





POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Saldature tra leghe di alluminio ed acciaio per applicazioni nel settore automobilistico

Relatore

Prof. Paolo Matteis

Studente

Angelo D'Aprile

Tutor aziendale

Cesare Puro

Anno accademico 2017/18

INDICE

1-INTRODUZIONE	5
1.1 Cenni sulla saldatura	7
1.2 Cenni sulla corrosione	9
2- MATERIALI ESAMINATI	11
2.1 Acciaio DP (dual phase)	11
2.2 Alluminio	13
2.3 Interlayer Feran	16
2.4 Interlayer GT-CR 40	17
2.5 Giunti di transizione	17
<u>3- METODI DI SALDATURA A PUNTI</u>	22
3.1 Saldatura a punti con interlayer	24
3.2 Saldatura a punti tramite cover plate	25
4-METODI DI SALDATURA AD ARCO ELETTRICO	27
4.1 Processo di saldatura	29
4.2 Tecnologia CMT	31
5-METODI SPERIMENTALI	33
5.1 Prove di trazione	33
5.2 Prove di microdurezza	36
5.3 Analisi micrografiche	37
6-SALDATURA A PUNTI : RISULTATI	41
6.1 Campioni omologhi di DP600	41

6.2 Campioni omologhi di Al 5182	43
6.3 Saldatura RSW tra DP600-Al5182 con Feran	44
6.4 Saldatura RSW tra DP600-Al5182 con GT-CR40	53
6.5 Saldatura RSW tra DP600-Al5182 con cover plate	60
6.6 Saldatura RSW tra DP1000-Al6016 con cover plate	69
6.7 Saldatura RSW tra DP1000-Al6016 con Feran	73
6.8 Sintesi dei risultati ottenuti	76
7-SALDATURA AD ARCO : RISULTATI	77
7.1 Utilizzo di giunto ibrido saldato per esplosione	80
7.2 Utilizzo di giunto ibrido saldato per colaminazione	91
7.3 Sintesi dei risultati ottenuti	99
8- CONCLUSIONI	101
9- BIBLIOGRAFIA	103

1 INTRODUZIONE

L'esigenza di abbassare la quantità di CO₂ prodotta, l'aumento dei costi del carburante e la necessità di creare auto con caratteristiche dinamiche migliori hanno portato le varie case automobilistiche ad evolvere le varie metodologie di produzione degli autoveicoli.

Dai primi anni del XX secolo l'uomo ha dedicato molta attenzione allo sviluppo di un mezzo che potesse permettergli di spostarsi con notevole facilità e rapidità; i primi esemplari di veicoli prodotti presentavano una struttura in acciaio molto robusta, semplice e di facile realizzazione. Con il passare degli anni, l'adozione di propulsori sempre più potenti e quindi l'aumento delle prestazioni ha determinato un evoluzione della struttura degli autoveicoli con telai sempre più resistenti ed evoluti [14].

È importante sottolineare che oltre al campo automotive l'impiego dell'alluminio negli ultimi anni ha trovato forte impiego nel campo navale e aeronautico .

Un aspetto importante da non sottovalutare è proprio il peso dei veicoli, già dai primi anni 40 ingegneri come "Colin Chapman" creatore della Lotus avevano scoperto che creare auto con strutture più leggere comportava vantaggi non indifferenti sul comportamento stradale delle autovetture, dallo stesso deriva lo studio della leggerezza delle monoposto da competizione con l'applicazione di telai senza tubi realizzati con elementi in lamiera di alluminio piegata e formata rivettati, definiti monoscocca.

Negli ultimi anni, tra le case costruttrici, in un periodo in cui la competitività è l'aspetto più importante si è diffusa la filosofia di costruzione con il motto "il materiale giusto al posto giusto nella quantità giusta".

Inizia pian piano l'applicazione dell'alluminio e le sue leghe per la costruzione degli autoveicoli in sostituzione delle più pesanti parti in acciaio e ghisa; l'impiego di questo materiale comprende alcune parti del telaio fino ad arrivare agli ultimi propulsori prodotti interamente in alluminio, tra i primi impieghi abbiamo l'Honda che con motore della prelude costruito in lega d'alluminio l'ADC12 (9.6-12% in peso di silicio, 1.5-3.5% in peso di rame) ebbe i primi risultati positivi in termini di prestazioni e raffreddamento.

In figura 1.1 è possibile vedere l'autotelaio di una audi A8, è interessante notare come l'impiego dell'alluminio abbia raggiunto percentuali importanti per la costruzione della carrozzeria arrivando ad un impiego fino al 58%, la rigidità torsionale e la resistenza a trazione vengono incrementate mentre il peso decresce considerevolmente.



Figura 1.1: autotelaio di una recente Audi A8

Il trend è quello di costruire auto con un impiego sempre maggiore di alluminio e altre leghe leggere, ciò comporta la presenza di diversi materiali costituenti il veicolo che dovranno essere giuntati tra loro, i metodi più utilizzati sono la rivettatura autoperforante, la graffatura e la rullatura.

Le saldature tra alluminio ed acciaio, a causa delle differenti caratteristiche tra i 2 materiali non sono effettuabili con metodi convenzionali, questo ha portato alla ricerca di metodologie diverse per la saldatura dei 2 diversi materiali.

Nel corso di questa tesi verrà analizzata la saldatura tra acciaio ed alluminio mediante l'uso di giunti di transizione per quanto riguarda le saldature ad arco, di lamine come feran o GT CR40 o di tecniche di saldatura come il cover plate per quanto riguarda le saldature a punti.

I giunti di transizione sono saldati mediante processi di esplosione o laminazione , vengono forniti in blocchi già saldati e vengono opportunamente tagliati in sede. Le lamine di feran e GT CR40 si ottengono mediante processi di laminazione e vengono tagliate in dimensioni opportune per poter esser saldate a punti.

Tramite una serie di prove sperimentali verrà verificata la resistenza e la fattibilità di queste saldature ibride , le prove saranno eseguite nei laboratori GML del Centro Ricerche Fiat.

1.1 CENNI SULLA SALDATURA

La saldatura è un processo nel quale una parte di componente viene fuso e risolidificato mediante un apporto di calore localizzato, e talvolta anche di ulteriore metallo. Questo procedimento permette di unire materiali tra loro anche con caratteristiche diverse, il materiale d'apporto alla saldatura può essere anche differente da quello da saldare purchè compatibile .



Figura 1.1.1: schematizzazione di un processo di saldatura

In figura 1.1.1 è illustrato il processo di saldatura tra 2 lamiere, la fornitura di calore alla zona interessata provoca un aumento elevato della temperatura che porta il materiale a modificare la sua microstruttura, il riscaldamento riguarderà non solo la zona d'interesse ma anche la zona circostante il cordone di saldatura; questa zona si chiama : ZTA (zona termicamente alterata). La ZTA non è sottoposta a fusione del materiale ma risente comunque del calore generato durante la saldatura, questo provoca modifiche non trascurabili alla struttura cristallina del materiale.

Una volta risolidificato, il materiale non ha le caratteristiche meccaniche che aveva inizialmente, l'assorbimento di impurità presenti, la presenza di idrogeno e il raffreddamento non controllato fa si che nella struttura si abbiano modifiche permanenti della microstruttura del materiale. Per quanto riguarda l'acciaio si ha la formazione di austenite che si presenta in diversi gradi al variare della distanza dal punto di saldatura. La ZTA è composta dalle seguenti regioni:

- 1- regione austenitizzata a temperatura elevata, in cui si è verificato un ingrossamento del grano austenitico; è la più critica, si ha la presenza di martensite che rende il materiale duro e fragile;
- regione austenitizzata a temperatura minore, in cui la dimensione dei nuovi grani austenitici è inferiore;
- 3- regione parzialmente austenitizzata;
- 4- regione non austenitizzata, bensì sottoposta ad un ciclo termico paragonabile ad una ricottura subcritica o ad un rinvenimento;
- 5- regione inalterata.

La saldabilità di un materiale è allora un indice di quanto la struttura dopo la sua saldatura sia immune a rotture e stress residui, è chiaro che nel caso dell'acciaio, affinchè sia saldabile deve avere un basso contenuto di carbonio. Per le nostre prove, l'acciaio usato sarà un DP (dual phase) di tipo DP600 e DP1000 che garantisce una buona formabilità, necessaria per la modellazione delle lamiere impiegate e saldabilità, gli spessori delle lamiere saranno di 1,5 mm.

Per l'alluminio verranno impiegate leghe 5000 e leghe 6000, dette Anticorodal, che garantiscono una buona saldabilità e formabilità delle lamiere, gli spessori sono leggermente diversi, 1,6mm per l'alluminio 6016 e 2,5mm per il 5182.

Per quanto riguarda l'orientamento delle lamiere da saldare si possono avere 6 configurazioni possibili . In figura 1.1.2 è possibile vedere le varie disposizioni delle lamiere da saldare , per le nostre prove di saldatura ad arco, verrà adottata la soluzione (a) con saldatura a testa delle lamiere. La figura (f) illustra invece la disposizione delle lamiere per la saldatura a punti [13].



Figura 1.1.2: orientamento delle lamiere durante la saldatura

I lembi di saldatura preparati secondo un processo di cianfrinatura possono assumere diverse configurazioni , in figura 1.1.2 sono illustrate le varie soluzioni di saldatura possibili, per le saldature ad arco delle nostre prove si usano lembi retti chiusi (a).

1.2 - CENNI SULLA CORROSIONE

La corrosione è un processo elettrochimico in cui i materiali reagiscono per formare ossidi e sali, si ha un flusso di elettroni e quindi di corrente elettrica che va dall'anodo al catodo. Il flusso è originato da una differenza di potenziale dovuta ai diversi potenziali elettrochimici dei materiali; per permettere l'instaurazione del fenomeno corrosivo è necessaria la presenza di un elettrolita che permetta il moto dei cationi da un materiale all'altro, tra queste la più comune è l'acqua . È importante sottolineare che per fa si che la reazione avvenga è necessaria la presenza dell'ossigeno che prende parte nella reazione chimica .

Dei 2 materiali, quello con potenziale elettrochimico minore è IL meno nobile, si origina un flusso di elettroni che parte dal materiale meno nobile e va verso il materiale più nobile, oltre a questo flusso un'altra parte di cationi vengono ceduti all'elettrolita dove avviene una reazione che genera il catione H+.

Si genera quindi un erosione del materiale meno nobile che funge da anodo cedendo cationi mentre l'altro materiale che è il catodo è protetto ed è coinvolto nella reazione di riduzione con la soluzione [5]. L'insieme degli elementi elencati rappresenta una comune cella elettrolitica e rappresenta una comune pila, è bene ricordare che il flusso di elettroni va dal materiale a potenziale minore a quello a potenziale maggiore, la corrente elettrica ha verso opposto; si ha la nascita di un vero e proprio circuito elettrico, in figura 1.2.1 è rappresentata una cella elettrolitica con cloruro di sodio disciolto in acqua come elettrolita, il sale accelera la reazione chimica ,in soluzione ci sono ulteriori cationi ed i potenziali elettrochimici vengono modificati.



Figura 1.2.1 : rappresentazione di una cella elettrolitica

Gli acciai inossidabili resistono alla corrosione grazie alla presenza di cromo al 15% circa, il cromo crea uno strato superficiale che protegge il materiale e si passiva al posto del materiale in misura molto minore.

Altri tipi di acciai possono essere protetti dalla corrosione galvanica mediante una zincatura, un processo di rivestimento di zinco applicato su un manufatto al fine di evitare la corrosione. Lo zinco è meno nobile rispetto all'acciaio, quindi in presenza di ambienti corrosivi tende a corrodersi comportandosi da anodo proteggendo in questo modo l'acciaio.

Per quanto riguarda gli acciai (nel nostro caso Dual Phase) in presenza di ossigeno ed acqua si ha una reazione anodica di ossidazione del ferro con produzione di elettroni ed una reazione catodica di riduzione dell'ossigeno con produzione di idrossidi. La corrosione provoca un indebolimento delle caratteristiche meccaniche del materiale arrivando nei casi più gravi alla distruzione completa del materiale. [1]

L'alluminio ha un potenziale di dissoluzione più basso del ferro ma immergendo una lega 5000 o 6000 in una soluzione con ioni di cloruro la lega rischia di perdere il suo stato passivo e di essere soggetto a corrosione per pitting. La corrosione per pitting provoca la formazione di piccole cavità, la corrosione in genere penetra nelle cavità e raggiunge l'interno.

Per le nostre prove di corrosione tutti i campioni sono stati immersi in acqua salata per 21 settimane con cloruro di sodio al 3,5% in peso, dopo questo tempo i campioni vengono prelevati e per prima cosa lavati con acqua deionizzata , poi si effettua un lavaggio in alcool etilico al 100% in modo da bloccare la reazione di corrosione disidratando il campione al 100%.

È impostante mantenere la concentrazione della soluzione costante durante tutta la durata della prova, il fenomeno dell'evaporazione dell'acqua provoca un innalzamento della concentrazione salina, per questo motivo bisognerà controllare periodicamente il livello della soluzione ed eventualmente aggiungere acqua.

Scopo di queste prove è determinare le caratteristiche meccaniche dei provini saldati immersi in ambiente corrosivo, verificare se c'è un decadimento delle proprietà meccaniche confrontando i risultati con dei valori di riferimento.

Nei paragrafi successivi verranno analizzati i vari provini saldati sottoposti a prova di corrosione.

2. MATERIALI ESAMINATI

4.1 Acciaio DP (Dual Phase)

La microstruttura degli acciai Dual Phase (DP) è costituita da una matrice di ferrite nella quale si trova uniformemente dispersa la martensite, una fase metastabile dell'acciaio che si origina sottoponendo il materiale ad una tempra. Un raffreddamento brusco del materiale non permette agli atomi di carbonio di tornare nelle posizioni ideali del reticolo cristallino, per questo motivo si crea una struttura tensionata data dalla presenza di atomi di carbonio che distorcono il reticolo il reticolo cristallino. La presenza della martensite negli acciai dual phase è variabile tra il 20 e il 70%, la martensite presente nel materiale innalza la resistenza meccanica con un carico di snervamento e di rottura più altro ma peggiora l'allungamento.

La struttura finale degli acciai DP è composta da 3 elementi:

- 1. Martensite;
- 2. Ferrite con alta densità di dislocazioni (vicina alla martensite);
- 3. Ferrite con poche dislocazioni (lontano dalla martensite).

La ferrite conferisce all'acciaio un'eccellente duttilità e quando viene lavorato, la deformazione si concentra nella ferrite, causando un elevato incrudimento per deformazione. Tale meccanismo si combina alle ottime caratteristiche di allungamento per conferire a questi acciai un basso valore del rapporto Re/Rm e, quindi, un carico di rottura più alto rispetto ad acciai convenzionali caratterizzati da analogo limite di snervamento. Inoltre si può ottenere un incremento della resistenza anche in seguito a trattamenti termici come la verniciatura. Nel corso delle nostre prove è stato usato acciaio DP600 e DP1000, la tabella 2.1.1 riporta le caratteristiche meccaniche dei 2 materiali.

			CARATT	ERISTICHE MECCANICHE					
	Qualità	Design.	D	Design.	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A80) (%) in	NIO-UE
	EN10336:2007	commerciale	SEW097: 2000	rivestimento	min-max	min	t≤0.7	t>0.7	min
			Lamina	ato a freddo / Rivestito					
	HCT450X	DP450	H260X	+Z,ZF,ZE	260-340	450	25	27	0.16
			H270X	+Z,ZF,ZE	270-350	500	23	25	0.16
	HCT500X	DP500	H300X	+Z,ZF,ZE	300-380	500	21	23	0.15
k e			H310X	+Z,ZF,ZE	310-390	600	19	21	0.15
	НСТ600Х	DP600	H340X	+Z.ZF.ZE	340-420	600	18	20	0.14
			H380X	+Z,ZF,ZE	380-460	600	16	18	0.12
	НСТ780Х	DP800		+Z,ZF,ZE	450-560	780	12	14	-
	НСТ980Х	DP1000		+Z,ZF,ZE	600-750	980	8	10	-

Tabella 2.1.1 Caratteristiche meccaniche acciaio DP

Il DP 1000 presenta caratteristiche di resistenza maggiori, dovuto soprattutto alla più alta percentuale di martensite contenuta, nelle nostre prove verrà impiegato un acciaio DP600 ed un Acciaio DP1000, entrambi i materiali hanno caratteristiche di resistenza molto maggiori dell'alluminio.



Figura 2.1.2: microstruttura tipica di un acciaio DP

In figura 2.1.2 si nota la presenza di martensite dispersa tra la matrice ferritica , è importante sottolineare che per conferire buone doti di duttilità e tenacità, occorre ottenere una microstruttura a grana molto fine e con una distribuzione il più uniforme possibile delle due fasi. Le tabelle 2.1.3 e 2.1.4 riportano un esempio di composizione chimica nominale dei 2 materiali dichiarata da un noto fornitore.

С	Si	Mn	Р	S	Ν	Cr	Ni
0,081%	0,199%	1,690%	0,016%	<0,001%	0,012%	0,455%	0,047%
Cu	Мо	Al	Nb	V	TI	В	ACCIAIO
0,005%	0,001%	0,037%	0,003%	0,020%	0,002%	<0,001%	DP600

Tabella 2.1.3: esempio di composizione chimica del DP600 di fornitura Sidermed

Composizione chimica										
Materiale	С	Si	Mn	Р	S	Al	Cu	Ti+Nb	Cr+Mo	В
	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max		Max
Acciaio DP 1000	%	%	%	%	%	%	%	%	Max %	%
	0.23	1	2.9	0.8	0.15	0.1-2	0.2	0.15	1.4	0.005

Tabella 2.1.4 : esempio di composizione chimica del DP1000 di fornitura Sidermed

In ottica di riduzione dei pesi dei veicoli e della richiesta di creare lamiere con forme sempre meno regolari i DP si prestano bene all'utilizzo in campo automotive. La bassa percentuale di carbonio permette un ottima saldabilità di questi acciai, vengono saldati con tecnologia TIG, MAG, possono essere saldati a punti, da studi recenti è risultato che la migliore tecnica di saldatura per questi acciai è quella con fascio elettronico.

