

AIAS – ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI
42° CONVEGNO NAZIONALE, 11-14 SETTEMBRE 2013, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

AIAS 2013 - 245

OTTIMIZZAZIONE DI GIUNTI IBRIDI *HBB* A DOPPIA SOVRAPPOSIZIONE GFRP-ALLUMINIO

G. Di Franco, M. Inzerillo, B. Zuccarello^a

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

Sommario

Al fine di mettere insieme i vantaggi delle due tipologie di giunzioni, meccaniche ed incollate, negli ultimi anni notevole interesse hanno destato le cosiddette giunzioni ibride (*Hybrid Bonded-Bolted joint*, *HBB*) che consistono comunemente nell'abbinare una classica giunzione meccanica (bullonatura, rivettatura, ecc.) ad una giunzione incollata tradizionale o di tipo co-cured.

Nel seguente lavoro sono presentati i risultati di una ricerca sperimentale e numerica condotta su giunti *HBB* a doppia sovrapposizione, al fine di individuare la configurazione geometrica che consenta di distribuire le sollecitazioni tra le due giunzioni coesistenti e quindi di ottimizzarne le prestazioni.

Il giunto studiato è costituito da un aderendo interno in GFRP unidirezionale ed aderendi esterni in alluminio tipo 2024-T6 collegati con apposito incollaggio ed un bullone M6. L'ottimizzazione della giunzione è stata ricercata intervenendo su diversi parametri quali la geometria del labbro e la forma della rondella che influenza la distribuzione del precarico del bullone.

Successive simulazioni numeriche, sono state eseguite per una migliore comprensione del comportamento statico del giunto, e per definire attendibili criteri di previsione della resistenza statica in diverse condizioni di esercizio.

Abstract

In order to exploit the advantages of both mechanical joints and adhesively bonded joints, in the last year a noticeable research activity has addressed to the so called hybrid joints (*Hybrid Bonded Bolted joint*, *HBB*) that consist in combining a classical mechanical joint (bolted, riveted joint, etc..) to a traditional bonded joint or a co-cured joint.

The present work shows the results of experimental and numerical analyses of double-lap *HBB* joints, carried out to detect the geometric configuration that permits to distribute the applied load between the two coexisting junctions and then to optimize their mechanical performance. The studied joint consists of an internal adherent made by GFRP and external adherents made by aluminum type 2024-T6, connected by using an adhesive bonding and a M6 bolt. The optimization is detected by varying various influence parameters such as the geometry of the lip and the shape of the washer, which influences the distribution of the bolt preload.

After the experimental tests, various numerical analyses are carried out to obtain a better understanding of the static behavior of the joint, as well as to define reliable criteria for the strength prediction under various operating conditions.

Parole chiave: giunti ibridi, bullonatura, incollaggio.

1. INTRODUZIONE

Nella progettazione meccanica di moderni componenti strutturali l'uso dei compositi fibro-rinforzati è sovente limitato dalle problematiche inerenti la giunzione di questi materiali con il resto della struttura primaria comunemente realizzata in metallo. In questo caso, i principali inconvenienti che s'incontrano nell'uso di giunzioni meccaniche (bulloni, viti, rivetti, etc...) sono legati alla significativa concentrazione di tensione che si verifica in prossimità del foro e al danneggiamento che i materiali compositi subiscono durante la foratura stessa (micro e macro danneggiamenti localizzati) [1].

In settori industriali come quello aeronautico, automobilistico e nautico le tradizionali tecniche di collegamento meccanico sono sempre più frequentemente sostituite con tecniche d'incollaggio, caratterizzate da buone prestazioni strutturali. Rispetto ai giunti meccanici, bullonati o rivettati, le giunzioni incollate presentano una distribuzione delle tensioni relativamente più uniforme, sebbene non mancano inconvenienti e limitazioni quali per esempio quelli legati al decadimento progressivo delle proprietà meccaniche dell'adesivo in seguito ad invecchiamento precoce in ambienti aggressivi o l'esercizio a temperature superiori a quella ambiente [2-5].

Al fine di mettere insieme i vantaggi delle due tipologie di giunzioni, meccaniche ed incollate, negli ultimi anni notevole interesse hanno destato le cosiddette giunzioni ibride che consistono comunemente nell'abbinare una classica giunzione meccanica ottenuta, per esempio, mediante bullonatura, ad una giunzione incollata tradizionale (*Hybrid Bonded-Bolted joint – HBB*) o di tipo co-cured [6-11]. Allo stato attuale lo studio delle giunzioni ibride interessa un vasto settore della ricerca, sebbene pochi lavori sono presenti ancora in letteratura.

Fino a pochi anni fa, i giunti ibridi sono stati considerati principalmente per la riparazione e per il miglioramento della resistenza al danneggiamento di giunti incollati. Ad esempio, *Hart-Smith* [6-7] ha condotto uno studio teorico su alcuni giunti incollati/bullonati fra elementi in CFRP e in titanio, mostrando che questi esibiscono in pratica lo stesso carico di rottura di giunti solamente incollati (a temperatura ambiente il 98% del valore del carico applicato viene sopportato dall'adesivo). L'autore conclude pertanto che i giunti ibridi mostrano benefici evidenti solo nella riparazione di giunti incollati limitando la propagazione del danno.

