

STUDIO NUMERICO-SPERIMENTALE DI GIUNZIONI IBRIDE A DOPPIA SOVRAPPOSIZIONE CFRP-ALLUMINIO

G. Marannano, B. Zuccarello

Università degli Studi di Palermo – Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica e Meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo

Sommario

Le giunzioni incollate e le giunzioni meccaniche tra componenti strutturali in composito o tra elementi in composito ed elementi in metallo, sono utilizzate in diversi campi della moderna progettazione e produzione industriale perché caratterizzate da economicità, affidabilità e facilità di assemblaggio.

Le giunzioni incollate sono caratterizzate da elevata rigidità e resistenza a fatica, sebbene fenomeni di delaminazione localizzata in prossimità dei bordi di attacco degli aderenti possono limitarne l'uso specie in applicazioni impegnative quali quelle in ambienti umidi e corrosivi. In questi casi una possibile alternativa è offerta dalle giunzioni rivettate. Queste, di contro, richiedono l'esecuzione di fori sugli elementi da unire e possono dare luogo a danneggiamenti localizzati soprattutto in presenza di laminati fortemente anisotropi a cui corrispondono elevate concentrazioni delle tensioni.

Nel presente lavoro è stato condotto uno studio numerico-sperimentale su giunti ibridi (incollati e rivettati) a doppia sovrapposizione tra componenti in alluminio e componenti in laminato composito CFRP, che hanno consentito di evidenziare le performance statiche ed a fatica di tali giunzioni, anche con riferimento al meccanismo di danneggiamento dello strato adesivo e al danneggiamento interlaminare del CFRP dovuto al processo di rivettatura.

Abstract

The adhesively bonded joints and the mechanical joints between structural components made by composite materials or between elements made by composite and metal, are commonly used in different fields of modern industrial design and manufacturing, since they are characterized by economy, reliability and ease of assembly.

The bonded joints are characterized by high stiffness and fatigue life, although delamination phenomena localized near the edges of attack of the adherends may limit their use, especially in particular applications where corrosive environments and humidity can lead to premature failure. In these cases, a possible alternative is offered by the well known riveted joints. On the contrary, the riveted joints require a preliminary drilling of the elements to be joined and, consequently, may cause localized material damage, especially in presence of strongly anisotropic laminates which are characterized by high stress concentration.

In the present work a numerical and experimental study of hybrid double-lap joints between aluminum and CFRP laminates, have permitted to highlight both the static and the fatigue performance of such joints, also with reference to the particular damage mechanism of the adhesive layer and to the interlaminar damage of the CFRP, due to the riveting process.

Parole chiave: Materiali compositi; double-lap joint; rivetti; analisi FEM.

1. INTRODUZIONE

Il notevole interesse connesso all'utilizzo dei materiali compositi nelle costruzioni meccaniche ha spinto l'industria e i centri di ricerca a sviluppare nuove tecniche di giunzione o a migliorare quelle

esistenti. Tra queste, le giunzioni bullonate o rivettate, le giunzioni adesive e le giunzioni ibride sono quelle più comunemente utilizzate.

Le tecniche di fissaggio meccanico (bulloni, rivetti, ecc..) offrono il vantaggio di poter essere rimosse senza danneggiare la struttura, non richiedono l'accurata preparazione della superficie di giunzione e, generalmente, sono poco sensibili alla temperatura di servizio o all'umidità [1-4].

L'utilizzo di giunti misti, incollati e bullonati o rivettati, è praticato quando si vuole aumentare la resistenza dei giunti incollati e, soprattutto, quando sono presenti sovraccarichi e/o sollecitazioni a fatica [5-6]. Lo scopo dei bulloni e dei rivetti è quello di limitare le tensioni di apertura (peeling) che nascono in corrispondenza dei bordi di attacco, all'interfaccia con l'adesivo.

La procedura di progettazione delle giunzioni meccaniche tra elementi in composito è prevalentemente basata sull'acquisizione di dati sperimentali poiché allo stato attuale non sono disponibili modelli analitici affidabili.

La determinazione ottimale dei parametri geometrici della giunzione è un fattore essenziale per il raggiungimento dell'affidabilità strutturale in quanto determinata la vita ultima del componente.

Nel presente lavoro è stato eseguito uno studio numerico-sperimentale che ha consentito di indagare sui peculiari meccanismi di danneggiamento di giunzioni ibride a doppia sovrapposizione tra una lega di alluminio AW 6082 T6 ed un laminato in composito CFRP a matrice epossidica.

Prove sperimentali statiche ed a fatica eseguite sui giunti semplicemente incollati e su giunti ibridi (incollati e rivettati) hanno permesso di valutare gli effettivi vantaggi dei giunti ibridi in termini di incremento di carico di rottura statico, resistenza a fatica e energia assorbita a rottura [7-9].

Inoltre, uno studio numerico condotto in ambiente ANSYS APDL con solutore esplicito è stato eseguito al fine di verificare l'integrità strutturale del giunto ibrido a seguito dell'operazione di rivettatura [10,11].

Studi riportati in letteratura [12-14] mostrano, infatti, che la deformazione radiale del rivetto potrebbe causare la nascita di campi di tensioni residue di compressione nell'intorno del foro, tali da dar luogo al danneggiamento interlaminare del composito giuntato.

2. PROVE SPERIMENTALI

2.1. Materiali

Utilizzando un tessuto in fibra di carbonio unidirezionale con grammatura di 200 g/m² e una resina epossidica termoindurente a bassa viscosità [15] avente modulo di Young $E=3$ GPa e tensione di rottura $\sigma_r=60$ MPa, è stato realizzato un laminato quasi isotropo $[0/\pm 45/90]_s$ mediante laminazione manuale e sacco a vuoto. Il laminato è stato curato a 80°C per un'ora. Le principali caratteristiche fisiche sono mostrate in tab. 1.

Tabella 1: Dati relativi al CFRP prodotto mediante hand lay-up.

	Fibra	Matrice	Composito
peso [g]	74	35	109
% in peso	0,68	0,32	-
Densità [g/cm ³]	1,75	1,2	1,53
% in volume	0,59	0,41	1

Al fine di analizzare il comportamento meccanico di tale laminato sono state eseguite prove di trazione mediante una macchina servoidraulica MTS con velocità di spostamento costante, pari a 1 mm/min.

