

AIAS – ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI
44° CONVEGNO NAZIONALE, 2-5 SETTEMBRE 2015 – UNIVERSITÀ DI MESSINA

AIAS 2015 - 601

CONFRONTO NUMERICO E SPERIMENTALE TRA LA VERSIONE RIVETTATA E INCOLLATA DI UNA GIUNZIONE MECCANICA

S. Cardamone^a, M. Fossati^a, A. Bernasconi^a, M. Giglio^a

^a Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica,
Via La Masa 1, 20156 Milano, e-mail: stefano.cardamone@polimi.it

Sommario

Le giunzioni metalliche incollate offrono diversi vantaggi nei confronti dei tradizionali collegamenti meccanici (rivettatura, bullonatura, ecc.), tuttavia richiedono un'estensiva caratterizzazione meccanica al fine di garantire un'adeguata affidabilità delle strutture in cui vengono inserite. In questo lavoro si presentano i risultati delle prove sperimentali e delle simulazioni numeriche condotte nell'ambito della riprogettazione di una giunzione rivettata di un componente reale, sfruttando la tecnologia dell'incollaggio. L'adesivo usato è una resina epossidica bicomponente, caratterizzata attraverso una campagna di prove sperimentali e simulazioni numeriche, su provini di tipo single-lap e T-peel. Si presenta quindi un confronto, sia numerico che sperimentale, delle prestazioni meccaniche della giunzione rivettata con l'analoga giunzione incollata. I risultati hanno evidenziato un sostanziale miglioramento in termini di rigidità e resistenza con l'uso della tecnica dell'incollaggio.

Abstract

Adhesively bonded joints of metallic materials offer several advantages compared to traditional mechanical joints (riveting, screwing, etc.), nevertheless they require an extensive mechanical characterization in order to ensure adequate reliability of the structures in which they are included. In this work, results of experimental tests and numerical simulations of a real component, taking advantage of gluing technology, are presented. The adhesive is a two-component epoxy resin, characterized with experimental testing and numerical simulations, on single-lap and T-peel specimens. A numerical and experimental comparison between mechanical performance of the riveted joint with the glued one is presented. Results have shown a substantial improvement in terms of stiffness and strength with the use of gluing technique.

Parole chiave: giunzioni incollate, giunzioni rivettate, resina epossidica bicomponente

1. INTRODUZIONE

Le giunzioni incollate presentano diversi vantaggi nei confronti dei tradizionali collegamenti meccanici. A differenza di bullonatura e rivettatura, le parti collegate non subiscono l'effetto d'intaglio dovuto alla presenza dei fori e gli sforzi sono distribuiti in maniera più uniforme. L'incollaggio sfrutta, infatti, l'intera superficie di sovrapposizione e generalmente consente un risparmio in termini di peso e complessità della struttura. A differenza della saldatura, nessuna zona viene alterata termicamente ed è inoltre facile collegare materiali di diversa natura [1].

Nella progettazione di un manufatto incollato, l'approccio più semplice è garantire che la giunzione sia resistente quanto le parti che vengono collegate. La resistenza delle giunzioni incollate tuttavia dipende dalla geometria di sovrapposizione e dalle modalità di carico a cui sono sottoposte. La stessa caratterizzazione dell'adesivo si basa su modelli analitici sviluppati, nella maggior parte dei casi, per semplici geometrie [2]. Per esempio, l'uso diretto del solo carico di resistenza ottenuto attraverso le

ricorrenti prove single-lap è limitante, in quanto è stato dimostrato che la resistenza di una giunzione incollata non aumenta linearmente all'aumentare dell'area di sovrapposizione. Inoltre, la singola prova non è rappresentativa delle diverse modalità di carico e cedimento e dipende da numerosi fattori, quali raggio di raccordo dei bordi degli aderendi, forma della sovrapposizione, ecc. [2]. In geometrie complesse, la progettazione di giunzioni incollate necessita quindi di un'apposita ed estensiva campagna di prove sperimentali specifiche, per garantire adeguata affidabilità nelle strutture in cui vengono inserite. Questo tipo di approccio ne limita la diffusione in molti campi progettuali.

L'approccio numerico-analitico ha una forte rilevanza nel limitare gli oneri della sperimentazione, pur essendo ancora materia di studio in fase di forte evoluzione per quel che riguarda gli incollaggi. Tra gli approcci presenti in letteratura, i criteri relativi allo sforzo massimo o deformazione massima locale si sono dimostrati esaustivi per avere una stima dell'inizio del danneggiamento [2, 7, 8], mentre i criteri basati sull'energia di propagazione forniscono un'ottima stima nel comportamento della frattura durante la sua evoluzione [2]. Questi ultimi metodi, sviluppati dalla meccanica della frattura, si basano su tecniche di Virtual Crack Closure [4] o su modelli di danneggiamento coesivo [5, 6].

Nel presente lavoro, nato dall'obiettivo di ottimizzare un componente reale, si è confrontato il comportamento di una giunzione rivettata e una corrispondente giunzione incollata, ambedue trattati con criteri relativi agli sforzi. Per quanto riguarda l'adesivo, questo tipo di approccio, scelto per l'interesse rivolto unicamente a un primo dimensionamento del componente incollato, ha il vantaggio di non necessitare del valore del parametro caratteristico dell'adesivo G_c (energy release rate), né di altri numerosi parametri delle leggi di trazione-separazione per ogni modo di apertura della giunzione incollata, ognuno dei quali ricavabile tramite apposite prove sperimentali. Tra gli approcci che non sfruttano l'energia di deformazione, infine, l'uso del criterio del massimo sforzo principale, contrariamente al criterio della massima deformazione, è giustificato dal comportamento pressoché fragile dell'adesivo studiato [2, 7].

2. CONFIGURAZIONE SPERIMENTALE

2.1. Giunzione studiata

Il lavoro di comparazione tra rivettatura e incollaggio è stato effettuato sulla giunzione riportata in Fig. 1. Il manufatto è stato scelto sulla base della geometria del componente reale da ottimizzare. Le due parti collegate sono due pannelli sottili di acciaio da deformazione plastica DD11 (Fe P11), di spessore 1,5 mm. L'estremità di un pannello ha una forma a "C" che si interfaccia alla corrispondente forma a "Z" presente sull'estremità dell'altro pannello. La giunzione meccanica è realizzata con tre file di 9 rivetti ciascuna, due posizionate nella superficie di maggiore sovrapposizione, una nella superficie ad essa trasversale. I rivetti, in acciaio AISI 304, hanno diametro esterno pari a 3,2 mm.

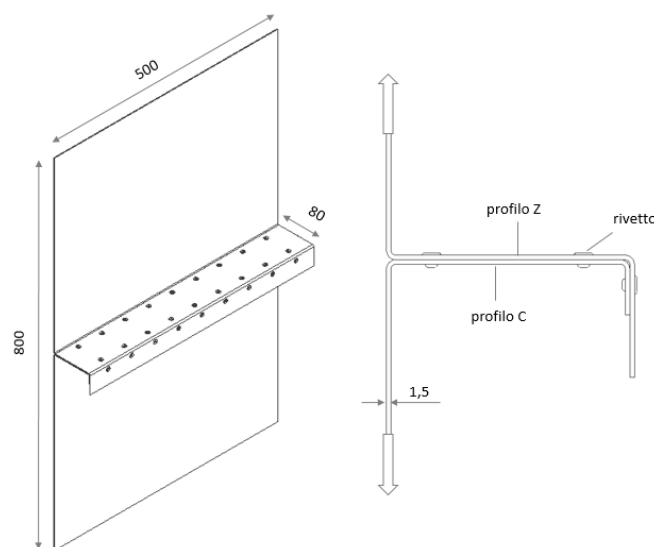


Figura 1: Giunzione rivettata.

La versione incollata della giunzione è realizzata di conseguenza. Come si può notare dalla Fig.2, le file di rivetti sono sostituite da uno strato di adesivo inserito tra le superficie di maggiore sovrapposizione. E' stata scelta una resina epossidica bicomponente 3M 7260 B/A con l'aggiunta di sfere di vetro, del diametro di 200 μm , in modo da controllare lo spessore dell'adesivo.

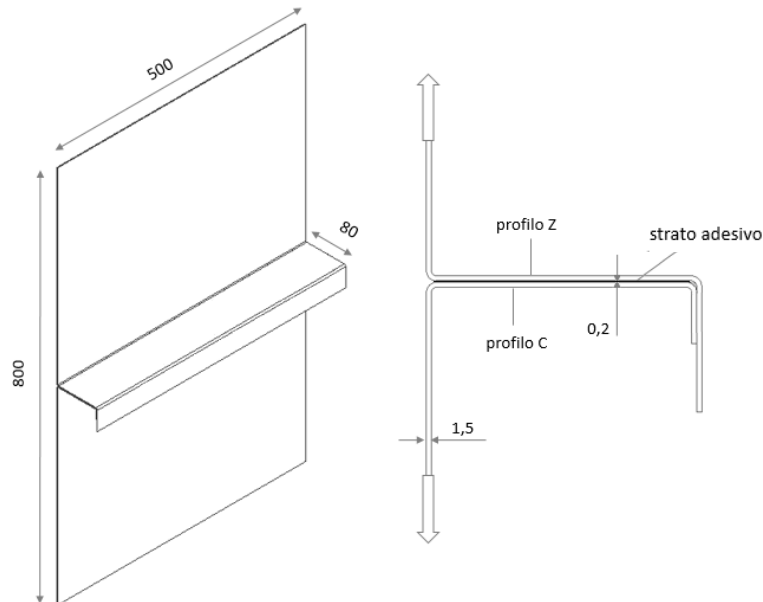


Figura 2: Giunzione incollata.

2.2. Caratterizzazione preliminare dell'adesivo

L'adesivo è stato caratterizzato da una campagna di prove di taglio single-lap, secondo la norma ISO 4587 [3], e da prove di pelatura T-peel, secondo la norma BS EN ISO 11339 [9] con geometria del provino riadattata tenendo in considerazione la giunzione studiata. Gli aderendi sono stati realizzati con lo stesso acciaio della giunzione in esame e con lo stesso spessore dei pannelli (1,5 mm).

