

FABRIZIA GREZZO, FRANCESCO CESARI,
GIANNI CALIGIANA, SERGIO CURIONI

GIUNTI RIVETTATI IN MATERIALE COMPOSITO

**Metodologia delle prove sperimentali condotte
su tre geometrie di giunti rivettati a doppia
sovrapposizione in materiale composito
volte alla determinazione della resistenza a carico
quasi statico e a fatica**

E noto come generalmente i collegamenti di tipo meccanico tendano a essere preferiti a collegamenti di tipo saldato o incollato per alcune parti di strutture che necessitano di elevata affidabilità e sicurezza quali componenti di strutture aeronautiche. Questo per la facilità di ispezione e manutenzione che tali collegamenti consentono. Di qui la particolare cautela che viene adottata nel disegno e nel progetto di tali componenti. Le giunzioni rappresentano, infatti, una zona critica della struttura in quanto introducono delle interruzioni geometriche e delle discontinuità nel materiale che possono risultare in aree ad alta concentrazione di tensione. Tale tensione può essere particolarmente pericolosa soprattutto perché il trasferimento del carico tra due elementi

della giunzione deve aver luogo in una frazione della sezione disponibile.

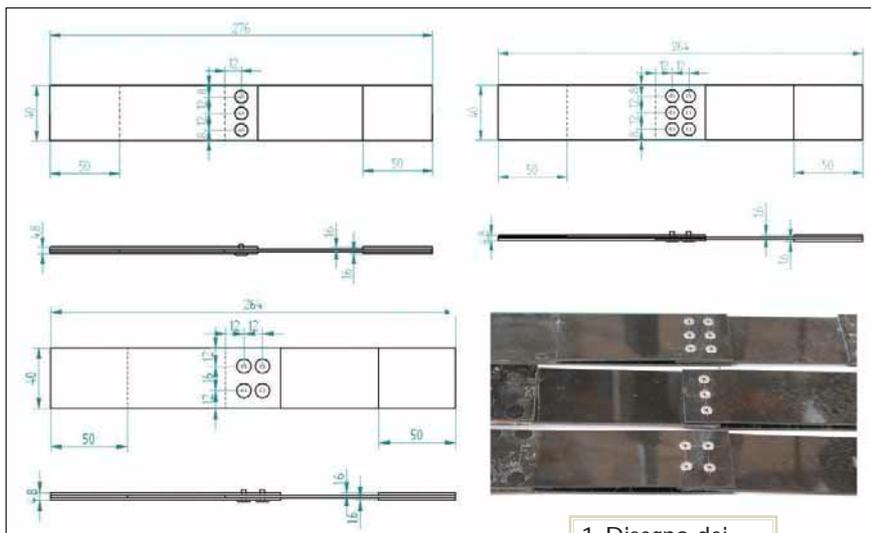
Contrariamente a quanto si osserva per i collegamenti meccanici in strutture metalliche ove è possibile sfruttare il comportamento plastico del materiale in modo tale che lo sneramento locale raggiunto abbassi i picchi di carico, per i materiali compositi questa riduzione di tensione non può essere realizzata e i picchi di carico devono essere necessariamente previsti ed evitati [1].

Dal punto di vista della realizzazione pratica del tipo di giunto qui analizzato è importante osservare che il numero e il tipo dei rivetti necessari per trasferire carichi in condizioni operative specifiche viene stabilito solitamente sulla base di considerazioni relative allo spazio disponibile e all'assemblaggio. La maggior parte delle strutture aeronautiche presentano

giunzioni a file multiple di rivetti e dunque parte dell'indagine sperimentale svolta in precedenza appartenente a questo progetto è stata pianificata soprattutto per osservare l'influenza reciproca tra le varie file di rivetti e l'influenza della loro disposizione sul comportamento complessivo del materiale al fine di ottimizzarne il disegno: problema tutt'oggi aperto e oggetto d'indagine.

La linea guida che solitamente viene seguita per il disegno ottimale di un giunto meccanico in materiale composito è tale da poter assicurare la giunzione contro ogni possibile rottura nelle condizioni operative assegnate [2]. In questa fase, si sono rivelate come variabili molto importanti la scelta della distanza dei fori dei rivetti dai bordi della giunzione e fra di loro, lo spessore del laminato e il diametro dei rivetti.