Le deformazioni dei provini sono state misurate mediante estensometro MTS modello 832.12c-20, con distanza tra i coltelli di 25 mm.

In fig.1(A) è riportata la configurazione geometrica e le dimensioni caratteristiche dei provini in CFRP testati in accordo alla norma ASTM D3039 [16].

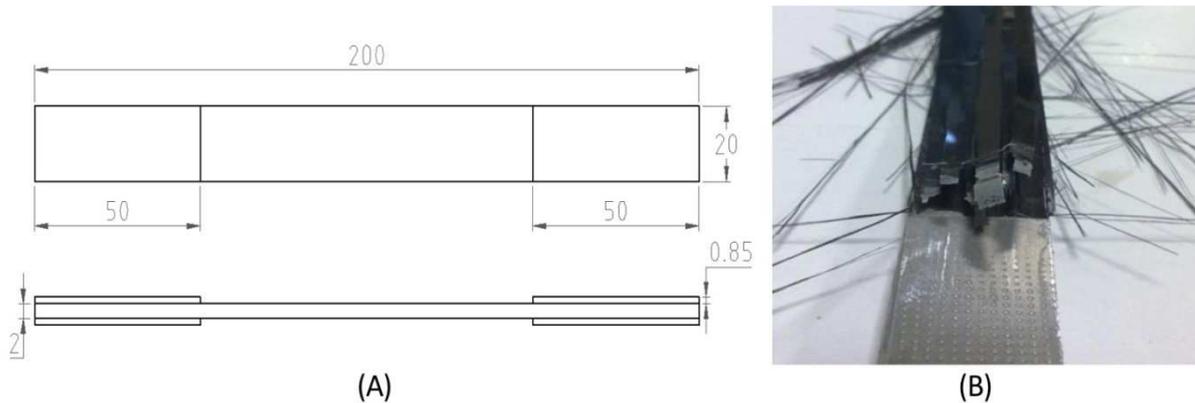


Figura 1: geometria dei provini utilizzata per la caratterizzazione sperimentale del composito CFRP(A) e particolare della modalità di rottura statica (B).

Le prove hanno evidenziato come il composito esibisca un comportamento elastico lineare sino alla rottura. Il danneggiamento finale avviene per debonding con modalità XGM [16] come si può osservare in fig. 1(B).

Si è rilevata una tensione di rottura pari a $\sigma_R = 418,76$ MPa e un modulo di Young $E = 49$ GPa.

A partire dai dati sperimentali del laminato sono state stimate, attraverso la Teoria Classica dei Laminati (TCL), le caratteristiche elastiche della singola lamina, necessarie per le successive simulazioni numeriche.

Per quanto concerne l'aderendo in alluminio esso è costituito da una lega serie 6xxx codificata come UNI-EN AW-6082-T6 (nome commerciale Anticorodal), i cui principali elementi in lega sono magnesio e silicio. Dopo il trattamento termico tale materiale ha caratteristiche meccaniche medie, in genere inferiori a quelle delle leghe della serie 2000. In accordo con la classificazione, le caratteristiche meccaniche dell'alluminio utilizzato sono: modulo di Young $E = 68$ GPa, tensione di snervamento $\sigma_s = 295$ MPa, tensione di rottura $\sigma_R = 316$ MPa.

Le giunzioni ibride a doppia sovrapposizione tra CFRP e alluminio sono state realizzate mediante incollaggio con la stessa matrice del laminato (resina epossidica) e rivetti a strappo. In particolare, sono stati considerati sia rivetti in alluminio che in acciaio aventi diametro $d = 4$ mm e lunghezza $L = 14$ mm. Si tratta in particolare di rivetti utilizzati per realizzare giunzioni con spessore complessivo compreso tra 8.5 e 10.5 mm. La geometria del rivetto è mostrata in dettaglio in fig. 2.



Figura 2: Geometrica del rivetto impiegato per le giunzioni analizzate.

Oltre ai giunti ibridi, sono stati analizzati pure i corrispondenti giunti semplicemente incollati e semplicemente rivettati.

2.2. Prove statiche

Le fig.3 e 4 mostrano in dettaglio la geometria dei giunti a doppia sovrapposizione utilizzata nel lavoro. In particolare, la fig. 3 si riferisce ai giunti semplicemente incollati mentre la fig. 4 descrive giunti ibridi incollati e rivettati.

In accordo con la teoria classica dei giunti incollati, lo spessore degli aderendi è stato fissato in modo da avere dei giunti bilanciati [17]. Un giunto sbilanciato risulta infatti meno resistente di un giunto bilanciato in quanto lo sbilanciamento dà luogo ad un innalzamento delle tensioni nel bordo di attacco dell'elemento meno rigido, e ciò indipendentemente dal verso di applicazione del carico (trazione e compressione). Nel caso di giunto a doppia sovrapposizione con aderendi esterni in laminato CFRP, avente spessore di 2 mm, dalla condizione di bilanciamento si ottiene, per l'aderendo interno in lega di

alluminio, uno spessore pari a 3 mm circa. Al fine di allontanare la possibile rottura dell'aderendo meno resistente (alluminio) causata dalla concentrazione di tensioni dovute ai fori necessari all'inserimento dei rivetti, è stato adottato uno spessore effettivo della lamina d'alluminio pari a 4 mm. Per meglio comprendere i meccanismi di resistenza, oltre ai provini semplicemente incollati e ai provini ibridi, sono stati analizzati pure provini semplicemente rivettati (fig.4).

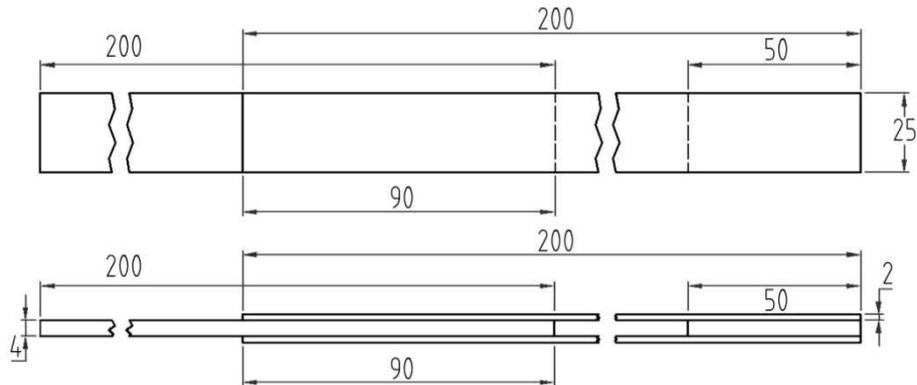


Figura 3: Geometria dei giunti semplicemente incollati analizzati.