Più recentemente, *Jin-Hwe Kweonet al.* [8] hanno studiato il comportamento meccanico di giunti incollati, bullonati e bullonati/incollati a doppia sovrapposizione CFRP-alluminio utilizzando due differenti tipologie di adesivi. In sintesi, gli autori affermano che una giunzione ibrida esibisce una migliore resistenza meccanica quando la resistenza della giunzione meccanica è maggiore di quella solamente incollata; al contrario, quando la resistenza del giunto bullonato è minore di quello solamente incollato, la giunzione meccanica contribuisce poco alla resistenza del giunto ibrido.

Maofeng e Mallick [9] hanno studiato il comportamento sia statico che a fatica di giunti a semplice sovrapposizione ibridi (bullonati/incollati) mediante prove sperimentali. È stato studiato l'effetto di rondelle di geometrie diverse ed è stato osservato come le performance delle giunzioni ibride sono funzione della forma della rondella impiegata e della conseguente distribuzione delle tensioni dovute al serraggio del bullone. In particolare, i giunti ibridi hanno evidenziato una maggiore resistenza statica ed a fatica rispetto a simili giunti semplicemente incollati.

In [10] *Gordon Kelly* ha studiato il trasferimento del carico in un giunto a singola sovrapposizione composito-alluminio ibrido (bullonato/incollato), mediante analisi agli elementi finiti tenendo conto del contatto bullone-foro e del comportamento non-lineare dei materiali. I risultati numerici sono stati confrontati con quelli ricavati sperimentalmente mediante un bullone strumentato con un ER per misurare il carico trasferito al giunto. È stato osservato che il carico trasferito dal bullone al giunto aumenta al crescere dello spessore dell'adesivo e degli aderenti, mentre diminuisce all'aumentare della lunghezza di sovrapposizione e del modulo elastico dell'adesivo.

Sebbene diversi altri lavori di ricerca sull'argomento siano presenti in letteratura, allo stato attuale non vi è ancora una sufficiente conoscenza delle proprietà delle giunzioni ibride, delle loro limitazioni e tanto meno di affidabili metodi di progettazione.

Con il presente lavoro, mediante prove sperimentali ed analisi numeriche, si intende dare un contributo all'ottimizzazione di giunti *HBB* a doppia sovrapposizione metallo-composito, nonché alla messa a punto di affidabili metodi di progettazione. A tal fine, è stata in particolare studiata l'influenza dei principali parametri geometrici quali:

- la geometria del labbro degli aderendi;
- la forma della rondella, che influenza la distribuzione delle tensioni di compressione dovute al precarico del bullone;
- la tolleranza bullone/foro.

2. CONFIGURAZIONE SPERIMENTALE

Nel seguente lavoro mediante prove sperimentali è stato studiato il comportamento meccanico di un giunto double-lap ibrido (bullonato/incollato) metallo-composito. In dettaglio, il giunto analizzato è costituito da un aderendo interno in laminato composito GFRP $[0^\circ]_{16}$ con spessore pari a 4 mm, e aderendi esterni in alluminio tipo 2024-T6 con spessore di 1.2 mm. Il laminato GFRP è stato realizzato con la tecnica della laminazione manuale (hand lay-up) e sacco a vuoto (vacuum bagging, con depressione di 0.73 kg/cm^2 rilevata da un'apposita sonda di misura). Per ottenere una buona e uniforme rugosità delle superfici da incollare, si è utilizzato un apposito strato di peel-ply che lascia sulle superfici esterne del laminato, a polimerizzazione avvenuta, l'impronta della sua trama. La laminazione manuale è stata seguita da una cura a temperatura controllata di 24°C e 30% di umidità, lasciando i provini in queste condizioni per circa 48 ore.

La lunghezza di sovrapposizione è stata fissata pari alla lunghezza minima (l_{min}) di sovrapposizione [1] indicata dalla cosiddetta Teoria Classica dei Giunti Incollati (TCGI):

$$l_{min} = \frac{12,5}{\lambda} \cong 25 \text{ mm}$$

con

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_a}{\eta} \cdot \left(\frac{2}{E_L \cdot t_c} + \frac{1}{E_{Al} \cdot t_{Al}} \right)} \quad (1)$$

dove G_a è il modulo di elasticità trasversale dell'adesivo, t_c lo spessore del laminato GFRP, t_{Al} lo spessore dell'aderendo in metallo e η lo spessore dell'adesivo.

Sebbene in campo aeronautico, al fine di aumentare ulteriormente l'affidabilità delle giunzioni incollate, la tendenza progettuale è quella di adoperare lunghezze di sovrapposizione dei componenti pari circa al doppio della lunghezza minima fornita dalla (1), nel presente lavoro si è scelto di adoperare quale lunghezza di sovrapposizione l_{min} al fine di avere una apprezzabile sovrapposizione tra la zona di influenza del bullone e la zona delle massime tensioni dell'incollaggio (zone di attacco degli aderendi). Si ritiene, infatti, che tale presupposto sia essenziale per ottenere un significativo aumento delle prestazioni delle giunzioni ibride rispetto a quelle dei corrispondenti giunti semplicemente incollati e semplicemente bullonati.