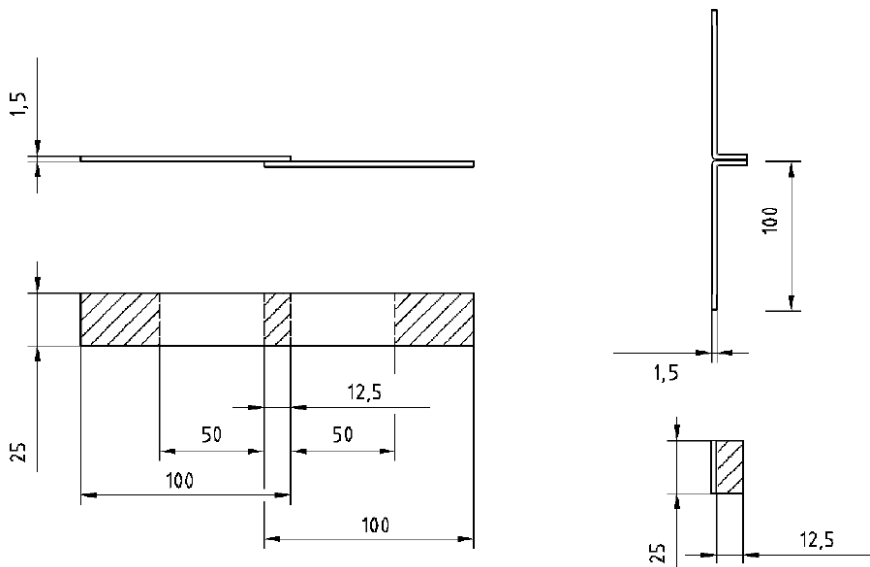


Figura 3: Geometrie dei provini single-lap e T-peel.

Tabella 1: Carico massimo raggiunto al cedimento dell'adesivo nelle prove di caratterizzazione.

Test	Single-Lap [N]	T-peel [N]
1	7977	1030
2	7765	1276
3	8137	1412
4	8077	
5	7717	
Media	7932	1239

In Tab.1 sono riportati i valori di carico massimo raggiunto nelle prove di caratterizzazione dell'adesivo. Il comportamento della resina epossidica si è confermato di tipo fragile, con un cedimento quasi istantaneo dopo aver raggiunto il valore di carico massimo rilevato. Le rotture sono state tutte di tipo coesivo.

3. MODELLAZIONE NUMERICA

3.1. Input analisi numeriche

Le modellazioni numeriche delle prove sono state effettuate attraverso il software ad elementi finiti Abaqus/CAE. I pannelli e gli aderenti sono stati discretizzati tramite una mesh strutturata, con elementi 3D esaedrici con funzioni di forma lineari a integrazione completa (C3D8), in modo da avere una buona stima degli sforzi locali raggiunti durante le prove. I rivetti sono stati modellati con elementi beam quadratici (B32). L'adesivo è stato modellato con elementi 3D coesivi di tipo continuo (COH3D8). Sono state sfruttate le simmetrie nei modelli più onerosi dal punto di vista computazionale e considerate le non linearità geometriche. Riguardo al comportamento plastico degli acciai in gioco, per i pannelli si è stimata la curva $\sigma\text{-}\epsilon_p$ (Fig.4) attraverso una prova di trazione, mentre per i rivetti è stato preso in considerazione un comportamento elastico-perfettamente plastico, in quanto il manufatto rivettato è considerato danneggiato in maniera critica al raggiungimento del primo snervamento di un rivetto. In Tab.2 sono riportate tutte le proprietà dei materiali riprodotti.

Tabella 2: Proprietà materiali coinvolti.

Materiale	E (MPa)	ν	ρ (g/cm ³)	R_{p02} (MPa)
Acciaio DD11 (Fe P11)	210000	0,3	7,8	318
Acciaio AISI 304	200000	0,3	7,8	205
Adesivo 3M 7260 B/A [10]	2500	0,35	1,3	-

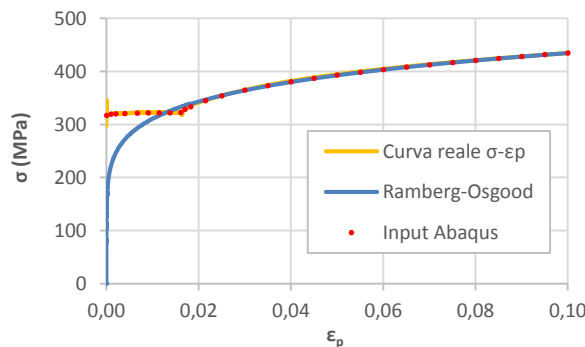


Figura 4: Curva di plasticità introdotte in Abaqus per l'acciaio DD11.

3.2. Risultati numerici delle prove di caratterizzazione dell'adesivo

Le prove di caratterizzazione preliminare dell'adesivo sono state riprodotte numericamente tramite il solutore Abaqus, in modo da avere una prima stima del cedimento dell'adesivo sulla base dello sforzo

massimo principale. La ricerca del valore locale degli sforzi in un collegamento incollato tuttavia è afflitta dal problema della singolarità nei pressi dell'interfaccia aderendo-adesivo. Gli sforzi calcolati numericamente tendono infatti ad un valore infinito, sia a causa della presenza di materiali diversi, sia per l'effetto d'intaglio dovuto alla severità dei raccordi [2]. Le singolarità numeriche provocano una forte dipendenza dalla mesh dei valori di sforzo di picco rilevati. Per ovviare a questo problema è stata scelta la stessa discretizzazione sia per l'adesivo e che per le parti di aderendo direttamente a contatto, in tutte le analisi numeriche effettuate. La larghezza e la profondità minima raggiunta negli elementi coesivi è stata di 0,1 mm, mentre l'altezza di 0,2 mm, pari allo spessore dello strato di adesivo. La prova single-lap presenta una concentrazione di sforzi di taglio elevata nei pressi delle estremità della sovrapposizione, a cui si aggiunge una componente di pelatura dovuta al momento flettente che si instaura durante la prova (Fig. 5). In corrispondenza del carico medio di cedimento rilevato dalla prove sperimentali di 7932 N, si è registrato un valore locale di sforzo principale massimo σ_1 di 149 MPa, come si può notare dalla Fig.6. La deformazione plastica degli aderendi è risultata evidente, come constatato nelle prove sperimentali.