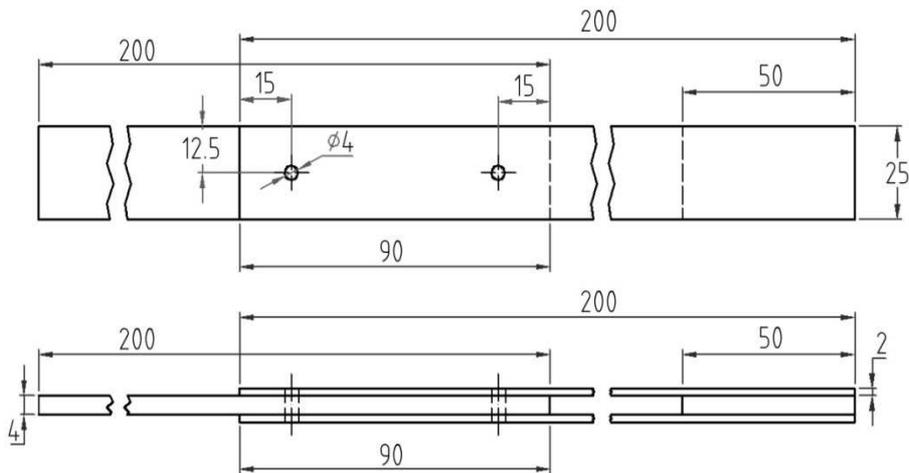


Figura 4: Geometria dei giunti semplicemente rivettati e ibridi analizzati.

La tab.2 mostra, per ogni tipologia di giunzione esaminata, il numero di provini utilizzati nelle prove sperimentali statiche.

Tabella 2: totalità delle prove statiche effettuate

	N° provini
Semplicemente incollati (SI)	5
Semplicemente rivettati con rivetto in alluminio (SR_AI)	4
Semplicemente rivettati con rivetto in acciaio (SR_acc)	4
Ibridi con rivetto in alluminio (Ibrido_AI)	5
Ibridi con rivetto in acciaio (Ibrido_acc)	5

I provini sono stati sottoposti preliminarmente a prove di trazione al fine di analizzare il meccanismo di danneggiamento ed il carico di rottura in condizioni statiche.

Nella fig.5(A,B) sono riportate le curve sperimentali di trazione relative ai giunti semplicemente incollati (SI, fig.5A) e ai giunti semplicemente rivettati (SR, fig.5B) con rivetti in alluminio ed in acciaio.

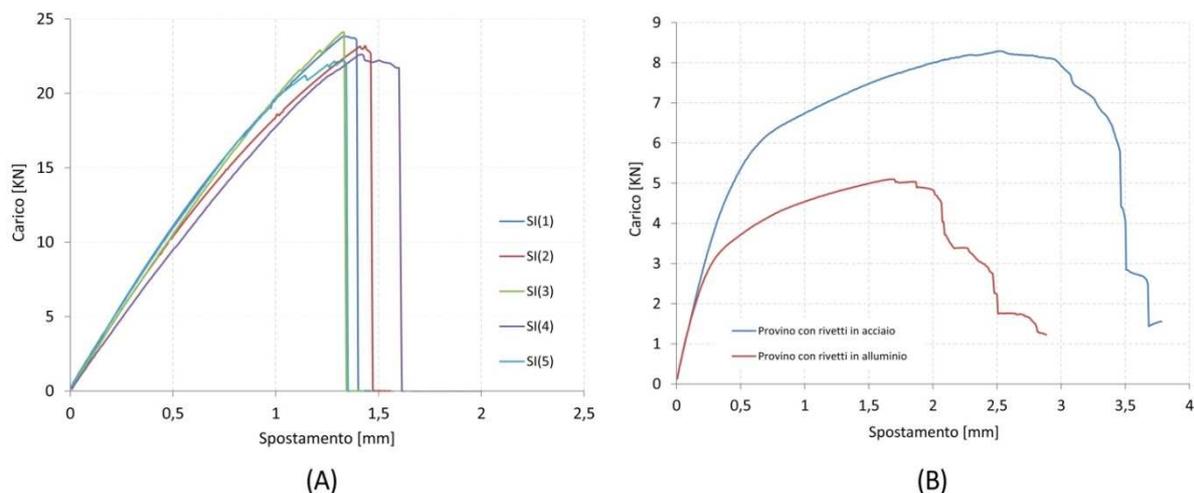


Figura 5: Curve di trazione per i giunti semplicemente incollati (A) e semplicemente rivettati (B).

Dal grafico di fig.5(A) è possibile osservare che i provini semplicemente incollati manifestano un comportamento pressoché lineare fino a rottura. Quest'ultima è causata dal cedimento dell'incollaggio che, in accordo con la teoria, si propaga a partire dal bordo di attacco dell'aderendo in composito (vedi anche Fig.6A).

Dalla fig.5(B) si osserva invece che i provini semplicemente rivettati esibiscono un comportamento inizialmente lineare seguito da una marcata non linearità. In particolare, i provini con rivetti in acciaio presentano un carico di rottura più elevato rispetto a quello rilevato per i provini con rivetti in alluminio (+75% circa). Dalle prove sperimentali si osserva come, per rivetti in acciaio, il cedimento del giunto avviene per deformazione flessionale del rivetto seguita dallo sfilamento dell'aderendo in composito previo danneggiamento localizzato del materiale nell'intorno del foro (vedi fig.6B). Nelle prove eseguite con rivetto in alluminio si osserva invece che la rottura avviene a seguito di una netta tranciatura dei rivetti senza significativa flessione e/o sfilamento. Nessun danneggiamento significativo si osserva in questo caso sugli aderendi in composito né in quello in alluminio.

