



Studio delle prestazioni di giunzioni incollate ibride

Strength evaluation of structural hybrid bonded joints

F. Moroni

*Università degli studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. P. Usberti 181/A 43124 Parma, IT
moroni@ied.unipr.it*

ABSTRACT. The idea of “hybrid joints” arises from the need of joining together materials, producing a tough, stiff and lightweight joint. The core concept is: use two different joining techniques, with the aim to increase the strength and gather the advantages of each technique, reducing the drawbacks. In this work hybrid joints consist in joints produced with two different kinds of joining techniques: one of them being adhesive bonding and the other being one among Resistance Spot Welding, Pop Riveting, Clinching, Self Piercing Riveting. The performance of hybrid joints are compared with those of traditional joints for the single lap joint geometry, for different geometric (plates thickness, pitch of the mechanical fastening) and environmental condition (temperature and ageing). The experimental tests are planned and therefore their results analyzed by means of Design of Experiment techniques.

Results show that hybrid joints allow a significant performances enhancement with respect to simple joints when the two simple joining techniques give similar performances, while the performance of hybrid joints are only equal or lower than the those of the strongest joint when the performances of the two joining techniques are significantly different.

RIASSUNTO. Le giunzioni ibride sono giunzioni in cui coesistono due differenti tipologie di giunzione, di cui una è l'incollaggio. L'articolo mostra i risultati di una campagna sperimentale volta a caratterizzare le prestazioni di giunti incollati ibridi in confronto ad alcune tipologie di giunzioni tradizionali. Si sono prese in considerazioni come tecnologie di giunzione tradizionali la saldatura a resistenza, la rivettatura a strappo, la clinchiatura e la rivettatura auto perforante. In particolare si sono studiate le prestazioni di giunti a semplice sovrapposizione per differenti condizioni geometriche del giunto (spessore aderenti, passo tra i punti di fissaggio meccanico) e condizioni ambientali (temperatura di esercizio, presenza o meno di invecchiamento). La pianificazione della campagna sperimentale, e la successiva analisi dei risultati sono state svolte mediante Design of Experiments.

I risultati dei test mostrano che le giunzioni ibride conducono ad significativo un miglioramento delle prestazioni quando le due tecnologie di giunzione componenti il giunto ibrido hanno prestazioni simili, mentre forniscono prestazioni pari o inferiori a quelle delle giunzione più resistente quando vengono accoppiate tecnologie di giunzione con prestazioni molto differenti.

KEYWORDS. Hybrid Joining, Adhesive Bonding, Design of Experiment



INTRODUZIONE

Le giunzioni ibride sono nate con l'idea di ottenere un giunto in grado di unire le qualità positive di differenti tecnologie di giunzione: il loro primo utilizzo risale agli anni 60 in Antonov russi, nei quali la saldatura a punti era accoppiata con l'incollaggio strutturale. Da allora numerosi studi si sono concentrati su queste tipologie di giunzione: se da una parte molti di questi evidenziano l'incremento delle prestazioni dei giunti ibridi rispetto a giunzioni tradizionali [1-10], spiegando questo fatto con una migliore distribuzione degli sforzi nella zona di giunzione, alcuni hanno anche sollevato alcuni dubbi sulla possibilità del loro impiego in ambito industriale [11]. I dubbi sono per lo più legati al fatto che con la presenza simultanea di due tecnologie di giunzione, si ha spesso un incremento delle problematiche legate al processo di giunzione stesso. Il lavoro citato in precedenza si riferisce in particolare a giunzioni in cui coesistono saldatura a resistenza e incollaggio, in cui a seconda dell'ordine con cui vengono eseguite la saldatura e l'incollaggio, si possono presentare problematiche legate a bruciatura di adesivo (nel caso in cui venga prima effettuato l'incollaggio e successivamente la saldatura) oppure tempi di giunzione troppo elevati (nel caso in cui venga per prima eseguita la saldatura e successivamente fatto penetrare per capillarità l'adesivo tra i due lembi già saldati). Lasciando per un attimo da parte la saldatura, altre tecnologie che ben si accoppiano con l'incollaggio sono le giunzioni meccaniche a punti come rivettatura (a strappo e auto perforante) e la clinchiatura. In questo caso non si hanno le problematiche relative al processo produttivo illustrate in precedenza, in quanto tutte queste tecnologie ben si prestano ad essere messe in opera utilizzando lamiera con interposto uno strato di adesivo non ancora polimerizzato. In aggiunta queste tecnologie permettono di unire anche materiali differenti (cosa spesso non possibile con la saldatura). Questa proprietà è molto ricercata la dove si debbano unire parti con diverse funzioni e quindi costruite con materiali "prodotti su misura": si pensi ad esempio ad un'automobile dove coesistono materiali leggeri, con materiali che devono garantire una sufficiente rigidità con altri che devono assorbire molta energia in caso d'urto. Discorso leggermente differente può essere fatto per le giunzioni imbullonate: queste solitamente sono utilizzate per la loro possibilità di essere disassemblate, proprietà che cade nel momento in cui queste vengono accoppiate con adesivi strutturali.

Negli ultimi anni, soprattutto grazie allo sviluppo di particolari resine weld-compliant sembrano essersi ridotte le problematiche dal lato produttivo, di conseguenza le giunzioni ibride sono ampiamente utilizzate nel settore automotive, costruzioni di veicoli stradali e ferroviari in genere. Alcuni esempi sono rappresentati dal loro utilizzo nella costruzione di mezzi per il trasporto pubblico come i famosi school bus americani, ma anche in telai per autovetture, come ad esempio nel caso della Jaguar serie XJ, dove si è fatto ampio uso delle giunzioni rivet-bonded.

In questo articolo in particolare si riportano i risultati di una campagna sperimentale svolta in collaborazione con il centro di ricerca Henkel di Monaco di Baviera in cui si è studiato il comportamento di differenti tecnologie di giunzione ibrida in confronto a quello delle giunzioni tradizionali, per differenti geometrie dei giunti e per differenti condizioni ambientali.

DEFINIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

Al fine di fare una ricerca mirata e che potesse essere di interesse a livello industriale, le tipologie di giunzione, i materiali e le condizioni di esercizio a cui testare i giunti sono state scelte in base ad una serie di interviste svolte presso svariate aziende di livello nazionale ed internazionale operanti nel settore automotive, navale e delle costruzioni di veicoli ferroviari e per il trasporto pubblico in genere. Definite le variabili da studiare, attraverso metodologie DoE [12] si è messo a punto un piano di esperimenti che permettesse di individuare i fattori maggiormente influenti per le giunzioni ibride, e di conseguenza di ottenere una sorta di ottimizzazione della giunzione stessa per determinate condizioni di utilizzo.

Le tecnologie di giunzioni tradizionali che sono state prese in considerazione (in quanto accoppiabili con l'incollaggio strutturale e allo stesso tempo di interesse per le aziende) sono state la saldatura a resistenza per punti (RSW), la clinchiatura (C), la rivettatura autoperforante (SPR) e la rivettatura a strappo (R). Queste sono poi state combinate con l'incollaggio (B) al fine di ottenere giunzioni ibride rispettivamente (RSW-B, C-B, SPR-B, R-B). Per quel che riguarda i giunti, si è scelta una geometria a singola sovrapposizione. I fattori che si sono valutati sono lo spessore ed il materiale dei lembi da unire, il passo tra i punti di fissaggio meccanico, la temperatura di esercizio e la presenza di invecchiamento. Così come i fattori, anche i livelli dei fattori sono stati determinati in base a quanto emerso dall'indagine, ed in particolare si sono assunti valori che potessero essere rappresentativi delle situazioni che con maggior frequenza si presentano ai costruttori. Al fine di avere una analisi più dettagliata e nella quale non fossero mischiati differenti effetti legati a differenti tipologie di giunzione, l'analisi globale è stata suddivisa in due sottogruppi: vista l'impraticabilità di saldare a resistenza materiali

differenti, si è scelto di adottare questa tecnologia di giunzione solamente per giunti omogenei (in cui entrambi gli aderenti sono dello stesso materiale), mentre le altre tecnologie sono state adottate per unire materiali differenti (giunti eterogenei). Si sono creati quindi due gruppi di analisi: il primo, giunti omogenei, formato da giunti solo RSW, B e RSW-B in cui si sono accoppiati materiali identici (alluminio + alluminio o acciaio + acciaio), ed un secondo, giunti eterogenei, formato da giunti R, C, SPR, B, R-B, C-B e SPR-B in cui si sono accoppiati materiali differenti (alluminio + acciaio). Inoltre si è supposto che temperatura di esercizio ed invecchiamento non fossero influenti per i giunti meccanici semplici. Per quel che concerne il passo tra i punti di fissaggio meccanico si è deciso di mantenere sempre la stessa dimensione dei provini e variare il numero di punti degli stessi: in particolare, come mostrato in Fig. 1, fissata la larghezza del provino a 60mm, la presenza di un punto di fissaggio meccanico rappresenta un passo di proprio 60mm, mentre la presenza di due punti identifica un passo di 30mm.