2.2 Alluminio

L'alluminio è un metallo leggero ma resistente, di largo impiego nel campo automotive, il suo peso specifico è tra i più bassi dei materiali strutturali e la sua struttura cristallina cubica a facce centrate ne dona una buona duttilità. Di seguito in tabella 4.2.1 sono presenti le principali caratteristiche meccaniche e confrontate con quelle dell'acciaio e del magnesio.

	σ 10 ⁶ S/m	K W/m/K	Cp kJ/kg/K	E GPa	Р g/cm³
Fe	7	80	0,49	208	7,87
Al	35	205	0,91	71,0	2,70
Mg	22	156	1,05	47,9	1,74

Tabella 2.2.1: Proprietà principali dell'alluminio

Dalla tabella si nota che la massa volumica è quasi 3 volte inferiore a quella dell'acciaio, ciò permette un risparmio di peso fino al 50% per la costruzione di strutture metalliche rispetto all'acciaio.

Questo metallo è molto avido di ossigeno e all'aria si ricopre immediatamente di un leggero strato di ossido che lo protegge da un'ulteriore più profonda ossidazione, è uno strato molto duro con temperatura di fusione di 2000°C detto sesquiossido (Al2 03).

I problemi di saldatura dell'alluminio sono dovuti proprio a questo stato presente, l'alluminio fonde a 660 °C ma lo stato di ossido presente tende a rimanere incluso nel bagno danneggiando la saldatura; quando si cerca di fonderlo, col cannello, sì fonde rapidamente tutta la zona circostante.

È dotato di elevata conduttività termica ed elettrica, si impiega l'alluminio per la produzione di scambiatori di calore, per testate di motori termici ed anche per la produzione di cavi elettrici.

L'alluminio puro a causa delle sue scarse caratteristiche meccaniche è destinato a pochi settori ma basta legarlo ad alcuni componenti come rame, il magnesio, il silicio, il manganese o in alcuni casi zinco e nichel per ottenere ottimi risultati in termini di resistenza meccanica e deformabilità.

Possiamo sottoporre l'alluminio anche a trattamenti termici per migliorare le sue caratteristiche meccaniche. Il trattamento si effettua in due tempi, distinti in tempra di solubilizzazione ed invecchiamento.

La tempra di solubilizzazione consiste in un riscaldamento a temperatura fra 490 e 540 °C (per un periodo di tempo conveniente in modo che si abbia la solubilizzazione dei leganti nell' alluminio) seguito da un raffreddamento in acqua. Successivamente si ha un invecchiamento naturale a temperatura ambiente o comunque dell'ordine dei 150 °C durante il quale ha luogo la precipitazione, dalla soluzione solida, di particolari composti degli elementi leganti [12]. La precipitazione dei leganti ostacola il movimento delle dislocazioni, per ottenere buoni risultati è necessario che il materiale legato sia disciolto in maniera omogena nell'alluminio. In base alle caratteristiche richieste si può scegliere il tipo di invecchiamento opportuno e in alcuni casi si attua un invecchiamento a due tempi. In tabella 2.2.2 sono elencate le varie leghe di alluminio, le 5000 e le 6000 sono impiegate soprattutto nel campo automobilistico e testate nelle prove di saldatura.

	Principali elementi di lega	Rafforzabili per	R _m (MPa)	Saldabili	Altre proprietà					
1xxx	-	incrudimento	70-180	Si	Formabilità, resistenza a corrosione, conduttività elettrica					
2xxx	Cu	tratt. termico	190- <mark>420</mark>	No (*)						
3xxx	Mn	incrudimento	110-280	Si	Formabilità, res. a corrosione					
4xxx	Si	tratt. term. (*)	170-380	Si	Formabilità					
5xxx	Mg	incrudimento	130-350	Si	Res. a corrosione, tenacità					
6xxx	Mg-Si	tratt. termico	130- <mark>400</mark>	Si	Formabilità, res. a corrosione					
7xxx	Zn-Mg-(Cu)	tratt. Termico	220- <mark>600</mark>	No						
8xxx	altro	(var	(vari gruppi di leghe tra loro diversi; es.: leghe Al-Li)							

Tabella 2.2.2 Principali leghe di alluminio in commercio

Lo standard ASTM, designa le leghe di alluminio in 2 categorie, le leghe per lavorazioni a getti e le leghe per lavorazione plastica . Le leghe per lavorazioni plastiche sono classificate con un numero a quattro cifre (la prima di queste cifre indica la famiglia di appartenenza, la seconda indica eventuali varianti nella composizione di base, la terza e la quarta contraddistinguono la composizione di leghe originali) seguito da un trattino, una lettera che ne identifica il tipo di trattamento termico e un numero composto fino a quattro cifre che ne identifica la specifica tempra e invecchiamento [4].

Per le nostre prove verranno utilizzate lamiere in alluminio serie 5182 e 6016, entrambe legate con magnesio, la 6016 contiene silicio con percentuali fino all'1,5%, ciò garantisce migliori proprietà meccaniche e abbassa la temperatura di fusione del materiale da 660 °C a 577 °C.

Lega	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Cr	Ti	Ni	Pb	V
5182	0.20	0.35	0.2-0.50	4-5	0.15	0.25	0.10	0.10	-	-	-
6016	0.5- 1.5	<0.5	<0.25	0.2- 0.8	<0.25	<0.20	<0.10	<0.15			

In tabella 2.2.3 è riportata la composizione chimica nominale delle 2 leghe.

Tabella 2.2.3: limiti composizionali delle leghe 5182 e 6016

Riguardo le caratteristiche meccaniche le 2 leghe hanno valori leggermente differenti, la 6016 ha inoltre subito un trattamento termico T4 con tempra di solubilizzazione e invecchiamento naturale. In tabella 2.2.4 sono riportate le caratteristiche meccaniche delle 2 leghe riportate sui cataloghi di un noto fornitore.

Lega	Rp ₀₂ [MPa]	Rm [MPa]	A _{80%}	E [GPa]	НВ
5182	130	275	26	69.6	74
6016	114	219	25	69	80

Tabella 2.2.4 : Principali caratteristiche meccaniche leghe 5182 e 6016 del fornitore Constellium.

2.3 INTERLAYER FERAN

Il feran è un colaminato con le 2 facce esterne in alluminio puro e acciaio a basso contenuto di carbonio al centro, la parte superiore di alluminio ha spessore di 0,06 mm, la parte di alluminio inferiore ha spessore 0,10mm, lo strato di acciaio misura 1,34 mm [3]. Viene fornito in grandi fogli e successivamente tagliato in quadratini di 30mm x 30mm . Per poterlo utilizzare per le prove di saldatura si lucida la superficie superiore fino a quando la sottile porzione di alluminio viene eliminata ,dopo questa operazione la faccia superiore sarà costituita unicamente d'acciaio. Alla fine della lucidatura si avrà una lamina di 1,4mm di spessore totale.



Figura 2.3.1 : saldatura a punti con interlayer Feran

In figura 2.3.1 è schematizzata la disposizione delle lamiere per la saldatura a punti mediante l'utilizzo di Feran.

2.4 INTERLAYER GT CR40

Il GT-CR40 è un colaminato con il 40% di spessore in alluminio e il restante in acciaio. Viene, come nel caso del feran, fornito in fogli grandi e poi tagliato in lamine di 30mm x 30mm. Il procedimento di saldatura è lo stesso adottato per il feran, viene interposta la lamina di GT-CR40 tra i due campioni e viene saldato tutto assieme. In figura 2.4.3 è schematizzata la disposizione delle lamiere con l'interlayer al centro.



Figura 2.4.1 : saldatura a punti con interlayer GT-CR40

Le tecnica di saldatura è simile per i 2 tipi di interlayer, il GT CR 40 si differenzia dal feran per il quantitativo di alluminio che è decisamente maggiore, nei prossimi paragrafi verranno confrontati i risultati di saldatura ottenuti con i 2 diversi tipi di interlayer.

2.5 GIUNTI DI TRANSIZIONE

I giunti di transizione permettono si saldare ad arco lamiere di acciaio con lamiere di alluminio, presentano 2 tipi di saldatura differenti, abbiamo saldatura per esplosione oppure per colaminazione. Sono entrambe saldature allo stato solido, in questo caso i legami interatomici si possono realizzare portando a contatto gli atomi dei 2 materiali, è richiesta l'assenza di contaminanti sulle superfici, sulle stesse si formeranno legami migliori che daranno luogo a soluzioni solide di sostituzione. La saldatura può essere prodotta senza il bisogno della fusione dei materiali. Infatti con l'acronimo di SSW (Solid-State Welding) si intendono tutti quei processi che non involvono nella fusione dei materiali, ma la giunzione è ottenuta dalla deformazione plastica dovuta dall'applicazione di pressione ad una temperatura inferiore a quella di fusione del metallo base e senza l'introduzione di alcun metallo d'apporto che fonde.

2.5.1 Giunti saldati per esplosione

Questo metodo sfrutta l'impatto ad alta energia di uno dei due pezzi accelerato tramite esplosione. In figura 2.5.1 è mostrato il processo di saldatura per esplosione, una volta puliti i layer dei 2 materiali e decapati tramite acido adatto vengono disposti nella configurazione come in figura. Una lamiera rimane fissa e poggiata sul fondo mentre l'altra mobile forma un angolo di collisione β che arriva fino a 20°, oltre alla lamiera mobile verrà disposto uno strato di interlayer che nel nostro caso è in titanio [11]. I cristalli della lamiera di alluminio impatteranno su quella d'acciaio accelerati dall'elevata energia di detonazione. L'energia di deformazione dipende dalla natura e dalla quantità del materiale detonante, l'elevata energia dell'impatto rende i 2 materiali plastici e li fa impattare l'uno contro l'altro con velocità che arrivano a 300 [m/s]. Per ottenere una saldatura omogenea è necessario che alcuni parametri siano costanti durante l'impatto.



Figura 2.5.1: Schema riassuntivo di una saldatura per esplosione

I parametri più importanti sono V₀ = velocità di collisione, V_c,=velocità del punto d'impatto e β che è l'angolo compreso tra le 2 lamiere che è funzione della densità e della resistenza della lamiera .

Tramite un modello matematico è possibile risalire alla velocità di collisione conoscendo la velocità del punto d'impatto e l'angolo β . Una volta impattato il profilo saldato presenta un'interfaccia ondulata, l'impatto causa un'adesione meccanica per deformazione plastica.

I giunti di transizione sono stati ricavati dal blocco già saldato esternamente ai laboratori e presentano la stratigrafia riportata in figura 2.5.2. Il giunto è composto da:

- 1 lega alluminio serie 3003 con uno spessore di 12,3 mm;

- 2 interlayer in titanio puro ASTM B265 grado 1 di spessore 1,2 mm;

-3 metallo base di acciaio con basso tenore di carbonio AISI 1008 (C<0,10%) spesso 37,5 mm.

Il giunto di transizione è stato fornito sotto forma di blocco delle dimensioni di 700 mm x 200 mm x 51 mm, da cui sono state ricavate delle strisce di dimensione 200 mm x 51 mm x 2,8 mm e di dimensione 200 mm x 51 mm x 1,5 mm tramite taglio con troncatrice (figura 2.5.3).

Per quanto riguarda il taglio è preferibile tagliare il blocco con la faccia di alluminio rivolta verso l'alto, questo garantisce un taglio migliore, con minori sfridi di lavorazione e un maggiore smaltimento del calore generato. È importante che il pezzo sia ben lubrificato e raffreddato durante il taglio in modo da non alterare le caratteristiche meccaniche del giunto a causa di un non voluto riscaldamento.



Figura 2.5.2: sezione di un giunto ibrido saldato per esplosione

Il blocco da cui vengono tagliate le strisce viene opportunamente conservato al fine di proteggerlo dall'attività di ossidazione, una volta tagliate, le strisce presentano sulla superficie i segni dovuti all'operazione di taglio e uno spessore non costante. Il moto di avanzamento del disco sul blocco provoca una deflessione della traiettoria di taglio, la variazione dello spessore delle strisce dipende proprio da questo fenomeno. Per poter avere delle strisce con superficie regolare e spessore uniforme è stata eseguita una lavorazione di fresatura per la spianatura delle facce con l'utilizzo di una fresa a candela.



Figura 2.5.3: taglio delle strisce tramite troncatrice

2.5.2 Giunti saldati per colaminazione

Nella saldatura a rulli (ROW Roll Welding) una lamina di acciaio ed una di alluminio sono congiunte insieme attraverso l'azione simultanea di due rulli (figura 2.5.4).



Figura 2.5.4: saldatura per colaminazione

A seconda della temperatura, del tempo di ricottura e della composizione chimica dei metalli, si possono formare diversi composti intermetallici nell'interfaccia tra alluminio ed acciaio. E' stata riportata la formazione di composti interfacciali a temperature superiori a 500° C tra l'interfaccia alluminio e acciaio. Inoltre è stata rilevata la formazione di composti intermetallici Fe2AI5 e FeAI3 nell'interfaccia delle lamiere AI-Fe che possono deteriorare la forza di legame dei due metalli [9]. Se da un lato le leghe di acciaio hanno una resistenza relativamente elevata e possono quindi essere indurite con lavorazioni meccaniche dovute alla trasformazione martensitica indotta dalle deformazioni, d'altra parte le leghe di alluminio hanno una conducibilità termica ed elettrica discretamente elevata e una bassa densità [16].

Devo tenere conto delle diverse caratteristiche tra i 2 materiali nel caso di un successivo trattamento termico del giunto, tramite micrografie successive si nota che per la ricottura superando i 500°C lo spessore di strato di intermetallico aumenta notevolmente.

Il materiale fornito dall'azienda è una striscia bimetallica costituita da un acciaio a basso tenore di carbonio e di elementi in lega, mentre la lega di alluminio è una 5754. Le dimensioni sono di 980 mm x 92 mm x 3,2 mm, da cui sono stati ricavati dei campioni dei campioni di lunghezza 100 mm o 200 mm per le prove di saldatura.



Figura 2.5.5: sezione trasversale della striscia bimetallica

Come mostrato in figura 2.5.5 nella zona rossa tratteggiata si avrà l'adesione dell'alluminio sulla porzione di acciaio che si distende per una lunghezza di 20 mm e spessore 10mm. La lunghezza del pin di acciaio deve essere tale da garantire una resistenza allo sforzo di taglio che si genera a causa della trazione delle lamiere maggiore di quello dell'alluminio. Il pin di acciaio disteso permette una saldatura side to side, si ha l'adesione dei 2 layer di alluminio sui 2 lati lunghi del pin, questo tipo di saldatura permette alla giunzione di resistere ad elevati sforzi di taglio. Il lato corto del pin posto all'estremità non risulta saldato con la lamiera di alluminio e non contribuisce ad un aumento della resistenza della giunzione. Rispetto ai giunti ibridi saldati per esplosione in questo caso la porzione di alluminio è maggiore ed è circa uguale alla porzione in acciaio, ciò è dovuto alla presenza del pin di acciaio. L'alluminio adottato per questo tipo di giunti ed appartenente alle leghe 5000 ha caratteristiche meccaniche migliori rispetto alla lega 3000 impiegata per i giunti saldati per esplosione che è a base di manganese; la presenza di magnesio nella lega 5000 da all'alluminio una buona lavorabilità e saldabilità.

3 - METODI DI SALDATURA A PUNTI

La saldatura a punti è un metodo di saldatura a resistenza utilizzato per unire tra di loro da 2 a 4 lamiere metalliche sovrapposte con spessori fino a 3 mm ciascuna. Tra i 2 elettrodi si ha il passaggio della corrente elettrica a causa della elevata differenza di tensione che viene generata dalla saldatrice. La resistenza del metallo da saldare determina una corrente di saldatura elevata di decine di kA, l'elevato surriscaldamento provoca la fusione localizzata del materiale e grazie anche alla pressione superficiale dei 2 elettrodi si ha la saldatura delle lamiere.

Durante la saldatura l'intensità di corrente non è costante, il valore varia in funzione della resistenza e della temperatura del materiale, l'energia che si genera durante il processo E=R*I²*t in [J], dove t è la durata dell'impulso in secondi.

Riguardo la saldatura a punti la normativa di riferimento è la SEP1220-2 del 2011; in base allo spessore della lamiera viene indicato il diametro minimo di saldatura che deve essere maggiore di 4*radq(t); il diametro degli elettrodi da usare è funzione del tipo di materiale e dello spessore delle lamiere, si possono avere casi di saldatura con elettrodi diversi quando si devono saldare, come nel nostro caso, lamiere di alluminio e acciaio insieme. Il processo si saldatura non si basa su parametri fissi, in genere per le prove si procede per tentativi, modificando i vari parametri si osserva la qualità della saldatura e si determinano i parametri ottimali.

I parametri principali sono:

- 1. Forza elettrodo in Newton;
- 2. Durata dell'impulso in secondi.
- 3. Corrente di saldatura in kA;

Successivamente si procede con la prova di sbottonatura, tramite pinze si tira la lamiera e si misura il diametro per verificare che sia maggiore di quello minimo richiesto, i risultati riguardo il punto di saldatura possono essere diversi, in figura 3.1 sono visibili i risultati ottenibili [17].



Ausknöpfbruch Plug fracture





Mischbruch Partial interfacial fracture

Scherbruch Interfacial fracture



Partieller Dickenbruch Partial thickness fracture

Figura 3.1: tipi diversi di fratture dopo la sbottonatura

Si nota che aumentando troppo il valore di corrente si ha la formazione di schizzi di materiale, le 2 lamiere non vengono più saldate ma bucate, il valore della forza dell'elettrodo varia in base alle caratteristiche della lamiera, in genere per l'acciaio si hanno valori intorno ai 3000N, per l'alluminio valori più bassi.

Gli elettrodi della saldatrice devono svolgere compiti importanti, distribuire uniformemente la corrente sul punto di saldatura, applicare la giusta pressione sulle lamiere e devono permettere un veloce smaltimento del calore generato nei pressi del giunto, in genere si usano materiali come il rame con conducibilità termica elevata; si dispone anche di un circuito di raffreddamento che permette un migliore controllo della temperatura degli elettrodi. Un'altra indicazione riguardo la qualità della saldatura si ha grazie alle prove micrografiche tramite microscopio elettronico e a quelle di durezza. La normativa prevede anche prove sulla vita utile degli elettrodi.

La saldatrice usata per le nostre prove è una MATUSCHEK a punti a media frequenza della CARPANETO, in figura 3.2 è visibile la postazione di lavoro e i 2 elettrodi. La saldatrice è dotata di circuito di raffreddamento ad acqua per gli elettrodi e di un circuito pneumatico per la chiusura degli elettrodi.

A causa delle varie problematiche già illustrate, non è possibile saldare a punti lamiere d'acciaio e di alluminio ed ottenere buoni risultati, alluminio ed acciaio hanno caratteristiche differenti tra loro. Si usano per questo motivo lamine con interlayer di alluminio puro ed acciaio e il metodo con cover plate.



Figura 3.2: saldatrice a punti Matuschek a media frequenza

3.1 Saldatura a punti con interlayer

Questo metodo di saldatura consiste nel saldare a punti una lamina di alluminio serie 6016 o 5182 con una lamina di acciaio DP600 o DP1000.

Per fare ciò si usa una lamina da interporre tra le due lamiere, il Feran oppure il GT-CR40 con il 40% dello spessore di alluminio.

Per questo tipo di saldatura si usano elettrodi uguali tra loro come forma oppure con forma diversa, la normativa SEP a causa dell'elevata conducibilità termica dell'alluminio richiede l'utilizzo di elettrodi con diametro maggiore (10mm) con forma troncoconica, per l'acciaio si usano invece elettrodi a forma arrotondata con diametri di 6 o 8 mm.



Figura 3.1.1: schematizzazione saldatura a punti con interlayer feran e GT-CR40

In figura 3.1.1 è schematizzato il processo di saldatura a punti mediante l'utilizzo di interlayer feran e GT-CR40, si può notare la diversa forma degli elettrodi per i 2 lati della saldatura.

Per la saldatura delle lamiere si preparano degli spezzoni sagomati di sezione 30x100 mm, il taglio è eseguito tramite troncatrice, successivamente si esegue il decapaggio e lucidatura delle facce con l'ausilio di carta abrasiva P600, per ottenere una buona saldatura è necessario infatti che le superfici da saldare siano perfettamente preparate.

I due accoppiamenti da saldare tramite tecnologia RSW hanno i seguenti spessori:

- 1- DP1000 (spessore 1,35mm) 6016(spessore 2,5mm)
- 2- DP600 (spessore 1,5mm) 5182 (spessore 1,6mm)

Gli elettrodi utilizzati per la saldatura sono di tipo invertito (fig.3.1.2):

- 1- Con punta troncoconica, dove la maggiore superficie permette una migliore distribuzione del calore, sono stati usati per il lato acciaio;
- 2- Con punta arrotondata, hanno una superficie di contatto minore e quantità di calore maggiormente concentrata, usati per il lato alluminio

1 Tronco conico





2

Arrotondato

Figura 3.1.2: elettrodi usati per le prove di saldatura a punti

3.2 Saldatura a punti tramite cover plate

Come precedentemente spiegato la saldatura a punti di 2 materiali diversi come acciaio e alluminio è influenzata dalle diverse caratteristiche dei 2 materiali. L'alluminio con una conducibilità termica di 290 [W/m*k] necessità di una corrente di saldatura molto elevata che potrebbe compromettere la funzionalità della saldatrice e degli elettrodi; la quantità di calore che si origina nella zona di saldatura viene rilasciata velocemente dall'alluminio ma non dall'acciaio. L'acciaio con una conducibiltà di 55 [W/m*k] ha un valore 6 volte inferiore

all'alluminio e ciò comporta una distribuzione disomogenea del calore nella zona di saldatura.

La tecnica con cover plate utilizza uno strato di materiale con conducibilità termica bassa da interporre sopra l'alluminio in modo da trattenere maggiormente il calore generato dal passaggio della corrente. In figura 3.2.1 è schematizzato il processo di saldatura.



Figura 3.2.1: schematizzazione saldatura a punti con cover plate

Nel nostro caso la lamina di cover sarà in acciaio DP600 o DP1000 come la lamina sottostante, la lamina in alluminio sarà la lega 5182 o la 6016.

Le dimensioni dei campioni da saldare saranno 30mm x 100mm e la lamina di cover 30mm x 30mm.

Come per il metodo con interlayer verranno effettuate diverse prove di saldatura al fine di trovare i parametri di saldatura ottimali, rispetto alle prove di saldatura effettuate nel corso delle precedenti tesi sull'argomento in questa tesi verrà utilizzato anche un alluminio 5182 con spessore di 1,6 mm che è nettamente inferiore ai 2,5mm dell'alluminio 6016, durante l'esecuzione del punto di saldatura l'alluminio disposto al centro viene schiacciato tra le 2 lamine d'acciaio, il minore spessore è l'elevate correnti usate potrebbero far si che le due lamine esterne si saldino tra di loro con l'alluminio depositato ai bordi del punto di saldatura.

Per questo metodo di saldatura, avendo da entrambi i lati acciaio, sono stati utilizzati elettrodi a forma arrotondata specifici per la saldatura dell'acciaio.

4: METODO DI SALDATURA AD ARCO ELETTRICO

Il procedimento di saldatura MIG/MAG è un procedimento a filo continuo in cui la protezione della zona saldata è attuata da un gas di protezione, il gas fluisce dalla bombola alla torcia tramite un circuito di alimentazione. L'alimentazione tramite filo continuo permette una elevata velocità di saldatura e la presenza di gas permette di effettuare saldature in atmosfera protetta dall'attività di ossidazione [7]. Rispetto alla saldatura con elettrodo rivestito questo metodo richiede attrezzature sofisticate e costose e l'operazione di cambio della bobina di materiale d'apporto ogni qualvolta si deve cambiare materiale da saldare. La saldatrice usa una tecnica di saldatura denominata CMT, la logica di funzionamento è con retroazione, la saldatrice adatta i parametri in tempo reali e li aggiorna in base alle caratteristiche del materiale che sta saldando [8], nei paragrafi successivi verrà approfondita questa tecnica.



Figura 4.1 : area di saldatura ad arco

L'attrezzatura in questione è osservabile in Figura 4.1 ed è costituita da:

1- un generatore di tensione TPS 4000 CMT, con un range di corrente settabile tra 3 e 400 A;

2- un'unità di controllo RCU 5000i, è possibile tramite la stessa impostare parametri come corrente, tensione di saldatura e avanzamento del filo; tramite il controllore presente posso impostare una curva di saldatura o caricare una già presente.

3- un'unità di avanzamento del filo VR 7000 CMT, in cui è posta la bobina di materiale d'apporto e un primo azionamento che ne regola l'avanzamento;

4- la torcia di saldatura, dotata di un altro motorino di avanzamento del filo e di un convogliatore per il gas;

5-Il robot COMAU Smart S2, dotato di 6 gradi di libertà rotazionali, garantisce una corretta esecuzione del cordone saldatura con buona ripetibilità dei risultati.

La saldatura delle lamiere tramite arco elettrico per le nostre prove prevede le seguenti fasi:

- 1- Scelta del filler opportuno, avendo un cordone di saldatura per le 2 facce di alluminio e un cordone di saldatura per le 2 facce di acciaio, devo cambiare il filo per i 2 cordoni e scegliere quello adatto al mio materiale;
- 2- Scelta del gas, durante la saldatura l'atmosfera circostante deve essere protetta, in base al materiale saldato scelgo se effettuare una saldatura MAG o MIG;
- 3- Fissaggio delle lamiere, programmazione del robot di saldatura e impostazione dei parametri di saldatura sulla saldatrice, questa fase consiste nel disporre le lamiere come lo schema di figura 2.2 con disposizione a testa e lembi retti chiusi, fissarle tramite pinze e programmare il robot di saldatura in autoapprendimento.

Date le elevate temperature di saldatura e le forti tensioni che si creano, le lamiere saldate tendono a curvarsi, bisogna fissare molto bene le lamiere per evitare di spostare il cordone di saldatura dalla zona interessata.

Nei paragrafi successivi verranno elencati i parametri adottati per le nostre saldature, l'utilizzo di un robot per la saldatura dei cordoni permette di ottenere delle saldature regolari con quantità costante di materiale d'apporto lungo tutta la direzione della saldatura, questo permette di ottenere dei provini tagliati dalle lamiere che hanno saldature uguali tra loro.

Rispetto alla saldatura a punti che sarà anche approfondita nel corso di questa tesi la saldatura ad arco risente molto della scelta del materiale d'apporto, si devono usare filler con caratteristiche compatibili al materiale saldato; la conservazione delle bobine deve essere accurata per evitare l'attività di ossidazione delle stesse.

4.1 PROCESSO DI SALDATURA

Tramite l'utilizzo di giunti ibridi è possibile saldare lamiere di acciaio ed alluminio a filo continuo.

In figura 4.1.1 è schematizzata la disposizione delle lamiere da saldare.



Figura 4.1.1: saldatura a testa delle lamiere

LATO ALLUMINIO SERIE 6016/5182 E SERIE 3003/5754

La saldatura delle 2 facce d'alluminio è di tipo MIG (Metal Inert Gas), si usa un gas di tipo inerte che nel nostro caso è argon puro, il gas impedisce l'instaurarsi di attività chimiche durante l'attività di saldatura, l'argon ha inoltre un peso atomico elevato è permette una migliore concentrazione del gas intorno al punto interessato [15].

Il materiale d'apporto è un filo di 1,2 mm di diametro avvolto su bobine opportunamente conservate per evitare ossidazione.

La ditta fornitrice della bobina è Safra e il materiale è l'AlSi12.

In tabella 4.1.2 la composizione del materiale AlSi12:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	altro
11,0-	<0,60	<0,30	<0,15	<0,10	<0,20	<0,15	<0,000	<0,15
13,0							3	

Tabella 4.1.2 : composizione del materiale AlSi12

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche del materiale d'apporto abbiamo un Rm di 130 MPa e un allungamento del 5%.

Durante la saldatura potrebbero formarsi dei composti binari tra alluminio e il ferro contenuto nel materiale d'apporto, essendo dannosi e indesiderati dato che deteriorano la forza del legame, si ricorre all'uso del silicio che favorisce la nascita di composti ternari tra Al,Fe e Si, che sono preferibili ai binari.

Da una prima osservazione è chiaro che la migliore accoppiata per la saldatura dal lato alluminio è la 5182-5734, entrambi i materiali appartengono alla lega 5000, la differenza tra i due sta nelle percentuali degli elementi costituenti la lega .

Quindi l'utilizzo del giunto ibrido saldato per colaminazione dovrebbe garantire migliori caratteristiche meccaniche essendo composto da una lega d'alluminio serie 5000.

LATO ACCIAIO DP600/1000 E AISI 1008

La saldatura delle 2 lamiere di acciaio è di tipo MAG (Metal active gas), in questo caso il gas impiegato partecipa attivamente all'attività di saldatura con una conseguente attività chimica. In tal caso, è stata adoperata una miscela tra CO2 all' 82% e O2 al 18%. Il materiale d'apporto alimentato tramite filler è un G3Si della Lincoln Electric Italia. Di seguito, in tabella 4.1.3 è indicata la composizione chimica del materiale.

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Мо	Cu	Al	Zr+T
										i
0,07	1,45	0,83	0,010	0,013	0,030	0,010	0,002	0,020	0,002	<0,10

Tabella 4.1.3 : composizione del materiale G3Si

L'elevata percentuale di manganese provoca un aumento della resistenza del materiale . Le caratteristiche meccaniche risultanti sono un Rm di 556 MPa e un allungamento fino al 30%, nettamente maggiori delle caratteristiche del filler precedente.

I 2 tipi di acciaio dual phase verranno saldati all'acciaio aisi 1008 che contiene carbonio con percentuali inferiori allo 0,1%, questo tipo di acciaio contiene altri elementi di lega come manganese allo 0,4% e alcune tracce di silicio.

È importante verificare la corretta alimentazione del filo durante la saldatura al fine di avere dei buoni cordoni di saldatura, la torcia deve essere pulita periodicamente e la velocità di scorrimento del filo deve essere costante. In base ai diversi materiali saldati posso selezionare diversi corpi torcia. Altro parametro importante per la saldatura ad arco è l'inclinazione e la distanza della torcia rispetto alla superficie del pezzo da saldare; riguardo i lembi da saldare la normativa fiat prevede nel caso di lamiere saldate di testa un gap per lembi retti aperti minore o uguale al diametro della torcia, in genere la distanza tra le 2 lamiere è di circa 1,2 mm e ciò permette al materiale d'apporto di penetrare all'interno dei lembi con facilità.

Per l'analisi della resistenza delle saldature ibride il lato dell'acciaio risulterà il più resistente, un incremento delle caratteristiche meccaniche di questo tipo di saldature è possibile migliorando le caratteristiche della giunzione dal lato alluminio.

4.2 Tecnologia CMT (Cold Metal Transfer)

Rispetto ai metodi convenzionali di saldatura ad arco la saldatrice della Fronius usata per i nostri test adotta una tecnologia chiamata CMT. È un processo di saldatura a filo continuo sotto protezione di gas (GMAW) in tecnologia inverter digitale con trasferimento di metallo mediante il controllo meccanico dell'arco voltaico".

In figura 4.2.1 è riportato lo schema di funzionamento.



Figura 4.2.1: schema di funzionamento di una saldatrice CMT

Le saldatrici convenzionali permettono un controllo della lunghezza dell'arco tramite il controllo della tensione, il risultato potrebbe essere influenzato dalle condizioni superficiali del pezzo.

La tecnologia CMT garantisce un monitoraggio della lunghezza dell'arco tramite un controllo meccanico, corrente per il trasferimento del materiale d'apporto prossima allo zero, migliore controllo del distacco della goccia fusa e velocità della sequenza d'innesco doppia.

Si combina anche un movimento pulsato dell'arco che permette un migliore riempimento del gap di saldatura e migliore distribuzione dell'energia; posso in questo modo saldare lamiere con spessori molto diversi. Come conseguenza ho una minore deformazione delle lamiere e totale assenza degli spruzzi.

La tecnologia CMT riduce le emissioni di gas nocivi fino al 90% per il solfato metallico e il 63% dello zinco. In figura 4.2.2 è mostrata una comparazione tra un cordone saldato con modalità tradizionale e un cordone saldato con tecnologia CMT, il cordone saldato con tecnica CMT appare più regolare con assenza di cavità superficiali e di residui carboniosi sulla superficie del cordone. L'aspetto esteriore del secondo cordone è molto più bello. L'immagine è stata prelevata dal catalogo della Fronius.



Figura 4.2.2: Cordone di saldatura tradizionale e con tecnica CMT

5. METODI SPERIMENTALI

Dopo la saldatura ibrida a punti o ad arco dei 2 materiali vengono eseguite delle prove volte a misurare la resistenza dei materiali e l'efficacia della tecnica di saldatura .

5.1 Prove di trazione

La prova di trazione è una delle prove più importanti volte a indicare la resistenza, la deformabilità e l'elasticità di un materiale. Nel caso di materiali saldati puo essere un indicazione della resistenza della saldatura [5]. La prova consiste nell'applicazione di un carico uniassiale con valore inizialmente nullo, l'incremento è lineare e può arrivare a decine di kN. L'applicazione del carico provoca la deformazione del materiale trazionato con un allungamento lungo la sezione longitudinale del provino e una strizione lungo la sezione trasversale. La traversa della macchina si muove con velocità costante e per valori di qualche millimetro, circa 6mm/min .

Tramite un grafico funzione del carico e dello spostamento è possibile avere un informazione immediata circa le caratteristiche meccaniche del materiale.

Per le nostre prove è impiegata una Galdabini SUN 20 con spostamento della traversa tramite vite azionata con motori elettrici, l'afferraggio alle estremità dei pezzi da trazionare è garantito da un sistema di cunei a comando pneumatico. Grazie agli estensimetri collegati al pezzo il computer collegato alla macchina registra molteplici parametri come la strizione della sezione, deformazione percentuale, carico massimo, corsa traversa, modulo elastico, energia, ecc.

Per le nostre prove è stata usata la modalità senza estensimetro collegato, la prova di trazione si basa solo su 2 parametri misurati, la forza misurata in kN e la corsa della traversa che corrisponde all'allungamento del provino in mm.

Per le prove si registreranno valori di allungamento di qualche mm e valori di forza sotto i 10kN, i valori registrati verranno riportati su un grafico, sull'asse delle ordinate è posta la forza, sulle ascisse lo spostamento della traversa.



Figura 5.1.1 : Macchina di trazione Galdabini e sabbiatrice manuale

In figura 5.1.1 è visibile la macchina di trazione usata per le nostre prove, per quanto riguarda l'afferraggio dei pezzi spesso si ha lo scivolamento del materiale tra i cunei di fissaggio, tramite una sabbiatrice manuale si sabbiano le estremità dei provini per ovviare allo scivolamento.



Figura 5.1.2 *schematizzazione del fissaggio di un provino durante una prova di trazione*

Per far si che i provini trazionati siano sottoposti al solo sforzo normale e non a tensioni tangenziali si usano degli spessori da interporre alla chiusura dei cunei pneumatici, in figura 5.1.2 è schematizzato il metodo di fissaggio.

Le nostre prove di trazione saranno eseguite su pezzi saldati a punti e ad arco, per le 2 tipologie di saldatura il tipo di rottura è differente, in figura 5.1.3 è possibile vedere i provini rotti dopo la prova di trazione.



Figura 5.1.3: provini rotti in seguito a prova di trazione.

È facile notare come il tipo di rottura sia diverso per i 2 tipi di saldature, per i provini saldati a punti le tensioni esercitate durante la prova sono maggiori e concentrate tutte sul bottone di saldatura. Nella maggior parte delle prove di trazione su campioni saldati ad arco si ha la rottura e il completo distacco tra le due lamiere, per i campioni saldati a punti si verificano 2 situazioni diverse; si può verificare la rottura completa del punto di saldatura o una rottura parziale del punto. Quando si verifica la rottura parziale, si ha una prima fase di snervamento con rottura del punto di saldatura e registrazione del carico massimo , successivamente si registra un carico che decresce nonostante il valore di spostamento della traversa continua a crescere, una piccola sezione del punto di saldatura continua a snervarsi ; se questa fase dura oltre un certo periodo di tempo e se il carico registrato è inferiore ad 1 kN si interrompe la prova nonostante le lamiere non si sono ancora distaccate completamente tra loro.