Tali variabili vengono scelte in modo



1. Disegno dei giunti a doppia sovrapposizione e realizzazione pratica.

tale che tutti gli eventuali cedimenti del componente evitino, comunque, la rottura netta della sezione, considerata come evento catastrofico.

Per la comprensione dei meccanismi di rottura del componente e la stima

sono stati realizzati in autoclave da Ri.BA. Composites S.r.l, Faenza-Forlì. I disegni del componente sono stati ottenuti considerando i risultati di precedenti prove sperimentali [3] e quanto presente in letteratura [4], [5]. Vista la mancanza di normativa al riguardo, una serie di indagini numeriche, condotte parallelamente ad altrettante verifiche sperimentali su materiale liscio con foro singolo e con due fori in differenti configurazioni, ha portato alla determinazione della distanza minima tra due fori alla quale non si ha la sovrapposizione delle tensioni. Il rispetto di tale distanza nel disegno della giunzione si è rilevato fondamentale per garantire l'assenza o la debole presenza di sovrapposizione degli effetti e, quindi, l'incremento di resistenza nella regione compresa tra due rivetti [6]. Ciò è stato confermato dall'osservazione del modo di rottura co-



2. Sistema di afferraggio utilizzato e installazione del componente.

della durata di vita in condizioni di carico a fatica con rapporto di carico $R=0$, sono state programmate prove di caratterizzazione statica e a fatica su giunzioni a doppia sovrapposizione in diverse configurazioni. Considerando che la maggiore limitazione strutturale di componenti in materiale composito si ha per l'insufficiente resistenza nella direzione dello spessore del materiale, la superficie di appoggio delle teste del rivetto è stata scelta più ampia possibile al fine di ridurre le tensioni indotte e dunque il possibile danneggiamento della lamina superficiale del materiale.

Per tale motivo sono stati utilizzati rivetti a testa standard tonda.

DISEGNO DEL COMPONENTE

Il materiale considerato per la realizzazione dei giunti è un preimpregnato PR UD CST 80/585 FT109 45 di spessore nominale di 0,2 mm a matrice epossidica rinforzato in fibra lunga di carbonio unidirezionale T300 presente per il 60% in volume. I pannelli laminati in 8 strati, con disposizione dei rinforzi (lay-up) del tipo $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$ e con spessore complessivo finale medio di 1,5 mm,



è comune a tutti i tipi di giunto considerati. Il rispetto della distanza minima tra rivetti ha permesso di studiare l'effetto dei rivetti stessi sul materiale e la trasmissione del carico che essi garantiscono analizzando semplicemente l'azione che un singolo rivetto esercita sul materiale. I disegni proposti per i giunti a doppia sovrapposizione sono riportati in figura 1. Si può notare come le file di rivetti distino una dall'altra e dal bor-

do più vicino di 12 mm. I rivetti si presentano equispaziati uno dall'altro di 12 mm per le tipologie di giunti DL 313 (giunto a doppia sovrapposizione, o double-lap, con una fila di rivetti con 3 rivetti di diametro 3 mm) e DL 623 (double-lap a due file di rivetti con 3 rivetti ciascuna di diametro 3 mm). Si presentano, invece, equispaziati uno dall'altro di 16 mm per il DL 423 (double-lap a due file di rivetti con due rivetti ciascuna di diametro 3 mm). La realizzazione pratica del componente è stata ottenuta attraverso le seguenti fasi: il materiale è stato fornito in lastre rettan-

stessa fila durante la loro realizzazione pratica. I rivetti usati sono di tipo inox Aisi 316 a testa tonda standard di 3 mm di diametro. La scelta di questa tipologia è motivata dalla semplicità della geometria e del collegamento risultante, dalla grande resistenza a taglio e dall'assenza di alluminio che potrebbe innescare processi di corrosione galvanica in strutture destinate ad applicazioni per esterni e, quindi, soggette a condizioni ambientali che prevedono infiltrazioni d'acqua tra gli elementi della giunzione. La te-

STRUMENTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE

Tutte le prove sperimentali sono state condotte a temperatura ambiente su di una macchina servo-idraulica Instron 8033 con cella di carico di 250 kN il cui range di sensibilità nell'acquisizione per le prove a fatica è stato impostato a ± 25 kN. I dati sono stati acquisiti tramite software Test-Star Station Manager versione 3.1, MTS Corporation. Durante le prove