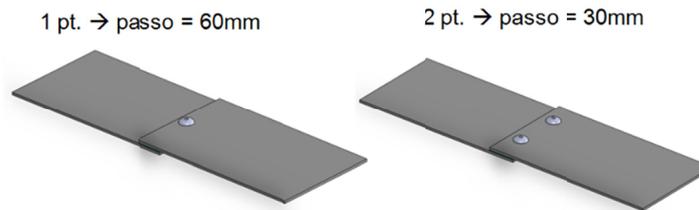


Figura 1: Geometria dei provini per la valutazione del passo.
Specimens geometry.

Giunti omogenei			Giunti eterogenei		
Fattore	Simbolo	Livelli	Fattore	Simbolo	Livelli
Spessore	A	1.5 / 2.5 mm	Spessore	A	1.5 / 2.5 mm
Materiale	B	Alluminio / Acciaio	Passo	B	30 / 60 mm
Passo	C	30 / 60 mm	Ageing	C	Si / No
Ageing	D	Si / No	Temperatura	D - E	-30 / 23 / 60 / 90 °C
Temperatura	E - F	-30 / 23 / 60 / 90 °C			

Tabella 1: Livelli dei fattori considerati.
Levels of the analyzed factors.

Per quel che riguarda la temperatura, il campo che si aveva intenzione di valutare (-30°C/90°C secondo i campi di progetto dei settori presi in considerazione) era troppo ampio per essere valutato con un solo fattore, di conseguenza si è scelto di dividere il fattore temperatura in due fattori: un primo macrolivello di temperatura (Temp 1) il quale indica se si è prossimi o meno alla temperatura di transizione vetrosa dell'adesivo (T_g), ed un secondo fattore (Temp 2) rappresentante piccole variazioni di temperatura rispetto alla temperatura del macrolivello. La temperatura viene quindi rappresentata secondo i due fattori sopra citati secondo quanto riportato in Tab. 2.

Temperatura [°C]	Temp 1	Temp 2
-30	-1	-1
23	-1	+1
60	+1	-1
90	+1	+1

Tabella 2: Rappresentazione del livello di temperatura con i due fattori Temp1 e Temp2
Representation of the Temperature by means of Temp 1 and Temp 2 factors.

Il trattamento di invecchiamento è stato eseguito secondo la norma tedesca VDA 621-415. Questo trattamento, della durata totale di 4 settimane, prevede cicli in nebbia salita alternati a cicli con un elevato tasso di umidità ad altri per così dire di riposo a temperature ambiente.

Per quel che riguarda i materiali scelti si è cercato di soddisfare i requisiti di un po' tutti i settori industriali presi in considerazione, di conseguenza si è optato per un acciaio da costruzione S 275 galvanizzato (che rappresenta una condizione intermedia tra gli acciai altoresistenziali del settore automotive e quelli utilizzati in settori quali quello navale e ferroviario), ed un alluminio Al 5052 che ben si presta ad essere lavorato per deformazione plastica.



L'adesivo utilizzato è una resina epossidica monocomponente, studiato per il settore automotive, fortemente tenacizzato ed in grado di ben sopportare urti e sollecitazioni di pelatura. L'adesivo è stato fatto polimerizzare in forno ad una temperatura di 160°C per 30 minuti.

Si sono quindi eseguiti i test sui giunti a sovrapposizione e per ognuno si sono estratti i valori di rigidità, carico massimo ed energia assorbita prima della rottura finale.

La campagna sperimentale è stata impostata seguendo metodologie DoE, ed in particolare si sono imposti piani fattoriali ridotti.

In Tab. 3 sono mostrati i trattamenti definiti per le giunzioni omogenee, mentre in Tab. 4 sono riportati quelle per le giunzioni eterogenee. Nel primo caso si è imposta una piano fattoriale 26-2, con generatori della riduzione E = ABC e F = BCD (Tab. 3), mentre nel secondo caso si è imposto un piano fattoriale 25-1 con generatore E = ABCD (Tab. 4).

Fattori		Trattamenti															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Spessore	A	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Materiale	B	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Passo	C	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Ageing	D	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Temp 1	E	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
Temp 2	F	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1
Trattamento		0	df	cef	cde	bef	bde	bc	bcdf	ae	aedf	acf	acd	abf	abdf	abce	abcdef

Tabella 3: Trattamenti per il gruppo “giunti omogenei”.
Homogeneous joints treatments.

Fattori		Trattamenti															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Spessore	A	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
Passo	B	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
Ageing	C	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
Temp 1	D	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Temp 2	E	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
Trattamento		e	d	c	cde	b	bde	bce	bcd	a	ade	ace	acd	abe	abd	abc	abcde

Tabella 4: Trattamenti per il gruppo “giunti eterogenei”.
Heterogeneous joints treatments.

Sempre utilizzando metodologie DoE si sono individuati i fattori più influenti, ed è stato possibile, per ognuna delle tre grandezze valutate (rigidità, resistenza ed energia assorbita) identificare una funzione generica R, definita come

$$R = \sum_n C_n X_n + \bar{R}$$

dove \bar{R} è il valore medio dei risultati dei test, n è il generico fattore o interazione tra due o più fattori definito come influente, C_n il suo coefficiente di regressione e X_n il valore assunto dal fattore. In questo modo è possibile definire delle superfici di risposta come ad esempio mostrato in Fig. 2.

RISULTATI

Prima di mostrare i risultati in termini di analisi statistica, vengono riportati alcuni esempi di risultati dei test in termini di spostamento e forza applicato al giunto.

Fig. 3 mostra i risultati per quel che riguarda giunti saldati in acciaio (a) e alluminio (b). Si può notare come in entrambi i casi il giunto abbia un comportamento abbastanza duttile, ed in particolare come vengano accumulate notevoli deformazioni plastiche anche dopo il raggiungimento del carico massimo.

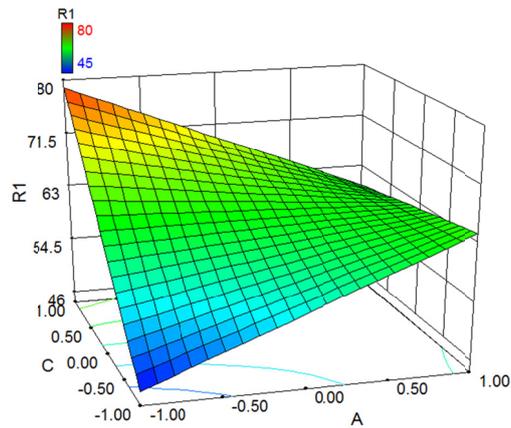


Figura 2: Esempio di superficie di risposta R1 in funzione di due parametri A e C.
Example of a response surface as a function of the two parameters A and C.

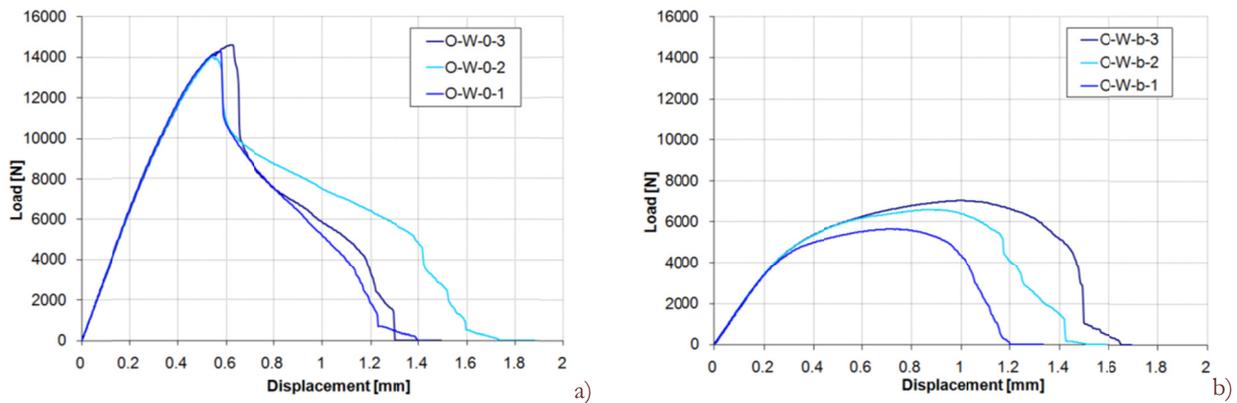


Figura 3: Esempio di grafico Forza – Spostamento per giunti saldati.
Example of Load vs. Displacement plot of simple welded joints.