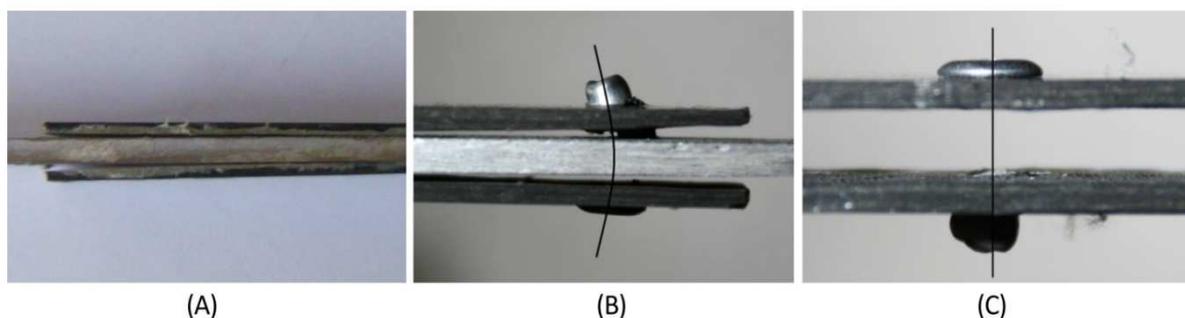


Figura 6: Modalità di rottura di giunti semplicemente incollati (A), semplicemente rivettati con rivetto in acciaio (B) e con rivetto in alluminio (C).

Dall'analisi delle curve carico-spostamenti relative alle prove di trazione su giunti ibridi con rivetti in alluminio (vedi fig.7A) si osserva invece un comportamento pressoché lineare sino a carichi relativamente elevati, seguito da una fase finale non lineare. In pratica, al cedimento progressivo dell'adesivo segue un parziale e progressivo trasferimento del carico ai rivetti (zona a comportamento non lineare) con successiva rottura di schianto del giunto che avviene sempre a seguito della rottura a taglio del rivetto (tranciatura).

Simile è il comportamento dei giunti ibridi con rivetti in acciaio sino al raggiungimento del carico di rottura (prima fase lineare seguita da una fase non lineare). Raggiunto il carico di rottura segue un più o meno marcato parziale *drop-down* del carico con deformazioni a rottura significativamente superiori a quelle rilevate per i provini ibridi con rivetti in alluminio.

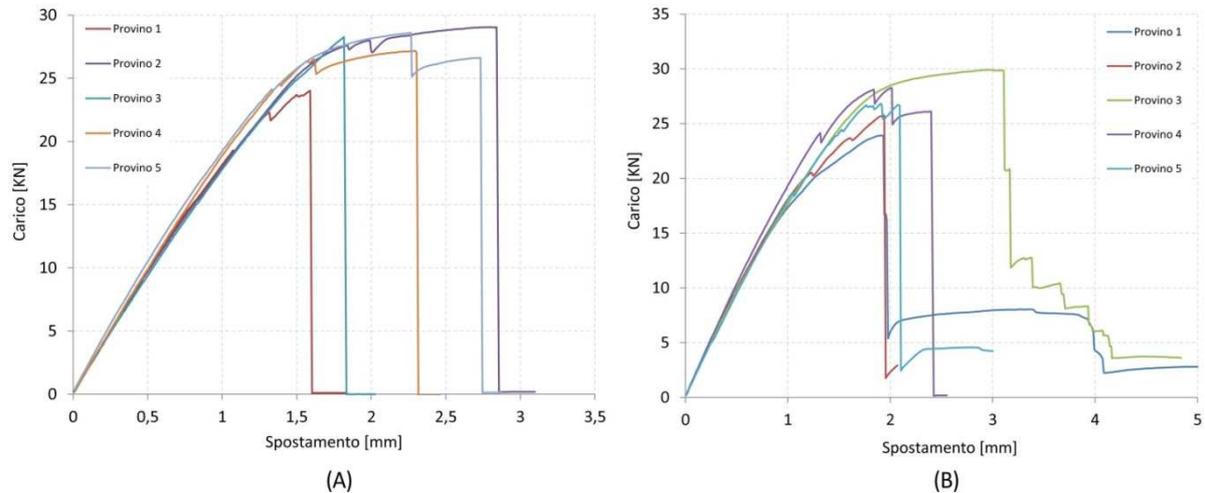


Figura 7: Curve di trazione per giunti ibridi con rivetto in alluminio (A) e con rivetto in acciaio (B).

Dal confronto dei valori del carico di rottura dei giunti semplicemente incollati e rivettati con rivetti in alluminio, con quelli dei relativi giunti ibridi, si osserva che il carico di rottura di questi ultimi è pari alla somma dei giunti semplicemente incollati e semplicemente rivettati che lo costituiscono. A rottura avvenuta, esaminando la superficie di incollaggio si osserva che, a causa della discontinuità introdotta dal foro, il primo strato di fibra dell'aderendo in composito (orientato a 0°) rimane incollato alla lamina di alluminio (vedi fig.8A); inoltre la testa e la controtesta del rivetto non provocano alcuna deformazione apprezzabile nel composito CFRP.

Dall'analisi del comportamento statico della giunzione ibrida con rivetti in acciaio (fig.7B) si deduce invece che il carico di rottura è inferiore alla somma dei carichi di rottura delle due tipologie di giunzione coesistenti, incollata e rivettata. Inoltre, al raggiungimento del carico di rottura (di entità paragonabile a quello rilevato per i giunti ibridi con rivetti in alluminio), segue un più o meno marcato drop-down del carico verso valori pari al 15-20% del carico di rottura, con deformazione a rottura generalmente molto superiore a quella dei giunti ibridi con rivetti in alluminio.



Figura 8: Superficie di rottura dei provini ibridi con rivetti in alluminio (A) e danneggiamento nell'intorno del foro sui provini ibridi con rivetti in acciaio

In fig. 8(B) è mostrato un particolare del provino ibrido con rivetti in acciaio a fine prova. Si osserva come, a causa della maggiore resistenza a taglio del rivetto, il laminato in carbonio risulta ora localmente deformato e danneggiato, come già osservato per il caso di giunto semplicemente rivettato con rivetti in acciaio (vedi fig.6B).

In sintesi, confrontando le performance dei giunti ibridi con i corrispondenti giunti semplicemente incollati e rivettati è possibile affermare che mentre il carico di rottura del giunto ibrido con rivetto in alluminio è pari alla somma dei carichi delle giunzioni semplici, l'incremento di carico di rottura del giunto ibrido con rivetto in acciaio rispetto al giunto semplicemente incollato è pari a circa 5kN, corrispondente a circa il 60% del carico di rottura del giunto semplicemente rivettato. Definendo una

efficienza percentuale del giunto ibrido ($e\%$) come il rapporto tra il carico di rottura del giunto ibrido e la somma dei carichi di rottura delle corrispondenti giunzioni semplici, è possibile affermare che le giunzioni ibride con rivetto in alluminio hanno efficienza del 100% mentre le giunzioni ibride con rivetto in carbonio hanno efficienza pari al 90%. Risulta infatti:

$$e\%(acciaio) = 100 \frac{P_{R,ibrido}}{P_{R,incollato} + P_{R,rivettato}} = 100 \frac{28 \text{ kN}}{23 \text{ kN} + 8 \text{ kN}} = 90\%$$

$$e\%(alluminio) = 100 \frac{P_{R,ibrido}}{P_{R,incollato} + P_{R,rivettato}} = 100 \frac{28 \text{ kN}}{23 \text{ kN} + 5 \text{ kN}} = 100\%$$

In fig. 9(A) e 9(B) sono mostrati, rispettivamente, i valori di carico di rottura e di rigidezza medi relativi alle varie tipologie di giunzione esaminate.

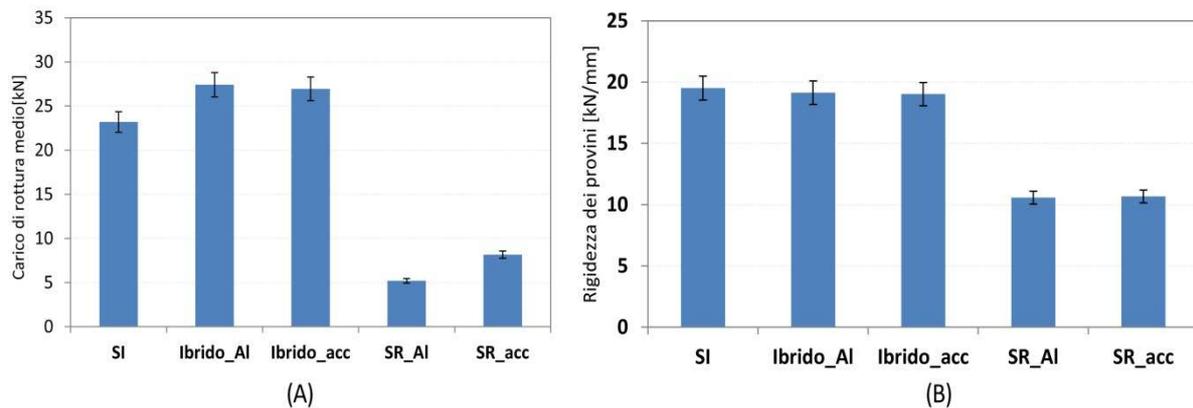


Figura 9: Carico di rottura medio per i diversi giunti esaminati (A) e relative rigidzze (B).

Dal grafico di fig.9(A) si evince che i provini ibridi incollati e rivettati (sia con rivetti di acciaio o di alluminio) raggiungono un carico di rottura statico maggiore delle altre tipologie esaminate. In altre parole la presenza del rivetto contribuisce a limitare gli effetti delle tensioni di peeling, responsabili della rottura adesiva dei giunti semplicemente incollati. L'incremento rispetto alla resistenza dei giunti semplicemente incollati è comunque piuttosto modesta (circa il 20%) a causa della bassa resistenza della rivettatura in alluminio e del danneggiamento locale del CFRP.

Dalla figura 9(B) si deduce che la presenza dei rivetti nei giunti ibridi non comporta variazioni apprezzabili della rigidezza (dei giunti integri) rispetto a quella dei giunti semplicemente incollati. Ciò è ampiamente giustificato dal fatto che in regime elastico (carichi non elevati) la rigidezza del giunto è essenzialmente legata alla geometria ed alla rigidezza degli elementi accoppiati, essendo trascurabile il contributo legato alla rigidezza dell'adesivo e del bullone.

2.3. Prove di fatica

Nel lavoro è stato eseguito un confronto tra le caratteristiche di resistenza a fatica di provini semplicemente incollati e provini ibridi con rivetti in acciaio soggetti a carico pulsatorio sinusoidale. Le prove sono state condotte su una macchina servoidraulica MTS con cella di carico da 100 kN, rapporto di carico pari a $R=0.1$ (trazione-trazione), frequenza di applicazione pari a 10 Hz che, come verificato, assicura l'assenza di fenomeni di riscaldamento del CFRP per isteresi meccanica.

Per ciascuna tipologia di provini, i livelli di carico di fatica sono stati scelti in funzione del carico massimo di rottura determinato nelle prove statiche. Le prove sono state eseguite in controllo di carico con valore massimo variabile tra il 40% e il 70% del carico di rottura statico.

Nella tab. 3 sono elencati i livelli di carico massimo con cui sono stati sollecitati a fatica le giunzioni in studio e, tra parentesi, il corrispondente numero di provini testati.

Tabella 3: Livelli di carico massimo e numero di provini utilizzati per le prove di fatica.

		Percentuale del carico di rottura statico					
		40%	50%	55%	60%	65%	70%
Giunti semplicemente incollati (SI)	Pmax [N]	9200 (2)	11500 (2)	12650 (2)	13800 (2)	14950 (1)	16100 (2)
Giunti ibridi con rivetto in acciaio (Ibrido_acc)	Pmax [N]	10800 (2)	13500 (4)	14850 (3)	16200 (1)	-	18900 (2)

Nella fig. 10 sono riportate le curve di Wöhler relative alle due tipologie di giunzioni analizzate.

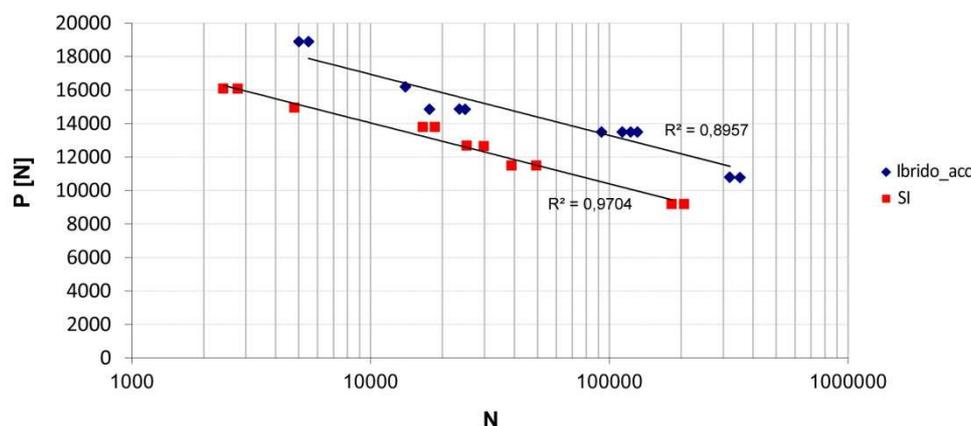


Figura 10: Confronto delle curve di Wöhler relative alle due tipologie di giunzioni analizzate.

