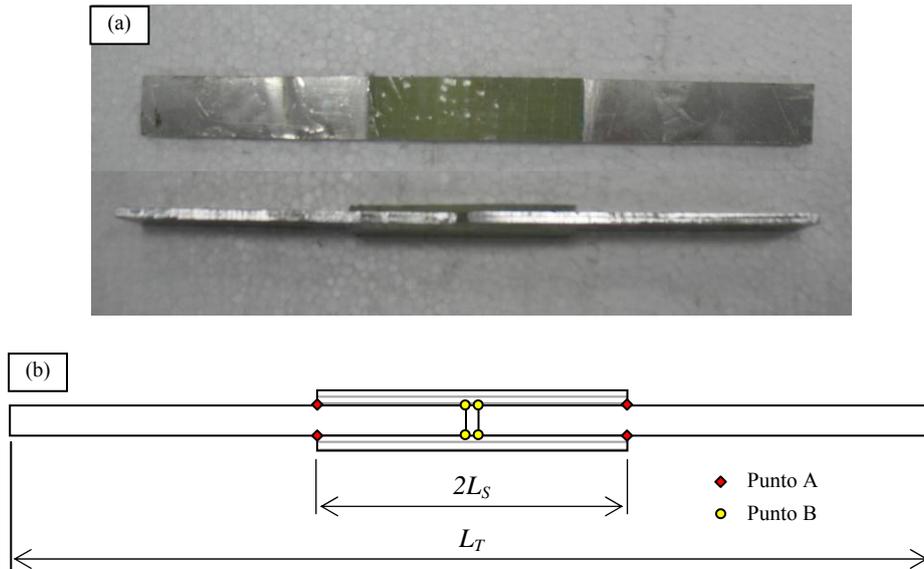


**Figura 1.** Provino single lap joint usato nelle prove sperimentali.

Al fine di valutare l'influenza della lunghezza di sovrapposizione, le prove, in accordo con la norma ASTM D3165, sono state eseguite con provini aventi lunghezze  $L_s = 20, 30, 40, 60, 80$  e 100 mm (figura 1b).

### 2.2. Double Lap Joint (DLJ)

Anche per la configurazione Double Lap sono stati utilizzati provini con larghezza di 25 mm (figura 2), con aderendi non rastremati (spessore di 4 mm e 2 mm per alluminio e composito rispettivamente). La procedura di manifattura del DLJ è analoga a quella descritta per il SLJ.



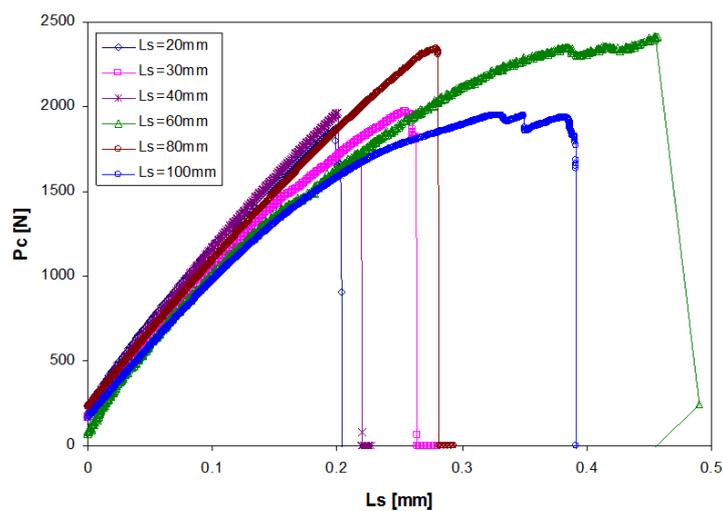
**Figura 2:** *Provino per le prove di double lap joint.*

### 3. PROVE SPERIMENTALI

Le prove statiche sono state eseguite con una macchina di prova elettromeccanica Instron, dotata di una cella di carico da 30 KN. Tutti i test sono stati condotti in controllo di spostamento, con una velocità pari a 0.1 mm/min. Tale velocità è risultata adeguata per riuscire a rilevare il punto da cui inizia il danneggiamento della giunzione. Per ogni lunghezza di sovrapposizione sono stati testati 5 provini.