Inoltre, al fine di indagare sulla migliore configurazione del giunto ibrido, sono state considerate due differenti geometrie degli aderendi con bordo rettilineo (tipo R) e circolare (tipo C, fig.1).

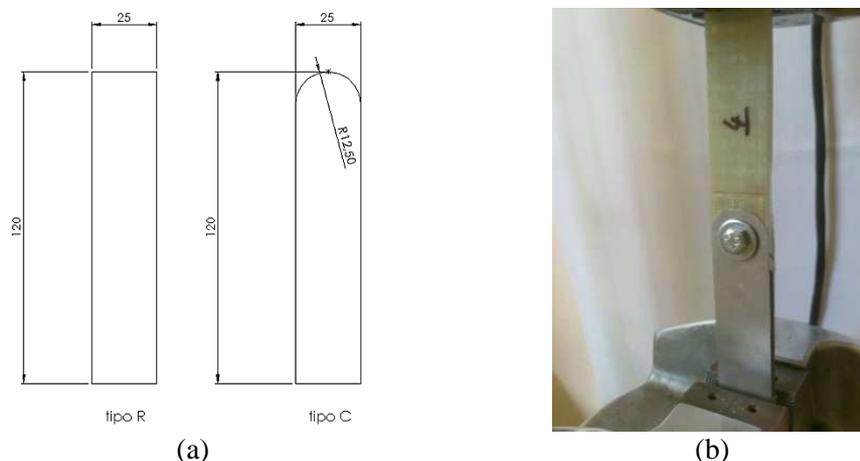


Figura 1: geometria degli aderendi dei giunti analizzati (a) e provino sotto carico (b).

Le caratteristiche meccaniche dell'aderendo in composito GFRP sono state preliminarmente ottenute mediante prove sperimentali secondo le norme ASTM [12-13]; si è ottenuto: $E_L=35.1$ GPa, $E_T=7.3$ GPa, $G_{LT}=3.9$ GPa, $\nu_{LT}=0.336$, $\sigma_{L,R}=550$ MPa.

Le caratteristiche meccaniche dell'alluminio utilizzato ottenute mediante prova di trazione [14], sono invece: $E_{Al}=65800$ MPa, $\sigma_{S,Al}=350$ MPa e $\sigma_{Al,R}=440$ MPa. In particolare, al fine di valutare l'effetto della geometria del labbro e della forma della rondella sono state studiate 6 differenti tipologie di giunti:

- giunto *HBB* di tipo *R* e rondella in acciaio di forma quadrata (vedi figura 2a);
- giunto *HBB* di tipo *C* e rondella di forma circolare (vedi figura 2b);
- giunto semplicemente incollato (*SI*) di tipo *R*;
- giunto semplicemente incollato (*SI*) di tipo *C*;
- giunto semplicemente bullonato (*SB*) di tipo *R*;
- giunto semplicemente bullonato (*SB*) di tipo *C*.

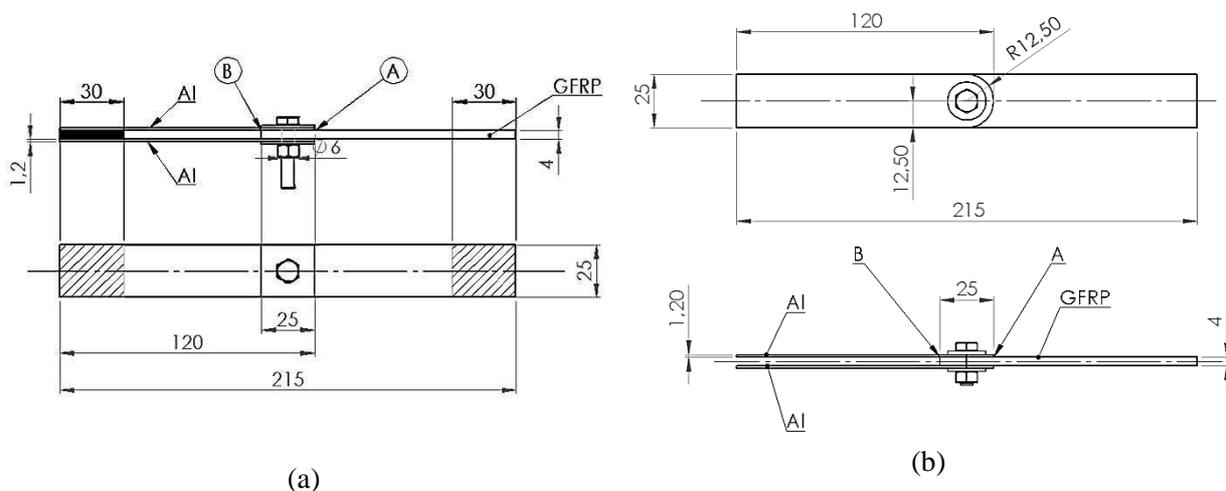


Figura 2: Geometrie dei giunti *HBB* analizzati di tipo *R* (a) e di tipo *C* (b).

Al fine di garantire una buona adesione con il composito, come adesivo è stata impiegata la stessa resina epossidica (tipo SX10 della Mates®) utilizzata per la manifattura dei laminati GFRP, avente modulo di Young $E_a=3$ GPa e tensione di rottura $\sigma_{a,R}=60$ MPa [15].