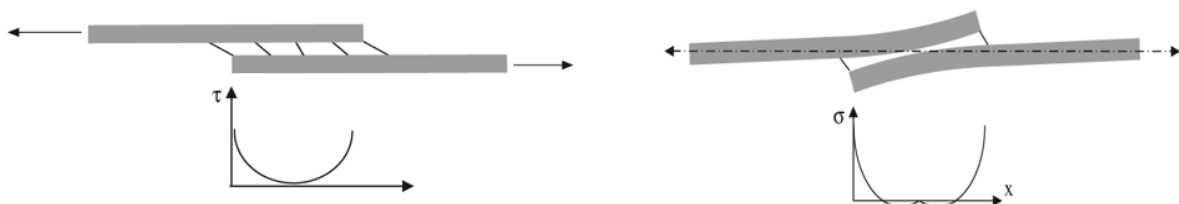


Figura 5: Componenti di taglio e peel degli sforzi agenti nello strato di adesivo nel test single-lap [2]

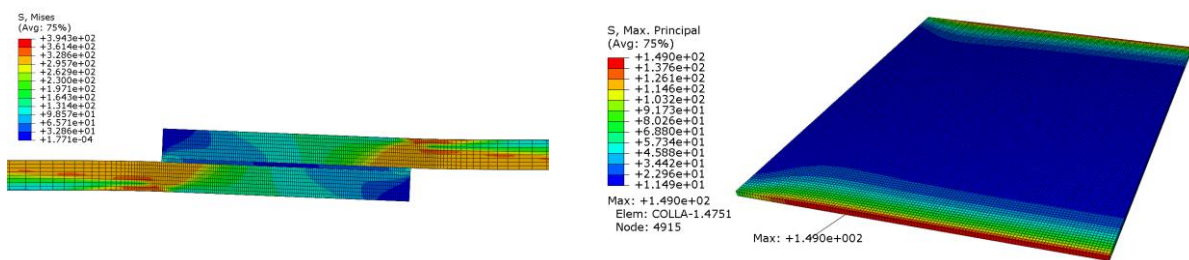


Figura 6: Risultati numerici della prova single-lap. A sinistra gli sforzi equivalenti di von Mises negli aderendi. A destra gli sforzi principali massimi agente nello strato di adesivo.

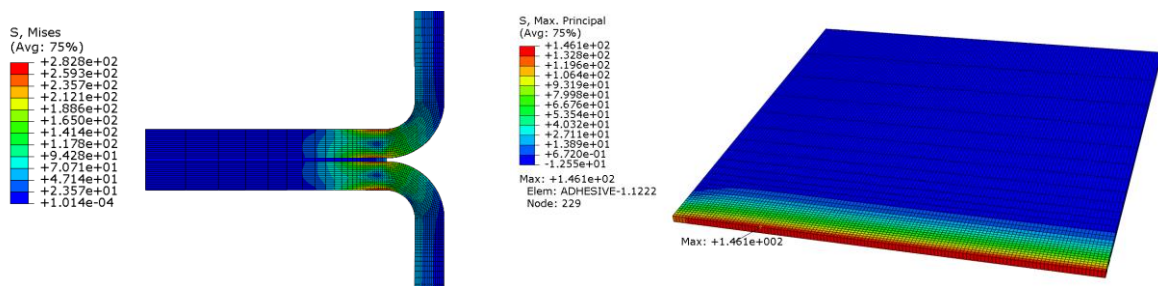


Figura 7: Risultati numerici della prova T-peel. A sinistra gli sforzi equivalenti di von Mises negli aderendi. A destra gli sforzi principali massimi agente nello strato di adesivo.

La Fig.7 mostra invece i risultati della simulazione della prova T-peel. Al carico di rottura medio di 1239 N, corrisponde un valore locale di sforzo principale massimo σ_1 di 146 MPa.

Nei test sperimentali sui provini T-peel è stata controllata esattamente la posizione dell'adesivo in corrispondenza del bordo, inteso come linea di inizio della curvatura degli aderendi, grazie all'applicazione di nastro in PTFE antiaderente. Si è dunque evitato che i risultati della prova T-peel dipendessero da un eccesso di incollaggio in una zona in cui non poteva essere garantito né il corretto spessore dello strato di adesivo, né tantomeno un'adeguata compressione durante il curing dell'adesivo, condizione necessaria ma non sufficiente alla corretta rottura coesiva. Un eccesso di adesivo oltre l'inizio del raccordo, come raffigurato in Fig.8, lavorando più vicino al piano delle forze applicate,

avrebbe l'effetto di un decremento degli sforzi rilevati nello strato di adesivo, ma il suo comportamento non può essere facilmente previsto per le cause citate in precedenza. Infatti, la rottura nella zona di eccesso, studiata appositamente attraverso ulteriori prove sperimentali in cui si è controllata la posizione dell'adesivo in eccesso per 1,5 mm, si è rilevata di tipo adesivo, ma a carichi di rottura più elevati. La conseguenza è dunque una diminuzione degli sforzi massimi locali agenti nello strato di adesivo a parità di carico. Questa diminuzione è stata evidenziata anche da ulteriori analisi numeriche sul provino T-peel, i cui risultati sono mostrati in Fig.9 e Fig.10.