Per quel che riguarda i giunti incollati (Fig. 4) si nota invece che vengono raggiunti carichi superiori rispetto a quelli mostrati dai giunti semplicemente saldati, e che il comportamento è per certi versi più fragile, infatti una volta raggiunto il carico massimo si ha un crollo piuttosto rapido della resistenza del giunto stesso.

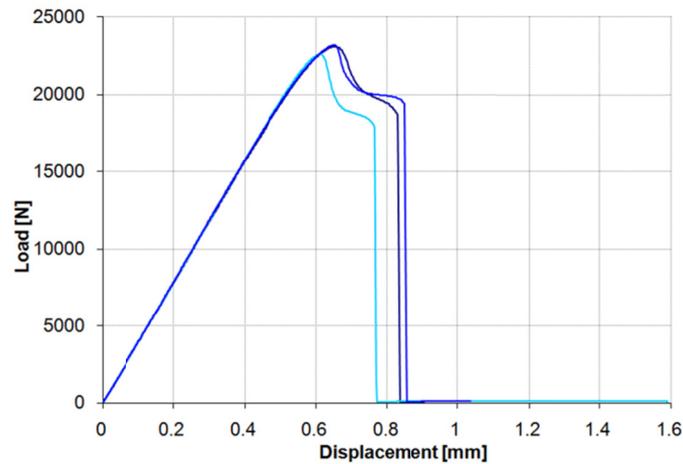


Figura 4: Esempio di grafico Forza – Spostamento per giunti incollati con aderendi in acciaio.
Example of Load vs. Displacement plot of simple bonded joints (steel plates).

Fig. 5 mostra esempi di risultati di giunti ibridi nel caso aderendi in acciaio (a) e alluminio (b). In questo caso si raggiungono carichi superiori rispetto ai giunti semplicemente e il comportamento che si ottiene è una sorta di sovrapposizione che prende il meglio dei due giunti semplici: il giunto ibrido infatti mostra di solito un picco di carico, che è prossimo al picco di carico del giunto incollato, dopodiché l'adesivo cede, e il giunto si comporta come un giunto semplicemente saldato. In questo modo si riescono a unire in uno stesso giunto l'elevata resistenza di un giunto incollato, con l'elevata duttilità e assorbimento energetico dei giunti saldati.

Inoltre si è notato che nei giunti saldati, nella maggior parte dei casi la frattura avviene per taglio del punto di saldatura, mentre nei giunti ibridi la frattura avviene per strappamento delle lamiere attorno al punto di saldatura. Essendo i giunti prodotti nelle stesse condizioni, si è individuata come possibile causa di questi diversi comportamenti, la differente distribuzioni di tensione che si ha quando viene applicato il carico. Si sono quindi eseguita analisi FEM di un giunto semplicemente saldato (una semplice analisi elasto-plastica) e di un giunto ibrido (analisi elasto-plastica con elementi coesivi per simulare lo strato di adesivo). Nell'analisi un lembo del giunto è stato fissato, mentre all'altro è stato applicato uno spostamento crescente fino a che in un punto delle lamiere fosse raggiunta una tensione prossima a quella di rottura (nelle Fig. 6 e 7 questo valore è utilizzato come fondo scala del contour). Come è possibile vedere in Fig. 6, per il giunto semplicemente saldato le massime tensioni si hanno nel punto di saldatura stesso.

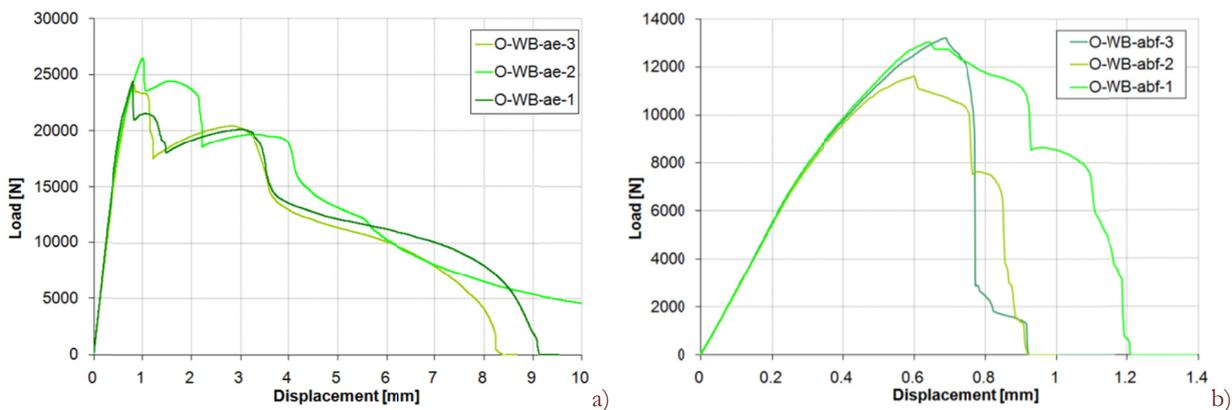


Figura 5: Esempio di grafico Forza – Spostamento per giunti ibridi.
Example of Load vs. Displacement plot of weld bonded joints.

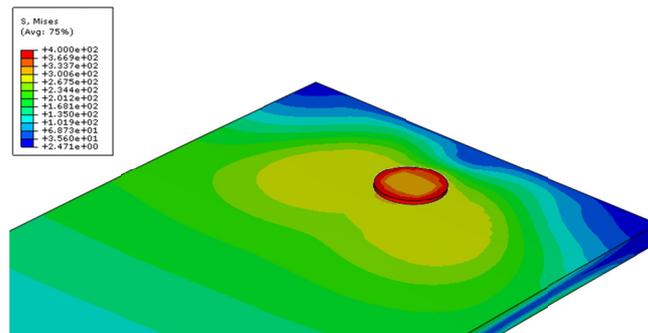


Figura 6: Tensioni di Von Mises in un giunto semplicemente saldato.
Equivalent Von Mises stresses distribution in the simple welded joint.

In particolare in Fig. 7b si nota come per il giunto ibrido le tensioni in prossimità del punto di saldatura (zona tratteggiata) siano prossime a 300MPa contro i 400 MPa della zona adiacente al punto stesso in cui si innesca la rottura. Questo fenomeno in ogni caso non è influente per quel che riguarda il carico massimo sopportabile da giunto, infatti ciò avviene dopo il cedimento dello strato di adesivo il quale è determinante nel raggiungimento del picco di carico, ma risulta discriminante per la tipologia di cedimento e di conseguenza per il valore di energia assorbita per la rottura del giunto.

In letteratura si possono incontrare entrambe le tipologie di frattura sia per giunti saldati che ibridi: in particolare in [3] si hanno sempre rotture per taglio, mentre in [5] la rottura si innesca nelle lamiere. Sebbene in questo secondo caso le prove di siano di fatica, il fatto che l'innesco avvenga in prossimità del punto di saldatura, ma nelle lamiere sta a significare che in questo punto vi sono tensioni mediamente più elevate che nelle altre zone.

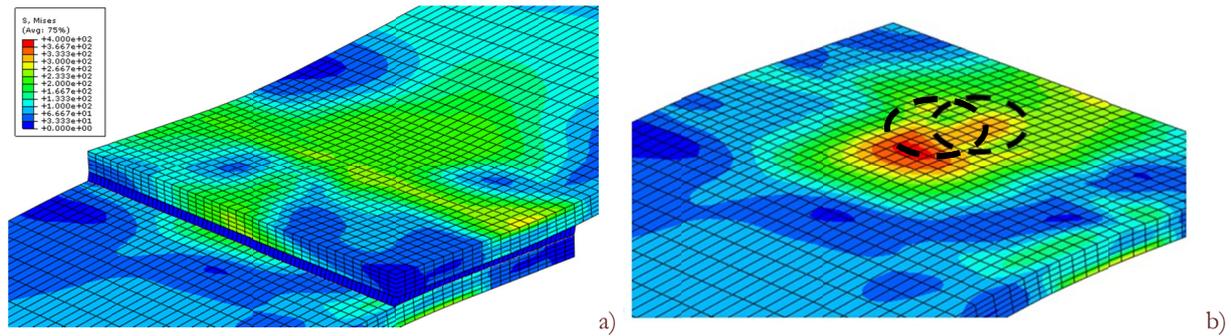


Figura 7: Tensioni di Von Mises in un giunto ibrido: in a) si nota la rotazione dei lembi, in b) il picco delle tensioni nei lamierini in prossimità, ma non in corrispondenza del punto di saldatura (zona tratteggiata).

Von Mises stresses distribution in the hybrid joint: the stress concentration is located in the plates close to the nugget (dashed line).

È altresì evidente come la tipologia di rottura sia fortemente influenzata dalla geometria del giunto ed in particolare dal rapporto tra diametro del punto di saldatura e spessore delle lamiere. Tanto più questo rapporto è elevato, tanto maggiore sarà la probabilità di avere una rottura per strappamento delle lamiere.

Venendo ai giunti eterogenei la situazione pare essere differente: infatti mentre nei giunti omogenei saldatura e incollaggio sono due tipologie di giunzione che sono in grado di fornire se prese singolarmente livelli di carico elevati e piuttosto simili, l'incollaggio è in grado di fornire carichi sensibilmente maggiori di rivettatura e clinchiatura (Fig. 8). Questo sbilancia in modo sensibile le prestazioni dei giunti ibridi verso quelle dei giunti incollati.

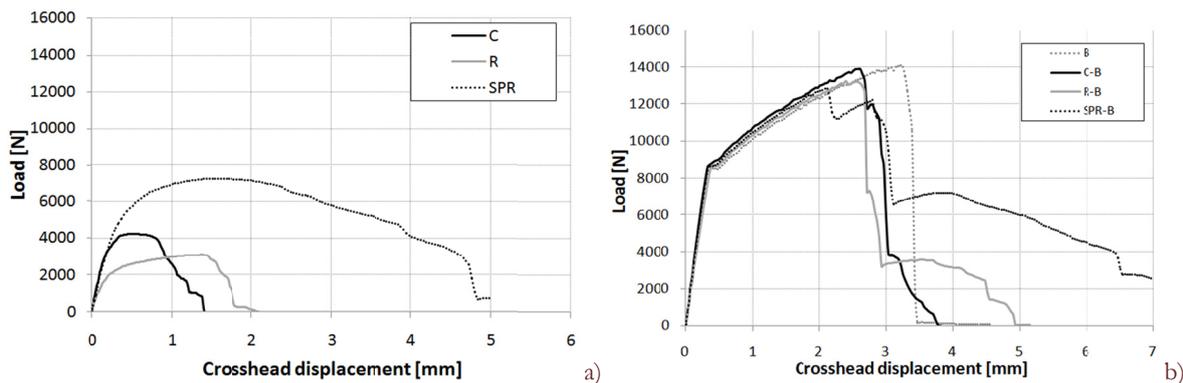


Figura 8: Diagramma Forza spostamento per giunti eterogenei con semplice fissaggio meccanico (a) e ibridi e incollati (b). Load vs. Displacement plot of heterogeneous simple (a) and hybrid joints (b).

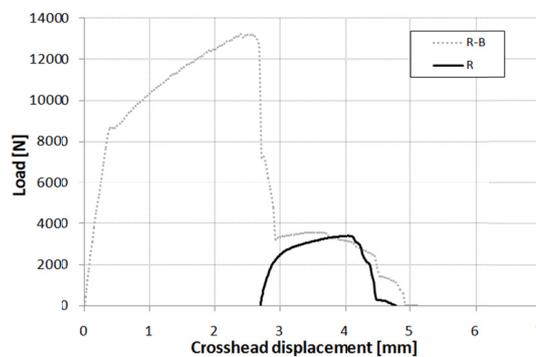


Figura 9: Confronto tra diagramma Forza – Spostamento di un giunto ibrido rivettato e giunto rivettato con origine traslata di un valore pari allo spostamento della rottura dell'adesivo.

Comparison between the load vs. displacement plot of a rivet bonded joint and that of a simple riveted joint. The second one is shifted until the adhesive failure displacement.



Inoltre come può essere facilmente individuato dal secondo diagramma di Fig. 8, i carichi raggiunti causano lo snervamento e l'accumulo di una significativa quota di deformazione plastica nel lamierino di alluminio. Fig. 9 mostra il confronto tra la curva di un giunto ibrido rivettato e quella di un giunto rivettato con l'origine traslata di un valore pari allo spostamento in cui si ha la rottura dell'adesivo. Si nota che nel giunto ibrido il punto di fissaggio meccanico risulta praticamente non caricato fino alla rottura dell'adesivo; solo da qui in poi si ha il caricamento del rivetto che si comporta esattamente come in un giunto semplicemente rivettato.

Per quel che riguarda la modalità di frattura essendo le due tipologie di giunzione abbastanza indipendenti tra loro, si avrà una sorta di sequenza di fratture. Per prima si avrà quindi la frattura dello strato di adesivo, seguita dalla frattura del punto di fissaggio meccanico. Questo sorta di sequenza temporale è stata mostrata in letteratura sia per in giunti ibridi clincati [10,14] che per giunti rivettati e incollati [13,14] sia dal punto di vista sperimentale che di simulazione.

In questi casi quindi il giunto ibrido non mostra significativi vantaggi in termini di forza massima rispetto alle giunzioni incollate, ma invece è in grado di fornire un comportamento molto più duttile e un maggiore assorbimento energetico nel processo di frattura.

ANALISI STATISTICA GIUNTI OMOGENEI

Figura 10 mostra il confronto tra i valori medi di rigidità, carico massimo ed energia assorbita per giunti semplicemente saldati, semplicemente incollati ed ibridi. Si può notare come per tutte e tre le grandezze i giunti ibridi offrano prestazioni migliori, ed in particolare il maggiore incremento si ha per l'energia assorbita.

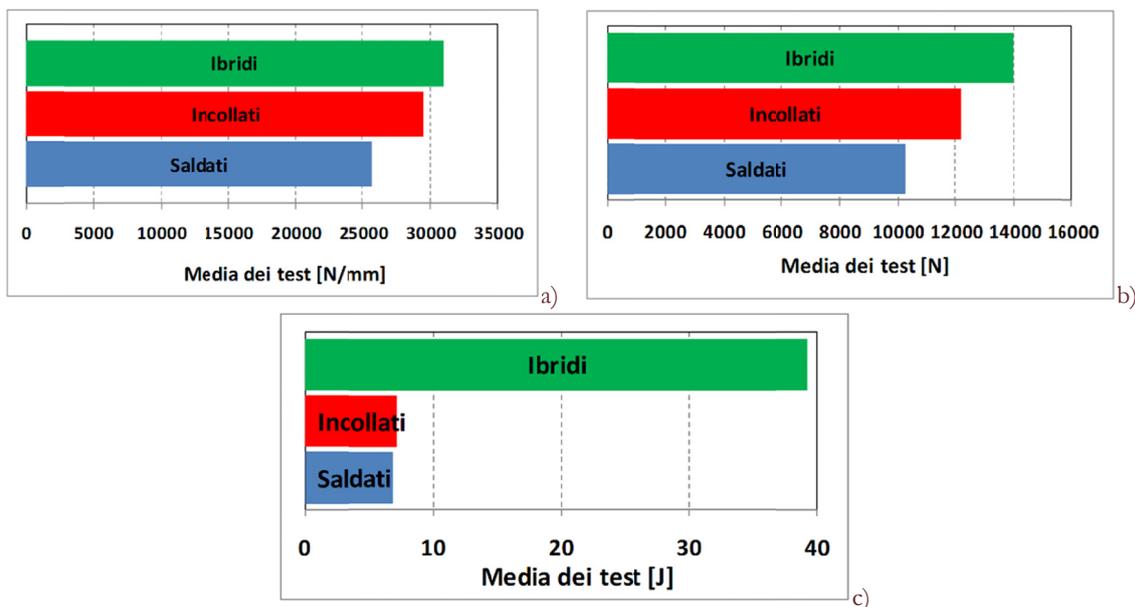


Figura 10: Valori medi di rigidità (a), carico massimo (b) ed energia assorbita (c) per le tre tipologie di giunto.
Average values of stiffness (a) strength (b) Energy absorption (c) for the homogeneous joints.

Questo è essenzialmente legato, oltre alla semplice somma dei valori relativi alle singole giunzioni, ai diversi modi di cedimento tra i giunti semplicemente saldati ed i giunti ibridi come discusso in precedenza.

Utilizzando la funzione di regressione discussa in precedenza si possono produrre le previsioni delle 3 grandezze in funzione dei vari fattori considerati, permettendo di fare confronti tra le tre tipologie di giunzione.

Un'altra importante proprietà delle giunzioni ibride è quella di contenere il degrado delle prestazioni rispetto ai giunti semplicemente incollati nel caso di temperature elevate. Questo è mostrato in Fig. 13 dove si confronta il carico massimo di giunti solo incollati e di giunti weld-bonded in funzione delle temperatura: a basse temperature i giunti solo incollati e giunti ibridi forniscono prestazioni simili, mentre all'aumentare della temperatura, la vicinanza con la T_g dell'adesivo (ca. 60°C) fa sì che i giunti incollati perdano oltre al 50% delle loro resistenza, mentre per i giunti ibridi il calo è più contenuto (intorno al 20%).

Un'altra considerazione da fare riguarda le basse temperature: in questi casi infatti la resistenza del giunto ibrido può essere inferiore rispetto a quella del giunto semplicemente incollato. Questo può accadere quando non vi sia una sinergia

tra le due tipologie di giunzione: a basse temperature infatti l'adesivo diventa più rigido e inizialmente porta tutto il carico arrivando prima alla condizione di rottura. Avendo l'adesivo una minore sezione resistente rispetto al giunto semplicemente incollato, si arriva a rottura ad un livello di carico inferiore.

Mediante l'analisi può essere investigata anche l'influenza dell'invecchiamento: come mostra Fig. 14, i giunti semplicemente incollati mostrano una riduzione della resistenza in seguito al trattamento di invecchiamento, mentre per i giunti weld-bonded la riduzione è molto minore, in alcuni casi nemmeno percepibile.

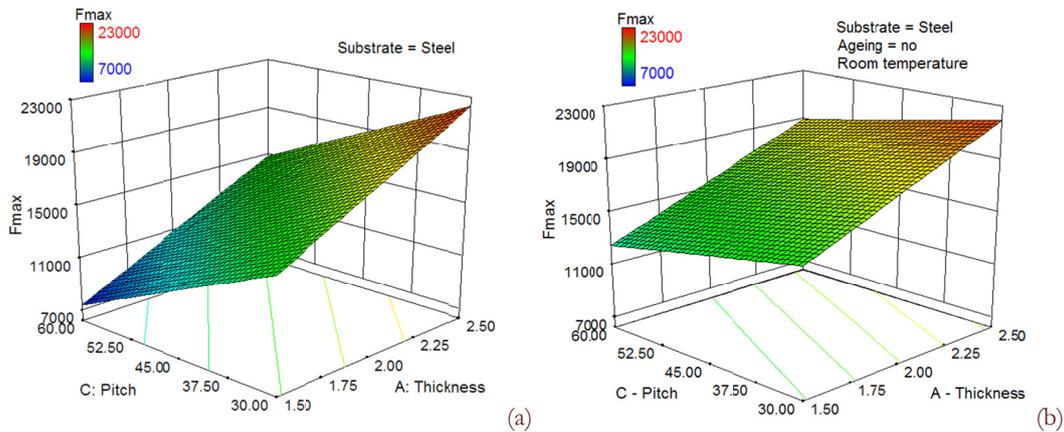


Figura 11: Confronto del carico massimo tra giunti saldati (a) e giunti ibridi (b) in acciaio a temperatura ambiente in funzione di spessore degli aderenti e del passo tra i punti di saldatura.
Comparison between the strength of welded (a) and hybrid (b) joints as a function of pitch and thickness (room temperature, steel plates).

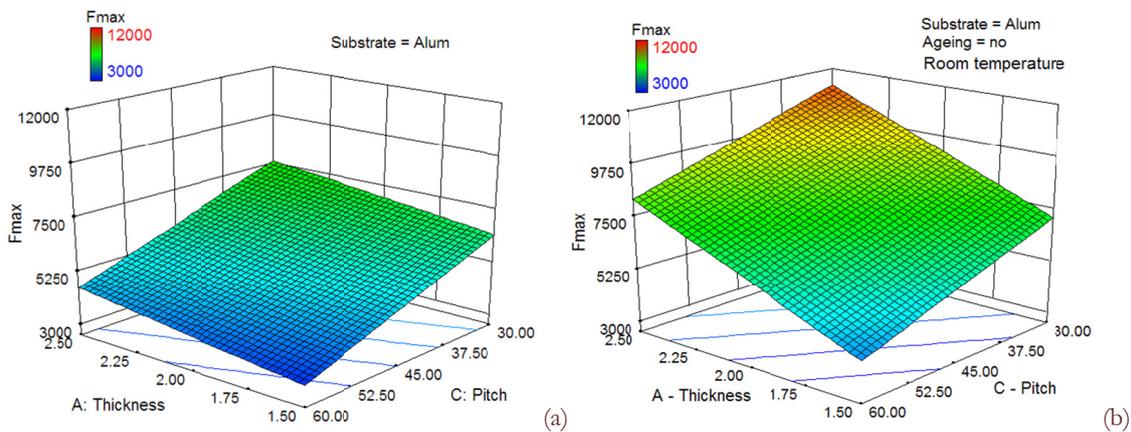


Figura 12: Confronto del carico massimo tra giunti saldati (a) e giunti ibridi (b) in alluminio a temperatura ambiente in funzione di spessore degli aderenti e del passo tra i punti di saldatura.
Comparison between the strength of welded (a) and hybrid (b) joints as a function of pitch and thickness (room temperature, aluminum plates).

Al contrario di quanto accade per il carico massimo, in cui in particolari condizioni, il giunto ibrido può essere più debole del giunto semplice, per la rigidità si ha sempre un aumento delle prestazioni. Si riporta in Fig. 15 un esempio per giunti in alluminio. Il giunto ibrido vede sempre un aumento di rigidità rispetto sia ai giunti incollati che a quelli ibridi, e quella che ne risulta è una superficie con una pendenza media tra quella dell'adesivo (più ripida) e della saldatura (piatta perché non influenzata dalla temperatura).

Venendo infine all'energia consumata per portare a rottura i provini, Figura 16 mostra come i giunti ibridi permettano un assorbimento di energia di maggiore rispetto ai giunti semplici alle temperature medio-basse, ovvero fintanto che la resistenza dell'adesivo è tale da garantire un meccanismo di cedimento del giunto ibrido per strappamento delle lamiere.

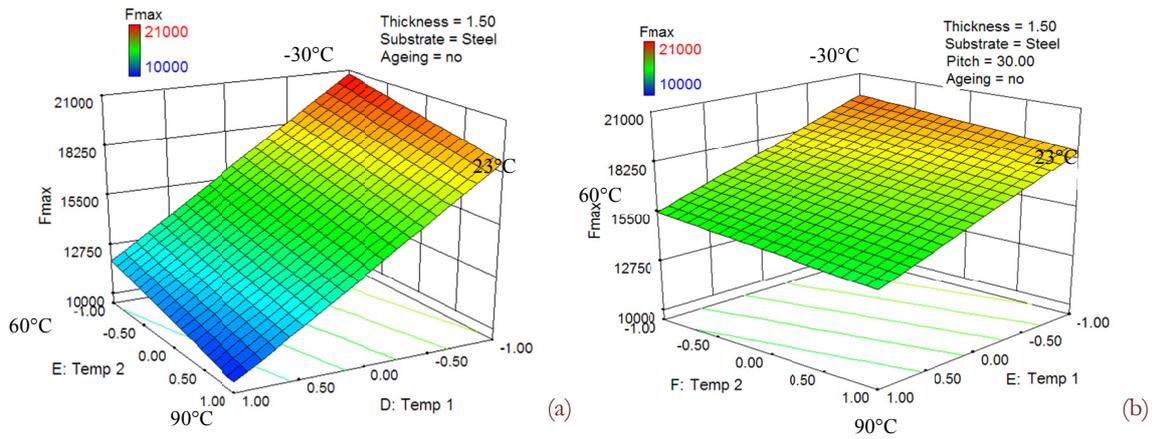


Figura 13: Confronto del carico massimo tra giunti in acciaio semplicemente incollati (a) e giunti ibridi (b) in funzione della temperatura di esercizio.
Comparison between the strength of bonded (a) and hybrid (b) joints as a function of temperature.