5.2 Prove di microdurezza Vickers

I provini saldati come detto precedentemente subiscono delle trasformazioni relative alla loro microstruttura. Per misurare l'andamento della durezza del materiale saldato si eseguono delle cuciture di durezza seguendo una normativa ben precisa. Tramite il programma si sceglie il passo di cucitura e il pattern che corrisponde alla traiettoria dei punti di durezza [17].

Per saldature a punti le cuciture si riferiscono alla normativa SEP1220-2 ed hanno andamento visibile in figura 5.2.1.

Per saldature ad arco elettrico le cuciture di durezza possono essere variegate a seconda della disposizione dei lembi da saldare.



Figura 5.2.1: cucitura di durezza per saldature a punti (norm. SEP1220-2)

Per le nostre prove il durometro utilizzato è un Affri Wiki200, ha un penetratore piramidale in diamante e 4 lenti per la misura delle diagonali dell'impronta, le lenti hanno un ingrandimento pari a 5x,10x,40x,e 50x. Il programma dedicato fornisce un grafico che riporta l'andamento della durezza in funzione della cordinata x.

La zona di saldatura è composta anche da una ZTA , in questa zona si registrano i valori di durezza più elevati dovuti alla presenza di martensite. In figura 5.2.2 è rappresentato il durometro Affri usato per le prove e un esempio di provino con cucitura effettuata.


Figura 5.2.2: durometro Affri ed esempio di provino con cucitura

5.3 Analisi micrografiche

Un'altra prova importante da effettuare è l'analisi micrografica dei campioni saldati tramite microscopio ottico e successivamente con microscopio elettronico.

Per effettuare le micrografie è necessario tagliare i campioni saldati lungo una sezione passante la zona di saldatura e ridurre le dimensioni dei campioni all'ordine di qualche centimetro di lunghezza in modo da permettere l'inglobamento in un provino [5], in figura 5.3.1 è possibile vedere 4 campioni sagomati prima dell'inglobatura.



Figura 5.3.1 : provini saldati a punti pronti per l'inglobamento

Viene posizionato il pezzo da analizzare in uno stampino, successivamente si immerge la resina all'interno e si attende la solidificazione della stessa; una volta ottenuto il provino si passa alla lucidatura della parte superiore dove è presente il campione sezionato.

La lucidatura si esegue con una lappatrice, una tavola circolare rotante con la possibilità di utilizzare carte abrasive con granulometrie differenti o panni diamantati; la tavola dispone di un ugello per distribuire l'acqua durante la lucidatura.

Si utilizzano carte abrasive da 180,400,800 fino ad arrivare a 2200, successivamente si utilizzano panni diamantati che permettono una lucidatura con pasta dell'ordine di qualche μ m.

Durante la lucidatura è importante premere il provino verso la carta abrasiva con una forza costante e distribuita in maniera omogenea lungo tutta la superficie in modo da avere una superficie lucidata completamente pianeggiante.

Dopo la lucidatura il provino può essere utilizzato per effettuare delle misure di microdurezza (figura 5.2.2).

Per l'osservazione tramite microscopio il provino deve essere trattato tramite attacco con soluzioni chimiche.

Per acciai il provino si immerge in una soluzione di NITAL al 2%, una miscela con il 2% di acido nitrico HNO₃ disciolto in una soluzione di alcool etilico mentre per l'alluminio si ricorre ad un attacco Keller, con l'1% di acido fluoridrico HF, l'1,5% di acido cloridrico HCl e il 2,5% di acido nitrico HNO₃ disciolti in acqua. A questo punto è possibile l'osservazione del campione al microscopio ottico, i provini attaccati non devono assolutamente venire a contatto con le mani.

Il microscopio ottico usato per le nostre prove è un Reichert Jung MEF3 (Figura 5.3.2) con lente da 10x e 6 obiettivi selezionabili (2x, 5x, 10x, 20x, 50x e 100x). È dotato di una lampada alogena da cui si origina il fascio di luce. Il microscopio è dotato di diverse regolazioni come contrasto e grado di luminosità ed è collegato ad un computer dotato di un software Qcapture per la cattura delle immagini.



Figura 5.3.2: microscopio ottico Reichert-Jung

L'analisi viene fatta poggiando il provino con la faccia lucidata rivolta verso il basso sulla base del microscopio, inizialmente si impostano obiettivi a basso ingrandimento come 5x per poi arrivare ad ingrandimenti sempre più grandi. Con gli obiettivi iniziali si analizza la saldatura, i composti intermetallici formatesi ed eventuali porosità presenti; con gli ingrandimenti elevati si analizza la microstruttura nella zona di saldatura, tramite una lente 50x possiamo distinguere la martensite dall'austenite e l'orientamento delle lamelle, occorre effettuare una corretta messa a fuoco per riuscire a vedere sia la microstruttura dell'alluminio che dell'acciaio. Successivamente si passa all'analisi al microscopio elettronico. La differenza sostanziale tra i 2 microscopi è la sorgente di radiazione che viene proiettata sul provino, in questo caso al posto del fascio di luce si usa una scarica di elettroni accelerati grazie ad un forte campo elettromagnetico generato.

Il potere di risoluzione è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata, il fascio di elettroni avendo una λ molto più piccola rispetto a quella dei fotoni permette un potere si risoluzione maggiore. il microscopio ottico è un SEM (scanning Electron Microscope), gli elettroni scagliandosi sul provino da analizzare emettono elettroni secondari che vengono captati da un rilevatore di impulsi.

Tramite il SEM si riesce ad avere una risoluzione di $0.2 \times 10^{-3} \mu m$ rispetto ai $0.02 \mu m$ della microscopia ottica con una profondità di campo nettamente maggiore .

L'emissione di raggi x da parte del materiale colpito dal fascio di elettroni permette di effettuare analisi EDS, ogni materiale colpito dagli elettroni emette dei raggi x con una determinata lunghezza d'onda caratteristica del materiale in esame, tramite l'analisi delle radiazioni emesse è possibile risalire alla composizione chimica del materiale in esame.

Per le nostre prove il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) usato è uno Zeiss Sigma mentre per le microanalisi a raggi X (EDS) è stato usato il modello Oxford AZtec Energy X-Max 80(Fig 5.3.3); 80 è la superficie massima in mm² su cui il sensore riesce ad agire per fornire ad esempio delle mappature come quella fatta all'alluminio nelle nostre prove.



Figura 5.3.3: sensore EDS Oxford AZtec Energy 80

6. SALDATURA A PUNTI, RISULTATI

Per quanto riguarda la saldatura tra acciaio e alluminio mediante tecnologia RSW sono state usate le 2 tecniche citate nel capitolo precedente: **1**- saldatura con interlayer (feran e GT-CR40) e **2**- saldatura con cover plate.

Dopo la saldatura si esegue una prova di sbottonatura manuale dei campioni saldati, ne consegue una prima indicazione sulla qualità della saldatura al fine di trovare i parametri di saldatura più opportuni.

Sono state fatte già alcune prove di saldatura a punti tra campioni omologhi di alluminio 6016 e acciaio DP1000, i valori di resistenza sono reperibili dalle precedenti tesi svolte sul medesimo argomento [3], nel corso di questa tesi verranno sottoposti a test anche l'acciaio DP600 e l'alluminio 5182, di seguito in tabella 6.1 e figura sono riportati i grafici e i parametri relativi alle saldature tra campioni omologhi.

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA			
		Forza[kg] Tempo [s] Corrente [A]			
DP600	30 x 100	330	0.2	13000	
5182	30 x 100	330	0.2	17000	
DP1000	30 x 100	330	0.2	13000	
6016	30 x 100	330	0.2	21000	

Tabella 7.1: parametri di saldatura adottati per campioni omologhi

6.1 Comportamento a trazione per saldature omologhe DP600

Due campioni di dimensioni 30 x 100mm di DP600 vengono saldati tra loro con la saldatrice a punti a media frequenza adottando i parametri in tabella e posti a prova di trazione.

Nel grafico 6.1.1 allegato è possibile vedere i valori di resistenza a trazione per 4 coppie di campioni di DP600 saldati a punti, i valori di forza massima registrata sono di circa 17 kN, il quarto campione ha manifestato una rottura fragile con conseguente valore massimo di 12 kN. I risultati ottenuti di resistenza a trazione si avvicinano ai valori ottenuti con i campioni omologhi di Dp1000 mostrati nel grafico 6.1.2, di seguito sono allegati i grafici per una comparazione delle caratteristiche meccaniche.



Grafico 6.1.1: campioni omologhi di Dp600 sottoposti a prova di trazione



Grafico 6.1.2: campioni omologhi di Dp1000 sottoposti a prova di trazione

6.2 Comportamento a trazione per saldature omologhe 5182

Due campioni di dimensioni 30 x 100mm di alluminio 5182 vengono saldati tra loro adottando i parametri in tabella e posti a prova di trazione.

Nel grafico 6.2.1 allegato è possibile vedere i valori di resistenza a trazione per 5 coppie di campioni di 5182 saldati a punti e confrontarli con i valori dell'alluminio 6016 (grafico 6.2.2).



Grafico 6.2.1: valori di resistenza a trazione per 5 campioni di Al 5182



Figura 6.2.2: valori di resistenza a trazione per 5 campioni di Al 6016

Dai valori ottenuti è evidente che l'alluminio 5182 saldato a punti ha un comportamento meno ripetibile rispetto al 6016 se sottoposto a sforzi di taglio, i valori registrati evidenziano una maggiore resistenza a trazione da parte dei campioni di 5182 rispetto all'alluminio 6016.

I valori medi di resistenza per Al 5182 si aggirano intorno ai 3 kN, l'alluminio 6016 fa registrare valori medi di 2,2 kN. Un altro aspetto da considerare è la differenza si spessore tra i due materiali, il 5182 ha uno spessore di 1,6mm, nettamente inferiore ai 2,5 mm dell'alluminio 6016. Questo aspetto evidenzia la maggiore resistenza a trazione dell'alluminio 5182.

6.3 Saldatura RSW tra DP600 e 5182 con l'utilizzo di Feran

Le lamine di dimensioni 30 x 100mm opportunamente sagomate tramite taglio con troncatrice vengono pulite e lucidate, lo spessore è di 1,6mm per Al 5182 e 1,5mm per DP600, viene interposta la lamina 30 x 30mm di feran tra alluminio e acciaio ed eseguita la saldatura con la saldatrice matuschek adottando i parametri mostrati in tabella 6.3.1

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA		
	campioni	Forza[kg]	Tempo [s]	Corrente [A]
DP600 - 5182	30 x 100	270	0.3	17000

Tabella 6.3.1: parametri nominali di saldatura

Per la saldatura sono stati utilizzati un elettrodo di tipo flat per l'acciaio e a punta arrotondata per il lato alluminio; nel grafico 6.3.2 sono presenti i valori istantanei di tensione e corrente della macchina, è interessante osservare il picco di corrente che raggiunge i 19 kA nell'istante iniziale , dopo qualche millisecondo la corrente si stabilizza sui 17 kA. I valori di tensione istantanei si aggirano intorno ai 2 Volt.

Il tempo indicato si riferisce al periodo di tempo da quando si origina l'impulso di corrente fino all'annullarsi della corrente e viene chiamato "weld time".

Oltre al weld time, sulla saldatrice a punti si imposta il tempo di squeeze e l'hold time che rappresentano rispettivamente il tempo che passa dalla chiusura degli elettrodi e il passaggio della corrente di saldatura ed il tempo tra il termine del passaggio di corrente e l'apertura degli elettrodi. In queste prove è stato sempre usato uno squeeze di 800ms e un hold time di 500ms.



Grafico 6.3.2 : curva dei parametri di saldatura in tempo reale con elettrodi diseguali , coppia DP600-Al5182 con utilizzo di Feran

In figura 6.3.3 è possibile vedere le diverse impronte lasciate dai 2 diversi elettrodi, per l'acciaio nonostante l'impiego di un elettrodo a forma arrotondata e di diametro più piccolo l'impronta lasciata sul campione è meno profonda, ciò è dovuto alla differenza sostanziale di durezza tra i 2 materiali.



Figura 6.3.3: saldatura ibrida con utilizzo di feran, lato dp600 e Al 5182

6.3.1 PROVE DI TRAZIONE

Sono stati sottoposti a trazione 11 campioni saldati con l'utilizzo di feran come interlayer, di questi, 6 sono stati sottoposti a corrosione in acqua salata al 3,5% per 3 settimane. Di seguito in figura 6.3.5 sono visibili i provini corrosi dopo le prove di trazione . I bottoni di saldatura sulla lamina di feran risultano regolari, dopo la rottura, che avviene sempre dal lato alluminio.

La tabella 6.3.4 che segue indica le date di saldatura, di inizio e fine immersione nella soluzione salata e la data di trazione dei provini, la voce differenza giorni indica il tempo che è trascorso dalla data di saldatura dei provini a quella i trazione. Per i provini non corrosi il periodo d'invecchiamento è stato quasi 4 volte maggiore.

PROVINI TIPO	DATA DI	DATA DI INIZIO	DATA DI FINE	DATA DI	DIFFERENZA
	SALDATURA	IMMERSIONE	IMMERSIONE	TRAZIONE	IN GIORNI
FERAN NON CORR.	15/12/17	/	/	5/04/18	110
FERAN CORROSI	19/03/18	28/03/18	18/04/18	19/04/18	30

Tabella 6.3.4: intervalli temporali delle analisi svolte sui provini saldati con Feran



Figura 6.3.5 Provini DP600-Al5182 saldati con interlayer feran e sottoposti a corrosione

L'acciaio DP600 e DP1000 usato per le nostre prove è zincato e durante il periodo di permanenza in acqua salata viene protetto dallo zinco. Soffermandoci sulla figura 6.3.5 possiamo notare come lo zinco si è sacrificato per proteggere l'acciaio ed anche l'alluminio della saldatura ibrida, lo zinco si è cosparso sopra la superficie dei provini.

Le leghe di alluminio ed in questo caso la 5182 hanno un loro strato di ossido chiamato allumina, durante la reazione di corrosione lo zinco è facilmente removibile rispetto all'allumina, le zone biancastre presenti sui campioni rappresentano il deposito di ossido dello zinco.

In teoria, una volta terminato lo strato di zinco presente sull'acciaio poiché vi è un contatto diretto tra Al-Fe e potrebbe instaurarsi la corrosione dell'alluminio lungo la zona del punto di saldatura più vicina alla giunzione AL-Fe

Anche i campioni saldati con interlayer GT CR 40 e con metodologia cover plate hanno manifestato lo stesso tipo di corrosione dopo l'immersione in acqua salata.

Nel grafico 6.3.6 è visibile il comportamento a trazione di 5 campioni sottoposti a trazione, le curve hanno un andamento simile con un comportamento elastico fino a 2 kN ed un punto di rottura con valori che vanno dai 4kN a 5,2 kN.



Grafico 6.3.6: comportamento a trazione di 5 campioni coppia DP600-Al5182 saldati con feran non corrosi



Grafico 6.3.7: comportamento a trazione di 5 campioni coppia DP600-Al5182 saldati con feran e corrosi

Nel grafico 6.3.7 sono visibili i valori registrati per i campioni corrosi, le curve hanno un andamento lineare nel primo tratto ed una rottura di tipo fragile, i valori sono abbastanza ripetibili ad eccezione del 6° campione corroso, i valori di carico vanno dai 2, 54 kN ai 5,22kN.

In tabella 6.3.8 si può notare una differenza tra i risultati ottenuti dai campioni corrosi e non; i campioni non corrosi presentano valori di resistenza inferiore e deviazione standard maggiore.

saldatura tra dp600 e Al5182 con interlayer feran					
campioni n	on corrosi	campioni corrosi			
campione	carico max [kN]	campione cario	co max [kN]		
1	4,88	1	4,568		
2	4,16	2	2,545		
3	4,77	3	2,757		
4	4,48	4	2,711		
5	5,22	5	3,076		
		6	4,975		
carico medio [kN]	4,70	'O carico medio [kN] 3			
dev st.	0,404	dev st.	1,055		

Tabella 6.3.8 riepilogo dei valori risultanti delle prove di trazione

6.3.2 ANALISI MICROGRAFICHE

Dopo l'inglobatura del provino ed i rispettivi attacchi sono state effettuate delle analisi micrografiche sui punti di saldatura. In figura 6.3.9 è possibile vedere la conformazione assunta dal materiale dopo il processo di saldatura a punti. È evidente che la saldatura non è accettabile, i parametri utilizzati dovrebbero essere modificati. La deformazione elevata della lamina di alluminio potrebbe derivare da una forza incisa dall'elettrodo troppo elevata, tra la lamina di alluminio 5182 e il sottilissimo strato d'interlayer del feran è presente una discontinuità ed è evidente la mancata fusione tra i 2 materiali . Dal lato acciaio il nocciolo di saldatura formatesi risulta regolare e privo di difetti e discontinuità, è facilmente visibile anche la zona termicamente alterata . Per migliorare la qualità della saldatura si dovrebbero fare ulteriori prove abbassando il valore della corrente di saldatura.



Figura 6.3.9 Sezione longitudinale del punto di saldatura, coppia DP600-Al5182 -Feran

In figura 6.3.10 è possibile vedere un ingrandimento della zona di saldatura , la freccia in figura indica la zona di frattura tra l'alluminio e l'acciaio dp600, è interessante notare la quasi assenza dell'alluminio nella zona centrale del punto di saldatura , ciò è dovuto alla fusione causata dall'elevata corrente, alla fine del processo il materiale fuso ha creato degli schizzi ai bordi della zona saldata, seguono delle analisi al microscopio elettronico al fine di studiare attentamente la zona del punto di saldatura, figure 6.3.11 e 6.3.12.



Figura 6.3.10: ingrandimento della zona saldata con indicazione della zona di frattura



Figura 6.3.11: Immagine al microscopio elettronico a scansione (SEM) della zona di saldatura mostrata nella foto di pagina precedente acquisita al microscopio ottico metallografico.