Ragionando in termini di sicurezza, nonostante la mancanza di un controllo dell'esatta posizione dell'adesivo per la giunzione incollata di Fig.2, si è considerata la presenza dell'adesivo solamente fino all'inizio del raccordo dell'aderendo, come provato dalle prove T-peel, e non oltre. La condizione di cedimento presa in considerazione è stata dunque quella più restrittiva tra i risultati numerici delle prove single-lap e T-peel:

$$\sigma_1 = \sigma_{1, \text{lim}} = 146 \text{ MPa} \quad (1)$$

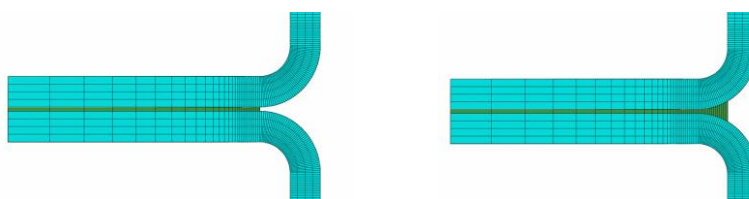


Figura 8: Posizione dell'adesivo nella sovrapposizione del T-peel. A sinistra senza alcun eccesso, a destra con un tratto aggiuntivo di adesivo per 1,5 mm sul raccordo, con evidente aumento di spessore.

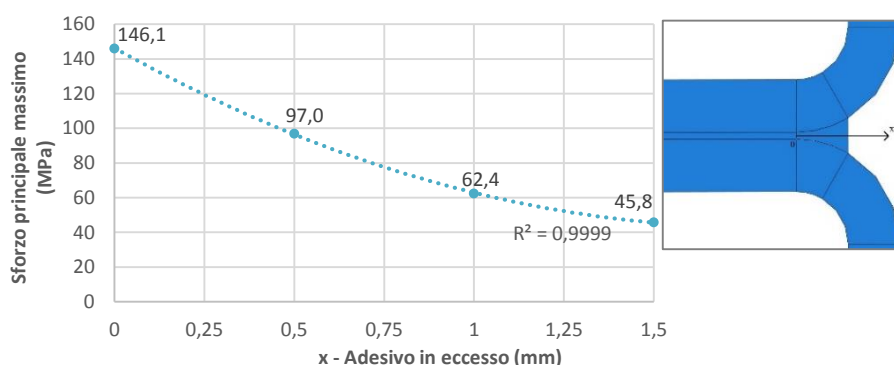


Figura 9: Decremento del valore di picco di σ_1 nello strato adesivo del test T-peel, ricavato numericamente, all'aumentare dell'eccesso di adesivo oltre l'inizio del raccordo.

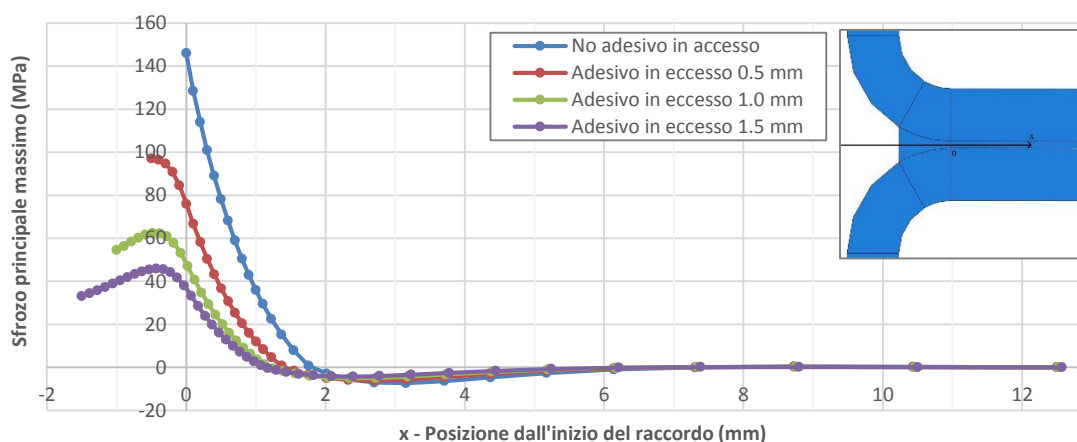


Figura 10: Valori di σ_1 nello strato di adesivo lungo la sovrapposizione del provino T-peel, per un valore di carico pari a 1239 N, ricavati numericamente. I casi analizzati sono senza adesivo in eccesso e con adesivo oltre 0,5 / 1 / 1,5 mm dall'inizio del raggio di raccordo.

3.3. Risultati numerici delle prove sulle giunzioni

La prova di trazione delle due giunzioni di Fig.1 e Fig.2 è stata modellata attraverso il software Abaqus. I risultati numerici hanno evidenziato una netta disparità nella distribuzione degli sforzi lungo la zona di collegamento, come mostrato in Fig.11. A parità di carico, infatti, a differenza del pannello rivettato, dove sforzi maggiori si concentrano nei pressi dei fori dei rivetti, nella giunzione incollata il pannello è sollecitato in maniera pressoché uniforme lungo tutta la linea di carico.

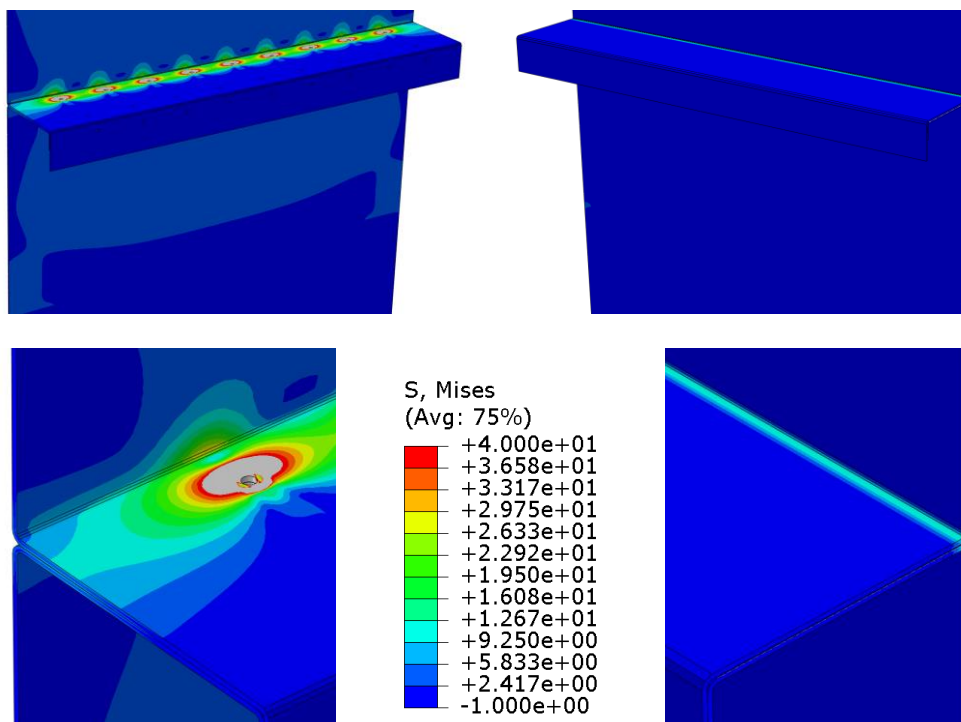


Figura 11: Confronto tra gli sforzi equivalenti di von Mises della giunzione rivettata (a sinistra) e incollata (a destra) per un carico di 1250 N. La scala dei valori è uguale nei due casi.

Nel modello della giunzione incollata, in mancanza di dati relativi alla propagazione della frattura nello strato di adesivo, è stato scelto di monitorare lo sforzo principale massimo, come effettuato per le prove di caratterizzazione dell'adesivo. La necessità di mantenere la stessa dimensione di mesh ha imposto l'uso di un sottomodello, considerando l'eccessiva onerosità computazionale che sarebbe risultata raggiungendo elementi tridimensionali di 0,1 mm.

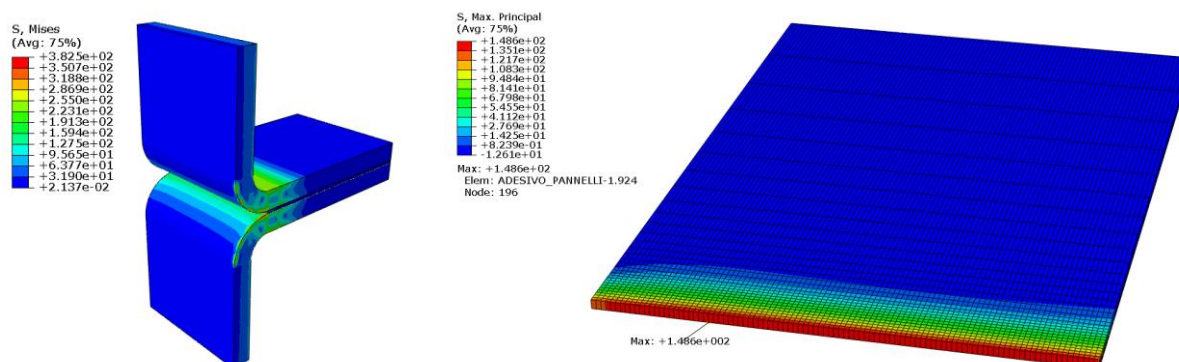


Figura 12: A sinistra sottomodello ad elementi finiti della giunzione incollata. A destra valore di σ_1 nello strato adesivo rilevato in corrispondenza di un carico di 30,20 kN.

Come mostrato in Fig.12, grazie alle analisi numeriche del sottomodello, è stato possibile rilevare il superamento del $\sigma_{1,lim}$ tenuto in considerazione per le parti adesive, per un carico di circa 30,20 kN.