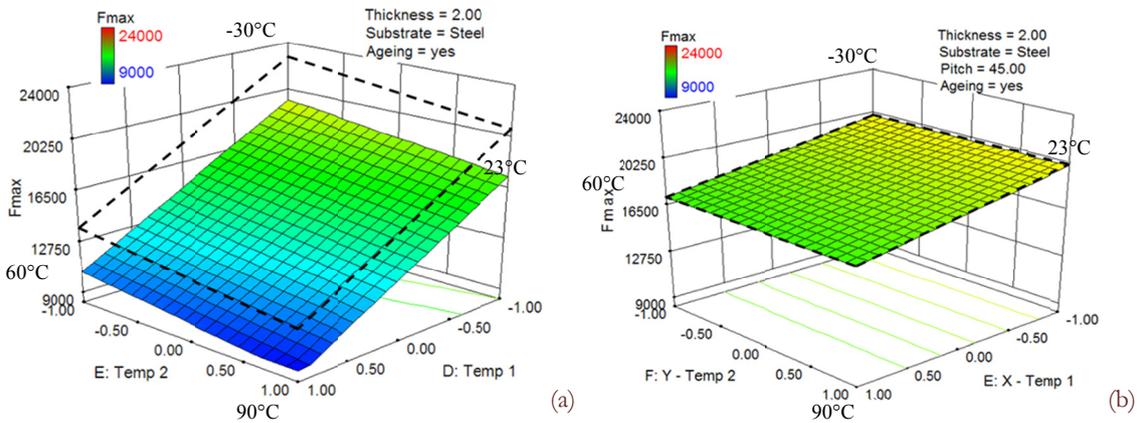


Figura 14: Effetto dell'invecchiamento su giunti incollati (a) e ibridi (b); le linee tratteggiate a giunti non invecchiati.
Comparison between the strength of bonded (a) and hybrid (b) joints as a function of pitch and thickness with (dashed line) or without ageing (surfaces).

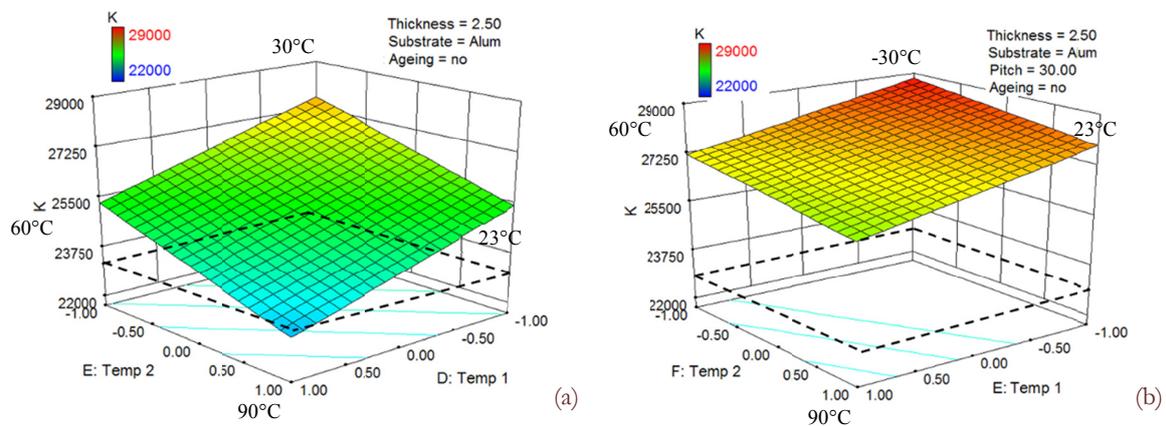


Figura 15: Confronto della rigidità di giunti semplicemente incollati (a) e giunti weld-bonded (b) in alluminio in funzione della temperatura. Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente saldati.
Comparison between the stiffness of bonded (a) and hybrid (b) joints as a function of temperature. Dashed lines refers to simple welded joints.

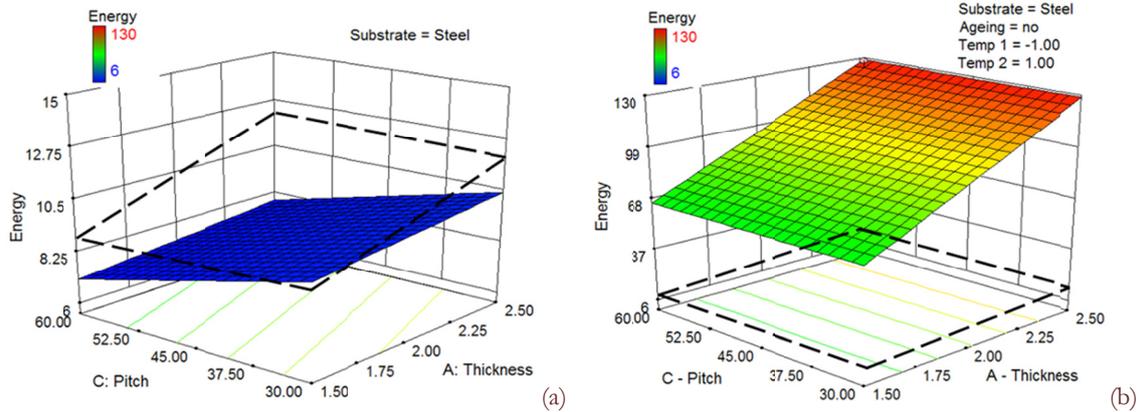


Figura 16: Confronto dell'energia assorbita da giunti semplicemente incollati (a) e giunti weld-bonded (b) in alluminio in funzione della temperatura. Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente saldati.
Comparison between the energy absorption of bonded (a) and hybrid (b) joints as a function of temperature. Dashed lines refers to simple welded joints.

ANALISI STATISTICA GIUNTI ETEROGENEI

Venendo quindi alla campagna sui giunti eterogenei, i valori medi delle grandezze misurate per le famiglie dei giunti testati sono mostrati in Fig. 17.

Per quel che riguarda la rigidezza, i giunti meccanici sono i più cedevoli. I giunti incollati si posizionano in una condizione intermedia, mentre i giunti ibridi sono quelli che, come nel caso di giunti omogenei, offrono la maggiore rigidezza. Un discorso un po' diverso vale per il carico massimo. I giunti rivettati e clinciati danno carichi massimi nettamente inferiori ai giunti incollati. Vista questa differenza, i giunti ibridi saranno caratterizzati principalmente dalla resistenza dell'adesivo. Addirittura si può intuire un piccolo calo della resistenza rispetto ai giunti semplicemente incollati, e questo è legato alla riduzione di sezione resistente dell'adesivo come mostrato in Fig. 18.

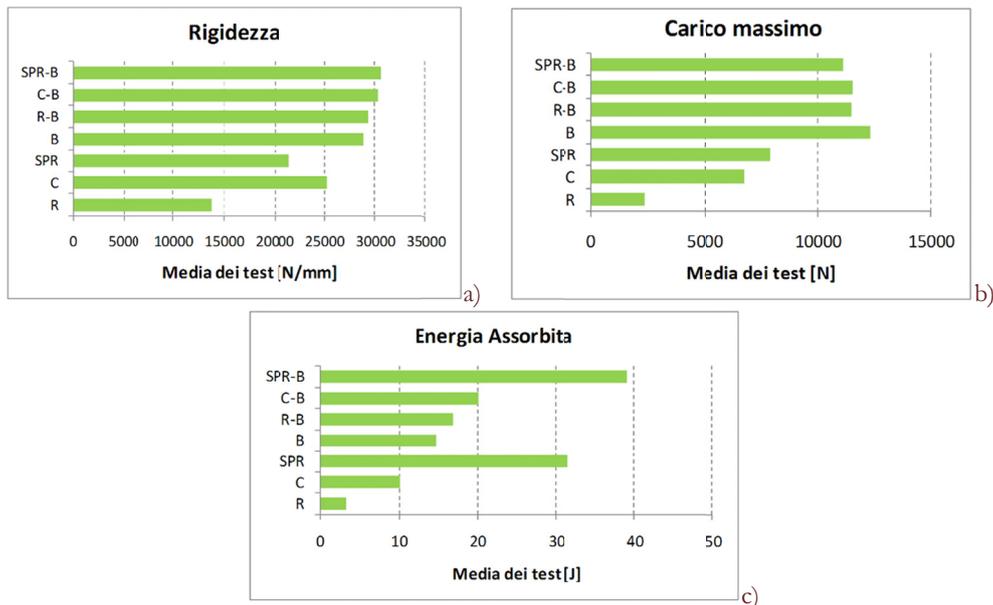


Figura 17: Valori medi di rigidezza (a), carico massimo (b) ed energia assorbita (c) per le tipologie di giunti eterogenei.
Average values of stiffness (a), strength (b) and Energy absorption (c) for the heterogeneous joints.