Figura 6.3.12: Immagine della mappatura dell'alluminio (evidenziato in giallo) nella zona mostrata in foto sopra e in foto di pagina precedente.

Le due immagini riportate sopra sono ingrandite a 25 X con tensione del SEM di 20kV.

Tramite la mappatura dell'alluminio è stata rilevata la presenza di tracce di alluminio soprattutto sulla zona circonferenziale del punto di saldatura , tramite il microscopio ottico ed elettronico è stata aumentato fino a 100x l'entità dell'ingrandimento in modo da poter osservare la presenza di composti intermetallici all'interfaccia tra alluminio ed acciaio.



Figura 6.3.13: Immagine al microscopio ottico della zona centrale della saldatura

In figura 6.3.13 sono indicate con la freccia zone dal colore grigio che indicano la presenza di intermetallici che si sono formati, segue l'analisi al SEM della zona ingrandita Fig. 6.3.14.



Figura 6.3.14: Immagine al SEM della zona di saldatura mostrata nella foto precedente

6.3.3 PROVE DI DUREZZA

È stata eseguita una cucitura di durezza HV1 al fine di misurare i valori di durezza lungo la direzione della diagonale indicata in figura 6.3.16, lo scopo della prova è quello di rilevare la durezza dei 2 materiali base e confrontarla con quella della zona saldata che comprende la zona termicamente alterata. I valori ottenuti sono riportati nel grafico 6.3.15 sottostante.



Grafico 6.3.15 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura



Figura 6.3.16 : ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura, DP600-Al5182

Dai valori di durezza ottenuti risulta una durezza del materiale base DP600 che si aggira intorno ai 200 HV, l'alluminio 5182 è duro circa 90 HV . Nella zona centrale la zona termicamente alterata del lato acciaio assume valori di durezza che arrivano fino a 420 HV , proseguendo verso il lato alluminio i valori decrescono , infine la ZTA del lato alluminio raggiunge valori di durezza pari a 340 HV. 10.5

6.4 Saldatura RSW tra DP600 e 5182 con l'utilizzo di GT-CR40

Le lamine di dimensioni 30 x 100mm opportunamente sagomate tramite taglio con troncatrice vengono pulite e lucidate, lo spessore è di 1,6mm per Al 5182 e 1,5mm per DP600, viene interposta la lamina 30 x 30mm di GT-CR40 con interlayer d'alluminio del 40% tra alluminio e acciaio ed eseguita la saldatura con la saldatrice Matuschek adottando i parametri riportati in tabella 6.4.1. Gli elettrodi usati sono un elettrodo arrotondato da 6mm per il lato alluminio in modo da diminuire la superficie di contatto e concentrare maggiormente il calore nel punto di saldatura, per il lato acciaio viene usato un elettrodo con forma troncoconica .

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA		
	campioni	Forza[kg]	Tempo [s]	Corrente [A]
DP600 - 5182	30 x 100	270	0.3	14000



Tabella 6.4.1: parametri di saldatura nominali

Grafico 6.4.2 : curva dei parametri di saldatura in tempo reale con elettrodi diseguali coppia DP600-Al5182 saldati con GT CR40

Nel grafico 6.4.2 è visibile l'andamento dei valori istantanei di tensione e corrente della macchina, si ha una corrente di picco di circa 15 kA e una tensione di picco di 2,2 Volt.

In figura 6.4.3 sono riportati 2 punti di saldatura dal lato alluminio, il primo con corrente di 14kA e il secondo di 17kA (parametro troppo elevato, saldatura non accettabile).

In foto è possibile vedere come aumentando la corrente si ha un conseguente aumento degli schizzi di materiale fuso che si va a depositare agli estremi del punto di saldatura.



Figura 6.4.3 : saldatura ibrida DP600-Al5182 con utilizzo di interlayer GT-CR40

Dei 10 provini saldati 5 sono stati immersi in acqua salata per 3 settimane per prova di corrosione e verranno confrontati con i restanti 5.

Seguono una serie di prove volte ad analizzare le caratteristiche e le proprietà della saldatura tra i due materiali facendo attenzione all'aspetto corrosione.

Rispetto al Feran utilizzato in precedenza il GT CR40 ha un interlayer con alluminio al 40% di spessore, quindi una quantità maggiore di alluminio.

È interessante vedere la deformazione da parte dell'elettrodo a punta arrotondata, il primo punto di saldatura eseguito utilizzando una corrente di saldatura più bassa ha un diametro del bottone di saldatura più piccolo rispetto al secondo, ciò indica che il diametro del punto di saldatura dipende dall'intensità di corrente [6]. Per le omologazioni si cerca sempre di trovare il minimo valore di corrente che permette la realizzazione di un punto di saldatura con diametro maggiore o uguale ad un dato valore.

6.4.1 PROVE DI TRAZIONE

I 5 provini non sottoposti a corrosione sono stati sottoposti a prova di trazione con velocità di spostamento della traversa costante e pari a 6mm/min , anche per le altre prove la velocità impostata è stata la stessa. Di seguito il grafico 6.4.4 mostra il comportamento a trazione dei provini trazionati.



Grafico 6.4.4 : valori di resistenza a trazione di provini DP600-Al5182 saldati con impiego di interlayer gt-cr40

I valori risultanti delle prove di trazione vanno da 2 kN ai 6,07 kN del 5° campione, i risultati non sono molto ripetibili. Sono stati analizzati i bottoni di saldatura dopo le prove di trazione, le rotture che hanno sempre interessato il lato dell'alluminio presentano un bottone di saldatura impresso sulla lamina di gt cr 40 differente.

I campioni 3 e 4 che hanno fatto registrare valori di resistenza più bassa hanno un bottone di saldatura non regolare con presenza di porosità, i campioni 1,2 e 5 che fanno registrare valori più alti di resistenza presentano un bottone di saldatura regolare . Le immagini in figura 6.4.5 acquisite alle stereomicroscopio Leica mostrano i 2 tipi di rottura dopo la prova di trazione;

la figura (a) rappresenta il campione 3, è facile vedere la presenza di zone porose, in figura (b) è rappresentato il campione 5, il bottone di saldatura è regolare ed è possibile vedere la porzione circonferenziale dove è avvenuta una rottura fragile ed il cuore dove è avvenuta una rottura duttile.



Figura 6.4.5 : ingrandimento dei bottoni di saldatura dopo prova di trazione

6.4.2 PROVINI CORROSI

In figura 6.4.6 è possibile vedere i provini corrosi prima e dopo le prove di trazione, la rottura avviene sempre dalla parte dell'alluminio, i bottoni si saldatura risultano regolari, per il 3 campione la rottura del bottone di saldatura sullo spessore della lamiera di alluminio è parziale, una parte di sezione del punto di saldatura continua a snervarsi e in questo caso la prova viene interrotta prima della completa rottura del punto di saldatura.



Figura 6.4.6: Provini con impiego di interlayer gt cr 40 corrosi e trazionati

Il grafico 6.4.7 seguente mostra il comportamento a trazione dei 5 provini corrosi.

I risultati della prova non sono molto ripetibili, i valori di forza registrata vanno dai 3.8 kN del secondo campione ai 5.8 kN del 5° campione.



Grafico 6.4.7 : prove di trazione per provini Dp600-Al5182 saldati con Interlayer GT-CR40 e corrosi per 21 giorni

La tabella 6.4.8 riporta una sintesi dei risultati ottenuti sia analizzando campioni non sottoposti a prova di corrosione e campioni corrosi.

saldat	gt-cr 40			
campio	ni corrosi	campioni non corrosi		
campione n°	Forza max [kN]	campione n°	Forza max [kN]	
	1 4,719	1	5,652	
	2 3,839	2	5,204	
	3 4,417	3	2,003	
	4 3,783	4	2,095	
	5 5,744	5	6,119	
carico medio [kN	N] 4,500	carico medio [kN]	4,215	
dev. St	0,799	dev. St	2,003	

Tabella 6.4.8 : confronto tra valori di resistenza a trazione per provini DP600-Al5182 –GT CR40 corrosi e non

In questo caso il fenomeno della corrosione e della permanenza dei campioni in soluzione per 21 giorni ha migliorato i risultati delle prove, si registrano valori medi di resistenza a trazione maggiori e deviazione standard inferiore per i campioni corrosi, ciò potrebbe derivare da un'attività di solubilizzazione di particelle di Mg_2Al_3 indisciolte che sono precipitate in seguito alla permanenza prolungata dei campioni a temperatura ambiente.

La tabella 6.4.9 che segue indica le date di saldatura, di inizio e fine immersione nella soluzione salata e la data di trazione dei provini, la voce differenza giorni indica il tempo che è trascorso dalla data di saldatura dei provini a quella di trazione. L'intervallo di tempo tra il giorno della saldatura ed il giorno della prova di trazione è stato il medesimo per i campioni corrosi e non.

PROVINI TIPO	DATA DI	DATA DI INIZIO	DATA DI FINE	DATA DI	DIFFERENZA
	SALDATURA	IMMERSIONE	IMMERSIONE	TRAZIONE	IN GIORNI
GT-CR40 NON CORR.	20/03/18	/	/	17/04/18	27
GT-CR40 CORROSI	20/03/18	28/03/18	16/04/18	17/04/18	27

Tabella 6.4.9: intervalli temporali delle analisi svolte sui provini saldati con GT-CR40

6.4.3 ANALISI MICROGRAFICHE

Sono state realizzate delle analisi micrografiche al fine di valutare la conformazione della microstruttura dei materiali saldati (figura 6.4.9).

È interessante vedere come lo strato di alluminio della lamina di GT CR40 abbia uno spessore molto maggiore rispetto alla lamina di feran. Nei dintorni del punto di saldatura lo strato di alluminio del GT CR40 tende a separarsi dall'acciaio per andare a saldarsi con l'alluminio 5182.



Figura 6.4.9 Sezione del punto di saldatura tra dp 600 e 5182 con utilizzo di interlayer GT CR40

L'ingrandimento della zona saldata mostra la completa saldatura tra la lamiera di acciaio dp600 e lo strato di acciaio della lamina di Gt CR40, il nocciolo di saldatura formato è omogeneo e presenta alcune cricche centrali , sono presenti anche alcune discontinuità . La lamina di alluminio 5182 saldata sullo strato di interlayer in alluminio presenta molte porosità che si sono originate durante la saldatura, nella zona centrale del punto di saldatura lo strato di alluminio è quasi assente. Nella zona indicata in figura 6.4.10 le 2 lamine di alluminio si sono saldate completamente .



Figura 6.4.10 : ingrandimento della zona di saldatura

6.4.4 PROVE DI DUREZZA

Sul provino inglobato è stata realizzata una cucitura di durezza al fine di valutare la durezza lungo la direzione di cucitura . Il grafico 6.4.11 mostra l'andamento delle durezze rilevate al durometro. Il passo impostato è pari a 0,5 mm mentre il carico è pari ad 1 kg.



Grafico 6.4.11.: andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura

12,0

199



Figura 6.4.12: direzione della cucitura di durezza ,coppia DP600-Al5182 GT CR40

Analizzando i valori di durezza ottenuti si registrano valori di circa 90 HV1 per l'alluminio 5182, avvicinandosi alla zona termicamente alterata i valori dal lato alluminio si innalzano fino a 148 HV1, il cuore del nocciolo di saldatura fa registrare valori intorno ai 130 HV1. Nei pressi della ZTA dell'acciaio i valori si innalzano considerevolmente fino 380, proseguendo, il materiale base DP 600 misura circa 200HV.

In figura 6.4.12 è visibile l'ingrandimento allo stereomicroscopio della cucitura realizzata.

6.5 Saldatura RSW tra DP600 e 5182 mediante cover plate

Le lamine di dimensioni 30 x 100mm vengono saldate interponendo al di sopra della lamina d'alluminio una lamina 30mm x 30mm di DP600 dello spessore di 1,5 mm, per Al 5182 lo spessore rimane di 1,6mm e 1,5mm per DP600, vengono usati elettrodi uguali a punta arrotondata con diametro da 6 mm. Sono state effettuate diverse saldature al fine di trovare i parametri ottimali, la saldatura prevede un unico impulso. In figura 6.5.1 è possibile vedere i diversi bottoni di saldatura in funzione dei vari parametri adottati, è interessante vedere come aumentando il valore della corrente aumenta di conseguenza il diametro del bottone di saldatura , è stato verificato che per valori superiori ai 17kA si ha perforazione delle lamiere oppure frattura parziale del bottone di saldatura , abbassando la corrente fino a 13 kA il bottone di saldatura risulta molto più regolare .



Figura 7.5.1: Varie prove di saldatura di Dp600-Al5182 C.P. con parametri diversi

Per l'esecuzione della saldatura sono stati utilizzati parametri diversi , di seguito in tabella 7.5.2 sono elencati i parametri di saldatura nominali utilizzati, la riga evidenziata in verde indica i parametri ottimali.

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA		
	campioni	Forza[kg]	Tempo[s]	Corrente [A]
DP600 - 5182	30 x 100	238	0.27	17000
		238	0.3	17000
		238	0.3	13000

Tabella 6.5.2 : prove di saldatura con metodo cover plate, parametri ottimali

Nel grafico 6.5.3 è riportato l'andamento reale dei parametri di saldatura riportati sul controller della saldatrice durante l'impulso di durata 300ms. La tensione tra i due elettrodi raggiunge valori di circa 2,2 V mentre la corrente ha un picco di 13,9V.



Grafico 6.5.3 : curva dei parametri di saldatura in tempo reale con elettrodi diseguali, coppia DP600-Al5182, metodo cover plate

La tabella 6.4.9 che segue indica le date di saldatura, di inizio e fine immersione nella soluzione salata e la data di trazione dei provini, la voce differenza giorni indica il tempo che è trascorso dalla data di saldatura dei provini a quella di trazione. L'intervallo di tempo tra il giorno della saldatura ed il giorno della prova di trazione è stato leggermente diverso, per i campioni non corrosi c'è stato un invecchiamento di 35 giorni, per quelli corrosi di 7 giorni.

PROVINI TIPO	DATA DI	DATA DI INIZIO	DATA DI FINE	DATA DI	DIFFERENZA
	SALDATURA	IMMERSIONE	IMMERSIONE	TRAZIONE	IN GIORNI
Cover plate NON CORR.	14/03/18	/	/	19/04/18	35
Cover plate CORROSI	20/03/18	28/03/18	16/04/18	18/04/18	27

Tabella 6.5.3: intervalli temporali delle analisi svolte sui provini saldati con cover plate, coppia DP600-Al5182

6.5.1 PROVE DI TRAZIONE

Per quanto riguarda la metologia cover plate sono stati posti a prova di trazione 10 provini dei quali i primi 6 sottoposti a corrosione in acqua salina per 3 settimane, gli ultimi 4 non corrosi.

Di seguito , in figura 6.5.4 sono presenti i 10 campioni rotti durante le prove e i 2 grafici indicano i valori di resistenza a trazione dei provini .



Figura 6.5.4 : provini DP600-Al5182 saldati mediante cover plate dopo prova di trazione



Grafico 6.5.5: Prova di trazione per campioni DP600-Al5182 saldati con Cover plate e corrosi



Grafico 6.5.6: Prova di trazione per campioni saldati con Cover plate non corrosi

Il grafico 6.5.5 mostra l'andamento del carico per la prova di trazione di provini DP600-Al5182 saldati non metodo cover plate e sottoposti a prova di corrosione per 3 settimane.

Il grafico 6.5.6 mostra il comportamento a trazione dei provini non corrosi.

Da una prima analisi sui valori ottenuti in tabella 6.5.7 si evincono valori di carico medio maggiori e deviazione standard inferiore per i campioni corrosi, questi valori possono essere interpretati in modo diverso. La maggiore resistenza dei campioni corrosi potrebbe essere attribuita ad una solubilizzazione seguita da invecchiamento naturale.

saldatura tra dp600 e Al5182 con metodologia cover plate					
campio	ni corrosi	campioni no	n corrosi		
campione n°	Forza max [kl	N] campione n°	Forza max [kN]		
	1 4,5	<mark>66</mark> 7	2,567		
	2 5,1	<mark>06</mark> 8	6,888		
	3 3,7	25 9	4,478		
	4 5,3	<mark>58</mark> 10	1,891		
	5 3,3	37			
	6 5,	52			
carico medio [kl	N] 4,6	02 carico medio [kN]	3,956		
dev. St	0,8	99 dev. St	2,241		

Tabella 6.5.7: confronto tra valori di resistenza a trazione per provini corrosi e non DP600-Al5182 metodo cover plate

6.5.2 ANALISI MICROGRAFICHE

Dalle prove micrografiche effettuate è possibile vedere la conformazione del punto di saldatura nel suo piano intermedio. Rispetto alla coppia usata in precedenza dove veniva usato alluminio 6016 con spessore di 2,5 mm la saldatura è cambiata considerevolmente. Lo strato sottile di 1,6 mm di alluminio 5182 dopo la saldatura scompare completamente e fa si che le due lamine di dp600 si saldino tra di loro creando una specie di punzonatura , in figura 6.5.8 è possibile vedere la sezione del punto di saldatura .Le prove di trazione eseguite in precedenza confermano le buone caratteristiche di questo tipo di saldatura che risulta essere, per certi aspetti, migliore degli altri metodi utilizzati.



Figura 6.5.8 : foto micro del punto di saldatura con metodo cover plate DP600-Al5182

Eseguendo un ingrandimento della zona di saldatura (Figura 6.5.9) si nota la presenza nei dintorni del nocciolo di saldatura dell'alluminio che a seguito della saldatura si è fuso creando molte porosità. All'interfaccia, nella zona centrale si nota la fessura tra le 2 lamine e la completa assenza di alluminio.



Figura 6.5.9 : ingrandimento 20 x del nocciolo di saldatura

Data la particolare conformazione assunta dal punto di saldatura , con l'alluminio che sembra essere migrato dalla zona centrale sono state eseguite delle analisi al microscopio elettronico al fine di studiare al meglio la microstruttura della zona centrale. Le figure 6.5.10 e 6.5.11 mostrano come tra la lamiera superiore ed inferiore di DP600 si sia formata una linea di discontinuità dove è presente alluminio in piccolissime quantità.