Questo valore di carico è stato considerato come valore massimo ammissibile per la giunzione incollata, con un margine di sicurezza legato all'eccesso di adesivo nel bordo della giunzione reale. Durante le fasi di incollaggio, infatti, non è stata controllata l'esatta posizione dell'adesivo oltre la linea di piegatura del pannello per la volontà di replicare un incollaggio eseguito nelle stesse condizioni del manufatto di riferimento.

Per quanto riguarda la giunzione rivettata, si è rilevato lo snervamento dei primi rivetti per un carico pari a 1270 N, dunque molto inferiore rispetto al cedimento atteso per la giunzione incollata.

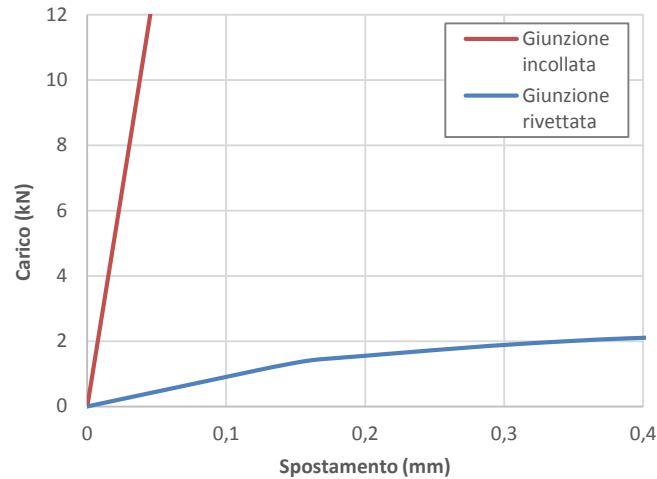


Figura 13: Confronto numerico tra giunzione rivettata e incollata.

Appare chiaro dalla Fig.13, infine, la sostanziale differenza di cedevolezza delle due giunzioni in esame, aspetto particolarmente critico per la funzionalità del componente reale.

4. PROVE SPERIMENTALI

Le prove sperimentali delle giunzioni sono state effettuate con una macchina elettromeccanica MTS in controllo di spostamento. I pannelli sono stati collegati alla macchina di prova in modo da evitare cedimenti della struttura lontano dalle giunzioni in esame.

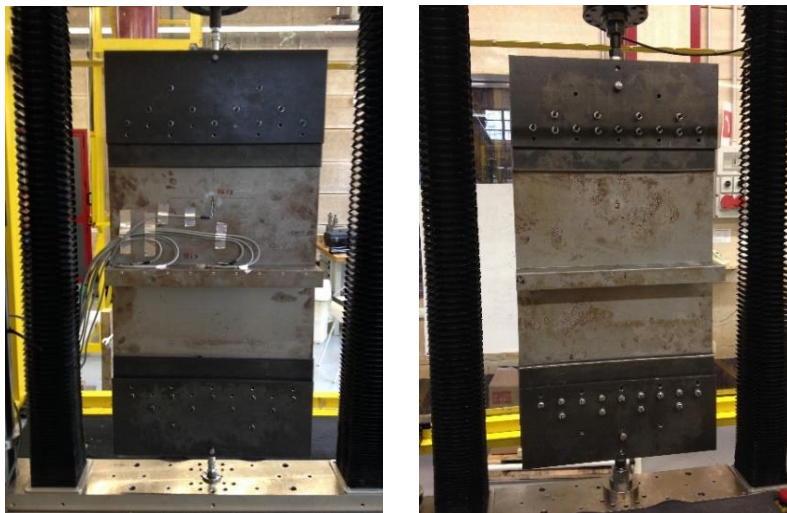


Figura 14: Prove sperimentali sulla giunzione rivettata (a sinistra) e incollata (a destra).

Come si può notare dalla Fig.15, il cedimento della giunzione rivettata è stata causata dalla rottura di alcuni rivetti della prima fila. Dalla Fig.16 si può notare come sia stata confermata la perdita di linearità

e quindi inizio dello snervamento dei rivetti, elemento più debole della giunzione, per un carico di circa 1250 N.

La prova sulla giunzione incollata, al contrario, ha fatto registrare un'estensiva fase di plasticizzazione del pannello, prima del cedimento dell'adesivo. In questo caso si è dunque raggiunto l'obiettivo di rendere la giunzione stessa più resistente delle parti da incollare. Il cedimento dello strato adesivo, di modalità coesiva per la quasi totalità della sovrapposizione, è avvenuto per un carico pari a 45,89 kN. L'eccesso di adesivo, stimato tra circa 1 e 1,5 mm lungo la linea di carico, ha permesso di raggiungere un carico più elevato rispetto ai 30,20 kN stimati numericamente. Il fattore di sicurezza sulla stima iniziale è stato pari a circa 1,5.



Figura 15: Cedimento di alcuni rivetti della giunzione rivettata (a sinistra) e dello strato adesivo in modo coesivo nella giunzione incollata (a destra).

Dalla Fig.16, infine, si può notare l'effettivo aumento di rigidezza della giunzione incollata in confronto alla versione rivettata, circa 12 volte superiore. Le rigidezze si riferiscono ai manufatti compresi di sistema di afferraggio.