3. Sistema di acquisizione MTS e sistema parallelo.



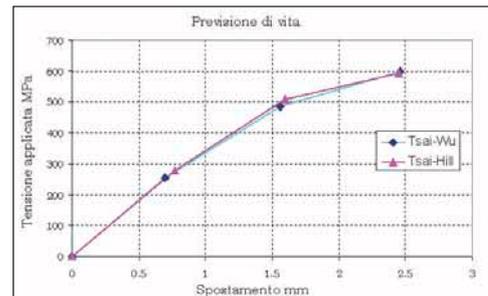
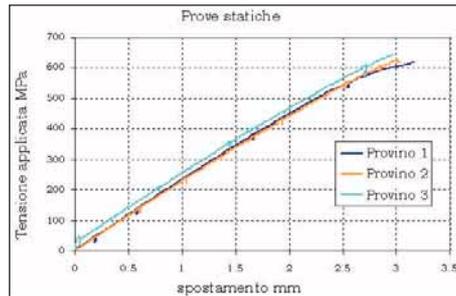
golari di 300x40x1.5 mm da Ri.Ba Composites che sono state tagliate per ricavarne lastre di lunghezza di 150 mm; tre lastre risultanti, sovrapposte l'una sull'altra, sono state forate assieme una volta stabilite le distanze dai bordi e la posizione dei fori per i rivetti; infine sono state realizzate le varie configurazioni di giunto a doppia sovrapposizione facendo uso di rivettatrice automatica. I fori per l'inserimento dei rivetti sono stati effettuati con punte 101X Master che, per la loro maggiore affilatura a geometria speciale, hanno garantito una buona finitura interna del foro e soprattutto la quasi completa assenza di delaminazione dello strato superficiale a 0°, fattore determinante per garantire un'equa distribuzione di carico tra tutti i rivetti della giunzione ed evitare effetti di maggiore concentrazione del carico o rotazione del rivetto dovuta ad una ovalizzazione del foro o al non buon allineamento dei centri dei fori nella

sta tonda del rivetto, come il suo gambo, consente una buona ed ampia superficie di appoggio che non intaglia lo strato superficiale del materiale.

In questa prima fase di analisi, non è stata presa in considerazione la pressione esercitata dal rivetto lungo lo spessore del materiale perché l'uso di una rivettatrice automatica ha garantito l'applicazione della stessa forza di serraggio per ciascun rivetto (l'esito delle prove sperimentali effettuate ha permesso di verificare che la forza di compressione esercitata è sufficiente a garantire il collegamento fino a fine vita del giunto) e perché la resistenza del materiale lungo la direzione dello spessore è estremamente elevata (l'ottima tolleranza del materiale alla pressione applicata dal rivetto è stata dimostrata qualitativamente da osservazioni al microscopio eseguite subito dopo l'operazione di assemblaggio del componente).

a fatica su componente, sono stati eseguiti frequenti controlli con un termometro a infrarossi per assicurare che la frequenza di prova stabilita non fosse tale da innalzare la temperatura del materiale e causare l'innescio di fenomeni visco-plastici con possibile deterioramento della matrice polimerica. Una delle priorità di questo lavoro è stata quella di garantire ripetitività e buona affidabilità dei risultati. Allo scopo è stato utilizzato un sistema di afferraggio, messo a punto in precedenti lavori sperimentali, riportato in figura 2 [7-9], in grado di assicurare assenza di flessione non desiderata sul provino. Le prove su componente sono state precedute da prove di caratterizzazione del materiale e ciò ha richiesto l'ideazione di un sistema di acquisizione parallelo al controllo MTS per la registrazione dei segnali provenienti da estensimetri collocati sul provino. Il sistema di acquisizione parallelo utilizzato è illustrato in figura 3. Le principali caratteristiche di resistenza meccanica del materiale sono state determinate in una serie di prove condotte secondo normativa