Figura 6.5.10 :Immagine al microscopio elettronico a scansione (SEM) della zona di saldatura mostrata nella foto precedente



Figura 6.5.11: Immagine della mappatura dell'alluminio (evidenziato in giallo).

Le immagini a 20x del microscopio elettronico mostrano la presenza di una zona di separazione tra le 2 lamine di acciaio dove è presente alluminio intrappolato, sono presenti alcuni punti dove le 2 lamine si sono fuse tra di loro; per analizzare in maniera più dettagliata questa zona di separazione è stato eseguito un ulteriore ingrandimento in modo da capire se si sono formate fasi di intermetallici del tipo FeAl₂(figura 6.5.12).



Figura 6.5.12: ingrandimento tramite microscopio ottico della zona centrale, DP600-Al5182 CP

La freccia rossa in figura indica le zone a colorazione grigia dove effettivamente si sono formati intermetallici, nelle zone indicate dalle frecce sono presenti fratture. Le impronte in figura sono quelle lasciate dal penetratore vickers per le cuciture di durezza. Spostandoci verso la zona termicamente alterata, tramite un ingrandimento 100x è possibile vedere come la microstruttura dell'acciaio cambia notevolmente (Figura 6.5.13).



Figura 6.5.13: ingrandimento a 100x tramite microscopio ottico della ZTA dell'acciaio

6.5.3 PROVE DI DUREZZA

È stata eseguita una cucitura di durezza lungo una diagonale che percorre tutto il punto di saldatura sezionato. Il grafico 6.5.14 mostra i risultati di durezza Vickers ottenuti con carico del penetratore impostato ad un chilo e passo 0,5 mm; in figura 6.5.15 è possibile vedere l'ingrandimento della zona di cucitura eseguito tramite lo stereomicrosopio Leica.



Grafico 6.5.14 : andamento delle durezze lungo la direzione della cucitura , DP600-Al5182 CP



Figura 6.5.15 : ingrandimento allo stereomicroscopio della cucitura

HV1

X[mm]

Dai valori di durezza registrati si ottengono valori di durezza del materiale base DP600 pari a 200HV circa, la zona termicamente alterata mostra durezze dell'ordine di 420 HV, nella zona centrale l'alluminio è quasi assente ,ci sono solo alcune porosità , i valori di durezza vickers si agirano intorno ai 390 HV.

205

10

199 10,5

6.6 Saldatura RSW tra DP1000 e 6016 mediante cover plate

Le lamine di dimensioni 30 x 100mm vengono saldate interponendo al di sopra della lamina d'alluminio una lamina 30mm x 30mm di DP1000 dello spessore di 1,35 mm, per Al 5182 lo spessore rimane di 2.5 mm e 1,35mm per il DP1000 sottostante, vengono usati elettrodi uguali a punta arrotondata con diametro da 6 mm. Sono state effettuate diverse saldature al fine di trovare i parametri ottimali (tabella 6.6.1), la saldatura prevede un unico impulso.

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA		
	campioni	Forza[kg]	Tempo[s]	Corrente [A]
DP1000 - 6016	30 x 100	238	0.30	13000

Tabella 6.6.1: parametri nominali di saldatura impostati sul controller della macchina

Sono state eseguite già in precedenza prove di saldatura con questo metodo e con questa coppia [3], nel corso di questa tesi si confrontano i risultati ottenuti con il metodo cover plate variando il tipo di accoppiata acciaio-alluminio e conseguentemente gli spessori delle lamiere saldate.

6.6.1 PROVE DI TRAZIONE

I valori ottenuti dalle prove precedenti questa tesi dai 5 campioni non corrosi sono riportati nel grafico 6.6.2 sottostante.



Grafico 6.6.2 : valori di resistenza a trazione per saldatura cover plate tra DP1000-6016 (tesi di Concetto Guarino: Saldatura a resistenza elettrica a punti tra acciaio e leghe di alluminio).

metodologia cover plate						
DP600)-Al5182	DP1000-Al6016				
campione n°	Forza max [kN]	campione n°	Forza max [kN]			
	1 4,566	1	5,46			
:	2 5,106	2	5,05			
:	3 3,725	3	3,18			
	4 5,358	4	7,33			
	5 3,337	5	7,09			
	6 5,52	6	5,62			
carico medio [kN]	4,602	carico medio [kN]	5,622			
dev. St	0,899	dev. St	1,509			

Tabella 6.6.3: confronto di valori di resistenza a trazione tra 2 accoppiate diverse

In tabella 6.6.3 è possibile vedere un confronto tra 5 campioni DP600-5182 e 5 del tipo DP1000-6016, i valori di resistenza a trazione ottenuti sono leggermente diversi.

I valori medi di resistenza ottenuti dall'accoppiata DP600-5182 sono inferiori con deviazione standard tra i campioni inferiore; il valore medio del carico risulta 1kN inferiore rispetto al valore ottenuto con la vecchia accoppiata.

Come già detto dopo l'analisi micrografica, la saldatura con DP600 ha una morfologia differente nei pressi del punto di saldatura, in questa zona l'alluminio è migrato a causa del suo strato sottile e ha permesso la saldatura tra le due lamine di DP600.

Le prove di durezza eseguite mostrano sostanziali differenze tra i punti di saldatura , la zona centrale del punto di saldatura tra DP600 e 5182 con metodologia cover plate raggiunge valori di durezza minima di 390HV; l'accoppiata DP1000-6016 mostra valori di durezza nella zona centrale del punto di saldatura molto inferiori e pari a 65 HV (è possibile vedere nel paragrafo successivo i valori), questo è dovuto alla presenza dell'alluminio 6016 che avendo uno spessore di 2,5 mm non permette alle 2 lamine contrapposte di DP1000 di saldarsi tra loro come invece succede per il DP600.

I valori presi come riferimento si riferiscono ai campioni non sottoposti a corrosione.

6.6.2 PROVE MICROGRAFICHE

Il provino lucidato ed attaccato con l'acido viene analizzato al microscopio, le immagini rilevate mostrano questo tipo di saldatura come una struttura a sandwich dove agli estremi è presente l'acciaio DP1000 ed al centro è presente l'alluminio 6016 (figura6.6.4). Dalla foto sono evidenti le superfici di separazione tra le lamine di acciaio e quella di alluminio, è evidente la presenza della zona termicamente alterata dell'acciaio



Figura 6.6.4 : sezione di un punto di saldatura tra DP1000-6016 con metodologia cover plate

In figura 6.6.5 è visibile un ingrandimento della zona di saldatura, la zona centrale dell'alluminio è interessata da numerose porosità, è presente anche uno strato di intermetallici all'interfaccia alluminio acciaio. La freccia in figura indica la presenza di una porosità formatesi agli estremi del punto di saldatura.



Figura 6.6.5: ingrandimento del nocciolo di saldatura , DP1000-Al6016 cover plate

6.6.3 PROVE DI DUREZZA

Sono state eseguite delle prove di durezza con passo di cucitura pari a 0,5 mm e carico del penetratore di 1kg. L'andamento dei valori di durezza è mostrato nel grafico 6.6.7





Grafico 6.6.7 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura



Figura 6.6.8 : ingrandimento allo stereomicroscopio della cucitura di durezza, DP1000-Al6016 CP

Dai valori ottenuti si registrano valori di durezza media del materiale base DP1000 pari a 360 HV, rispetto al DP600 usato per le precedenti prove questo tipo di acciaio è più duro.

Proseguendo verso il centro del punto di saldatura si registrano valori che raggiungono i 440 HV nei pressi della ZTA, l'innalzamento dei valori di durezza è determinato dalla presenza di martensite che si è formata dopo il processo di fusione dell'acciaio. Nella zona centrale dove è presente l'alluminio i valori decrescono considerevolmente fino ad arrivare a 63 HV di durezza minima, la misura della durezza in questa zona è stata difficoltosa a causa delle numerose porosità presenti. La figura 6.6.8 mostra l'ingrandimento del campione sottoposto a cucitura.
6.7 Saldatura RSW tra DP1000 e 6016 con interlayer Feran

Le lamine di dimensioni 30 x 100mm opportunamente sagomate tramite taglio con troncatrice vengono pulite e lucidate, lo spessore è di 2.5 mm per Al 6016 e 1,5mm per DP1000, viene interposta la lamina 30 x 30mm di feran tra alluminio e acciaio ed eseguita la saldatura con la saldatrice matuschek adottando i parametri mostrati in tabella 6.7.1

Materiale	Dimensioni	PARAMETRI DI SALDATURA				
	campioni	Forza[kg]	Tempo[s]	Corrente [A]		
DP1000 - 6016	30 x 100	270	0.30	17000		

Tabella 6.7.1: parametri nominali di saldatura impostati sul controller della macchina

Sono state eseguite già in precedenza prove di saldatura [3] con questo metodo e con la configurazione DP1000-Al6016, nel corso di questa tesi si analizzano i risultati ottenuti sottoponendo i campioni a prova di corrosione per 3 settimane.

6.7.1 PROVE DI TRAZIONE

I valori ottenuti dalle prove precedenti questa tesi dai 5 campioni non corrosi sono riportati nel grafico 6.7.2 sottostante.



Grafico 6.7.2 : curve di trazione per saldatura con interlayer Feran tra DP1000-6016 (Tesi di Guarino Concetto: Saldatura a resistenza elettrica a punti)

Sono stati sottoposti a trazione 4 campioni saldati con l'utilizzo di feran dopo le prove di corrosione. Di seguito, in figura 6.7.3 sono visibili i provini corrosi prima e dopo le prove di trazione mentre il grafico 6.7.4 riporta l'andamento delle 4 curve di trazione.



Figura 6.7.3 : campioni di DP1000- Al6016- Feran corrosi, prima e dopo le prove di trazione



Grafico 6.7.4: curve di trazione per 4 campioni DP1000-Al6016 /Feran corrosi

Osservando i provini corrosi è possibile vedere la forte corrosione dell'acciaio DP1000 soprattutto lungo la zona del punto di saldatura, è presente sulle lamine di alluminio un deposito di zinco.

Le rotture avvengono sempre dalla parte dell'alluminio e hanno un comportamento molto simile, un tratto elastico iniziale ed una rottura fragile, i valori non sono molto ripetibili. Segue in tabella 6.7.5 una sintesi dei valori di resistenza ottenuti dai campioni sottoposti a corrosione ed un confronto con i valori dei campioni non corrosi (prove precedenti, tesi di Guarino).

saldatura tra dp1000 e Al6016 con interlayer feran								
campioni corrosi (2	L7 [kA]) saldati il							
20/03/2018, tira	ati il 28/05/18	campioni non cor	rosi (15[kA]) [3]					
campione n°	Forza max [kN]	campione n°	Forza max [kN]					
1	7,367	1	3,8					
2	6,33	2	4,9					
3	7,643	3	3,6					
4	5,085	4	3,7					
Immersi in soluzione	8/05/18							
tirati dalla soluzione	28/05/18	5	3,5					
Periodo di	68 giorni							
invecchiamento								
carico medio [kN]	6,60625	carico medio [kN]	3,9					
dev. St	1,161	dev. St	0,570					

Tabella 6.7.5: sintesi dei valori di resistenza a trazione per DP1000-Al6016/Feran

Nel corso di questo paragrafo è stata analizzata l'accoppiata DP1000-Al6016 con utilizzo di interlayer feran; le precedenti prove facevano uso di una corrente di saldatura di 15kA e non sottoponevano i campioni a corrosione, la forza di chiusura degli elettrodi era di 2500N. Il valore del carico medio risultante era di 3,9 kN con una deviazione standard di 0,570 tra i valori dei 5 campioni. Nel corso di questa tesi è stato analizzato il comportamento a corrosione e sono stati modificati i parametri di saldatura, in particolare la corrente è passata da 15kA a 17 kA e la forza di chiusura è stata incrementata di 200N; i valori delle prove di trazione sono migliorati con un carico medio registrato che passa dai 3,9 kN ai 6,60 kN.

Le ragioni di un miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei campioni saldati potrebbero derivare, oltre che da un miglioramento dei punti di saldatura, anche da un invecchiamento dell'alluminio lega 6000 impiegato, la permanenza per un tempo di 68 giorni (arco di tempo dal giorno della saldatura al giorno della prova di trazione) a temperatura ambiente è un trattamento termico usato molto per gli allumini 6000 e viene chiamato T4. Il trattamento T4 migliora la solubilità degli elementi presenti nel materiale.

6.8 SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI

1- PROVE DI TRAZIONE

Effettuate tutte le prove segue una sintesi dei risultati ottenuti con le varie metodologie di saldatura , in tabella 6.8.1 è presente un resoconto dei valori di resistenza a trazione ottenuti.

accoppiata dp600 5182								
	no corrosione	corrosione		val medi				
metodologia	interlay	interlayer feran						
carico medio [kN]	4,70	3,44	L	4,07				
metodologia	interlaye	r GT-CR40						
carico medio [kN]	4,22		4,50	L	4,36			
metodologia	cover plate							
carico medio [kN]	3.956		4.60	L	4,28			

Tabella 6.8.1: sintesi dei valori di resistenza a trazione ottenuti con saldatura RSW.

2-PROVE DI DUREZZA

In tabella 6.8.2 sono riportati i valori medi di durezza Vickers HV1 misurati lungo la direzione di cucitura sul materiale base e tenendo conto della zona termicamente alterata (HAZ) dell'acciaio dual phase . L'accoppiata di saldatura è DP600-Al5182.

Metodo	Materiale base 1:	Durezza zona fusa	Materiale base 2: Al	
	DP600		5182	
Interl. feran	206	421	90	
Interl.GT CR40	204	380	88	
Cover plate	203	407	\	

Tabella 6.8.2 : sintesi dei valori di durezza Vickers misurati per DP600-Al5182

In tabella 6.8.3 sono riportati i valori di durezza misurati per la vecchia accoppiata DP1000-Al6016.

metodo	Materiale base 1: DP1000	Durezza zona fusa	Materiale base 2: Al 6016
Cover plate	326	450	68

Tabella 6.8.3 : sintesi dei valori di durezza Vickers misurati per DP1000-Al6016

Osservando i valori di durezza sintetizzati nelle tabelle precedenti possiamo constatare che l'acciaio DP1000 è duro circa 130 HV in più rispetto al DP600. Riguardo l'alluminio la lega 5182 è più dura di circa 20 punti HV rispetto alla lega Al 6016.

7. SALDATURA AD ARCO, RISULTATI

Per la saldatura ad arco tra alluminio ed acciaio viene interposto il giunto ibrido , le dimensioni della lamiera di alluminio 6016 e acciaio DP1000 sono 200mm x 100mm, l'allineamento dei lembi retti chiusi avviene lungo il lato più lungo da 200mm. Le lamiere verranno saldate al giunto ibrido saldato per esplosione (figura 7.1 a) oppure al giunto saldato per colaminazione (figura 7.1 b).



Figura 7.1 : saldatura ad arco tra DP1000 e Al 6016 con l'utilizzo di giunti ibridi

Nel corso delle precedenti tesi svolte sull'argomento si sono riscontrati problemi riguardo la traiettoria percorsa dall'arco elettrico durante la saldatura, nonostante il fissaggio con le pinze delle lamiere, l'elevato calore sprigionato dalla saldatura tende a far curvare le lamiere e a far spostare i lembi da saldare dalla posizione originaria. Si ha per questo motivo una non corretta saldatura lungo la parte inferiore delle lamiere, soprattutto nella zona centrale.

Sono state adottate 3 varianti al fine di migliorare la qualità della saldatura rispetto alle precedenti prove , le 3 varianti sono :

 Variazione dei parametri di saldatura tra i quali : corrente di saldatura, tensione e velocità di avanzamento del filo in modo da migliorare il quantitativo di materiale d'apporto e le dimensioni del cordone di saldatura[10];

- 2. Materiale d'apporto, il filler è stato sostituito con uno completamente nuovo, sigillato e completamente isolato dall'ossigeno e dall'umidità;
- 3. Utilizzo di spessori di 0,75 mm di acciaio da disporre sotto le lamiere da saldare in modo da rialzarle e permettere una migliore penetrazione del materiale d'apporto ed una migliore smaltimento del calore generato con una conseguente minore curvatura delle lamiere, questa operazione è indicata soprattutto per la saldatura del lato alluminio dove la resistenza a trazione delle lamiere saldate è inferiore a quella del lato acciaio. In figura 7.2 è schematizzato il processo di saldatura, in rosso è rappresentato l'acciaio dual phase già saldato con il giunto ibrido, in blu le due parti di alluminio in fase di saldatura. La saldatura effettuata in precedenza dal lato acciaio non presenta problemi di deviazione della traiettoria del cordone di saldatura e di penetrazione del materiale d'apporto, in quel caso lo smaltimento del calore è necessario che sia lento e graduale in moto da avere ZTA non troppo dure e fragili.





Le nuove prove utilizzano la stessa coppia DP1000 – 6016 sia con l'utilizzo di giunti ibridi saldati per esplosione che per colaminazione, in questa tesi verrà analizzata anche la resistenza a corrosione dei giunti , 5 campioni saldati con giunto ibrido esploso e 5 saldati con giunto ibrido colaminato vengono immessi in acqua salata per 3 settimane e trazionati in modo da confrontare i risultati con quelli dei campioni non sottoposti a corrosione.

PARAMETRI DI SALDATURA

Durante la saldatura i vari parametri della curva impostati mediante l'unità di controllo variano continuamente, la tecnica CMT adottata dalla saldatrice varia i parametri in funzione della geometria del cordone di saldatura e della natura dei materiali, i valori reali quindi si discostano da quelli impostati, alla fine del processo è possibile risalire ai valori medi assunti dalla saldatrice durante l'intero processo e confrontarli con quelli impostati. In tabella 7.3 sono presenti i vari valori torici e reali rilevati durante la saldatura e la velocità di avanzamento del filo d'apporto. Il diametro dei 2 tipi di filler è pari ad 1,2 mm.

accoppiamento	materiale	Tensior	ne [V]	Correr	nte [A]	Velocità av.	Avanz. filo
		Teor.	Reale	Impost Reale		Rob. [mm\min]	[m/min]
Dp1000-6016	Acciaio	14.9	15.7	120	112	460	3.2
Giunto esploso							
	alluminio	12.3	12.4	118	115	400	6
Dp 1000-6016	Acciaio	14.9	17.2	120	117	460	3.2
Giunto esploso							
Per prove	alluminio	12.3	13.2	118	116	400	6
corrosione							
Dp1000-6016	Acciaio	14.9	15.5	120	117	460	3.2
Giunto							
colaminato	alluminio	12.3	12	118	117	400	6
Dp1000-6016	Acciaio	14.9	16	120	117	460	3.2
Giunto							
colaminato	alluminio	12.3	12.1	118	117	400	6
Per prove di corr.							