Gli andamenti delle curve di fatica riportate in fig.10 mostrano che il processo combinato di rivettatura e incollaggio apporta rilevanti incrementi della durata a fatica del giunto a doppia sovrapposizione, se comparato alla giunzione semplicemente incollata. A parità di carico applicato la vita a fatica migliora mediamente di un fattore 5. A parità di numero di cicli di carico applicati invece, le giunzioni ibride resistono a carichi più elevati rispetto alle giunzioni semplicemente incollate, con un aumento medio del carico variabile tra il 15% e il 25%.

Per quanto concerne le modalità di rottura a fatica, si osserva che le giunzioni semplicemente incollate cedono con rottura (adesiva) di schianto all'interfaccia alluminio-composito.

Per i giunti ibridi invece è possibile osservare che il cedimento avviene essenzialmente in due fasi distinte. Infatti, alla rottura progressiva di buona parte dell'incollaggio segue il cedimento dei rivetti con sfilamento parziale dal composito. Quest'ultimo risulta più o meno danneggiato in funzione della percentuale di carico applicato. In particolare, con percentuali di carico massimo inferiori o uguali al 50% del carico di rottura statico, si verifica un vistoso danneggiamento del composito (fig.11A); con percentuali di carico invece superiori al 50% del carico di rottura statico è possibile constatare che il composito non presenta danneggiamenti evidenti (fig.11B).

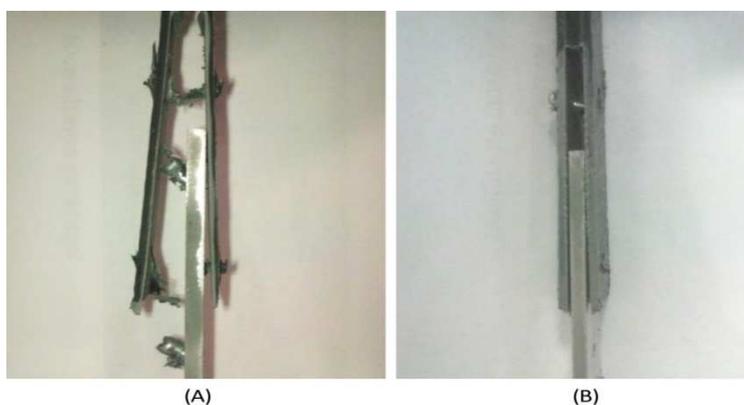


Figura 11: Danneggiamento a fatica dei giunti ibridi analizzati per carico massimo inferiore (A) e superiore (B) del 50% del carico di rottura statico.

Al diminuire del carico massimo si verifica, infatti, un distacco più graduale dell'adesivo dall'alluminio con conseguente trasferimento di una quantità maggiore di carico stesso sul rivetto, prima della rottura definitiva. Questo determina notevoli deformazioni del CFRP in prossimità del bordo del foro. Per valori di carico massimo superiori al 50% del carico di rottura statico, invece, le deformazioni presenti sui fori del CFRP a fine prova sono poco rilevanti, paragonabili al caso statico. A titolo di esempio, la figura 12 mostra il danneggiamento a fatica del CFRP per carico massimo applicato pari al 70% (A), 60% (B), 55% (C), 50% (D) e 40% (E) del carico di rottura statico.

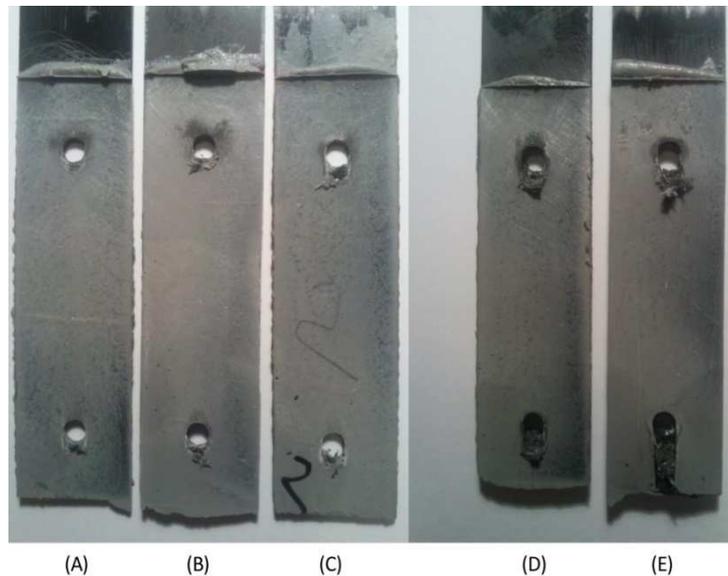


Figura 12: Modalità di rottura tipica dei giunti ibridi per carico massimo applicato al 70% (A), 60% (B), 55% (C), 50% (D), 40% (E) del carico di rottura statico.

3. ANALISI NUMERICA

Un'analisi numerica in ambiente ANSYS APDL con solutore esplicito ha permesso di determinare l'estensione del danneggiamento interlaminare subito dal CFRP a seguito dell'operazione di rivettatura. In particolare, l'analisi è stata condotta utilizzando un modello tridimensionale parametrico del giunto ibrido a doppia sovrapposizione che riproduce le 8 lamine del CFRP. Il modello numerico è stato discretizzato tramite elementi a 8 nodi tipo SOLID164, ottimizzati per la modellazione solida di geometrie 3D. Per velocizzare i tempi dell'analisi, lo stelo metallico interno del rivetto è stato considerato come parte rigida. Il cilindro deformabile esterno è stato modellato attraverso la definizione di caratteristiche elastoplastiche di tipo “*plastic kinematic hardening*”. In dettaglio, nella tabella 4 sono riportati i parametri utilizzati per definire le caratteristiche meccaniche dell'acciaio considerato nelle simulazioni numeriche del processo di rivettatura.