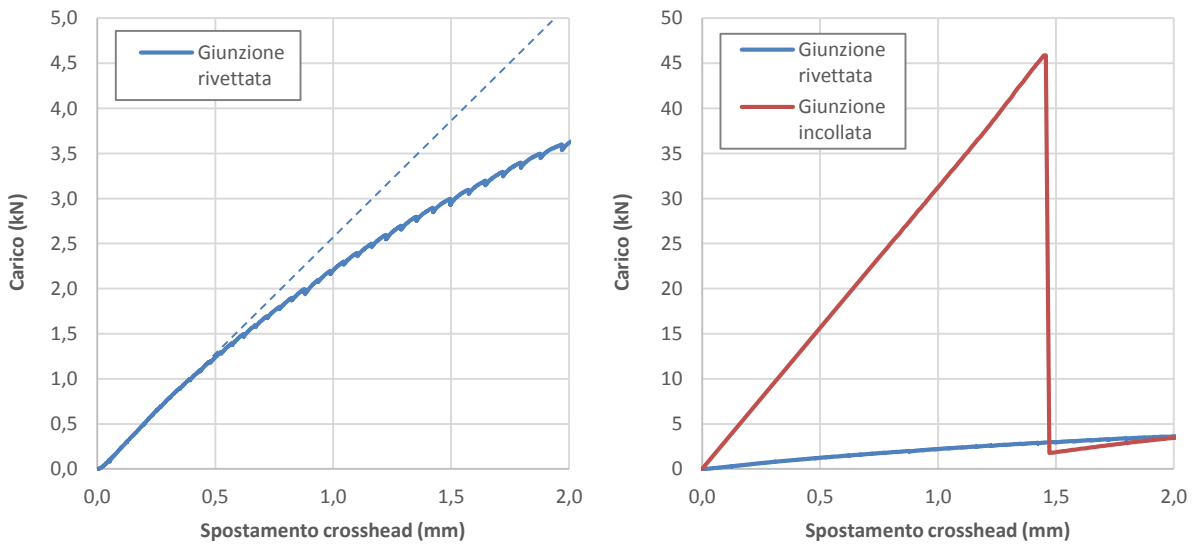


Fig. 16: A sinistra risultati sperimentali della prova sulla giunzione rivettata (intervallo 0-5 kN). A destra confronto sperimentale tra giunzione rivettata e incollata (intervallo 0-50 kN).

Tabella 3: Comparazione tra simulazioni numeriche e prove sperimentali.

Giunzione	Carico di primo danneggiamento (N)	
	Abaqus	Prove sperimentali
Rivettata	1267	1250
Incollata	30200	45890

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato analizzato, attraverso simulazioni numeriche e prove sperimentali, il comportamento statico della versione rivetta e incollata di una giunzione derivante da un componente reale. La valutazione delle sollecitazioni limite è stata effettuata attraverso l'analisi degli sforzi agenti nella struttura, nei rivetti e nello strato di adesivo nella giunzione incollata. Il confronto dello sforzo principale massimo con quello ricavato dalle prove single-lap e T-peel di caratterizzazione dell'adesivo ha permesso di stimare un valore di carico di rottura con un margine a favore di sicurezza. L'eccesso di adesivo nella giunzione in esame, presente nel manufatto di prova, ma volutamente trascurato nelle analisi numeriche, ha infatti dato un contributo alla resistenza alla pelatura.

L'obiettivo di miglioramento del collegamento in esame, con l'uso della tecnologia dell'incollaggio, è stato pienamente raggiunto: le prove sperimentali hanno confermato una maggiore resistenza e rigidità della giunzione incollata rispetto alla versione rivettata.

Ulteriori sviluppi del lavoro riguardano l'ottimizzazione della giunzione incollata con l'applicazione dell'adesivo nelle sole zone di maggiore efficacia, mantenendo invariate le prestazioni meccaniche. A questo proposito potranno essere utili le prove DCB ed ENF per una modellazione più efficace della propagazione della frattura nello strato di adesivo.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare 3M Italia per la fornitura dell'adesivo, dell'attrezzatura necessaria per l'applicazione e per i suggerimenti sull'uso efficace dei loro prodotti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Habenicht, *Applied Adhesive Bonding. A Practical Guide for Flawless Results*, ed. Wiley-VCH (2009).
- [2] L.F.M. da Silva, A. Öchsner, *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, ed. Springer (2009).
- [3] Standard ISO 4587, *Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies* (2003).
- [4] R. Krueger, The virtual crack closure technique: history, approach and applications, NASA/CR-202-211628, ICASE Report No. 2002-10.
- [5] J.P.M. Gonçalves, M.F.S.F. de Moura, A.G. Magalhães, P.M.S.T. de Castro, Application of the interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 26, Issue 5, 479-486 (2003).
- [6] B.R.K. Blackman, H. Hadavinia, A.J. Kinloch, J.G. Williams, The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joints, *International Journal of Fracture*, Vol. 119, Issue 1, 25-46 (2003).
- [7] J.H. Harris, R.D. Adams, Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 4, No. 2, 65-68 (1984).
- [8] L. Goglio, M. Rossetto, E. Dragoni, Design of adhesive joints based on peak elastic stresses, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 4, No. 2, 65-68 (2008).
- [9] Standard BS EN ISO 11339, *Adhesives - T-peel test for flexible-to-flexible bonded assemblies* (2005).
- [10] 3M Scotch-Weld Epoxy Adhesive 7260 B/A. Product Data Sheet UK (2001).