Questo discorso vale per i giunti eterogenei ma non per quelli omogenei in quanto, sebbene in entrambi i casi vi sia una riduzione di sezione resistente dell'adesivo, nei giunti omogenei questa è compensata dalla presenza del nocciolo di

saldatura rigido e resistente, mentre di caso di giunti ibridi eterogenei il punto di fissaggio meccanico non è altrettanto performante. Infine per quel che riguarda l'energia, nei giunti rivettati questa è legata essenzialmente alla deformazione del rivetto, nei giunti clinciati alla deformazione del punto clinciato e nei giunti SPR si ha la deformazione di una grossa quantità di materiale visto che il rivetto viene praticamente strappato dal lamierino, come mostrato in Fig. 18. Di conseguenza si ha via via un incremento di energia assorbita, la quale per i giunti SPR è poco più del triplo rispetto ai giunti clinciati. Per i giunti incollati l'assorbimento di energia non è tanto legato alla rottura dell'adesivo, quanto piuttosto alla deformazione plastica subita dal lamierino in alluminio, dovuta agli alti carichi raggiunti. Per quel che riguarda i giunti ibridi l'energia assorbita è abbastanza prossima alla somma dell'energia assorbita mostrata da adesivo più di volta in volta l'energia assorbita dalla giunzione meccanica che compone il giunto ibrido. Prendendo come esempio i giunti ibridi SPR, che possono essere considerati rappresentativi anche del comportamento dei giunti ibridi clinciati (mentre per quelli ibridi rivettati, il comportamento è praticamente quello dei giunti semplicemente incollati), si nota come la giunzione meccanica, indipendentemente dalla geometria, sia più debole della giunzione incollata (Fig. 19a), e di conseguenza la resistenza dei giunti ibridi è prossima a quella dei giunti solo incollati, con un calo che è tanto maggiore quanto è minore la resistenza dei giunto SPR a pari condizioni (Fig. 19b), e comunque molto meno evidente che nelle giunzioni SPR stesse.

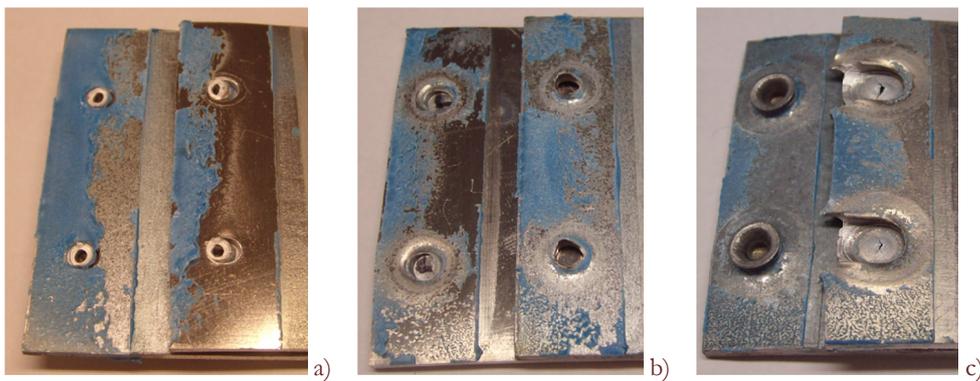


Figura 18: Superfici di frattura di giunti ibridi, rivettati (a), clinciati (b) e rivettati SPR (c).
Fracture surfaces of rivet- (a) clinch-(b) and SPR- (c) -bonded joints.

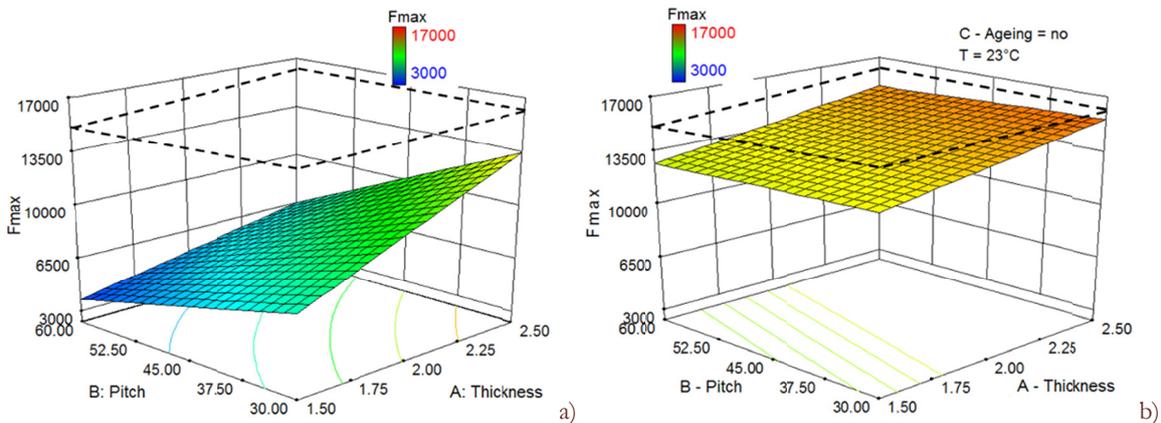


Figura 19: Confronto del carico massimo di giunti SPR (a) e ibridi-SPR (b) in funzione di passo e spessore.
Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente incollati.
Comparison between the strength of SPR (a) and SPR-bonded (b) joints as a function of pitch and thickness.
Dashed lines refers to simple bonded joints.

Dal punto di vista delle prestazioni in temperatura, si nota un minore degrado delle prestazioni ad alte temperature rispetto alle giunzioni incollate, come mostrato in Fig. 20.

Per quel che riguarda la rigidità dei giunti ibridi, nei casi in cui i giunti siano sottili e con passo elevato, la rigidità è praticamente la stessa del giunto incollato, mentre quando si incrementa lo spessore e si riduce il passo, la rigidità è maggiore dei giunti semplicemente incollati, proprio perché la aumenta il peso relativo della giunzione SPR (Fig. 21).

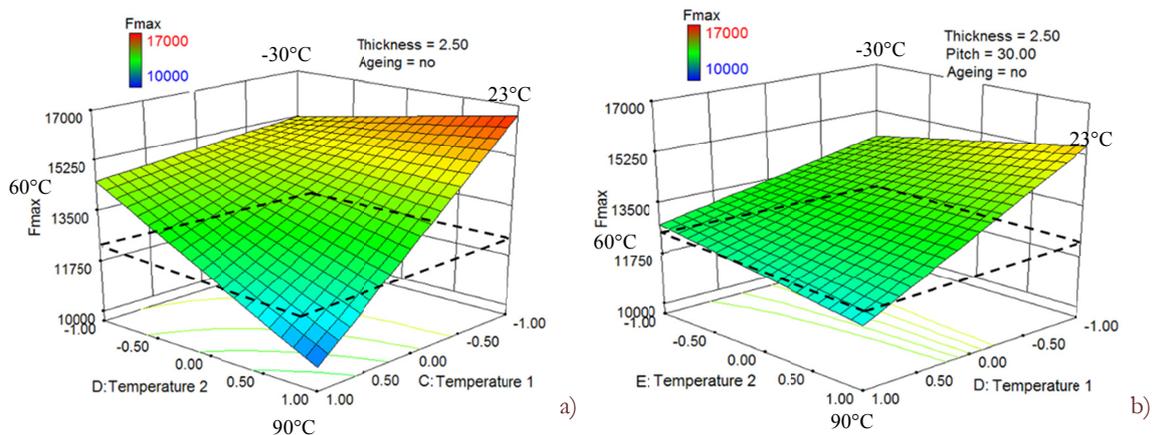


Figura 20: Confronto della rigidità di giunti incollati (a) e ibridi-SPR (b) in funzione della temperatura. Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente rivettati SPR. Comparison between the stiffness of bonded (a) and SPR-bonded (b) joints as a function of the temperature. Dashed lines refers to simple SPR joints.

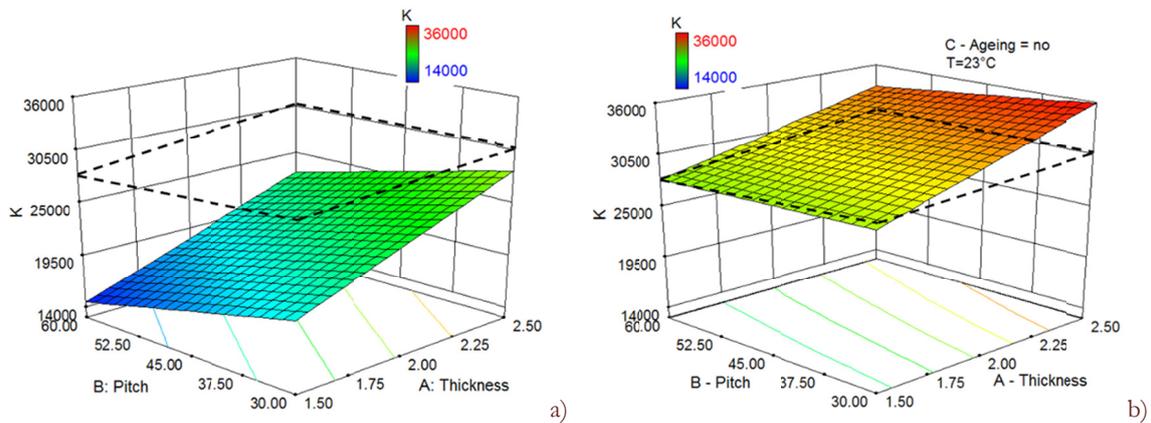


Figura 21: Confronto della rigidità di giunti SPR (a) e ibridi-SPR (b) in funzione di passo e spessore. Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente incollati. Comparison between the stiffness of SPR (a) and SPR-bonded (b) joints as a function of pitch and thickness. Dashed lines refers to simple bonded joints.

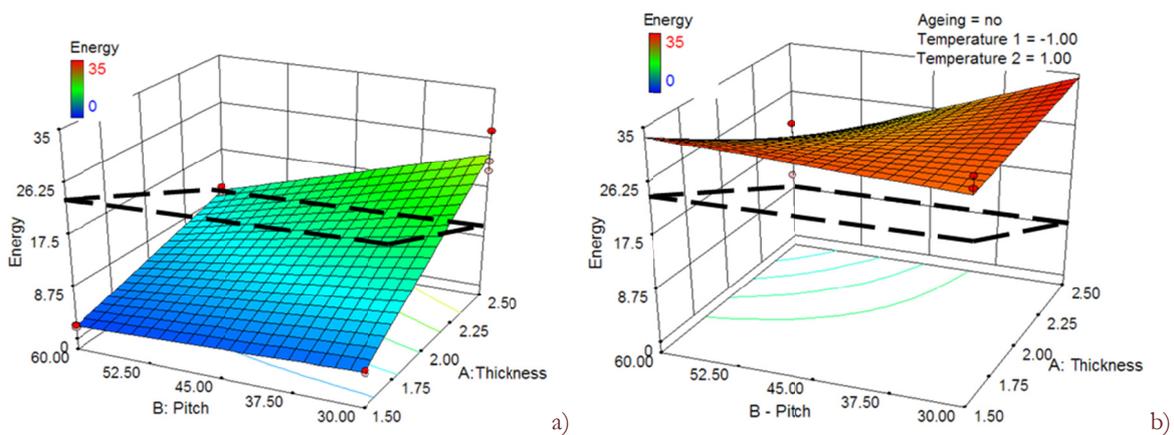


Figura 22: Confronto dell'energia assorbita fino alla rottura di giunti SPR (a) e ibridi-SPR (b) in funzione di passo e spessore. Le linee tratteggiate si riferiscono a giunti semplicemente incollati. Comparison between the Energy Absorption of SPR (a) and SPR-bonded (b) joints as a function of pitch and thickness. Dashed lines refers to simple bonded joints.



Infine si analizza l'assorbimento di energia in Fig. 22. Nel grafico di sinistra si nota come per le giunzioni incollate l'assorbimento di energia aumenti al ridursi dello spessore: questo è legato al fatto che nei giunti più sottili si è avuta una maggiore plasticizzazione degli aderenti. Al contrario per i giunti SPR l'energia aumenta all'aumentare dello spessore: infatti nel giunto SPR la rottura avviene per strappamento della lamiera, e maggiore è lo spessore della stessa, maggiore è l'energia necessaria per romperla. Nelle giunzioni ibride (figura di destra) si può notare come l'energia è molto prossima alla somma punto per punto dell'energia assorbita dal giunto incollato e quella assorbita dal giunto rivettato; questo è proprio spiegato dal fatto che nel giunto ibrido le due rotture avvengono come due fenomeni distinti, prima la rottura dell'adesivo e poi la rottura della parte rivettata.

CONCLUSIONI

Attraverso la campagna sperimentale è stato possibile valutare l'efficienza meccaniche di giunzioni ibride in confronto a giunzioni tradizionali per differenti combinazioni geometriche e ambientali. Appare come nel caso di giunti in cui coesistono saldature e incollaggio, le prestazioni siano superiori a quelle delle giunzioni prese singolarmente. Questo miglioramento delle prestazioni è stato notato per tutte le tre grandezze valutate, ed è in particolare emerso come i giunti ibridi permettano di ridurre in modo significativo il degrado delle prestazioni dei giunti incollati in seguito ad aumenti di temperatura. Discorso leggermente differente per quel che riguarda giunti in cui coesistono adesivo e fissaggi meccanici quali clinchiatura e rivettatura. Qui la differenza di prestazioni tra incollaggio e fissaggio meccanico fa sì che nei giunti ibridi l'effetto dell'incollaggio sia la parte preponderante per quel che riguarda le prestazioni. Addirittura la riduzione dell'area di incollaggio provocata dalla presenza del fissaggio meccanico fa sì che le prestazioni dei giunti ibridi siano leggermente inferiori rispetto a quelle di giunzioni semplicemente incollate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Chang, Y. Shi, S. Dong, J. of Materials Processing Technology, 87 (1999) 230.
- [2] S.M. Darwish, Int. Journal of Adhesion & Adhesives 23 (2003) 169.
- [3] I.O. Santos, W. Zhang, V.M. Gonçalves, N. Bay, P.A.F. Martins, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 44 (2004) 1431.
- [4] B. Chang, Y. Shi, S. Dong, J. of Materials Processing Technology, 100 (2000) 171.
- [5] A. Melander, M. Larsson, H. Stensiö, A. Gustavsson, J. Linder, Int. J. of Adhesion & Adhesives, 20 (2000) 415.
- [6] B. Chang, Y. Shi, L. Lu, J. of Materials Processing Technology, 108 (2001) 307.
- [7] G. Kelly, Compos. Struct, 2005, 69 (2005) 35.
- [8] A. Al-Samhann, S.M. Darwish, Int. J. Adhes. Adhes, 23 (2003) 23.
- [9] Al-Samhan, S.M. Darwish, J. Mater. Process. Technol, 142 (2003) 587.
- [10] L. Del Gamba, Studio teorico e sperimentale del comportamento di unioni ottenute per clinchiatura con o senza incollaggio, Graduation Thesis, University of Pisa, Pisa, Italy (2005).
- [11] R.W. Messler, Industrial Robot: An International Journal, 29(2) (2002) 138.
- [12] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John Wiley & sons, inc. New York (2001).
- [13] T. Sadowski, M.Knec', P.Golewski, Int. J. of Adhesion & Adhesives, 30 (2010) 338.
- [14] A. Pirondi, F. Moroni, J. Adhes. Sci. Technol., 23 (2009) 1547.