Tabella 7.3: parametri di saldatura impostati e valori reali rilevati

Un altro parametro che è stato considerato è la distanza tra la torcia ed il pezzo da saldare (steak out), il valore impostato va da 15mm a 18mm. Le lamiere saldate vengono tagliate tramite la macchina water jet bar a controllo numerico BELOTTI MKN 1612, tramite un controller vengono impostate le cordinate degli assi e il conseguente movimento della testa dalla quale esce un getto d'acqua pressurizzata a 4000 bar, il programma impostato permette di tagliare con precisione 5 campioni larghi 25 mm che saranno sottoposti a prova di trazione . Durante le prime prove di trazione si sono riscontrati problemi di afferraggio da parte dei cunei della macchina con un conseguente strisciamento dei provini, per incrementare l'attrito sono state sabbiate le estremità dei provini tramite la sabbiatrice.

7.1 GIUNTO IBRIDO SALDATO AD ESPLOSIONE

Sono stati trazionati 10 campioni , dei quali 5 non corrosi e 5 sottoposti a corrosione . Si può subito constatare per entrambi i casi che i valori maggiori di resistenza a trazione si registrano per i campioni 1 e 5 che sono stati tagliati dai bordi delle lamiere saldate, ai bordi la curvatura delle lamiere è ridotta durante la saldatura e l'arco riesce a saldare in maniera ottimale con una penetrazione completa della saldatura.

In figura 7.1.1 è possibile vedere i provini prima e dopo la rottura e delle immagini dettagliate acquisite allo stereomicroscopio Leica CH 9435 della zona dell'alluminio interessata dalla rottura (figure c e d). Nella figura C si può notare la presenza di porosità dovute all'attività di ossidazione dell'alluminio nella zona dei lembi saldati. La figura D illustra la rottura di tipo fragile dell'alluminio del giunto saldato per esplosione.

Dei campioni trazionati solo il campione 1E ha subito una rottura nei pressi della zona dell'alluminio del giunto ibrido, tutti gli altri campioni si sono rotti lungo il cordone di saldatura dell'alluminio.



Figura 7.1.1: provini DP1000-Al6016–giunto esploso prima e dopo la rottura

Dal grafico 7.1.2 è possibile constatare il comportamento a trazione dei 5 campioni rotti, il valore di resistenza medio è risultato pari a 7,265kN, la deviazione standard è risultata pari a 1,669. La rottura del campione 1 nella zona dell'alluminio serie 3000 del giunto ibrido dimostra la minore resistenza della lega 3000 rispetto alla lega 6000 e la buona resistenza del cordone saldato.



Grafico 7.1.2: trazione su campioni DP1000-Al6016 saldati ad arco con giunto esploso non corrosi

7.1.1 ANALISI SULLA CORROSIONE

È stato analizzato il comportamento a corrosione dei giunti ibridi, la figura 7.1.3 mostra l'aspetto dei campioni dopo la permanenza in acqua salata per 3 settimane; dalla foto è possibile notare l'intaccamento dell'acciaio. Dopo il lavaggio con acqua distillata e con alcool etilico i campioni sono stati sottoposti alle prove di trazione.



Figura 7.1.3 : campioni DP1000-Al6016 saldati ad arco con giunto esploso e colaminato sottoposti a prova di corrosione per 21 giorni

In figura 7.1.4 è presente un ingrandimento del cordone di saldatura del lato acciaio, la corrosione ha interessato soprattutto la lamina di acciaio Dual phase.



Figura 7.1.4 : corrosione su cordone di saldatura tra AISI1008 e DP1000, prova fotografica dopo il 21° giorno di corrosione

Per quanto riguarda la zona di giunzione tra acciaio e alluminio in figura 7.1.5 è presente un ingrandimento della zona di saldatura, è facile notare la corrosione dell'acciaio AISI1008 mentre il titanio non è stato intaccato dalla reazione grazie alle sue buone caratteristiche di resistenza a corrosione.



Figura 7.1.5 : corrosione sulla zona di saldatura tra alluminio acciaio dove è presente il titanio

Possiamo concludere dicendo che la corrosione dopo 21 giorni ha interessato solo l'acciaio soprattutto nella zona del cordone di saldatura, nei pressi dell'interlayer di titanio, osservando le lamine di alluminio non si registrano casi di corrosione ma si ha solo il deposito sulla superficie delle lamine di zinco. I valori ottenuti dalle prove di trazione sono abbastanza vicini tra campioni corrosi e non; dando uno sguardo alle tabelle successive si hanno addirittura valori medi più elevati per i campioni corrosi.



Grafico 7.1.6: : trazione su campioni DP1000-Al6016 saldati ad arco con giunto esploso corrosi in acqua salata al 3,5% per 3 settimane

Il grafico 7.1.6 mostra il comportamento a trazione dei 5 provini corrosi in acqua salata al 3,5% e sottoposti a prova di trazione.

Confrontando i valori di resistenza a trazione ottenuti dai campioni corrosi non si hanno significative differenze rispetto a quelli non corrosi. In figura 7.1.7 sono presenti i campioni rotti dopo la prova di trazione, anche in questo caso la rottura si è registrata sempre nella zona dell'alluminio 3003, in prossimità del cordone di saldatura dell'alluminio.



Figura 7.1.7: campioni DP1000- giunto esploso-AL6016 – corrosi rotti dopo la prova di trazione

7.1.2 ANALISI MICROGRAFICA

Tramite il microscopio ottico sono stati analizzate le sezioni trasversali dei cordoni di saldatura del lato acciaio e del lato alluminio, per fare ciò sono stati inglobati dei campioni per poi essere lucidati ed attaccati con acido opportuno.

Saldatura lato AISI1008-DP1000

Per la saldatura dal lato acciaio è stato effettuato un attacco con Nital al 3%, in figura 7.1.8 è visibile una sezione ingrandita del cordone di saldatura. In figura è interessante vedere la differenza di spessore tra la lamina di DP1000 e il giunto ibrido che misura 2,8 mm, il materiale

d'apporto penetra completamente lo spessore delle 2 lamine di acciaio disposte testa contro testa con lembi retti aperti fuoriuscendo dalla parte opposta.

La fusione del materiale d'apporto che unisce i 2 materiali è completa ed è abbastanza regolare, all'interfaccia con l'aisi 1008 si vedono alcuni difetti mentre la saldatura del DP1000 appare esente da difetti.



Figura 7.1.8: saldatura MAG tra AISI 1008 e DP1000

Osservando le microstrutture dei 2 acciai si nota che avvicinandosi al cordone di saldatura la microstruttura cambia a causa della trasformazione martensitica che si è verificata. In particolare l'acciaio AISI 1008 lontano dal cordone di saldatura presenta una struttura con grani di ferrite e perlite finemente dispersi nella matrice metallica, avvicinandosi alla zona termicamente alterata si ha diffusione del carbonio e presenza di bainite. Anche la struttura del DP1000 appare modificata, è facile notare la ZTA interessata dalla trasformazione martensitica

In genere per questo tipo di acciai la ZTA è suddivisa in 3 zone che dipendono dalla temperatura massima raggiunta durante il processo di saldatura, si ha quindi:

- 1. Zona a grano ingrossato, corrisponde alla zona dove si raggiungono le temperature più elevate, in genere più di 1100 C°;
- 2. Zona a grano affinato dove sé avvenuta una ricristallizzazione, in genere le temperature raggiunte in questa zona si aggirano intorno ai 900°C;
- 3. Zona di austenitizzazione parziale, in questa zona non si è raggiunta una temperatura tale da permettere la trasformazione completa del materiale base in austenite, in genere per questa zona non si superano gli 800 C° di temperatura massima.

Saldatura lato alluminio 3003- 6016

Per quanto riguarda il lato dell'alluminio è stato inglobato il campione, lucidato e successivamente attaccato con Keller, in figura 7.1.9 è visibile la sezione ingrandita.



Figura 7.1.9: saldatura MIG tra alluminio lega 3003 e 6016

Le due lamiere con lembi retti aperti saldate a testa hanno spessore simile, il giunto ibrido è spesso 2,8 mm mentre l'alluminio 6016 2,5 mm.

L'ingrandimento del cordone saldato mostra la conformazione della saldatura, in particolare è visibile il materiale d'apporto che compenetra tra i 2 lembi, durante la saldatura l'AlSi12 penetra completamente le 2 lamiere di alluminio permettendo la saldatura delle 2 lamine.

Il materiale d'apporto presenta numerose porosità, ciò è riconducibile alla presenza di gas intrappolati che vengono rilasciati dopo la fusione, le porosità possono originarsi anche per la presenza nel cordone di agenti contaminanti, nel complesso la saldatura da noi eseguita è accettabile, l'interfaccia tra l'alluminio 3003 e alluminio 6016 con il materiale d'apporto risulta abbastanza regolare ed esente da cricche. In figura 7.1.10 è visibile il cordone di saldatura ottenuto da prove precedenti questa tesi [2], è interessante vedere come il numero di porosità sia maggiore rispetto alla nuova saldatura, il diametro medio dei pori risulta comunque più piccolo, la variazione delle caratteristiche del cordone saldato potrebbe essere dipesa proprio dalla sostituzione del filler del materiale d'apporto, il filler vecchio, essendo sottoposto per molto tempo all'attività di ossidazione può essere stato una delle cause della presenza di numerose porosità del cordone; la causa principale della formazione di porosità è proprio l'assorbimento d'azoto, ossigeno e idrogeno nel bagno di fusione.

Elettrodi non opportunamente conservati potrebbero contenere umidità ed un conseguente quantitativo di idrogeno che potrebbe causare la generazione di porosità, l'idrogeno in seguito alla solidificazione del metallo potrebbe rimanere intrappolato nel metallo saldato.

Oltre al ruolo importante degli elettrodi è bene considerare il gas di protezione, l'inclusione anche minima dell'aria nella zona da saldare comporta la presenza di ossigeno ed azoto che potrebbero far parte nella reazione, entrambi sono causa dell'origine di porosità.

Un altro aspetto da non trascurare è l'aspetto esteriore delle superfici da saldare, la presenza di olii , vernici o altre sostanze potrebbe compromettere la riuscita di una buona saldatura [1].



Figura 7.1.10: saldatura MIG effettuata in precedenza tra alluminio lega 3003 e 6016

7.1.3 PROVE DI MICRODUREZZA

Dopo l'esecuzione delle prove micrografiche i campioni inglobati sono stati utilizzati per effettuare delle cuciture di durezza lungo la zona della saldatura, è stato utilizzato un durometro vickers con carico del penetratore di 1 kg e lente con ingrandimento maggiore per la misura dell'acciaio e carico di 0,1kg con lente ad ingrandimento minore per la misura dell'alluminio, il passo di cucitura è stato impostato pari a 0,5 mm.

La disposizione a testa delle lamiere permette di eseguire una cucitura con direzione parallela al piano longitudinale delle lamiere, di seguito sono riportati i valori rilevati, la minore durezza dell'alluminio e la maggiore dimensione delle impronte richiedono ottiche con ingrandimenti minori.

Saldatura lato AISI1008-DP1000

È stata eseguita una cucitura di durezza HV1 al fine di misurare i valori di durezza lungo la direzione indicata in figura , lo scopo della prova è quello di rilevare la durezza dei 2 materiali base e confrontarla con quella del cordone di saldatura dove è presente la zona termicamente alterata. I valori ottenuti sono riportati nel grafico 7.1.11 sottostante .



Grafico 7.1.11 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura



Figura 7.1.12 : ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura

Dai valori di durezza ottenuti risulta una durezza del materiale base D1000 che si aggira intorno ai 350 HV, l'acciaio AISI 1008 è duro circa 150 HV. La zona termicamente alterata del lato DP1000 assume valori di durezza che arrivano fino a 450 HV , proseguendo verso destra i valori decrescono ,la zona del cordone di saldatura misura 250 HV, infine la ZTA del lato Aisi 1008 raggiunge valori di durezza pari a 260 HV. In figura 7.1.12 è visibile la cucitura.

Soprattutto per gli acciai le cuciture di durezza hanno come scopo quello di studiare nel dettaglio la ZTA, saldature con elevato apporto di calore e velocità elevate di raffreddamento portano alla formazione di martensite nei dintorni del cordone di saldatura; rilevare valori di durezza molto più elevati del materiale base vuol dire avere zone ad elevata durezza ma fortemente tensionate e tali strutture potrebbero essere maggiormente soggette a casi di rottura fragile del metallo.

Saldatura lato alluminio 3003- 6016

È stata eseguita una cucitura di durezza HV 0.1 al fine di misurare i valori di durezza lungo la direzione indicata in figura , lo scopo della prova è quello di rilevare la durezza dei 2 materiali base e quella del cordone saldato con AlSi12, i valori ottenuti sono riportati nel grafico 7.1.13 sottostante .

Il settaggio di un carico 10 volte inferiore rispetto a quello dell'acciaio è dovuto al fatto che l'alluminio è un materiale meno duro dell'acciaio, usando un carico da 1 kg l'impronta lasciata sul materiale sarebbe troppo grande e impossibile da misurare con l'ottica a disposizione .



Grafico 7.1.13 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura



Figura 7.1.14 : ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura

Dai valori di durezza ottenuti risulta una durezza dell'alluminio 6016 che si aggira intorno ai 70 HV, l'alluminio 3003 è duro circa 38 HV . La zona del cordone di saldatura assume valori di durezza che arrivano fino ad 81 HV , e coincide con la durezza del materiale AlSi12 .

In figura 7.1.14 è visibile un ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura, è facile vedere le porosità nella zona del cordone, la presenza di una grande cavità e le impronte del penetratore a forma piramidale con base quadrata lasciate sul materiale.

7.2 GIUNTO IBRIDO SALDATO PER COLAMINAZIONE

Sono state eseguite delle prove di trazione su 10 campioni ricavati tagliando delle lamiere saldate, si ricorre all'utilizzo di un giunto ibrido alluminio acciaio saldato per colaminazione.





Figura 7.2.1 : rotture dopo prove di trazione di campioni DP1000-Al6016 – giunto colaminato saldati ad arco

Rispetto alla saldatura con giunto saldato per esplosione l'alluminio usato nel giunto di transizione in questo caso non è della lega 3003 ma è impiegata una lega 5754 con caratteristiche meccaniche maggiori. I 5 campioni posti a rottura si sono rotti tutti nello stesso punto, in figura 7.2.1 (a) e (b) è possibile vedere il campione numero 2 saldato, prima e dopo la rottura. Dalle immagini ottenute allo stereomicroscopio (figura 7.2.1(c)) dei punti di rottura si può subito notare la presenza di numerose porosità al cordone di saldatura dell'alluminio, la qualità delle saldature sul lato alluminio è nettamente inferiore rispetto al lato acciaio.Il grafico 7.2.2 riporta il comportamento a trazione dei 5 campioni, anche in questo caso il campione 5 che è stato tagliato dall'estremità della lamiera riporta valori di resistenza molto più elevati rispetto agli altri campioni.

I valori ottenuti sono simili a quelli ottenuti dai campioni saldati con l'altra metodologia di giunto ibrido con valori di forza massima che va dai 5 kN ai 9,5 kN.



Grafico 7.2.2 : comportamento a trazione dei 5 campioni DP1000-Al6016 saldati con giunto ibrido colaminato

7.2.1 PROVE DI CORROSIONE

Sono state effettuate anche delle prove di corrosione al fine di verificare il comportamento a corrosione dei campioni saldati, il grafico 7.2.3 mostra i risultati per i 5 campioni corrosi per 3 settimane in acqua salata al 3,5%.



Grafico 7.2.3 : comportamento a trazione dei 5 campioni DP1000-Al6016 saldati con giunto colaminato e sottoposti a prova di corrosione

Per quanto riguarda questo tipo di giunto saldato si ha un significativo decadimento delle proprietà meccaniche in seguito alle prove di corrosione, i valori medi della resistenza a trazione si dimezzano e non superano i 5 kN. In figura 7.2.4 sono rappresentati i campioni corrosi e rotti dopo la prova di trazione , si notano i segni dell'attività di corrosione soprattutto nei pressi del cordone di saldatura del lato acciaio, la rottura avviene sempre sul cordone di saldatura dell'alluminio, all'interfaccia con l'alluminio 6016.



Figura 7.2.4: campioni di DP1000-Al6016 saldati con giunto colaminato e corrosi, rotti dopo le prove di trazione

In figura 7.2.5 è presente un ingrandimento della zona di corrosione del pin di acciaio compenetrato nella lamiera di alluminio, nonostante la corrosione del pin che permette la saldatura side to side tra alluminio ed acciaio, la rottura dei campioni trazionati non si è verificata mai in questa zona, questo implica che la corrosione del pin non è la causa del decadimento delle caratteristiche meccaniche dei campioni saldati.



Figura 7.2.5 : segni dell'attività di corrosione sul pin del giunto colaminato

7.2.2 ANALISI MICROGRAFICA

Tramite il microscopio ottico sono stati analizzate le sezioni trasversali dei cordoni di saldatura del lato acciaio e del lato alluminio .

Saldatura lato Acciaio a bassa % di C -DP1000

Per il lato acciaio è stata effettuata una saldatura con lamiere disposte testa contro testa e lembi retti chiusi, è evidente in figura 7.2.5 l'elevata differenza di spessore tra le due lamiere.



L'acciaio DP1000 misura 1,5mm mentre il giunto ibrido è spesso 3,2mm -

Figura 7.2.5 : saldatura MAG sul lato acciaio con utilizzo di giunto colaminato

Tramite l'ingrandimento al microscopio si deduce che non c'è stata una penetrazione completa tra i 2 acciai, la superficie di separazione tra i 2 materiali è ben evidente, inoltre le frecce indicano cricche che si sono formate sulla lamina di acciaio del giunto .

È interessante vedere come la microstruttura dell'acciaio varia al variare della distanza dal cordone di saldatura , nei pressi del cordone è facile vedere la perlite globulare che si è formata dopo il riscaldamento con addensamenti di cementite sparsa , verso la zona termicamente alterata la situazione cambia , la trasformazione martensitica che è avvenuta fa si che il carbonio rimanga sparso nella matrice metallica rendendo il materiale più duro.

Saldatura lato Al 5754 - Al6016

Per il cordone di saldatura tra l'alluminio lega 5000 del giunto colaminato e la lega 6016 è stata eseguita una saldatura di tipo MIG con materiale d'apporto a base di silicio .

In figura 7.2.6 è visibile l'immagine al microscopio della sezione saldata. Lo spessore delle lamiere è di 3,2 mm per la lamiera dal giunto e di 2,5 mm per la lega 6016.

La saldatura è avvenuta disponendo di testa le lamiere e con lembi retti aperti, ciò permette al materiale d'apporto di penetrare tra le lamiere e raggiungere la faccia sottostante.



Figura 7.2.6 : saldatura MIG sul lato alluminio con utilizzo di giunto colaminato

La saldatura risulta accettabile con adesione e fusione del materiale d'apporto con le rispettive lamiere, sono presenti numerose porosità lungo il cordone di saldatura soprattutto lungo la parte superiore. Lungo la zona di giunzione con l'alluminio 6016 le numerose porosità presenti potrebbero generare l'origine di cricche che porterebbero alla rottura della saldatura. Rispetto all'accoppiata con alluminio 3003, l'alluminio 5754 ha caratteristiche simili all'alluminio 6016, la microstruttura tra i 2 è molto simile. In figura 7.2.7 è presente un immagine al microscopio di una saldatura effettuata precedentemente [2] tra la lamiera del giunto in Al 5754 e Al 6016, le porosità sono più numerose ma di diametro più piccolo.



Figura 7.2.7: saldatura MIG effettuata in precedenza tra alluminio lega 5754 e 6016

L'adozione degli spessori da sottoporre sotto le lamiere saldate ha permesso di migliorare la penetrazione del materiale d'apporto, l'adozione del filler di materiale d'apporto nuovo non ha garantito significativi miglioramenti del cordone di saldatura dell'alluminio.

Nel capitolo 8.3 segue un confronto tra valori di resistenza a trazione dei campioni saldati prima e dopo la variazione dei parametri precedentemente elencati.

7.2.3 PROVE DI MICRODUREZZA

Anche per le saldature con giunto colaminato sono state effettuate delle cuciture di durezza .

I parametri adottati sono li stessi, HV1 per lato acciaio ed HV 0,1 per lato alluminio, il passo è sempre di 0,5 mm ed il tempo di permanenza dell'impronta nel materiale è di 3 secondi.

Saldatura lato Acciaio a bassa % di C -DP1000

È stata eseguita una cucitura di durezza HV1 al fine di misurare i valori di durezza lungo la direzione indicata in figura, lo scopo della prova è quello di rilevare la durezza dei 2 materiali base e confrontarla con quella del cordone di saldatura dove è presente la zona termicamente alterata. I valori ottenuti sono riportati nel grafico 7.2.8 sottostante.



Grafico 7.2.8 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura



Figura 7.2.9 : ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura

Dai valori di durezza ottenuti risulta una durezza del materiale base D1000 che si aggira intorno ai 350 HV, l'acciaio del giunto è duro circa 135 HV. La zona termicamente alterata del lato DP1000 assume valori di durezza che arrivano fino a 438 HV, proseguendo verso destra i valori decrescono, la zona del cordone di saldatura misura 427 HV, infine la ZTA del lato del giunto raggiunge valori di durezza pari a 431 HV. In figura 7.2.9 è visibile la cucitura.

Saldatura lato Al 5754 - Al6016

È stata eseguita una cucitura di durezza anche per il cordone di saldatura lato alluminio, in figura 7.2.10 è visibile l'andamento dei valori lungo il cordone con passo 0,5mm .



Grafico 7.2.10 : andamento delle durezze vickers lungo la direzione di cucitura

Dai valori in uscita si registrano durezze vickers di circa 70 HV per il materiale base al 6016, proseguendo a destra verso il cordone la durezza sale a causa della presenza del materiale d'apporto AlSi12, in questa zona si registrano valori di picco di 97 HV, verso l'estremità destra si registrano i valori di durezza del materiale base Al5754 che corrisponde all'alluminio del giunto saldato per colaminazione, la durezza è di circa 66HV. Rispetto all'impiego della lega 3003, la lega 5754 ha valori di durezza simili all'alluminio 6016 delle nostre prove . In figura 7.2.11 è presente un ingrandimento della zona di cucitura con indicazione della direzione.



Figura 7.2.11 : ingrandimento allo stereomicroscopio della zona di cucitura

66,5

6,5

7.3 SALDATURA AD ARCO : SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI

Giunto saldato per esplosione

Segue in tabella 7.3.1 una sintesi tra i valori ottenuti in precedenza [2] e quelli ottenuti dalle nuove prove, stranamente i valori medi sono diminuiti ed è peggiorata anche la ripetibilità dei risultati, nonostante le immagini al microscopio dimostravano un miglioramento della qualità della saldatura non si sono registrate migliorie in termini di resistenza con la variazione dei parametri precedentemente elencati.

SALDATURA DP1000-AL6016 CON UTILIZZO DI GIUNTO SALDATO PER ESPLOSIONE									
VALORI PRECEDENTI OTTENUTI					NUOVI VALORI OTTENUTI				
CAMPIONE N°		CARICO N	CARICO MAX [kN]		CAMPIONE N°		CARICO MAX [kN]		
	1		8,6		1		9,579		
	2		8,98		2		5,858		
	3		8,9		3		5,485		
	4		7,52		4		7,343		
	5		8,58		5		8,059		
carico me	edio [kN]		8,516	carico medio [kN]			7,265		
dev	. St		0,584	dev	/.St		1,669		

Tabella 7.3.1: confronto tra valori di resistenza a trazione prima e dopo l'adozione degli accorgimenti per la saldatura

In tabella 7.3.2 è riportata la sintesi dei valori ottenuti dai campioni non corrosi e quelli sottoposti all'attività di corrosione, come possiamo notare l'attività corrosiva non ha indebolito le caratteriste della giunzione ibrida ma i valori sono addirittura migliorati e sono diventati più ripetibili.

SALDATURA DP1000-AL6016 CON UTILIZZO DI GIUNTO SALDATO PER ESPLOSIONE									
CAMPIONI NON CORROSI					CAMPIONI CORROSI				
CAMPIONE N°	CAMPIONE N° CARICO M		/IAX [kN]	CAMPIONE N°		CARICO MAX [kN]			
	1		9,579		1		8,048		
	2		5,858		2		9,054		
	3		5,485		3		7,307		
	4		7,343		4		7,31		
	5		8,059		5		7,941		
carico medio [kN]			7,2648	carico medio [kN]			7,932		
dev . St			1,669	dev.St			0,716		

Tabella 7.3.2: confronto tra valori di resistenza a trazione tra provini corrosi e non

Giunto saldato per colaminazione

Segue in tabella 7.3.3 una sintesi tra i valori ottenuti in precedenza [2] e quelli ottenuti dalle nuove prove, i valori medi sono diminuiti di 2 kN ed è peggiorata anche la ripetibilità dei risultati, nonostante ci sia stata una riduzione del numero di porosità presenti non si sono registrate migliorie in termini di resistenza, la variazione dei parametri non ha dato significative migliorie.

SALDATURA DP1000-AL6016 CON UTILIZZO DI GIUNTO SALDATO PER COLAMINAZIONE									
VALORI PRECEDENTI OTTENUTI					NUOVI VALORI OTTENUTI				
CAMPIONE N° C/		CARICO M	CARICO MAX [kN]		CAMPIONE N°		CARICO MAX [kN]		
	1		7,6		1		5,503		
	2		8,68		2		5,32		
	3		8,35		3		6,763		
	4		8,25		4		6,186		
	5		10,74		5		9,511		
carico me	dio [kN]		8,724	carico medio [kN]			6,657		
dev	. St		1,193	dev	.St		1,695		

Tabella 7.3.3: confronto tra valori di resistenza a trazione prima e dopo l'adozione degli accorgimenti per la saldatura

In tabella 7.3.2 è riportata la sintesi dei valori ottenuti dai campioni non corrosi e quelli sottoposti all'attività di corrosione, come possiamo notare l'attività corrosiva ha decrementato i valori di resistenza media a trazione dai 6,6 kN a 3,6kN, questo è indice di un peggioramento delle caratteristiche meccaniche del cordone di saldatura dell'alluminio, i valori sono comunque diventati più ripetibili con deviazione standard tra i valori dei 5 campioni che si è dimezzata.

SALDAT	SALDATURA DP1000-AL6016 CON UTILIZZO DI GIUNTO SALDATO PER COLAMINAZIONE									
CAMPIONI NON CORROSI				CAMPIONI CORROSI						
CAMPIONE N°		CARICO MAX [kN]		CAMPIONE N°		CARICO MAX [kN]				
	1		5,503		1		4,828			
	2		5,32		2		4,268			
	3		6,763		3		2,679			
	4		6,186		4		2,958			
	5		9,511		5		3,689			
carico me	dio [kN]		6,657	carico medio [kN]			3,684			
dev	. St		1,695	dev	.St		0,893			

Tabella 7.3.4: confronto tra valori di resistenza a trazione tra provini corrosi e non

8 CONCLUSIONI

Obbiettivo di questa tesi era lo studio di saldature ibride tra alluminio ed acciaio, le coppie oggetto di studio erano la DP1000-Al6016 che è stata oggetto di studio nel corso delle precedenti tesi ed una nuova tra DP600-Al5182 con spessore dell'alluminio ridotto a 1,6mm. Le saldature effettuate sui materiali sono state di 2 tipi, saldatura di tipo RSW e saldatura ad arco elettrico.

Per quanto riguarda la saldatura RSW sono state già svolte altre tesi in precedenza sulla saldatura tra DP1000-Al6016, partendo dai risultati precedenti sono state effettuate delle prove di corrosione al fine di misurare la resistenza dei punti di saldatura dopo la permanenza in ambiente corrosivo, i risultati ottenuti ...

Per quanto riguarda la nuova accoppiata sono state eseguite prove di saldatura a punti con tecnica cover plate , con utilizzo di interlayer GT CR40 e di interlayer feran; per le 3 tecniche sono state anche eseguite delle prove di corrosione , prove di durezza , prove di trazione e analisi micrografiche . Possiamo concludere dicendo che la resistenza dei punti di saldatura assume valori simili, i risultati ottenuti dalle prove di trazione vanno dai 3,96 kN della saldatura con metodologia cover plate ai 4,70 kN del valore ottenuto con utilizzo di interlayer feran, la metodologia con utilizzo di GtCR40 assume valori intermedi. Possiamo affermare che in assenza di corrosione l'interlayer feran garantisce valori di resistenza maggiore rispetto all'interlayer con 40% di alluminio.

Sottoponendo i campioni a prova di corrosione si ha una variazione delle caratteristiche delle saldature, le saldature con utilizzo di feran hanno un decadimento dei valori medi di resistenza se sottoposti a corrosione, i valori medi di 4,70 kN scendono a 3,44kN, conseguenza dell'attività di corrosione.

La situazione è diversa per i campioni saldati con interlayer GT CR40, in questo caso l'immersione dei campioni saldati in acqua salata per 21 giorni ha migliorato la resistenza media a trazione, i valori ottenuti passano dai 4,22 kN ai 4,5 kN, questo leggero incremento di resistenza può essere dovuto all'invecchiamento; anche i campioni saldati con cover plate hanno un miglioramento delle caratteristiche meccaniche con un incremento di circa 0,6 kN in resistenza a trazione.

Sono stati confrontati i valori di resistenza a trazione ottenuti con la vecchia accoppiata DP1000-Al6016 con i valori del nuovo accoppiamento, nel caso di saldatura con metodologia cover plate la saldatura tra DP600-Al5182 garantisce valori di resistenza inferiori di 1kN rispetto alla vecchia coppia , questo nonostante le prove di trazione tra campioni omologhi di alluminio 5182 e 6016 davano in uscita valori di resistenza maggiore da parte dell'alluminio 5182 .

Per quanto riguarda la saldatura ad arco lo scopo era partire dai risultati ottenuti dai precedenti studi sull'accoppiamento ibrido tra DP1000-Al6016 e cercare di migliorare la qualità dei cordoni di saldatura adottando delle migliorie sul processo di saldatura e successivamente effettuare delle prove di corrosione al fine di studiare il comportamento dei giunti saldati se sottoposti ad un ambiente fortemente corrosivo.

La saldatura ad arco tra alluminio e acciaio è stata possibile grazie all'utilizzo di giunti ibridi saldati mediante esplosione o colaminazione, tramite le nostre prove è stato possibile studiare il comportamento del giunto dopo la permanenza in ambiente corrosivo e fare dei confronti tra i 2 tipi di giunto.

Dopo le prove eseguite sui campioni DP1000-Al6016 saldati ad arco si sono registrati valori medi di resistenza a trazione di 7,22kN per campioni con giunto saldato ad esplosione e valori medi di 6,65 kN con l'utilizzo di giunto colaminato, a parità di parametri di saldatura utilizzati e di spessori delle lamiere è chiaro che il giunto saldato per esplosione ha fatto registrare valori medi di resistenza maggiore di 1 kN.

Per quanto riguarda le prove di corrosione i risultati in uscita sono stati molto diversi tra i 2 tipi di giunto utilizzato.

La saldatura tra DP1000-Al6016 con utilizzo di giunto ibrido saldato per esplosione non ha risentito dell'effetto della corrosione, i valori medi registrati sono addirittura migliorati di circa 0,8kN; la buona resistenza a corrosione del giunto è stata confermata anche per l'interlayer in titanio tra acciaio e alluminio.

L'utilizzo del giunto ibrido saldato per colaminazione subisce significativi decrementi delle caratteristiche meccaniche se sottoposto a prova di corrosione, i valori di resistenza registrati tendono a dimezzarsi, da valori medi di 6,65kN si passa a 3,6 kN; ciò è attribuibile ad un peggioramento delle caratteristiche meccaniche del cordone di saldatura dell'alluminio.

9 BIBLIOGRAFIA

[1] F. Capelli, V. Boneschi. I fenomeni corrosivi più comuni nei giunti saldati;

[2] Alberto Riolo . Esame di tecnologie di giunzione applicabili a coppie dissimili formate da lamiere di acciaio e di alluminio per applicazioni nel campo automobilistico;

[3] Concetto Guarino. Saldatura a resistenza elettrica a punti tra acciaio e leghe di alluminio;

[4] Walter Nicodemi . Acciai e leghe non ferrose cap.5;

[5] Walter Nicodemi, Maurizio Vedani .La metallurgia nelle tecnologie di produzione, cap. 5 e 6 ;

[6] Ranfeng Qiu*, Chihiro Iwamoto, Shinobu Satonaka. The influence of reaction layer on the strength of aluminum/steel joint welded by resistance spot welding;

[7] R. Muraro. Impianti automatici per la saldatura: soluzioni e tendenze (2011);

[8] Fronius . *The new revolution in digital GMA welding*;

[9] Yongchao Sua, Xueming Huaa, Yixiong Wua,baShanghai . *Influence of alloy elements on microstructure and mechanicalproperty of aluminum–steel lap joint made by gas metal arc welding*;

[10] Ali Mehrani Milani1 & Moslem Paidar2 & Alireza Khodabandeh3 & Saeed Nategh3. Influence of filler wire and wire feed speed on metallurgical and mechanical properties of MIG welding–brazing of automotive galvanized steel/5754 aluminum alloy in a lap joint configuration ;

[11] Acarer M, Gulenc B, Findik F. *The influence of some factors on steel/steel bonding quality on their characteristics of explosive welding joints. J Mater Sci (2004), 57–66;*

[12] G.Umbertalli. L'alluminio e le sue leghe ;

[13] Matteo Meggiolaro. La saldatura: procedimenti e qualifiche di laboratorio;

[14] E. C. Regulation . Combining the advantages of steel and aluminium pp. 1–10;

[15] J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, C. L. Fan, G. C. Ma. Analysis of intermetallic layer in dissimilar TIG welding-brazing butt joint of aluminium alloy to stainless steel. 213-218;

[16] M. Soltan Ali Nezhad and A. Haerian Ardakani. A study of joint quality of aluminum and low carbon steel strips by warm rolling. Mater Des., vol. 30, no. 4, pp. 1103–1109, (2009);
[17] FCA. Welding resistance spot, PS.50004/01.

10- RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo progetto e della mia carriera universitaria ringrazio coloro che mi hanno sostenuto nel corso di questo lungo percorso di formazione.

Dico grazie alla mia famiglia che mi ha sostenuto nella realizzazione di tutto ciò con l'aiuto sia morale che economico, soprattutto mia madre che dal primo giorno mi ha spinto ad incamminarmi su questa lunga scalata.

Ringrazio chi giorno per giorno mi ha dato consigli utili al raggiungimento dei miei obiettivi, chi mi ha risollevato nei periodi difficili come quelli delle sessioni universitarie, in particolare un grazie va ai miei amici, Emilio, Andrea, Leo, Luca e Davide.

Ringrazio la mia ragazza che nonostante la lontananza con molta pazienza mi ha sempre sostenuto dandomi forza e sostegno morale.

Riguardo questo progetto sulle saldature ibride un caloroso grazie va al mio tutor Cesare Puro, ad Alessio Gulino che mi ha supportato in ogni situazione e al Prof. Matteis che mi ha affidato questo interessante progetto.

Questi mesi di attività di ricerca volta allo studio delle saldature ibride sono stati molto formativi per me, ringrazio tutto il personale del centro ricerche Fiat che è stato sempre disponibile nei miei confronti soprattutto nel darmi lezioni sull'utilizzo degli apparati dei laboratori.