POLITECNICO DI TORINO FACOLTA' DI INGEGNERIA CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANCA

TESI DI LAUREA DI II LIVELLO La saldatura delle lamiere in ambito automobilistico

Monitoraggio e controllo dei sistemi robotizzati



Relatore: Prof.ssa Raffaella Sesana

Correlatori:

Prof. Franco Lombardi Prof.ssa Francesca Maria Curà Prof.ssa Manuela De Maddis

Tutor aziendale:

Cesare Puro

Studente: Emmanuele Saladino

A.A. 2018-2019

Indice

Indice _			i
Elenco	delle tabelle		iii
Elenco	delle figure		iv
1. Int	roduzione		1
2. Sta	to dell'arte		3
2.1.	Classificazione dei pro	cessi di saldatura	3
2.2.	Tipologie di difetti in s	aldatura	5
2.3.	Controlli distruttivi		7
2.4.	Controlli non distruttiv	vi: termografia attiva e passiva	8
3. Str	umentazione, materiali	e metodi	12
3.1.	Strumentazione saldat	tura: robot e saldatrice	12
3.1	.1 Saldature Cold Metal	Transfer	14
3.2.	Sistema di fissaggio		16
3.3.	Strumentazione prove	e distruttive	18
3.3	.1. Micro-durometro	Affri Wiki JS	18
3.3	.2. Pressa inglobatric	e Leco per campioni metallografici	20
3.3	.3. Macchina per luci	idatura metallografica	20
3.3	.4. Macchina per traz	zioni Galdabini	21
3.4.	Strumentazione prove	e non distruttive	22
3.4	.1. Termocamera ON	ILINE	22
3.4	.2. