

OTTIMIZZAZIONE DI UNA GIUNZIONE INCOLLATA A DOPPIA SOVRAPPOSIZIONE PER SANDWICH IN COMPOSITO

G. Marannano, A. Giallanza, B. Zuccarello

Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica, Meccanica - Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: giuseppe.marannano@unipa.it

Sommario

Grazie alle peculiari performances meccaniche, quali soprattutto l'elevata resistenza a flessione unita ad un basso peso specifico, le strutture sandwich in composito sono sempre più frequentemente utilizzate nella moderna progettazione industriale. Nel presente lavoro, considerando un composito sandwich con skins in vetroresina e core in PVC espanso, è stato eseguito uno studio numerico e sperimentale al fine di individuare la configurazione ottimale di una giunzione incollata a doppia sovrapposizione avente quali aderenti esterni le stesse skins del sandwich e aderendo interno costituito da un inserto in metallo o in composito. In dettaglio, previa preliminare ottimizzazione teorica della geometria della giunzione, eseguita tenendo conto delle proprietà dell'adesivo e del materiale costituente l'aderendo interno, la configurazione ottimale è stata individuata attraverso sistematiche prove sperimentali di trazione e flessione al variare dei principali parametri di influenza. Successive analisi numeriche eseguite in ambiente Ansys APDL, hanno evidenziato i particolari meccanismi di danneggiamento interlaminare.

Abstract

Due to the particular mechanical properties, such as high flexural strength and low specific weight, sandwich composite structures, are frequently used in modern industrial design. In this paper, composite sandwich panels constituted by GFRP skins and PVC core, are considered. In particular, in order to determine the optimal configuration of a double-lap joint, several numerical analyses and experimental tests, have been carried out. The joining system is realized using the same sandwich skins as external adherents and an internal adherent constituted by metal or composite. After a preliminary optimization of the joint geometry performed by considering the mechanical properties of the adhesive and of the internal adherent, the final optimal configuration of the joint is identified by means of systematic experimental tests carried out by varying the main influence parameters. Successive numerical simulations performed by using Ansys APDL, have permitted to detect the particular interlaminar damage mechanisms.

Parole chiave: compositi sandwich, giunto a doppia sovrapposizione, prove sperimentali, analisi FEM

1. INTRODUZIONE

Il crescente utilizzo dei compositi sandwich trae vantaggio dall'elevata resistenza flessionale e dall'elevato carico ultimo di instabilità longitudinale. Accanto a tali vantaggi, i sandwich in composito presentano altre interessanti proprietà quali elevato isolamento termico ed acustico, resistenza ad agenti chimici e agli impatti, che li fa preferire in molte applicazioni semi-strutturali o non strutturali, sia in ambito civile che industriale. Uno dei problemi direttamente correlati all'utilizzo di tale classe di compositi è dovuto essenzialmente alla selezione della tipologia di giunzione. In via teorica, le modalità di giunzione continua (incollaggio, saldatura, ecc..) sono da preferire a quelle discontinue quali la rivettatura o la bullonatura. In quest'ultimo caso, infatti, l'interruzione delle fibre e la concentrazione

delle tensioni causata dalla realizzazione dei fori potrebbero promuovere il danneggiamento. Nelle giunzioni adesive composito-metallo, inoltre, la stratificazione degli aderendi in composito e la relativa debolezza nella direzione dello spessore rende i meccanismi di cedimento della giunzione molto più complessi da analizzare e studiare teoricamente [1]. A causa di queste incertezze, in campo industriale si preferisce utilizzare margini di sicurezza più elevati aumentando, ad esempio, la superficie di incollaggio rispetto a quella minima teorica oppure facendo ricorso a giunzioni di tipo ibrido (incollate, bullonate o rivettate) [2] con conseguente uso non ottimale dei materiali impiegati. Al riguardo, una delle teorie più accreditate per l'ottimizzazione della lunghezza di sovrapposizione da utilizzare per l'incollaggio di un giunto a doppia sovrapposizione fa uso del modello analitico proposto da L.J. Hart-Smith [3]. Non di rado, però, specialmente in campo aeronautico, si preferisce raddoppiare tale valore di lunghezza per garantire un sufficiente margine di sicurezza rispetto al danneggiamento a trazione [2]. Diversi studi di letteratura hanno inoltre evidenziato come l'ottenimento di elevate performances meccaniche di una giunzione incollata, sia essa a semplice che doppia sovrapposizione, possono essere raggiunte attraverso ottimizzazioni geometriche di forma [4], l'utilizzo di differenti tipologie di adesivo lungo l'interfaccia [5,6] oppure variando le proprietà elastiche del materiale lungo la zona di collegamento [7]. In tutti i casi, comunque, lo studio non può prescindere dalla conoscenza dell'andamento delle tensioni tangenziali e di peeling all'interfaccia, ottenute mediante formulazioni analitiche (solo in pochi casi sono fornite soluzioni in forma chiusa [3, 8-9]) o, più comunemente, facendo ricorso alle moderne tecniche numeriche [10].

Nel presente lavoro è stato condotto uno studio numerico-sperimentale su giunzioni in composito sandwich realizzate incollando, in luogo di una porzione di core che è stata opportunamente rimossa, un inserto in metallo o in composito quale elemento di collegamento. In particolare, la giunzione analizzata si configura come una giunzione incollata a doppia sovrapposizione avente quali aderendi esterni le stesse skins del sandwich e aderendo interno costituito dall'inserto. Nello studio, previa una preliminare selezione teorica della lunghezza di sovrapposizione da utilizzare per la giunzione, la configurazione ottimale è stata individuata attraverso sistematiche prove sperimentali di trazione e flessione al variare dei principali parametri di influenza. L'analisi sperimentale ha altresì consentito il rilievo dei principali meccanismi di danneggiamento e della correlata resistenza meccanica sotto diverse sollecitazioni.

Sono state infine eseguite diverse simulazioni numeriche in ambiente ANSYS APDL al fine di determinare gli andamenti delle sollecitazioni tangenziali e di peeling all'interfaccia adesivo-skin al fine di analizzare in dettaglio i processi di danneggiamento in funzione dei principali parametri geometrici della giunzione.

2. STUDIO SPERIMENTALE

2.1. Materiali

La giunzione è realizzata tra due pannelli sandwich costituiti da skins in composito GFRP e core in PVC espanso a celle chiuse (spessore $t_c=4$ mm). In particolare le pelli esterne sono realizzate utilizzando *mat* in fibre di vetro E-glass orientate in maniera random con densità pari a 450 g/m² impregnate con resina poliesteri ortoftalica CRYSTIC 446 LVPA prodotta dalla Scott Bader. Il composito è stato realizzato mediante laminazione manuale e curato a 80°C per 1h. La frazione in volume di fibra è risultata pari a $V_f=0.17$ mentre lo spessore totale del composito sandwich è pari a $t=9.5$ mm. La giunzione delle due parti in composito sandwich è stata realizzata mediante incollaggio, interponendo un strato di adesivo epossidico strutturale distribuito sulle superfici laterali dell'inserto (che ha la funzione di elemento di collegamento) e sulle pelli del composito sandwich. In particolare, la Fig. 1 mostra un disegno schematico della giunzione in una configurazione di flessione a 4 punti.