Il bullone impiegato è un M6 a testa esagonale in acciaio (UNI 5727) con lunghezza pari a 20 mm. Per la realizzazione dei giunti *HBB*, al fine di evitare il danneggiamento dell'adesivo durante la foratura, si è scelto di eseguire prima la foratura degli aderendi per poi procedere con la fase di incollaggio. L'operazione di foratura è stata fatta mediante macchina CNC 1035 DMG con una punta in carburo di tungsteno della DORMER di diametro nominale 5.9 mm. Tale valore è stato scelto al fine di eliminare il gioco tra il bullone M6 ed il foro ottenendo un collegamento con interferenza.

Per quanto concerne la fase dell'incollaggio, al fine di avere una sufficiente rugosità delle superfici degli aderendi in alluminio è stato eseguito un trattamento preliminare di abrasione unidirezionale delle superfici con tela abrasiva (grana P60) e successiva pulizia con apposito detergente. Inoltre, ci si avvalsi di opportuni spessori calibrati per assicurare uno spessore di adesivo costante pari a 0.1 mm.

3 PROVE SPERIMENTALI

Le analisi sperimentali sulle giunzioni GFRP-Alluminio sono state eseguite utilizzando la macchina prova materiali MTS 810 con cella di carico da 100 kN e velocità della traversa pari a 1.2 mm/min, come indicato dallo standard ASTM D3528-96.

Inoltre, è stata utilizzata una fotocamera digitale ad alta risoluzione tipo CANON 5D per monitorare le modalità di rottura dei giunti analizzati. La superficie laterale dei provini è stata verniciata con una vernice bianca fragile per monitorare l'evoluzione del danneggiamento. Per ogni tipologia di giunto

considerata sono stati testati sperimentalmente 5 provini al fine di avere un campione statistico sufficientemente affidabile.

3.1 RISULTATI SPERIMENTALI

La figura 3 mostra le tipiche curve carico-spostamento ottenute dalle prove di trazione per i diversi giunti studiati. In ordinata è riportato il carico totale applicato al giunto, mentre in ascisse è riportato lo spostamento della traversa mobile della macchina di prova.

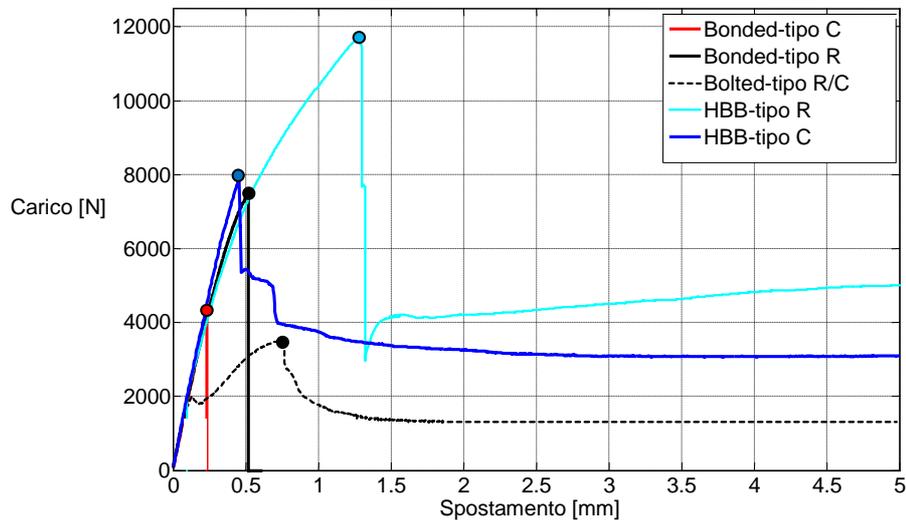


Figure 3: Curve caratteristiche carico-spostamento per i diversi giunti studiati.

Sia nel caso di giunti di tipo *C* che di tipo *R* semplicemente incollati (Bonded) si nota come il carico cresce praticamente in modo lineare fino al valore massimo, seguito dalla rottura catastrofica della giunzione per frattura di tipo adesiva all'interfaccia resina-alluminio. Il carico di rottura medio P_R è pari a 4203 N per il giunto di tipo *C*, 7600 N per il tipo *R*. L'energia E_a assorbita dal giunto *SI* è pari a 0.506 J e 2 J rispettivamente per il giunto di tipo *C* e di tipo *R*.

Per quanto riguarda la rottura dell'adesivo, questa s'innesca nel bordo di attacco della lamina GFRP (punto *A*) e si propaga fino al punto di attacco dell'alluminio (punto *B*, vedi fig.2a) laddove, com'è noto [1], si hanno le massime tensioni tangenziali.



Figure 4: Rottura adesiva dei giunti semplicemente incollati (*SI*) di tipo *C* (a) e di tipo *R* (b).

I giunti semplicemente bullonati (*SB*) tipo *C* e *R* esibiscono in pratica le stesse performance, rappresentate da un'unica curva in figura 3 (Bolted). Si rileva un carico di rottura di circa 3600 N ed una energia a rottura $E_a=7.5$ J. In ogni caso il cedimento del giunto avviene per rottura del labbro dell'aderendo in composito.

Nel caso dei giunti *HBB* di tipo *C*, le prove hanno mostrato che il carico cresce linearmente fino al raggiungimento del valore massimo, pari a 7936 N, quindi si ha un lieve drop-down causato dalla rottura progressiva dello strato di adesivo, ed una successiva fase di danneggiamento piuttosto

prolungata con una lenta diminuzione del carico sopportato che tende in pratica a quello mostrato dal giunto semplicemente bullonato. A differenza dei giunti ibridi studiati in [11] l'entità del drop-down a seguito della rottura adesiva è di entità minore, grazie all'assenza di gioco tra bullone e foro. L'energia E_a assorbita è pari a 17.16 J.

La curva carico-spostamento per giunti *HBB* di tipo *R* mostra come il carico cresca dapprima in modo pressoché lineare fino al raggiungimento del carico massimo di rottura. In seguito si ha un marcato drop-down del carico sino a valori pari al 40% circa del carico di rottura, seguito da un limitato aumento fino alla rottura definitiva del giunto. Il carico di rottura medio P_R è pari a 11646 N con un aumento rispetto al valore rilevato in [11] per giunti *HBB* di tipo *R* con rondella circolare, pari a circa il 6%. L'energia E_a assorbita è pari a 26.94 J, con aumento del 5% rispetto ai giunti studiati in [11].

Per i giunti ibridi (*C* e *R*) le modalità di rottura osservate sperimentalmente sono le medesime, ovvero si ha dapprima la rottura dello strato di adesivo che si innesca nel bordo di attacco della lamina GFRP e si propaga fino al punto di attacco dell'alluminio come avviene nel caso di giunti semplicemente incollati; successivamente si ha la rottura per taglio del labbro dell'aderendo in GFRP cui segue la rottura del giunto (vedi figura 5).

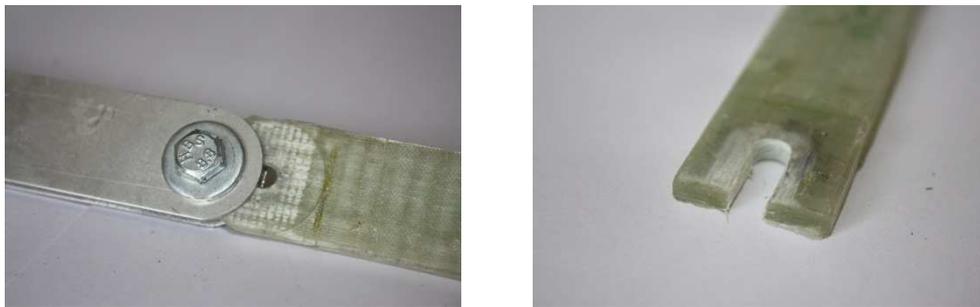


Figure 5: Modalità di rottura caratteristica dei giunti *HBB* esaminati.

Dall'analisi dei risultati si osserva che la configurazione *C*, nella versione semplicemente incollata, esibisce performance meccaniche significativamente più basse della configurazione *R*: il carico di rottura statico è circa la metà. Considerando i giunti *HBB*, si osserva invece che le configurazioni *C* e *R* esibiscono un carico di rottura praticamente pari alla somma del carico di rottura del giunto *SI* più quella del giunto *SB*. Si può dire quindi che entrambi le configurazioni di giunti *HBB*, pur essendo caratterizzate da un carico del giunto *SB* inferiore a quello del giunto *SI*, consentono un significativo incremento della resistenza statica. Se si definisce quale efficienza di un giunto ibrido il rapporto tra il suo carico di rottura e la somma dei carichi di rottura delle due giunzioni di cui è costituito, allora si può affermare che entrambe le configurazioni studiate, contrariamente a diverse configurazioni riportate in letteratura [6-10], hanno in pratica una efficienza del 100%. Tale risultato, estremamente significativo, è legato al fatto che le configurazioni studiate, contrariamente a diverse configurazioni riportate in letteratura, consentono di distribuire il carico applicato tra le due giunzioni coesistenti. Ciò consente di ottenere un significativo sinergismo in termini di energia di deformazione a rottura: per i giunti *HBB* analizzati, infatti, l'energia a rottura E_a è largamente superiore della somma dei valori che competono ai giunti *SI* e *SB*. Per il giunto *HBB* di tipo *C* l'energia E_a è pari a circa il doppio della somma dei valori del giunto *SI* e del giunto *SB*. Per il giunto di tipo *R* invece E_a è pari a circa il triplo.

4 ANALISI NUMERICHE

Al fine di studiare lo stato tensionale che si verifica nelle giunzioni esaminate, con particolare riferimento alla distribuzione delle tensioni tangenziali e delle tensioni di peeling sull'adesivo, sono state eseguite delle analisi FEM 3D utilizzando il codice ANSYS (Workbench). In particolare sono stati studiati agli elementi finiti tre tipologie di giunti:

- giunto semplicemente incollato di tipo *R*;
- giunto semplicemente incollato di tipo *C*;
- giunto *HBB* di tipo *R* e rondella quadrata;
- giunto *HBB* di tipo *C*;

4.1 GIUNTI SEMPLICEMENTE INCOLLATI (S)

Per la discretizzazione dei modelli FEM si è scelto di utilizzare elementi triangolari (366349 elementi con 562810 nodi). Al fine di poter confrontare i risultati delle diverse simulazioni FEM, queste sono state eseguite con lo stesso carico di trazione di 4203 N, che corrisponde al carico di rottura dei giunti *SI* di tipo *C* (carico minimo). Tutte le proprietà meccaniche dei materiali sono state assegnate sulla base di dati desunti dalla letteratura e/o determinati sperimentalmente. Tenuto conto dei fenomeni di intensificazione delle tensioni che, come ampiamente dimostrato in [16], si verificano in prossimità dei bordi liberi dei giunti incollati, sono state realizzate opportune zone di infittimento della mesh in prossimità dei bordi liberi.

Nella seguente figura 6 è riportato l'andamento delle tensioni tangenziali (τ_{xz}) e di peeling (σ_z) per il giunto di tipo *C*, relativamente alla sezione di mezzeria e al bordo libero. Poiché la lunghezza del bordo libero curvilineo è maggiore della lunghezza della sezione di mezzeria, si è provveduto ad adimensionalizzare il parametro relativo alla lunghezza.

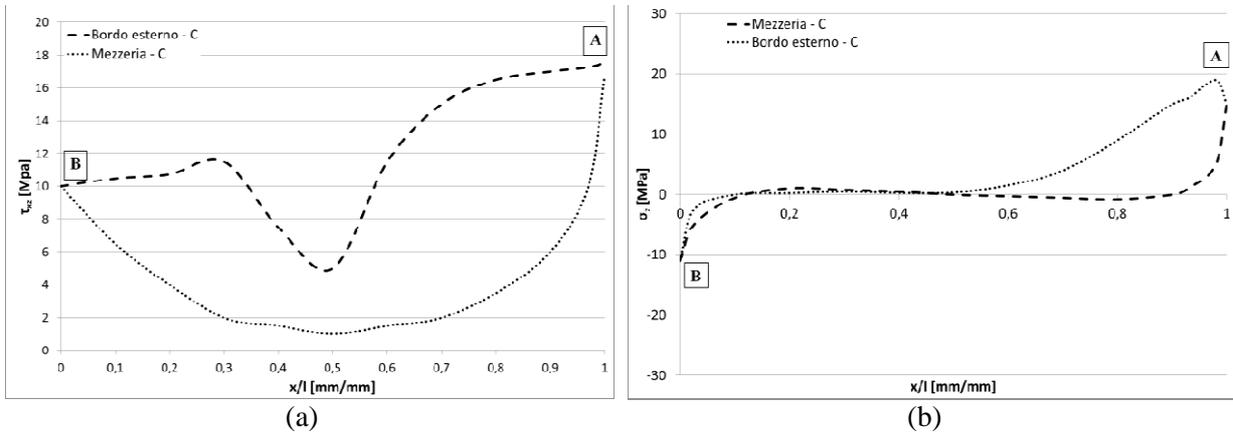


Figure 6: tensioni tangenziali τ_{xz} (a) e di peeling σ_z (b) per giunti semplicemente incollati di tipo *C*.

Dalla figura 6a si osserva la presenza di un significativo sbilanciamento delle tensioni tangenziali dal lato del bordo di attacco dell'aderendo più cedevole, cioè dell'aderendo in composito (punto A). Inoltre, si osserva che mentre l'andamento sulla sezione di mezzeria è quello tipico di un giunto incollato a bordi rettilinei, quello del bordo libero presenta un andamento non monotono con un massimo ed un minimo relativo nella zona centrale. Simili considerazioni valgono per le tensioni di peeling (vedi figura 6b). In dettaglio, si nota che queste sono di compressione nella zona di attacco dell'alluminio, di trazione nella zona di attacco del composito (punto A). Queste ultime contribuiscono, come osservato sperimentalmente, alla prematura rottura del giunto a partire da tale punto. Simili risultati sono stati ottenuti per i giunti semplicemente incollati di tipo *R* (fig.7).

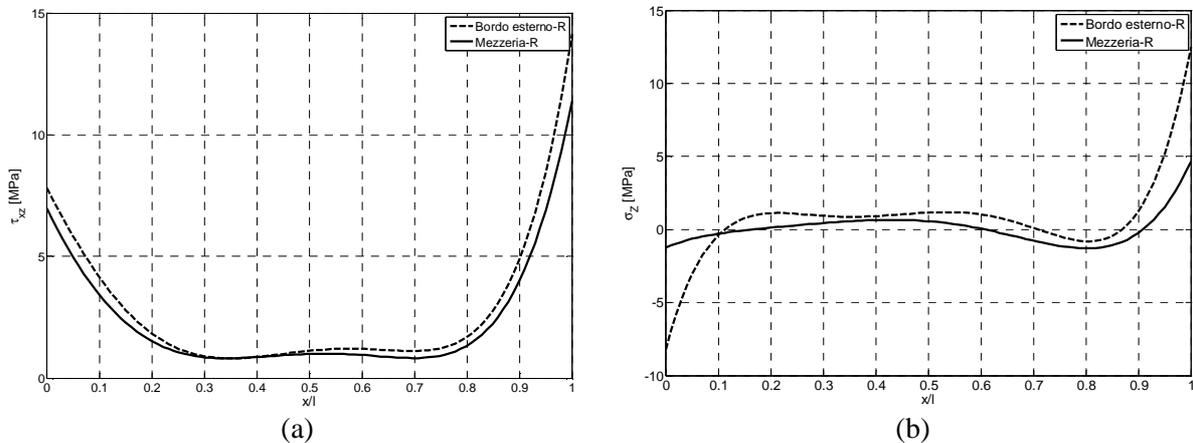


Figure 7: tensioni tangenziali τ_{xz} (a) e di peeling σ_z (b) per giunti semplicemente incollati di tipo *R*.

Dalla fig.7 si vede, infatti, come anche in questo caso si hanno tensioni tangenziali sbilanciate dal lato del bordo di attacco del composito (punto A) e pericolose tensioni di peeling di trazione.

4.2 GIUNTI HBB DI TIPO C

Il modello 3D per il giunto ibrido prevede la modellazione, oltre che degli aderendi anche del bullone ed il suo posizionamento. Anche in questo caso è stata sfruttata la presenza dei piani di simmetria per ridurre ad $\frac{1}{4}$ il modello per l'analisi agli elementi finiti. Per evitare la compenetrazione tra il bullone e gli aderendi, nel caso di innescio del contatto in fase di carico, sulle superfici laterali del foro del bullone sono state assegnate coppie di elementi contact/target di tipo "frictional" con coefficiente di attrito pari a 0,2. La mesh utilizzata per tale modello presenta sempre l'utilizzo di elementi triangolari. L'infittimento degli elementi è stato eseguito nelle zone di intensificazione delle tensioni e cioè in corrispondenza delle estremità della superficie di incollaggio e in corrispondenza del foro. Il modello utilizzato per tale analisi risulta essere composto da 374610 elementi e 606822 nodi. Le tensioni di peeling e le tensioni tangenziali sull'adesivo sono mostrate in figura 8.

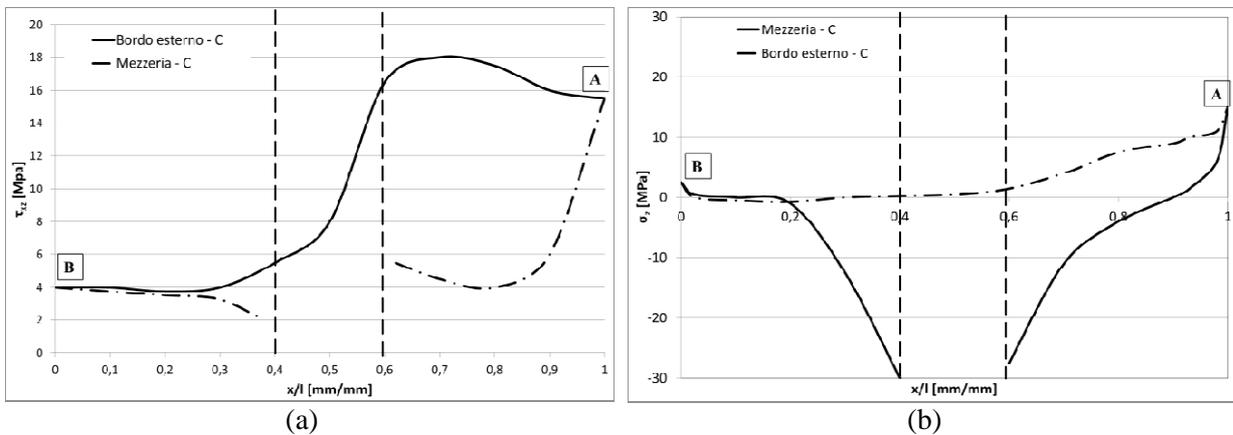


Figure 8: tensioni tangenziali τ_{xz} (a) e di peeling σ_z (b) per giunti *HBB* di tipo *C*.

Il confronto dei risultati di figura 8 relativi al giunto *HBB* con quelli di figura 6, relativi al giunto *SI*, mostra come la presenza del bullone da luogo nel punto *A* che resta sempre il più sollecitato, a limitate diminuzioni delle tensioni tangenziali ma ad una significativa riduzione delle tensioni di peeling (di oltre il 40%), giustificando l'aumento di circa il 45% del carico di rottura del giunto *HBB* rispetto a quello del giunto *SI*.

4.3 GIUNTI HBB DI TIPO R

Di seguito sono mostrate le tensioni tangenziali (vedi fig.9a) e quelle di peeling (vedi fig.9b) in corrispondenza dell'interfaccia adesivo alluminio di giunti *HBB* di tipo *R*.