ASTM [10-12]. I risultati sono riportati in tabella 1. I provini lisci sono stati strumentati con estensimetri HBM 350Ω collegati ciascuno a quarto di ponte di Wheatstone per il calcolo del modulo di Young e per la verifica del coefficiente di Poisson. I risultati sperimentali concernenti le caratteristiche meccaniche del materiale sono stati verificati teoricamente in accordo con la teoria dei laminati sottili (LPT, *Laminated Plate and Shell Theory*) e i principali criteri di rottura presenti in letteratura hanno consentito la previsione del carico di



rottura del primo strato FPF (*First Ply Failure*) per il materiale. La tensione di rottura finale del laminato (LPF, *Last Ply Failure*) viene valutata teoricamente con un metodo di riduzione progressiva della rigidità (tabella 2), utilizzando opportuni coef-

4. Confronto tra curve di caratterizzazione sperimentali e numeriche.

ficienti di riduzione, come in [13]. Si può notare come i valori numerici ottenuti per la previsione della rottura finale del laminato in prove quasi statiche ($\sigma_{Rottura}$), siano molto prossimi ai valori sperimentali, tabella 2 (errore massimo del 4,8 %). Nei grafici di figura 4 è riportato il confronto tra le previsioni numeriche del comportamento del materiale (in accordo con il metodo di riduzione della rigidità, si pone $E_{L(t+dt)}=r \cdot E_{L(t)}$, $E_{T(t+dt)}=r \cdot E_{T(t)}$, $G_{lt(t+dt)}=r \cdot G_{lt(t)}$) e si utilizzano i criteri di Tsai-Wu e Tsai-Hill) e gli andamenti sperimentali relativi a tre prove quasi-statiche di caratterizzazione del laminato.

E_x [MPa]	E_x/E_y	G_{xy} [MPa]	E_x/G_{xy}	ν_{xy}	$\sigma_{Rottura}$ [Mpa]
46000	1	17300	2.67	0.3	625

Tabella 1. Caratteristiche del materiale come risultato della caratterizzazione sperimentale.

Tabella 2. Proprietà di resistenza del laminato come da previsione numerica.

Criterio di rottura	Tsai Hill	Tsai Wu
FPF [MPa]	278	255
LPF [MPa]	595	598

F. Grezzo, F. Cesari, G. Caligiana, S. Curioni, Università degli Studi di Bologna.

BIBLIOGRAFIA

[1] Military Handbook, *Polymer Matrix Composites*, Vol. 3.
 [2] J. J. Tierney, J. W. Gillespie JR., P.-E. Bourban, *Comprehensive of Composite Materials, "Joining Composites"*, Vol. 2, pp. 1029-1047, A. Kelly and C. Zweben Editors, Elsevier, 2000.
 [3] Ghezzi F., Minak G., Caligiana G., "Progetto di giunzioni rivettate su materiale composito CFRP", XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Salerno 3-6 settembre 2003, AIAS 2003.
 [4] Li Q.M., Mises R.A.W., Birch R.S., "Static and dynamic behaviour of composite riveted joints in tension", *Int. Jour. of Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 1591-1610.
 [5] Banbury A., Kelly D.W., "A study of fastener pull-through failure of composite laminates. Part 1: Experimental", *Composite Structures*, Vol. 45, pp. 241-254, 1999.
 [6] Giannini G., Ghezzi F., "Experimental and Numerical Analysis on Notched CFRP Laminates", [2] IMEKO Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, 12th-15th May, Porretta, 2004.
 [7] Caligiana G., Liverani A., "Apparecchiatura per prove di resistenza a trazione compressione" brevetto numero BO2003A000629.

[8] Caligiana G., Liverani A., Pippa S., "Modelling, Design and Analysis of a Testing Rig for Composite Materials", XIII ADM - XV INGEGRAF International Conference on Tools and Methods Evolution in Engineering Design, June 4th and June 5th 2003, Napoli, June 5th 2003, Salerno, Università degli Studi Federico II, Facoltà di Ingegneria.
 [9] Caligiana G., Minak G., Ghezzi F., Cicchetti M., "Dispositivo per prove di fatica su materiali compositi: progetto, messa a punto e risultati sperimentali", XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Salerno 3-6 settembre 2003, AIAS 2003.
 [10] ASTM 3039M-00, "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1995.
 [11] ASTM D 5766/D5766-95, Open Hole Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 1995.
 [12] Donald F. Adams, *Comprehensive of Composite Materials, "Test Methods for mechanical properties"* Vol. 5, pp. 113-148, A. Kelly and C. Zweben Editors, Elsevier, 2000.
 [13] Caligiana G., Cesari F., *I materiali compositi*, Ed. Pitagora, 2002.