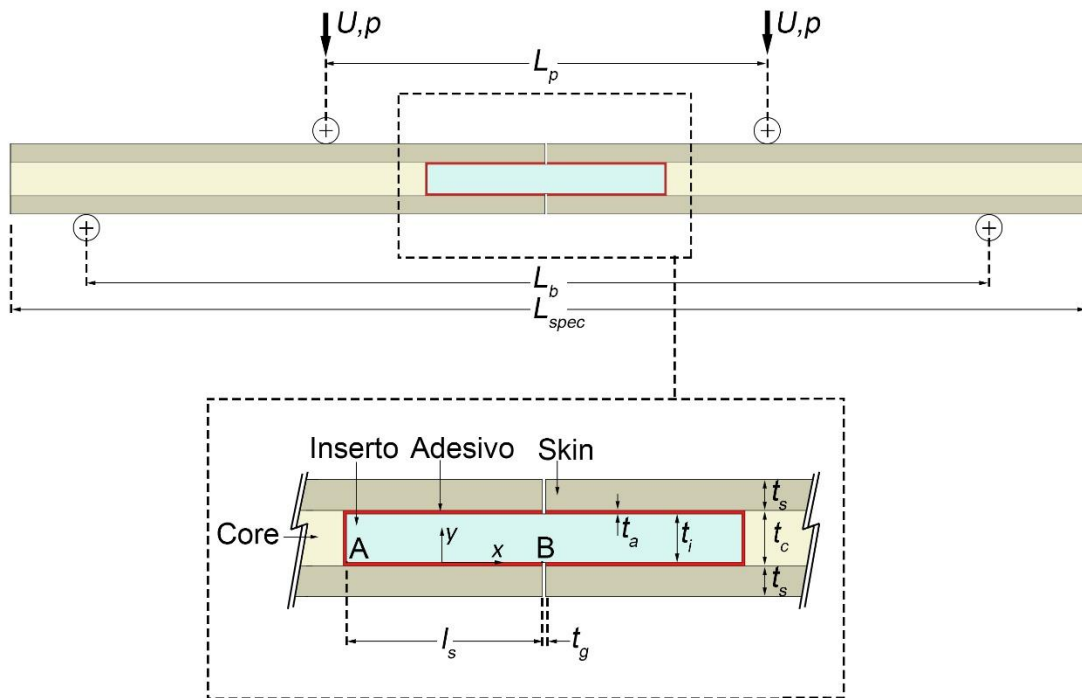


Figura 1. Disegno schematico della giunzione nella configurazione di flessione a 4 punti

Per garantire la corretta polimerizzazione dell'adesivo, i provini sono stati sottoposti ad un ciclo di cura di 60°C per 10 h. Da una micrografia della sezione della giunzione, lo spessore dello strato adesivo è risultato pari a $t_a=0.25$ mm.

In definitiva, la soluzione adottata si prefigura come una giunzione incollata a doppia sovrapposizione (ad eccezione dello strato adesivo presente tra materiale del core e dell'inserto) che assicura la perfetta planarità delle parti da collegare, condizione indispensabile in alcune applicazioni industriali.

Scopo del lavoro è quello di determinare le proprietà meccaniche di tale giunzione con particolare riferimento alle tensioni tangenziali e normali all'interfaccia skin-aderendo interno. I parametri di influenza che sono stati analizzati sono:

- Materiale dell'inserto;
- Lunghezza di sovrapposizione.

In particolare, due diverse tipologie di inserto sono state utilizzate per la realizzazione della giunzione:

- Laminato unidirezionale CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) costituito da 16 lamine in fibra di carbonio HM (grammatura di 200 g/m² e modulo di Young $E_c=300$ GPa) e resina epossidica MATES SX-10 avente modulo di elasticità $E_r=3$ GPa, modulo di Poisson $\nu_r=0.39$, resistenza a trazione $\sigma_{u,r}=60$ MPa e resistenza a taglio pari a $\tau_{u,r}=30$ MPa [2].
- Lamina in lega di alluminio 2024-T3 di spessore $t_i=4$ mm.

Le caratteristiche dell'adesivo e dei materiali costituenti gli inserti, le pelli ed il core sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche elastiche dei materiali costituenti la giunzione.

	E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	G_{xy} [MPa]	G_{yz} [MPa]	G_{xz} [MPa]	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}
Composito sandwich									
Skins	6000	4000	6000	2500	1250	2500	0.22	0.3	0.22
CORE PVC espanso	100			-			0.15		
Adesivo epossidico	3000			-			0.3		

Inserti									
CFRP	135000	10500	10500	7610	3170	7610	0.12	0.24	0.12
Lega alluminio 2024-T3	69000		-			0.33			

2.2. Valutazione della lunghezza minima di sovrapposizione

Secondo la teoria dei giunti incollati, per evitare distribuzioni fortemente asimmetriche dello sforzo di taglio e di peeling alla interfaccia adesivo-aderente in giunzioni a doppia sovrapposizione sottoposti a trazione, gli spessori degli aderenti devono essere scelti correttamente in modo tale da realizzare giunti bilanciati, cioè giunti in cui la rigidità degli aderenti interni è uguale alla somma della rigidità degli aderenti esterni. Un giunto sbilanciato porta infatti ad un aumento delle sollecitazioni sul bordo di attacco degli aderenti più cedevoli e quindi, per una fissata condizione di lavoro, determina caratteristiche di resistenza inferiore a quello del giunto equilibrato, indipendentemente dalla direzione del carico (trazione o compressione). Allo scopo di garantire un confronto diretto tra i risultati sperimentali, la lunghezza minima di sovrapposizione l_s^* è stata determinata mediante la teoria proposta da L. J. Hart-Smith [3] utilizzando quale elemento di collegamento l'inserto in lega di alluminio. In particolare, con riferimento alla Fig. 1, la lunghezza minima di sovrapposizione è stata determinata mediante l'Eq.1. Le prove sperimentali sono state condotte sia con lunghezza di sovrapposizione minima ($l_s=l_s^*$) che, utilizzando l'approccio aeronautico, con lunghezza di sovrapposizione doppia ($l_s=2 l_s^*$).

$$l_s^* = \frac{\sigma_{s,u} \cdot t_s}{\tau_{u,a}} + \frac{2}{\beta} \cong 16 \text{ mm} \quad (1)$$

dove:

$$\beta = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot G_a}{\eta_a \cdot E_s \cdot t_s} \left(\frac{1+S}{2S} \right)}}{\sqrt{1 + \frac{G_a}{\eta_a} \left(\frac{t_i}{6 \cdot G_i} + \frac{t_s}{3 \cdot G_s} \right)}} \quad (2)$$

$$S = \frac{E_i \cdot t_i}{2E_s \cdot t_s} \quad (3)$$

con:

$\sigma_{s,u}=95$ MPa, $E_s=6000$ MPa, $G_s=2500$ MPa, $t_s=2.5$ mm corrispondenti, rispettivamente, alla resistenza a trazione longitudinale, al modulo di elasticità longitudinale, al modulo a taglio e allo spessore del laminato costituente le pelli del composito sandwich, $\tau_{u,a}=23$ MPa e $G_a=1000$ MPa corrispondenti alla resistenza e modulo di elasticità a taglio dell'adesivo strutturale, $S=9.2$ lo sbilanciamento della giunzione, $\eta_a=0.25$ mm lo spessore dello strato adesivo, $G_i=26000$ MPa e $t_i=4$ mm corrispondenti al modulo a taglio e spessore dell'inserto (lega di alluminio AL 2024-T3).

2.3. Prove di trazione

Al fine di studiare il comportamento meccanico a trazione delle giunzioni incollate al variare del materiale dell'inserto e della lunghezza di sovrapposizione, diverse prove sono state condotte su una macchina servoidraulica MTS 810 con cella di carico da 100 kN. In accordo con le norme ASTM, tutte le prove sperimentali sono state effettuate in controllo di spostamento con velocità di avanzamento della traversa di 1 mm/min. La Fig.2 mostra la geometria dei provini realizzati per l'esecuzione delle prove di trazione.

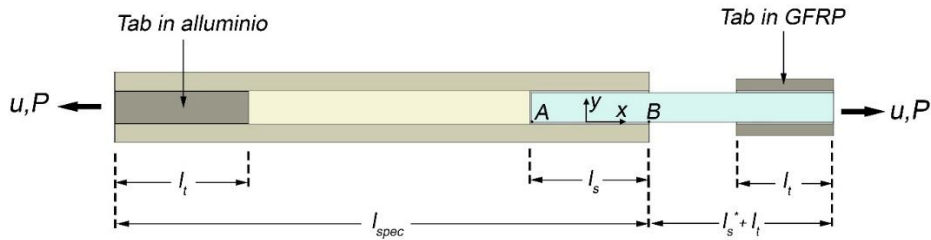


Figura 2. Geometria dei provini per le prove di trazione.

In riferimento alla Fig. 2, la lunghezza dei provini $l_{spec}=125$ mm, la lunghezza di afferraggio $l_t=35$ mm, $l_s=l_s^*=16$ mm per le prove con lunghezza di sovrapposizione pari a quella minima oppure $l_s=2\cdot l_s^*=32$ mm per le prove con lunghezza di sovrapposizione doppia. Per garantire il corretto ammortaggio alla macchina di prova, due tabs in vetroresina sono stati applicati all'estremità libera dell'inserto e un elemento in alluminio è stato incollato nella sezione terminale del composito sandwich. La Fig. 3 mostra un provino posizionato nella macchina di prova MTS.



Figura 3. Prova di trazione di un provino con inserto in alluminio e lunghezza doppia di sovrapposizione

Nelle seguenti figure 4 e 5 sono mostrati, rispettivamente, gli andamenti del carico in funzione dello spostamento per i provini di trazione con lunghezza minima di sovrapposizione (Fig. 4) e lunghezza di sovrapposizione doppia (Fig. 5).

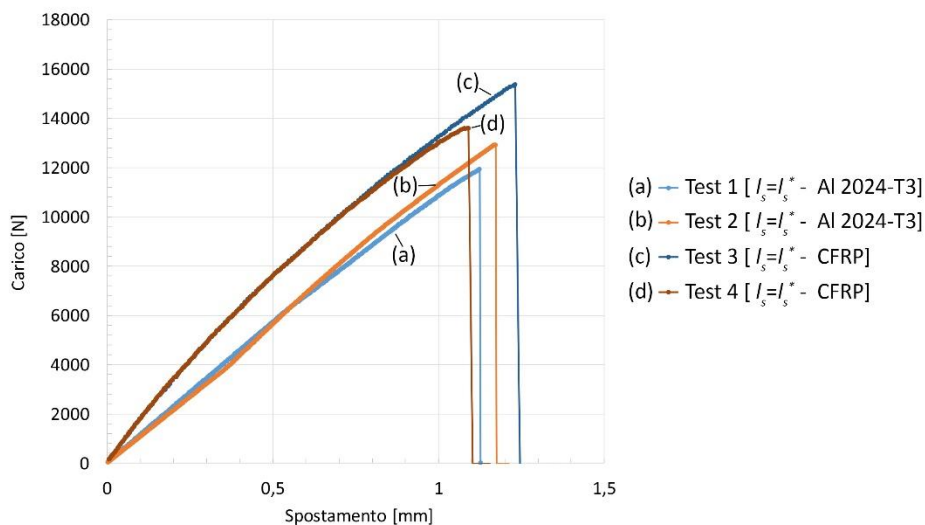


Figura 4. Prove di trazione su giunti con lunghezza minima di sovrapposizione

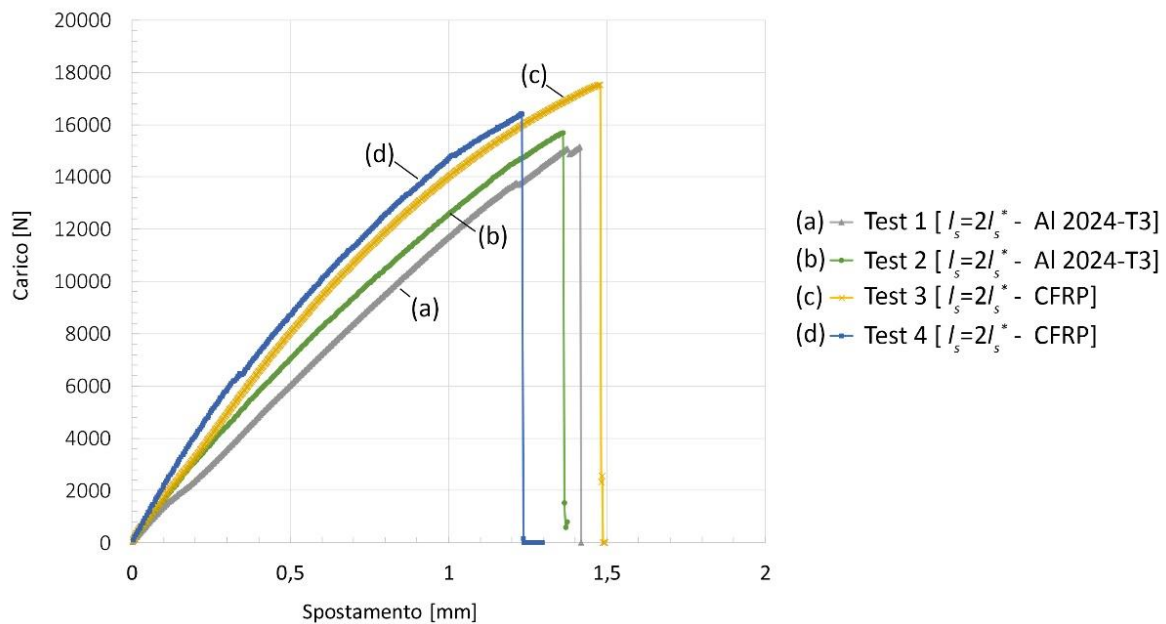


Figura 5. Prove di trazione su giunti con lunghezza di sovrapposizione doppia

La tabella 2 mostra i risultati delle prove statiche di trazione sui giunti analizzati in termini di carico di rottura, rigidezza e energia di rottura media.

Tabella 2. Risultati delle prove statiche di trazione

Tipologia inserto	Alluminio Al 2024-T3		CFRP	
	Minima $l_s=l_s^*$	Doppia $l_s=2l_s^*$	Minima $l_s=l_s^*$	Doppia $l_s=2l_s^*$
Carico di rottura medio [kN]	12.42	14.42	14.49	16.98
Rigidezza media del giunto [kN/mm]	11.10	13.69	16.97	18.46
Energia di rottura media [kN·mm]	7.40	11.83	9.62	13.65

Dalla Tab.2 è possibile osservare che la giunzione con inserto in CFRP e lunghezza di sovrapposizione doppia, oltre ad essere quella più resistente, è anche quella cui corrisponde la massima energia di rottura e quindi la massima tolleranza al danneggiamento, condizione quest'ultima molto apprezzata nella moderna progettazione industriale, specie in presenza di materiali compositi e condizioni di esercizio in cui la rottura catastrofica può portare nocimento alla vita umana (ambito aeronautico, automobilistico, navale).

2.4. Prove di flessione

La geometria dei provini realizzati per l'esecuzione delle prove di flessione a 4 punti è quella di Fig.1. In particolare, la lunghezza dei provini è pari a $l_{spec}=220$ mm, la distanza tra gli appoggi di base $l_b=180$ mm mentre la distanza tra i punzoni di carico è pari a $l_p=90$ mm. Le prove sono state effettuate in controllo di spostamento con velocità di avanzamento della traversa di 1 mm/min. Nelle seguenti figure 6 e 7 sono mostrati, rispettivamente, gli andamenti del carico in funzione dello spostamento per i provini di flessione con inserto in alluminio (Fig. 6) e CFRP (Fig. 7).

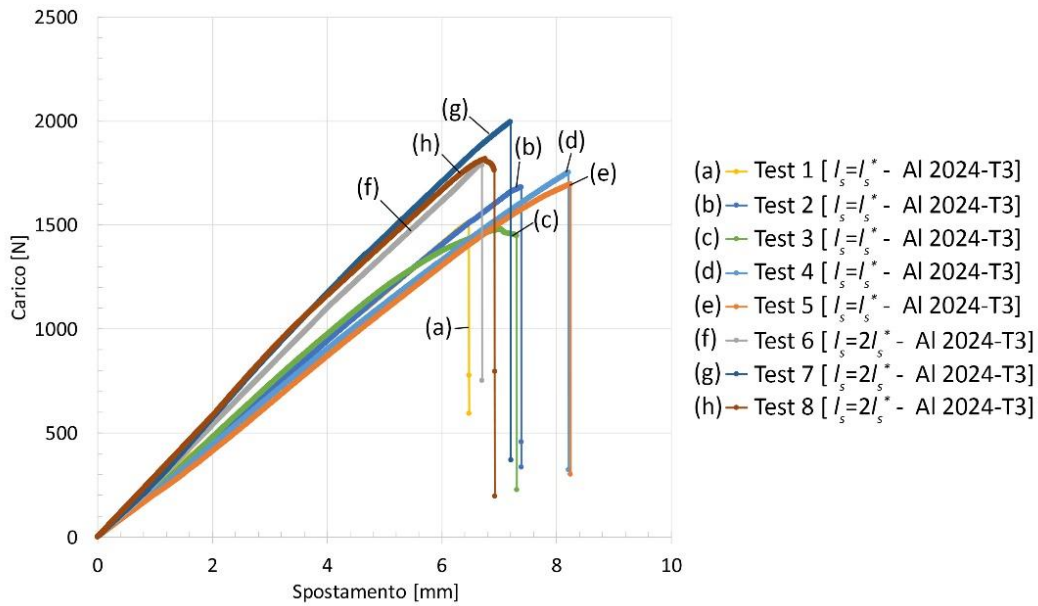


Figura 6. Prove di flessione su giunti con inserto in alluminio

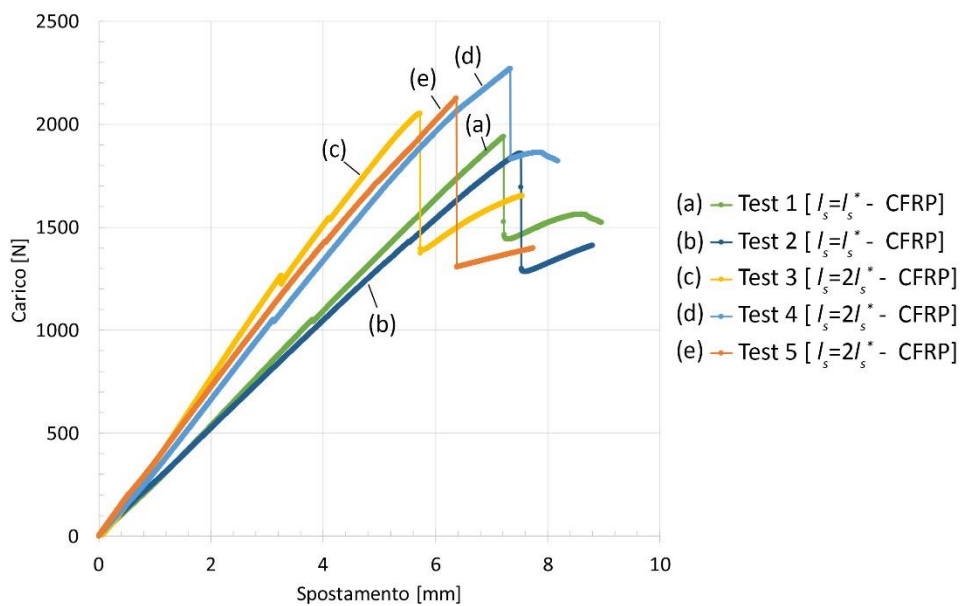


Figura 7. Prove di flessione su giunti con inserto in CFRP

La tabella 3 mostra i risultati delle prove statiche di flessione a 4 punti sui giunti analizzati in termini di carico di rottura, rigidezza e energia di rottura media.

Tabella 3. Risultati delle prove statiche di flessione a 4 punti

Tipologia inserto	Alluminio Al 2024-T3		CFRP	
	Minima $l_s=l_s^*$	Doppia $l_s=2l_s^*$	Minima $l_s=l_s^*$	Doppia $l_s=2l_s^*$
Carico di rottura medio [kN]	1.62	1.86	1.90	2.15
Rigidezza media del giunto [kN/mm]	0.22	0.27	0.26	0.34
Energia di rottura media [kN·mm]	6.44	6.76	7.16	7.33

Anche in questo caso, in valore assoluto, i risultati migliori sono stati ottenuti con inserto in composito CFRP e lunghezza di sovrapposizione pari al doppio di quella determinata mediante lo studio analitico.

Le Fig. 8 e 9 mostrano, rispettivamente, le modalità di danneggiamento a fine prova per i giunti con inserto in alluminio e in CFRP. In particolare, per i giunti con inserto in alluminio, siano essi incollati con lunghezza minima o doppia di sovrapposizione, la rottura avviene a causa del debonding tra inserto e skin, sempre dal lato delle fibre tese. Dall'esame della superficie di rottura è possibile constatare che la modalità di scollamento è di tipo adesivo; tale risultato sarà utilizzato per la definizione del path di delaminazione nelle simulazioni numeriche.



Figura 8. Prova di flessione a 4 punti: modalità di danneggiamento tipica di un provino con inserto in alluminio

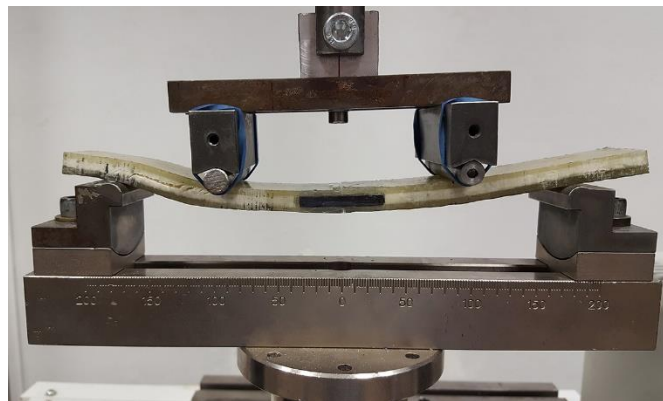


Figura 9. Prova di flessione a 4 punti: modalità di danneggiamento tipica di un provino con inserto in CFRP

È infatti osservato che il danneggiamento del provino con inserto in CFRP si verifica sempre a causa della rottura del nucleo in PVC espanso ad opera dello sforzo di taglio nel tratto compreso tra il vincolo e il punto di applicazione del carico. Tale tipologia di giunzione possiede un'efficienza superiore al 100% degli elementi sandwich collegati.

3. ANALISI NUMERICHE

Diverse analisi numeriche non lineari sono state condotte in ambiente ANSYS APDL allo scopo di determinare l'andamento delle tensioni tangenziali e normali all'interfaccia skin-inserto durante il caricamento della giunzione. In particolare, le analisi sono state condotte su un modello bidimensionale parametrico della giunzione analizzata, riproducendo singolarmente le diverse parti che caratterizzano il composito sandwich e il materiale utilizzato quale inserto. Le caratteristiche elastiche introdotte per la modellazione dei materiali sono state già mostrate in Tabella 1. La curva tensione-deformazione dell'adesivo strutturale è stata riportata per punti in quanto la resina utilizzata possiede un comportamento non lineare, con tensione di rottura a trazione prossima a $\sigma_{a,u}=42$ MPa e tensione di taglio massima pari a $\tau_{a,u}=23$ MPa. Particolare cura è stata riposta nella modellazione della zona coesiva. In dettaglio, la modellazione di tale zona è stata realizzata per mezzo di elementi di contatto computando

l'apertura normale e lo scorrimento tangenziale in ogni elemento disposto lungo la linea di interfaccia [11]. Il modello di zona coesiva utilizzato nella formulazione del danneggiamento con elementi di contatto in ANSYS è una legge di tipo bilineare mostrata in figura 10(a) e 10(b), rispettivamente per caricamento di modo I e modo II.

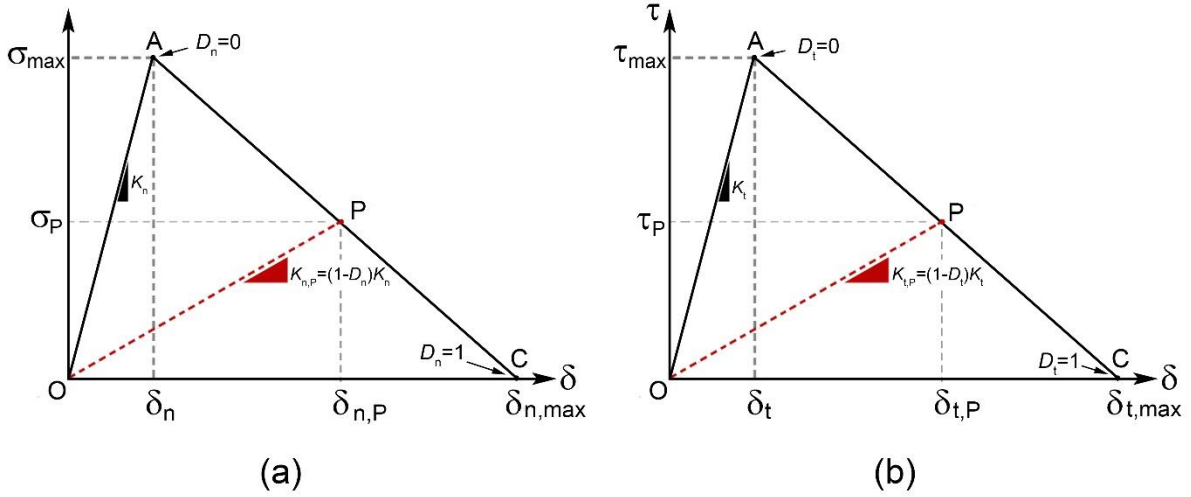


Figura 10. Legge coesiva bilineare utilizzata nella formulazione del danneggiamento per modo I (a) e modo II (b)

Come è possibile osservare dalla Fig. 10, la relazione tra tensione (normale o tangenziale) e deformazione (di apertura o di scorrimento) ha inizialmente un andamento lineare (tratto OA) seguito da un tratto di softening (tratto AC). La fase di debonding inizierà quando la tensione normale o tangenziale raggiungerà quella massima (punto A in Fig. 10) e continuerà fino a quando questa si annullerà producendo la completa separazione dei nodi e, quindi, la propagazione della delaminazione interfacciale. Ad esempio, in Fig. 10(a), δ_n e $\delta_{n,max}$ rappresentano, rispettivamente, l'apertura al valore massimo della tensione normale di contatto e l'apertura corrispondente al completo debonding. È possibile pertanto definire un parametro di danno D_n (D_t) che lega la rigidità iniziale dello strato adesivo K_n (K_t) a quella del materiale danneggiato (Eq. 4 e Fig. 10).

$$K_{n,P} = (1 - D_n)K_n; \quad K_{t,P} = (1 - D_t)K_t \quad (4)$$

L'area sottesa al triangolo OAC rappresenta, nei due casi, l'energia di frattura critica G_{nc} per modo I (Fig. 10a) e G_{tc} modo II (Fig. 10b). In particolare:

$$G_{nc} = \frac{1}{2} \sigma_{max} \delta_{n,max} \quad (5)$$

$$G_{tc} = \frac{1}{2} \tau_{max} \delta_{t,max} \quad (6)$$

Nel caso in esame, il danneggiamento dei provini avverrà per modo misto e, pertanto, il completo debonding avverrà quando si verificheranno le condizioni previste dal criterio descritto nell'Eq. 7:

$$\left(\frac{G_n}{G_{nc}} \right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{tc}} \right)^2 = 1 \quad (7)$$

dove G_n e G_t corrispondono al tasso di rilascio di energia per modo I e II.

Il modello numerico è stato discretizzato con elementi bidimensionali tipo PLANE182. Le zone interessate dal danneggiamento sono state modellate separatamente in modo che, lungo l'interfaccia, siano presenti nodi distinti anche se nella stessa posizione geometrica. Su tali nodi sono stati posizionati gli elementi di contatto esplicitando l'opzione di contatto iniziale di tipo "bonded". Particolare cura è stata riposta nella definizione della discretizzazione: al riguardo, una ottimizzazione iniziale ha permesso di definire la dimensione minima degli elementi in modo da garantire una buona accuratezza dei risultati. Nel modello è stato inoltre definito un rateo di discretizzazione (dimensione minima degli elementi pari a 1/100 di mm) in modo da garantire un infittimento locale nelle zone in cui siano presenti singolarità o punti di concentrazione di tensione. Le Fig. 11 e 12 mostrano, rispettivamente, un particolare della discretizzazione del modello per trazione e flessione a 4 punti.

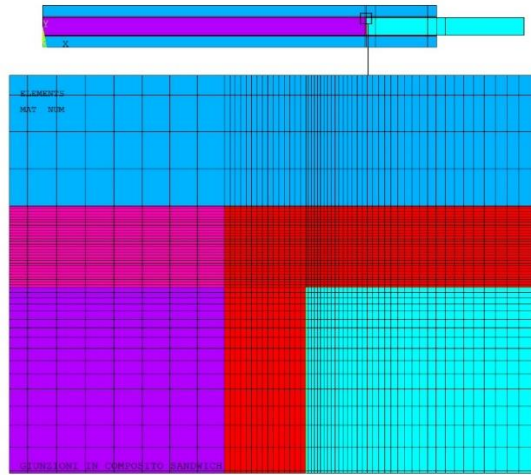


Figura 11. Particolare della discretizzazione del modello numerico per le analisi di trazione

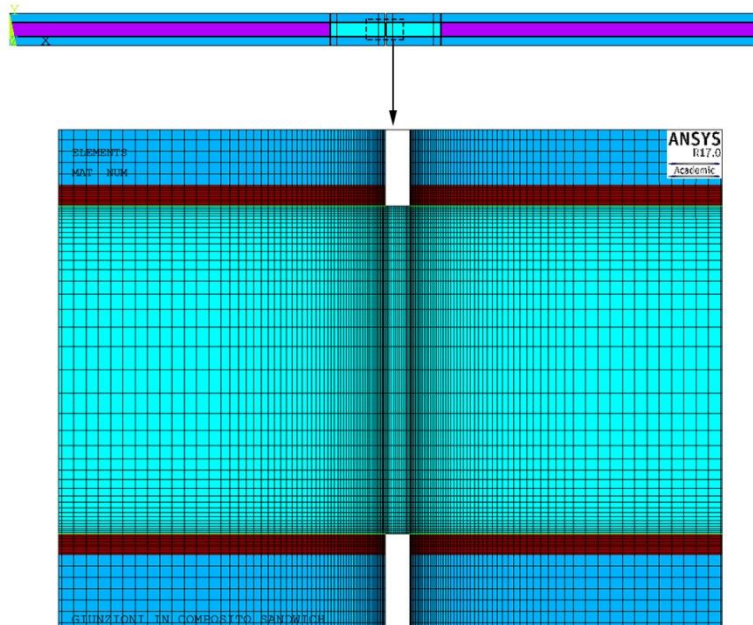


Figura 12. Particolare della discretizzazione del modello numerico per le analisi di flessione a 4 punti

La Fig. 13 mostra l'andamento delle tensioni tangenziali per sollecitazione di trazione lungo la linea di interfaccia adesivo-aderendo interno (tratto AB in Fig. 2) in funzione del rapporto adimensionale x/l_s , dove x individua la generica coordinata longitudinale (sistema di coordinate mostrato in Fig. 2) e l_s indica la lunghezza di sovrapposizione. Le curve si riferiscono ai due materiali (alluminio e CFRP)

considerati per l'aderendo interno, nonché alle due distinte lunghezze di sovrapposizione l_s e $2l_s$. Nel grafico di Fig.13 sono inoltre mostrati gli andamenti delle tensioni tangenziali all'interfaccia adesivo-aderendo forniti dalla teoria proposta da Tsai et al. [9]. Tale teoria tiene conto della deformazione a taglio degli aderenti, ma considera un comportamento lineare elastico per l'adesivo.

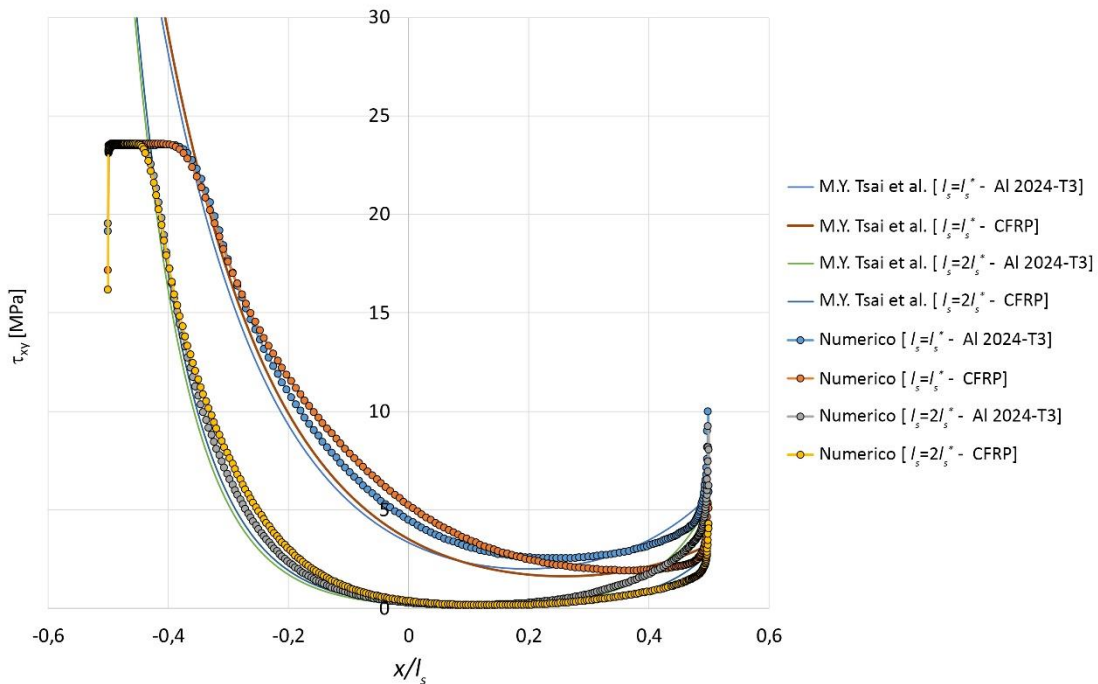


Figura 13. Andamento delle tensioni tangenziali all'interfaccia adesivo-aderendo per sollecitazione di trazione, ottenuto mediante simulazioni FEM e mediante teoria di Tsai et al.

Come è possibile osservare dalla Fig.13, in accordo con l'elevato valore di sbilanciamento del giunto, l'andamento delle tensioni tangenziali è fortemente asimmetrico, con valori massimi in corrispondenza del bordo di attacco A (vedi Fig.2) dell'elemento più cedevole (skin). Si osserva comunque un buon accordo tra teoria e risultati numerici ad eccezione ovviamente nell'intorno del punto A, ove la teoria descrive un picco relativamente elevato per via della ipotesi di comportamento elastico lineare dell'adesivo. In corrispondenza del punto A, in accordo con l'effettivo comportamento elasto-plastico dell'adesivo, i risultati numerici mostrano per entrambi i materiali e per entrambe le lunghezze di sovrapposizione un andamento piatto dello stato tensionale con valore prossimo a quello di snervamento a taglio dell'adesivo (23 MPa). Evidentemente la zona soggetta alla massima tensione risulta molto meno estesa nel caso di lunghezza di sovrapposizione pari al doppio del valore minimo teorico, e la distribuzione delle tensioni nel tratto centrale assume valori pure significativamente inferiori, in accordo con la maggiore resistenza di tale configurazione rilevata sperimentalmente.

Per una completa giustificazione della diversa resistenza esibita dai giunti aventi aderendo interno di diverso materiale e diversa lunghezza di sovrapposizione, è ovviamente importante osservare altresì l'andamento delle tensioni di peeling all'interfaccia adesivo-aderendo interno, riportate nella seguente Fig.14 per il caso considerato di sollecitazione di trazione, per i due diversi materiali dell'aderendo interno considerati (alluminio e CFRP) e per le due diverse lunghezze di sovrapposizione.

Si osserva come nella zona prossima al punto A le tensioni di peeling sono di compressione ma cambiano segno non appena ci si allontana da questo, assumendo valori sempre superiori per il caso di aderendo interno in alluminio. Ciò giustifica pienamente i risultati sperimentali che hanno indicato per questo materiale una resistenza a trazione sempre apprezzabilmente inferiore a quella del CFRP.

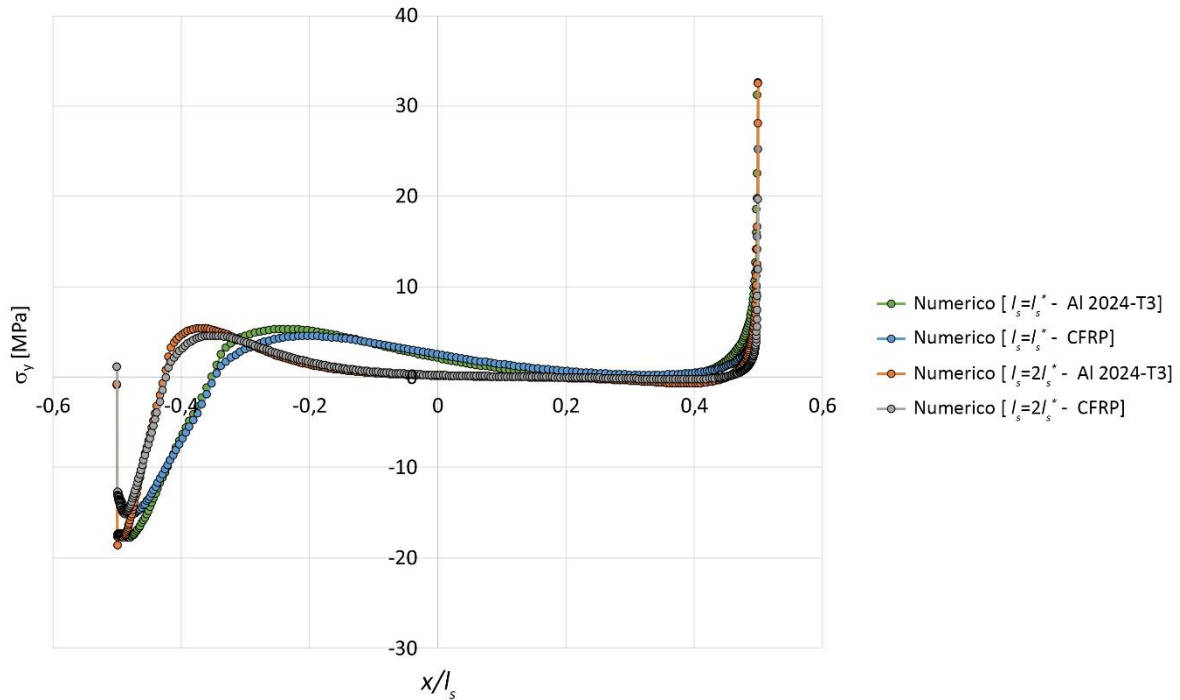


Figura 14. Andamento delle tensioni normali all'interfaccia adesivo-aderendo interno per sollecitazione di trazione al variare del materiale dell'inserto e della lunghezza di sovrapposizione.

Le tensioni di peeling assumo comunque un picco molto elevato in corrispondenza del bordo di attacco dell'aderendo interno (punto B in Fig.2). In maggiore dettaglio, si rileva come tali tensioni sono sempre più elevate per la lunghezza di sovrapposizione più piccola e per l'alluminio, in pieno accordo con l'evidenza sperimentale che mostra per tali casi sempre una minore resistenza a trazione.

Le seguenti Fig.15 e 16 mostrano, rispettivamente, gli andamenti delle tensioni tangenziali e di peeling lungo l'interfaccia adesivo-aderendo interno (tratto AB in Fig.1) per il caso di sollecitazione di flessione a 4 punti.

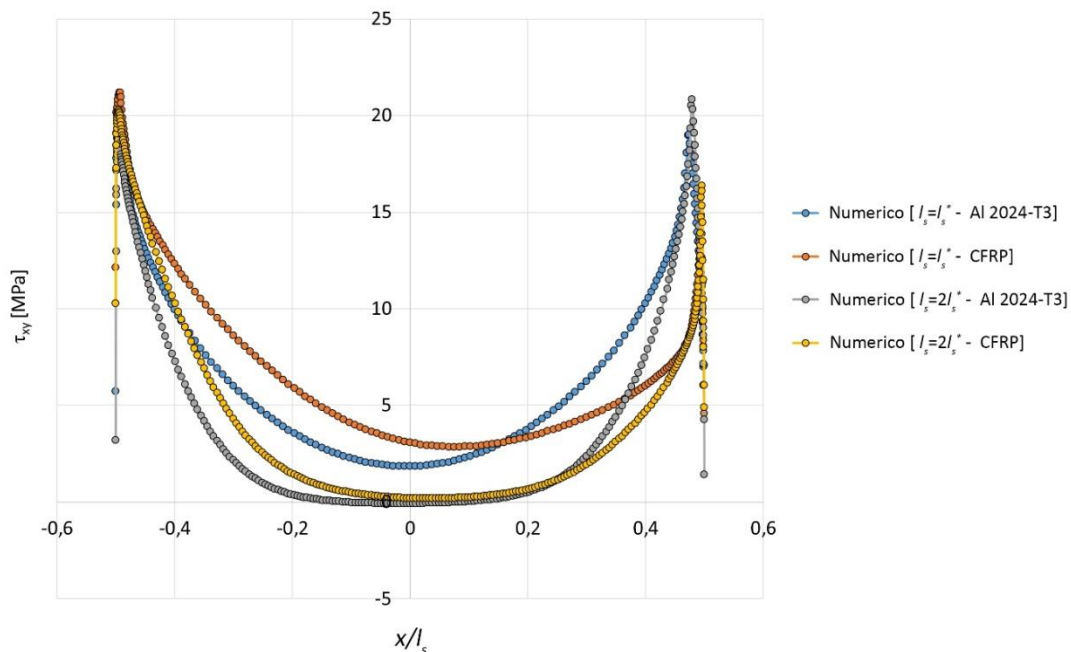


Figura 15. Andamento delle tensioni tangenziali all'interfaccia adesivo-aderendo interno per sollecitazione di flessione a 4 punti.

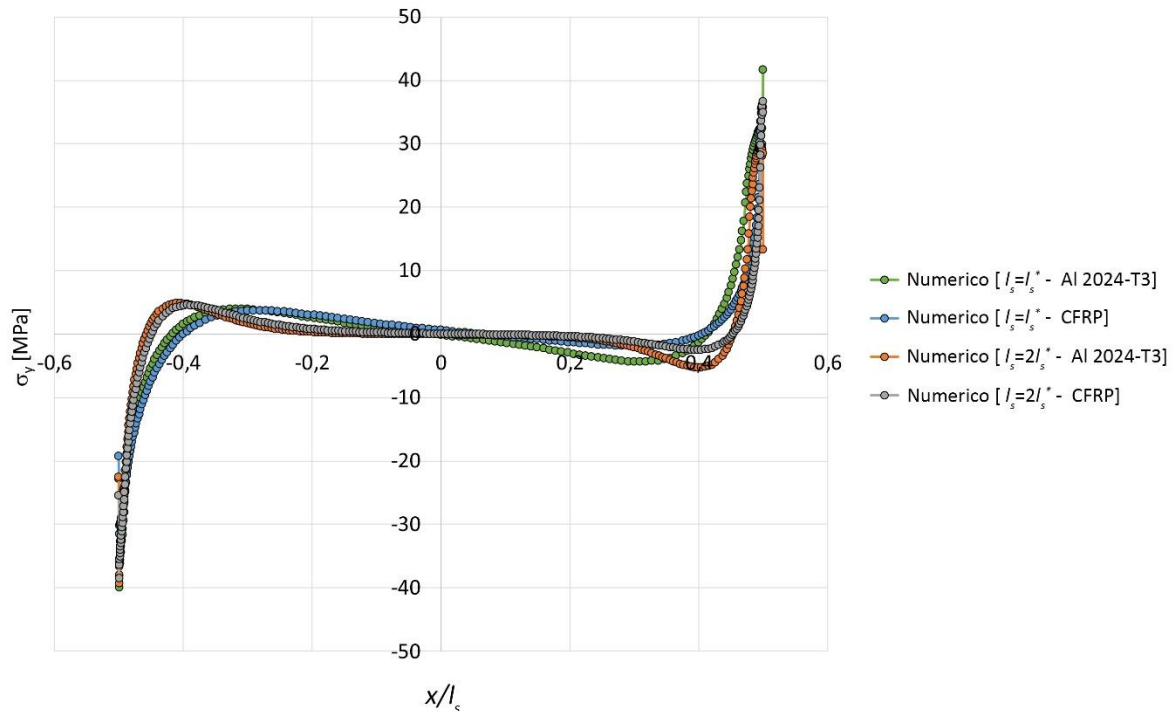


Figura 16. Andamento delle tensioni normali (peeling) all'interfaccia adesivo-aderendo interno per sollecitazione di flessione a 4 punti.

Anche in questo caso, in accordo con le evidenze sperimentali, le analisi numeriche mostrano che le minori sollecitazioni (di taglio e normali) competono al caso di lunghezza di sovrapposizione doppia ed aderendo interno realizzato con materiale avente maggiore modulo elastico (CFRP). In questo caso, è importante osservare come la sollecitazione di flessione non dà luogo a significativo sbilanciamento delle tensioni tangenziali né delle tensioni di peeling, che in modulo risultano anch'esse pressoché simmetriche. Ovviamente, ancora in accordo con la evidenza sperimentale (vedi Fig.8) il punto di innesco della rottura è il bordo di attacco degli skins, ovvero il punto B (vedi Fig.2) in cui si verificano elevate tensioni di peeling (positive). In questo punto comunque, si osserva come la sostituzione dell'alluminio con il CFRP dà luogo ad una diminuzione delle tensioni tangenziali di circa il 22% giustificando pienamente l'assenza di rottura del giunto con aderendo interno in CFRP, osservata sperimentalmente.

In definitiva pertanto è possibile affermare che le analisi numeriche confermano i risultati sperimentali e mostrano che le performances più elevate della giunzione si ottengono utilizzando per l'aderendo interno un materiale ad elevato modulo ed una lunghezza di sovrapposizione pari al doppio della lunghezza minima fornita dalla teoria per il caso di sollecitazione semplice di trazione.

A ulteriore conferma degli effetti della lunghezza di sovrapposizione in presenza di sollecitazione di flessione, nella seguente Fig. 17 sono riportati i risultati numerici in termini di delaminazione osservata per i due casi di aderendo interno in alluminio con lunghezza di sovrapposizione minima e doppia. Si osserva come il raddoppio della lunghezza di sovrapposizione produce una significativa riduzione della delaminazione all'interfaccia adesivo-aderendo interno.

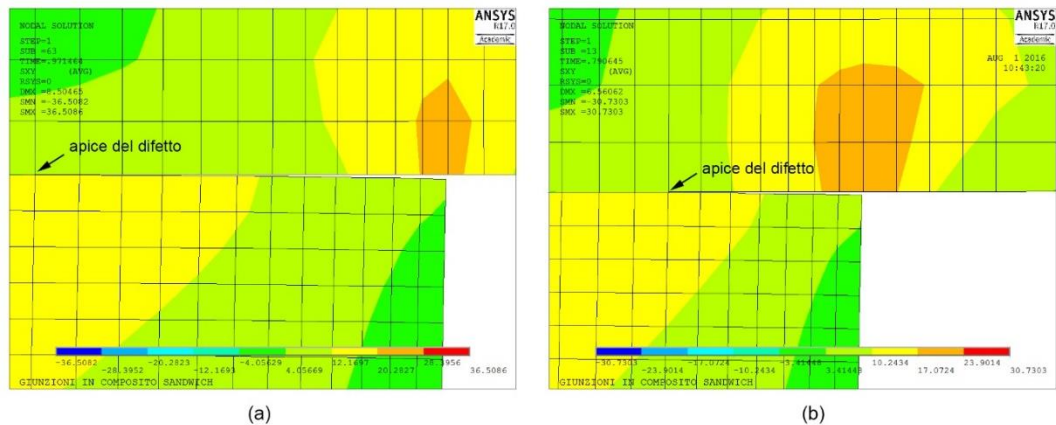


Figura 17. Mappe delle tensioni tangenziali nel caso di prova di flessione per giunzione con inserto in alluminio e lunghezza di sovrapposizione minima (a) e doppia (b).

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato condotto uno studio numerico-sperimentale al fine di individuare la configurazione ottimale di una giunzione incollata a doppia sovrapposizione per sandwich in composito, aventi skins in vetroresina e core in PVC espanso. Dopo una preliminare scelta dei parametri geometrici eseguita sulla base della teoria delle giunzioni incollate, sistematiche prove sperimentali e successive simulazioni numeriche eseguite al variare dei principali parametri di influenza, quali modalità di sollecitazione (trazione, flessione), materiale dell'aderendo interno (alluminio 2024-T3, composito CFRP) e lunghezza di sovrapposizione, hanno indicato che la configurazione ottimale per trazione e flessione corrisponde all'uso di una lunghezza di sovrapposizione doppia del valore minimo indicato dalla teoria, e da aderendi interni realizzati con materiali aventi elevata rigidità meccanica.

Tale configurazione, oltre ad essere quella più resistente, è anche quella cui corrisponde la massima energia di rottura e quindi la massima tolleranza al danneggiamento del giunto.

In dettaglio, l'analisi sperimentale ha mostrato come la rottura di tali giunzioni è sempre di tipo adesivo e si verifica all'interfaccia con l'aderendo interno. Inoltre, l'uso di un aderendo interno in CFRP dà luogo ad una giunzione che sotto sollecitazione prevalente di flessione risulta più resistente degli elementi sandwich collegati (efficienza maggiore del 100%).

Le analisi numeriche, condotte in ambiente ANSYS APDL, hanno permesso di determinare l'andamento delle tensioni tangenziali e normali all'interfaccia adesivo-aderendo interno, evidenziando come nel caso di sollecitazione prevalente di trazione la distribuzione delle tensioni tangenziali è, in accordo con la teoria, fortemente sbilanciato sebbene la resistenza del giunto risulta significativamente influenzata dalle tensioni di peeling. Diversamente, nel caso di sollecitazione prevalente di flessione, la distribuzione delle tensioni tangenziali risulta pressoché bilanciata mentre le tensioni di peeling giocano sempre un ruolo rilevante nel danneggiamento della giunzione. Per questo, ulteriori miglioramenti della resistenza della giunzione necessitano di interventi finalizzati a limitare le tensioni normali ovvero ad aumentare la resistenza al peeling con l'uso di adesivi meno fragili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Tong, "An Assessment of Failure Criteria to Predict the Strength of Adhesively Bonded Composite Double Lap Joints", *J. Reinf. Plast. Compos.*, 16(8), 698-713 (1997).
- [2] G. Marannano, B. Zuccarello, "Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints", *Composites Part B: Engineering*, 71, 28-39 (2015).
- [3] L.J. Hart-Smith, *Adhesive-bonded double-lap joints*, NASA Technical Report (1973).
- [4] Q. Zeng, C.T. Sun, "Novel design of bonded lap joint", *AIAA J.*, 39, 1991-1996 (2001).
- [5] L. F. M. Da Silva, R. D. Adams, "Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives", *Int. J. Adhesion Adhes.*, 27(3), 216-226 (2007).

- [6] M.D. Fitton, J.G. Broughton, “Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance”, *Int. J. Adhesion Adhes.*, 25(4), 329-336 (2005).
- [7] V. K. Ganesh, T. S. Choo, “Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints”, *J. Compos. Mater.*, 36(14), 1757-1767 (2002).
- [8] R. D. Adams, J. Comyn, W. C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*, Chapman & Hall 2nd ed. (1997).
- [9] M. Y. Tsai, D. W. Oplinger, J. Morton “Improved theoretical solutions for adhesive lap joints”, *Int. J. Solids Structures*, 35(12), 1163-1185 (1998).
- [10] M. F. S. F. De Moura, J. P. M. Gonçalves, J. A. G. Chousal, R. D. S. G. Campilho, “Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints”, *Int. J. Adhes.*, 28(8), 419-426 (2008).
- [11] M. A. Wahab, *The mechanics of adhesives in composite and metal joints*, DEStech Publications, Inc. (2014).