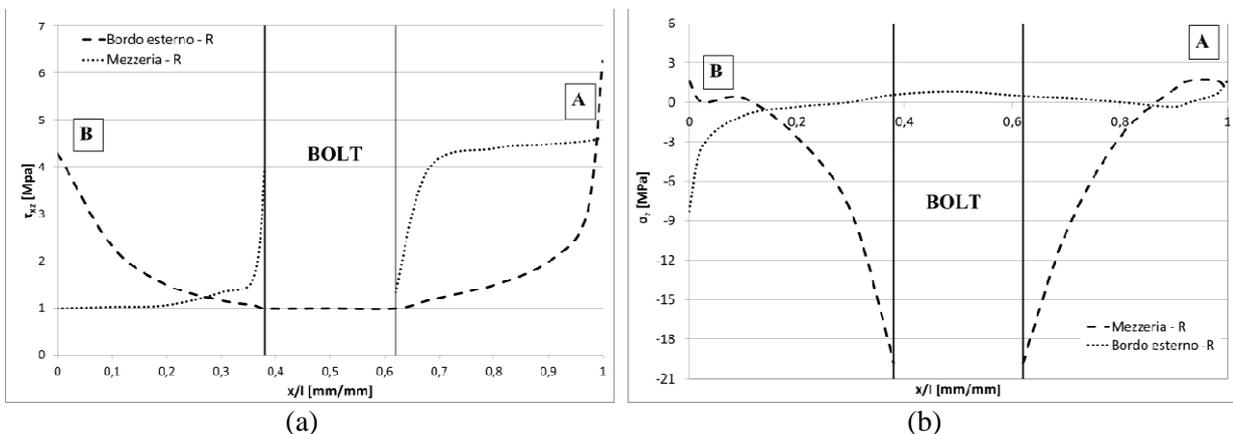


Figure 9: tensioni tangenziali τ_{xz} (a) e di peeling σ_z (b) per giunti *HBB* di tipo *R*.

Dalla figura 9 si osserva come le massime tensioni tangenziali si hanno sempre sul bordo di attacco del GFRP, e precisamente in corrispondenza del punto appartenente al bordo libero esterno. Le tensioni di peeling massime si hanno pure in prossimità dello stesso punto, sebbene simili valori si rilevano sul punto medio del bordo di attacco dell'alluminio (vedi figura 9b).

Rispetto ai valori rilevati per i giunti *HBB* di tipo *C* si rilevano valori significativamente più bassi (circa -60% per le tensioni tangenziali e -80% per le tensioni normali), a conferma della superiore resistenza dei giunti di tipo *R* (vedi fig.8).

5 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro, mediante analisi sperimentale e simulazioni FEM è stato studiato il comportamento meccanico di giunti ibridi a doppia sovrapposizione GFRP-alluminio, realizzati mediante bullonatura ed incollaggio. Al fine di ottimizzare la giunzione, sono state considerate due diverse geometrie degli aderenti, con bordo libero rettilineo (*R*) e curvilineo (*C*).

Inoltre, per aumentare l'aliquota di carico supportata dal bullone con adesivo integro, si è considerata una leggera interferenza tra bullone e foro. Per quanto riguarda il confronto tra la giunzione semplicemente incollata e quella ibrida, l'analisi sperimentale ha mostrato che per giunti con bordo libero circolare la presenza del bullone fa raddoppiare il carico di rottura. Per il caso di bordo libero rettilineo, invece, si assiste ad un incremento del carico di rottura del 35% circa.

Più in dettaglio, è possibile affermare che le configurazioni studiate permettono in pratica una soddisfacente distribuzione del carico tra le due giunzioni coesistenti, incollata e bullonata. In tali giunti, infatti, la resistenza statica è somma della corrispondente resistenza del giunto semplicemente incollato e di quella del giunto semplicemente bullonato. In termini di energia a rottura si osserva invece un marcato sinergismo essendo l'energia a rottura delle giunzioni ibride 2-3 volte superiore alla somma di quella dei giunti semplicemente incollati e dei giunti semplicemente bullonati. I risultati dell'analisi sperimentale sono stati confermati da simulazioni numeriche che hanno mostrato come la presenza del bullone consente una significativa riduzione delle tensioni tangenziali e ancor più delle tensioni di peeling del punto più sollecitato che, in accordo con la teoria, è sempre il punto di attacco dell'aderendo più cedevole (composito).

Ulteriori sviluppi del presente lavoro potranno riguardare la messa a punto di un attendibile metodo di previsione della resistenza statica di tali giunzioni ibride basato sui GSIF [16], ovvero su un approccio globale di tipo "average stress method".

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. R. Reddy, "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis", ed. CRC Press.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] L.J. Hart-Smith. "Adhesive-bonding double-lap joints". NASA CR- 112235, 1973.
- [5] 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).
- [6] Hart-Smith L.J., "Design methodology for bonded-bolted composite joints", *Technical Report AFWAL-TR-81-3154*, Douglas Aircraft Company (1982).
- [7] Hart-Smith L.J., "Bonded-bolted composite joints", *J Aircraft*, 22, 993-1000 (1985).
- [8] 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).
- [9] Maofeng Fu, P.K. Mallick, "Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 145-159 (2001).

- [10] G. Kelly, “Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints”, *Composite Structures*, 69, 35-43 (2005).
- [11] G. Di Franco, L. Fratini, A. Pasta, B. Zuccarello, “*Analisi di giunti a doppia sovrapposizione GFRP-alluminio incollati e bullonati*”, AIAS, 9/09/2011, Università di Palermo.
- [12] ASTM D3039/D3039M - 08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [13] STM D4255 / D4255M – 01 (2007) Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method.
- [14] ASTM E8 / E8M - 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [15] MATES - Technical Data Sheet: Epoxy Resin I-SX10.
- [16] 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).