Tabella 4: Parametri utilizzati per definire le caratteristiche elasto-plastiche del cilindro esterno del rivetto in acciaio.

Densità [Kg/mm³]	8.75E-6
Modulo di elasticità	210000
Coefficiente di Poisson	0.28
Tensione di snervamento [MPa]	275
Tangent modulus [MPa]	20
Hardeningparameter	0.5
Strain rate parameter C	40
Strain rate parameter P	5

Le caratteristiche elastiche delle singole lamine ortotrope costituenti il materiale composito sono state introdotte attraverso la definizione di un sistema di coordinate locale, prima dell'esecuzione della discretizzazione. Le lamine adiacenti sono state definite come parti indipendenti e separate, all'interfaccia, da nodi sovrapposti. Il rivetto è stato realizzato tramite estrusione per rivoluzione, data l'assialsimmetria del modello.

Elementi di contatto di tipo *TSTS* (*Tie break Surface-To-Surface contact*) sono stati disposti all'interfaccia tra le lamine in composito e tra gli elementi in composito e la lamina di alluminio in modo da simulare la zona di incollaggio e definire le superfici di danneggiamento. La definizione di tale tipologia di contatto permette la modellazione delle connessioni tra parti indipendenti del modello e la trasmissione di carichi di compressione, trazione e taglio, con la possibilità di definire opportuni criteri di rottura. Infatti, il contatto di tipo *TSTS* può essere considerato un incollaggio perfetto solo fino al raggiungimento di una condizione limite di rottura. Superato tale valore, il nodo appartenente ad una parte del modello si separerà dalla parte coniugata determinando la nascita di un difetto interlaminare. Ulteriori tipologie di contatti (di tipo *NTS*, *Node-To-Surface*) sono stati definiti tra la superficie esterna del cilindro deformabile del rivetto e la superficie interna del foro.

Definite le parti del modulo dinamico si è passati alla definizione dello spostamento temporale dello stelo metallico del rivetto. È stato quindi definito il vettore dei tempi (secondo step di valore pari al decimo di secondo) correlato al vettore degli spostamenti dello stelo del rivetto. La fig.13(A) mostra un particolare della discretizzazione del modello nell'istante iniziale della simulazione numerica; la fig. 1(B) mostra la formatura del rivetto nella fase finale della simulazione. La figura 1(C) mostra infine un particolare della zona prossima alla controtesta del rivetto che evidenzia le zone di composito delaminato (si osserva lo spostamento relativo dei nodi appartenenti a lamine adiacenti del composito CFRP).

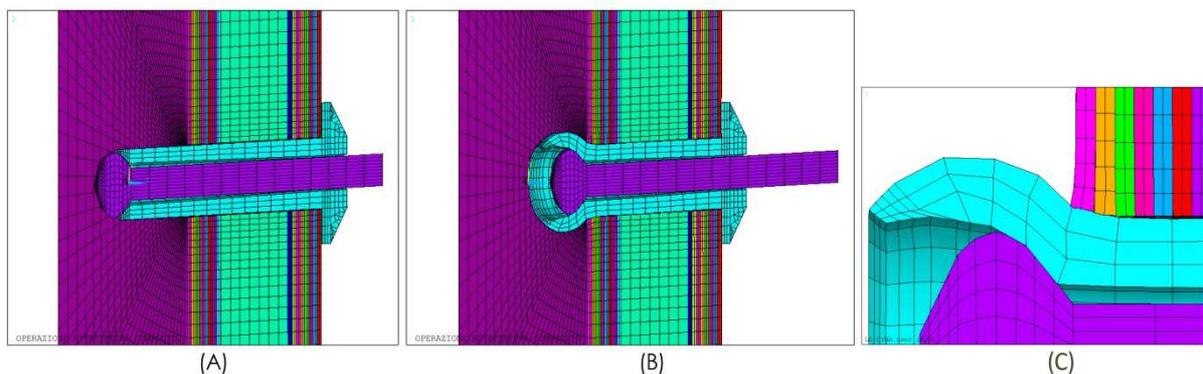


Figura 13: Particolare del modello FEM nella fase iniziale della rivettatura (A), deformata del modello a fine rivettatura (B) e particolare del composito delaminato (C) intorno al foro.

Nella fig. 14 è mostrata in maggiore dettaglio l'estensione del danneggiamento interlaminare che si ha nel CFRP alla fine del processo di rivettatura simulato numericamente. Dalla figura è possibile osservare che un significativo danneggiamento, di estensione confrontabile con il diametro del foro, si verifica sull'aderendo in CFRP posto dal lato della testa del rivetto; in particolare si rileva delaminazione all'interfaccia tra la lamina superficiale con fibre a 0° e la lamina sottostante con fibre inclinate a $+45^\circ$.

Di contro, nelle lamine più interne, nella zona centrale del giunto e all'interfaccia tra il composito e la lamina di alluminio non si evidenziano apprezzabili fenomeni di danneggiamento del CFRP.

L'estensione relativamente elevata della delaminazione in prossimità delle lamine esterne del giunto, molto più elevata rispetto al caso di rivetto in alluminio e rispetto al caso di giunto semplicemente bullonato ove il composito può scorrere più facilmente sotto la sollecitazione di compressione del rivetto, qui non mostrati per brevità, giustifica la minore efficienza del giunto ibrido in carbonio rilevata sperimentalmente. La delaminazione infatti, riduce le caratteristiche meccaniche della giunzione e favorisce lo sfilamento parziale del rivetto, così come ampiamente evidenziato dalle prove sperimentali (fig.8A e fig.11A).