#### 3.1. Single Lap Joint

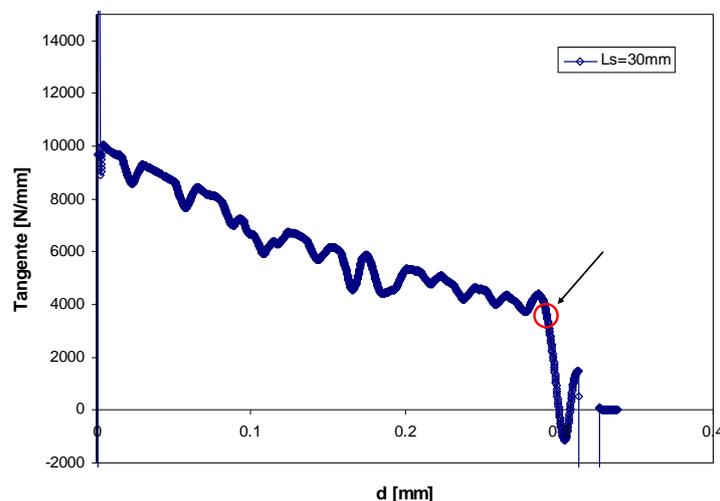
Nella figura 3 sono mostrati i diagrammi carico-spostamento relativi ognuno ad un provino rappresentativo di una fissata lunghezza di sovrapposizione (lo spostamento rappresentato è quello della traversa della macchina di prova).



**Figura 3.** *Diagrammi carico-spostamento per i giunti SLJ analizzati.*

Per quasi tutti i valori di  $L_s$  si nota che il carico cresce in maniera pressoché lineare fino ad un valore massimo, in corrispondenza del quale inizia il processo di rottura dell'interfaccia alluminio-GFRP. Da questo momento in poi si assiste in alcuni casi ad un drop-down improvviso seguito da una successiva ripresa del carico fino a rottura finale, in altri casi invece, l'interfaccia cede di schianto. Si nota sempre che la rottura è di tipo adesivo, cioè avviene all'interfaccia metallo-resina. In particolare, durante le prove si è osservato anche che il punto da cui comincia a propagare il debonding non è lo stesso per tutte le lunghezze di sovrapposizione. L'innescò della frattura è stato osservato mediante l'uso di vernici fragili applicate al bordo laterale del provino e sfruttando la naturale trasparenza delle fibre di vetro che consente di giudicare se, a causa del debonding, si interpone aria tra le superfici incollate. Si è osservato che per lunghezze di sovrapposizione  $L_s < 60\text{mm}$ , la cricca nasce, prevalentemente, in corrispondenza del punto A di attacco dell'aderendo metallico e si propaga fino alla rottura del giunto; per lunghezze di sovrapposizione  $L_s > 60\text{mm}$ , il comportamento si inverte ed è il punto B di attacco dell'aderendo composito, quello da cui inizia a propagare la cricca. Per la lunghezza  $L_s = 60$  sono state osservate cricche propagare da A e da B.

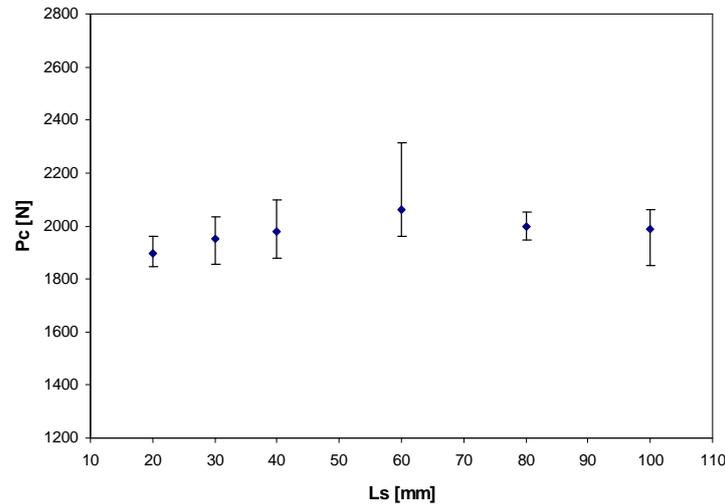
Per determinare il valore del carico di rottura del giunto, inteso come il carico in cui si forma la cricca, sono state seguite due vie: la prima è quella già accennata di osservare i due punti A e B durante il caricamento monotono e annotare il carico nell'istante in cui si distingue la formazione di un difetto nella giunzione, la seconda è quella di plottare la rigidità del giunto, ovvero la tangente ai diagrammi carico-spostamento. Come si osserva nella figura 4 dove è riportata la tangente al diagramma di carico di un provino con  $L_s = 30\text{mm}$ , a parte le irregolarità tipiche di un processo di derivazione numerica, il diagramma è piuttosto regolare fino ad uno spostamento  $d = 0.293$  mm (punto cerchiato) dove si ha una brusca variazione della tangente. Tale istante identifica il carico in corrispondenza del quale si innesca la cricca. Le due procedure, visiva e numerica hanno dato risultati tra loro coerenti.



**Figura 4.** Tangente al diagramma carico-spostamento per il giunto SLJ.

I carichi di rottura così individuati sono diagrammati in figura 5 per le diverse lunghezze  $L_s$  analizzate. Contrariamente a quanto solitamente rilevato in tradizionali giunti incollati a semplice sovrapposizione, si nota che il carico di rottura  $P_c$  non ha andamento monotono crescente con la lunghezza di sovrapposizione. In particolare  $P_c$  aumenta da  $L_s = 20$  mm fino a  $L_s = 60$  mm, cioè nella zona in cui il fenomeno è dominato dalla rottura a partire dal punto A.

Da  $L_s=60\text{mm}$  in poi, zona dominata dalla rottura a partire da B, il carico  $P_c$  decresce. Sebbene nel range analizzato le variazioni risultano relativamente limitate (circa 10% del valore medio), si osserva come la resistenza di tali giunti aumenta con la lunghezza di sovrapposizione sino a  $L_s=60\text{ mm}$ , cioè sino a valori del rapporto caratteristico  $L_s/t$  pari a circa 30; oltre tale valore si assiste ad una lieve riduzione della resistenza che praticamente si stabilizza per valori  $L_s/t$  superiori a 50. Oltre tale valore, una ulteriore crescita della lunghezza di sovrapposizione non dà luogo ad apprezzabili variazioni della resistenza.



**Figura 5.** Carichi di rottura dei giunti SLJ analizzati.

### 3.2. Double Lap Joint

La configurazione double lap joint (DLJ) è stata studiata sperimentalmente sotto carichi statici e di fatica. Seguendo una procedura analoga a quanto visto per i single lap joint, per le lunghezze di sovrapposizione analizzate, sono stati determinati sperimentalmente i carichi in corrispondenza dei quali inizia a danneggiarsi la giunzione. Tali carichi sono riportati in tabella 3.

**Tabella 3:** Carichi di rottura dei provini DLJ

Lunghezza $L_s$	Carico $P_c$
[mm]	[N]
30	8910
40	8980

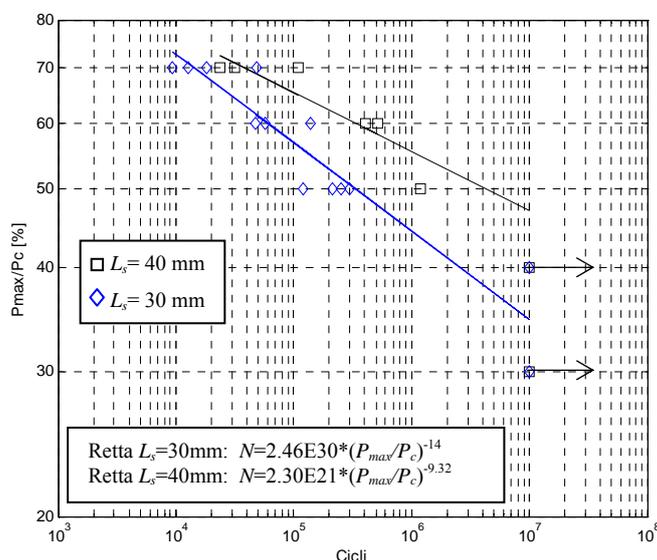
La tabella mostra come, per le lunghezze analizzate, il carico tende a crescere con la lunghezza stessa. Inoltre, il confronto con i carichi di rottura della configurazione SLJ mostra che a parità di ogni altra condizione il giunto DLJ presenta una efficienza superiore al doppio di quella del SLJ.

I test di fatica sono stati condotti con provini degli stessi lotti di produzione di quelli usati per le prove statiche. Per ogni lunghezza di sovrapposizione sono state condotte prove a diversi livelli di carico, da  $P_{max}/P_c=0.3$  a  $P_{max}/P_c=0.7$ . Si è assunto un diagramma di carico di tipo pulsante con rapporto  $P_{min}/P_{max}=0.1$ .

Per le prove di fatica è stata adoperata una macchina servoidraulica MTS dotata di una cella di carico da 100 KN. Tutti i test sono stati fatti in controllo di carico. I provini, nella zona della sovrapposizione, sono stati verniciati con vernice fragile e sono stati spruzzati con liquidi penetranti per visualizzare la formazione e la propagazione della cricca. Similmente al caso statico, anche nelle prove di fatica si è constatato che il punto in cui si manifesta per primo il cedimento dell'adesione fra gli aderendi è il punto B. Da lì il difetto si propaga progressivamente indebolendo la giunzione fino alla rottura definitiva.

In figura 6 è mostrato il diagramma di fatica relativo alle lunghezze di sovrapposizione 30 e 40 mm.

Dalle prove di fatica si è notato che la rottura dei provini avviene entro  $10^7$  cicli solo con valori del carico massimo  $P_{max}$  superiori al 40% del carico di rottura statico  $P_c$ . Come prevedibile, al decrescere del carico aumenta il numero di cicli a rottura. Il valore del 40% del carico statico può costituire quindi un valore di soglia, al di sotto del quale non si assiste ad alcuna nascita e propagazione del difetto nell'incollaggio. In altre parole, per tali giunti si può assumere un "rapporto di fatica" caratteristico pari a 0.4.



**Figura 6.** Diagramma di fatica per il DLJ con  $L_s=30$  e  $40$ mm

Dalla analisi dei risultati riportati in figura 6 si osserva, come già rilevato nel caso statico, che i risultati relativi alle due lunghezze di sovrapposizione analizzate sono molto prossimi e l'analisi di diverse lunghezze di sovrapposizione è necessaria al fine di indagare sugli effetti di tale parametro sulla resistenza a fatica di tali giunzioni. E' possibile comunque affermare che per livelli di carico superiori a  $0.4P_c$ , il comportamento a fatica è descritto in modo sufficientemente accurato da relazioni del tipo  $N=a(P_{max}/P_c)^{-b}$ .

#### 4. ANALISI NUMERICHE

Al fine di comprendere meglio i risultati sperimentali nonché mettere a punto un criterio di previsione della resistenza statica dei giunti analizzati, sono state eseguite analisi numeriche con il codice di calcolo ANSYS® modellando i provini con le diverse lunghezze di sovrapposizione nelle ipotesi esemplificative di Stato Piano di Deformazione (SPD). I modelli sono stati discretizzati con elementi piani quadrangolari ricorrendo a infittimenti locali

progressivi in corrispondenza dei punti A e B, in modo da avere una buona precisione sul calcolo delle tensioni nell'intorno dei punti di singolarità.

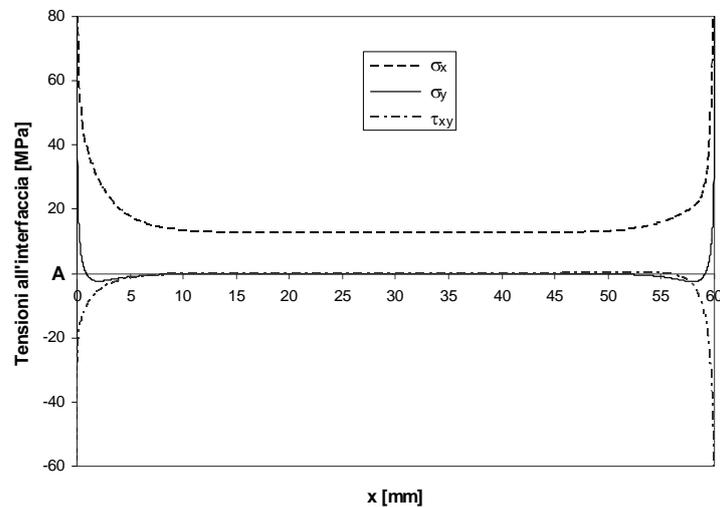
A titolo di esempio, in figura 7 è riportato l'andamento delle tensioni normali e di taglio all'interfaccia composito-metallo, per  $L_s=60\text{mm}$ . Si nota che la differenza fra le caratteristiche elastiche dei due materiali accoppiati provoca una diversa distribuzione delle tensioni nei punti A e B (gradienti maggiori si rilevano nel punto B per la tensione tangenziale  $\tau_{xy}$  e per quella di trazione  $\sigma_x$ ).

Le distribuzioni delle tre componenti di tensione in prossimità dei due punti singolari A e B, insieme ai dati sperimentali relativi al carico di rottura, ha permesso di verificare che la resistenza statica di tali giunti può essere prevista in modo sufficientemente accurato dall'uso del criterio di delaminazione di Ye [10] applicato a entrambi i punti A e B, in associazione con l'*average stress criterion* [13], largamente utilizzato per la previsione della resistenza dei materiali compositi in presenza di elevati effetti di intaglio. In sintesi, la condizione di rottura dei giunti analizzati può essere descritta dalla relazione:

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_y}{S_y}\right)_i^2 + \left(\frac{\bar{\tau}_{xy}}{S_{xy}}\right)_i^2 = 1 \quad (i = A, B) \quad (1)$$

dove:

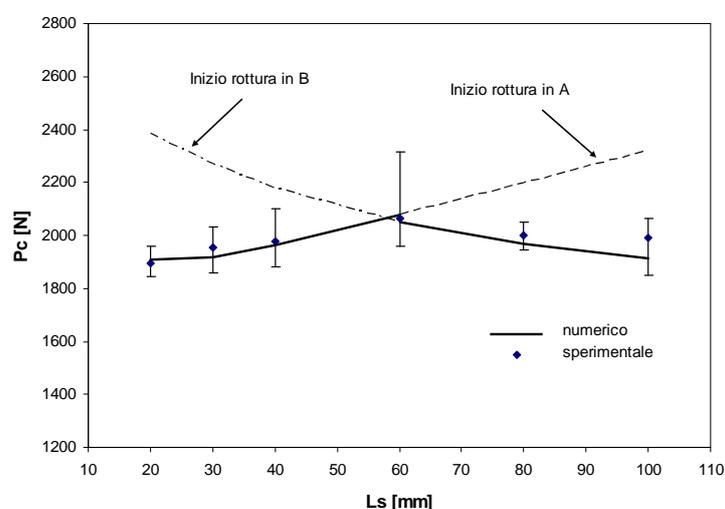
$\bar{\sigma}_y$  e  $\bar{\tau}_{xy}$  sono le tensioni medie valutate nel segmento di dimensioni  $c_i$  ( $i=A,B$ ), misurato a partire dal corrispondente punto di singolarità;  $S_y$  e  $S_{xy}$  sono le tensioni di rottura dell'interfaccia sotto sollecitazione di trazione semplice e taglio puro rispettivamente. Nel presente lavoro tali dati ( $S_y = 40\text{MPa}$ ,  $S_{xy} = 160\text{MPa}$ ) sono stati ricavati dalla letteratura [11].



**Figura 7.** Andamento delle tensioni all'interfaccia nel provino SLJ con  $L_s=60\text{mm}$ .

Nel dettaglio le due lunghezze caratteristiche  $c_i$  sono state preliminarmente determinate considerando il giunto avente  $L_s=60\text{ mm}$ , caratterizzato da rottura pressoché contemporanea dei punti A e B. Utilizzando le (1) nonché le distribuzioni delle tensioni (fig.7) fornite dalle analisi numeriche per un carico applicato pari al carico di rottura rilevato sperimentalmente (2064 N), si è ottenuto  $c_A = 0.16\text{ mm}$ ,  $c_B = 0.17\text{ mm}$ .

In figura 8 è riportato l'andamento del carico di rottura previsto dal criterio di Ye, insieme ai dati sperimentali.



**Figura 8.** Giunto SLJ Al-GFRP: previsioni del carico di rottura fornite dal criterio di Ye (linea continua) e risultati sperimentali.

Si osserva come, in ottimo accordo con i dati sperimentali, il criterio di Ye preveda al variare della lunghezza di sovrapposizione, un andamento monotono crescente del carico di rottura per il punto A, un andamento monotono decrescente per il punto B. Evidentemente il dominio di resistenza è individuato dall'involuppo inferiore delle due curve: si osserva un massimo del carico di rottura in corrispondenza di  $L_S=60$  mm, sebbene l'andamento asintotico della curva relativa al punto B indica limitate diminuzioni del carico al crescere della lunghezza di sovrapposizione oltre il valore critico  $L_S=60$  mm.

Come è facile aspettarsi sulla base delle osservazioni fatte circa il meccanismo di danneggiamento (rottura adesiva), altri criteri, come il criterio di Tsai-Wu [9] utilizzato in letteratura per la previsione della rottura di altri giunti co-cured, non risulta applicabile ai giunti studiati.

Ulteriori prove sperimentali per la caratterizzazione a fatica dei giunti SLJ e dei giunti DLJ e correlate simulazioni numeriche sono tuttora in corso e i risultati saranno presentati in una successiva memoria.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro, mediante analisi sperimentali e simulazioni numeriche FEM, è stato studiato il comportamento statico e a fatica di giunzioni bimateriali co-cured alluminio-GFRP a singola e doppia sovrapposizione.

Per i giunti a singola sovrapposizione si è studiato, in particolare, l'effetto della lunghezza di sovrapposizione  $L_S$  sulla resistenza meccanica sotto sollecitazione di trazione semplice. L'analisi sperimentale ha mostrato che il cedimento di tale giunto avviene sempre per rottura adesiva, cioè per rottura dell'interfaccia alluminio-resina. In particolare, la cricca si propaga dal punto di attacco dell'aderendo metallico o dal punto di attacco dell'aderendo in composito, in funzione della lunghezza di sovrapposizione  $L_S$  ovvero del rapporto caratteristico  $L_S/t$ , essendo  $t$  lo spessore dell'aderendo metallico. Ciò influenza anche il carico di rottura: l'analisi sperimentale mostra come al variare del rapporto caratteristico  $L_S/t$ , il carico di rottura ha un andamento prima crescente e poi decrescente, con un massimo intorno

a  $L_s/t = 30$ . Per rapporti superiori a tale valore si assiste ad una lieve diminuzione del carico di rottura che si stabilizza in pratica per  $L_s/t > 50$ .

I risultati sperimentali, insieme a quelli numerici, hanno mostrato che il comportamento meccanico sotto sollecitazioni statiche è descritto in modo sufficientemente accurato dal criterio di Ye, applicato in associazione con l'*average stress criterion*.

L'analisi a fatica, limitata in questo lavoro ai soli giunti a doppia sovrapposizione, ha mostrato che questi esibiscono un rapporto di fatica caratteristico pari a circa 0.4. Per livelli di carico superiori a  $0.4P_c$ , il comportamento a fatica è descritto da espressioni del tipo  $N = a(P_{max}/P_c)^{-b}$ .

## Bibliografia

- [1] Shin K.C., Lee J.J., Lee D.G. (2000) A Study on the Lap Shear Strength of a Co-cured Single Lap Joint. *J. Adhesion of Science and Technology* **14**, 123-139.
- [2] Cope R., Pipes R.B. (1982) Design of the Composite Spar-wingskin Joint. *Composites* **13**, 47-53.
- [3] Jones R.M. (1975) *Mechanics of Composite Materials*. McGraw-Hill, New York.
- [4] Kim H.S., Lee S.J., Lee D.G. (1995) Development of a Strength Model for the Cocured Stepped Lap Joints under Tensile Loading. *Composite Structures* **32**, 593-600.
- [5] Lawcock G., Ye L., Mai Y.W., Sun C.T. (1997) The Effect of Adhesive Bonding between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-fiber-reinforced Metal Laminates. *Composites Science and Technology* **57**, 35-45.
- [6] Lee S.W., Lee D.G., Jeong K.S. (1997) Static and Dynamic Torque Characteristics of Composite Co-cured Single Lap Joints. *Journal of Composite Materials* **31**, 2188-2201.
- [7] Shin K.C., Lee J.J. (2000) Prediction of the Tensile Load-bearing Capacity of a Cocured Single Lap Joint Considering Residual Thermal Stresses. *J. Adhesion Sci. Technol.* **14**, 1691-1704.
- [8] Shin K.C., Lee J.J. (2000) Tensile Load-bearing Capacity of Co-cured Double Lap Joints. *J. Adhesion Sci. Technol.* **14**, 1539-1556.
- [9] Shin K.C., Lee J. J. (2002) Fatigue Characteristics of a Co-cured Single Lap Joint Subjected to Cyclic Tensile Loads. *J. Adhesion Sci. Technol.* **16**, 347-359.
- [10] Ye L. (1988) Role of Matrix Resin in Delamination Onset and Growth in Composite Laminates. *Composites Science and Technology* **33**, 257-277.
- [11] Shin K. C., Lee J. J. (2006) Effect of Thermal Residual Stresses on Failure of Cocured Lap Joints with Steel and Carbon Fiber-epoxy Composite Adherends under Static and Fatigue Tensile Loads. *Composites Part.A* **37**, 476-487.
- [12] Park S.W., Kim H.S., Lee D.G. (2006) Optimum Design of the Co-cured Double Lap Joint Composed of Aluminum and Carbon Epoxy Composite. *Composite Structures* **75**, 289-297.
- [13] Whitney J.M., Nuismer R.J. (1974) Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials* **8**, 253-265.
- [14] Tsai S.W., Wu E.M. (1971) A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. **5**, 58-80.