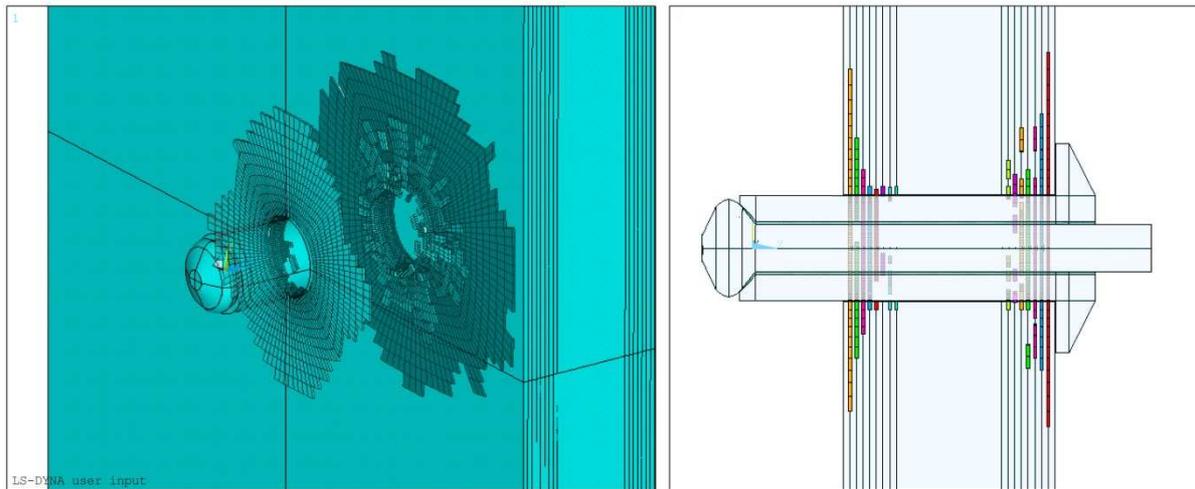


Figura 14: Mappe del danneggiamento interlaminare del CFRP a seguito del processo di rivettatura.

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato condotto uno studio numerico-sperimentale su giunti ibridi (incollati e rivettati) a doppia sovrapposizione tra alluminio AW 6082 T6 ed un laminato CFRP quasi isotropo $[0/\pm 45/90]$, a matrice epossidica.

Il confronto dei risultati sperimentali relativi al giunto ibrido e ai giunti semplicemente incollati e semplicemente rivettati, ha mostrato che, se opportunamente configurati, i giunti ibridi consentono una soddisfacente distribuzione del carico tra le due tipologie di giunzioni coesistenti, con una corrispondente resistenza statica prossima alla somma di quella del giunto incollato e del giunto rivettato. Significativi vantaggi si ottengono pure in termini di energia assorbita a rottura.

In dettaglio, giunzioni ibride con rivetti in acciaio mostrano una più bassa efficienza a causa di significativi fenomeni di danneggiamento localizzato che si verificano nel CFRP nell'intorno del foro e che portano ad un meccanismo di rottura con sfilamento delle lamine in composito. Tale meccanismo di danneggiamento inizia già con il processo di rivettatura, come hanno confermato le analisi numeriche condotte in ANSYS APDL con solutore esplicito simulando il processo di rivettatura. In particolare, le simulazioni numeriche hanno mostrato che la rivettatura dà luogo a delaminazione tra le due lamine più esterne dell'aderendo in CFRP. La delaminazione si estende radialmente per una distanza dal bordo foro pari a circa il diametro del foro (4-5 mm). Tale danneggiamento, causato dalla testa e dalla controtesta del rivetto, contribuisce a un prematuro sfilamento del CFRP ed è responsabile della minore efficienza dei giunti ibridi con rivetti in acciaio rispetto ai giunti ibridi con rivetti in alluminio.

Ulteriori sviluppi del lavoro riguardano la messa a punto di opportune azioni in grado di migliorare ulteriormente l'efficienza di tali giunti ibridi, evitando i fenomeni di danneggiamento localizzato (concentrati a bordo foro) del CFRP a seguito dell'operazione di rivettatura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kwang-Soo Kim, Jae-Seok Yoo, Yeong-Moo Yi and Chun-Gon Kim, "Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints". *Composite Structures*, 72, 477-485 (2006).
- [2] James F. P. Owens and Pearl Lee-Sullivan, "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to aluminum joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20, 39-45 (2000).
- [3] L.J. Hart-Smith. "Adhesive-bonding double-lap joints". NASA CR- 112235, 1973.
- [4] Jin Ho Choi e Dai Gil Lee. "The torque transmission capabilities of the adhesively bonded tubular single lap joint and the double lap joint", *The Journal of Adhesion*, 44, 197-212 (1994).

- [5] Jin-HweKweon, Jae-Woo Jung, Tae-Hwan Kim, Jin-Ho Choi, Dong-Hyun Kim, “Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding”, *Composite Structures*, 75, 192-198 (2006).
- [6] Gordon Kelly, “Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints”, *Composite Structures*, 72, 119–129 (2006).
- [7] Young-Hwan Lee , Do-Wan Lim, Jin-Ho Choi, Jin-HweKweon, Myung-Keun Yoon,” Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints”, *Composite Structures*, 92, 2916–2926 (2010).
- [8] S. Ucsnik, M. Scheerer, S. Zaremba, D.H. Pahr, “Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology”, *Composites: Part A*, 41, 369-374 (2010).
- [9] Jin-HweKweon, Jae-Woo Jung, Tae-Hwan Kim, Jin-Ho Choi, Dong-Hyun Kim, “Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding”, *Composite Structures*, 75, 192-198 (2006).
- [10] T. Sadowski, M. Kneć, P. Golewski, “Experimental investigations and numerical modeling of steel adhesive joints reinforced by rivets”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30, 338-346 (2010).
- [11] A. Manes, M. Giglio, F. Viganò, “Effect of riveting process parameters on the local stress field of a T-joint”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 53, 1039-1049 (2011).
- [12] PMST De Castro, PFP De Matos, PMGP Moreira, LFM Da Silva, “An overview on fatigue analysis of aeronautical structural details: open hole, single rivet lap-joint and lap-joint panel”, *Mater SciEng*, 144, 468-470 (2007).
- [13] PFP De Matos, PMGP Moreira, PP Camanho, PMST De Castro, “Numerical simulation of cold working of rivets holes”, *Finite Elem Anal Des*, 41, 989-1007 (2005).
- [14] PFP De Matos, AJ McEvily, PMGP Moreira, PMST De Castro, “Analysis of the effect of cold-working of rivet holes on the fatigue life of an aluminum alloy”, *Int J Fatigue*, 29, 575-586 (2007).
- [15] MATES - Technical Data Sheet: Epoxy Resin I-SX10 ver2.
- [16] ASTM D3039 / D3039M “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” ASTM International (2008).
- [17] A. Russo, B. Zuccarello, “Toward a design method for metal-composite co-cured joint based on the G-SIFs”. *Composites: Part B: Engineering*, 45(1), 631-643 (2012).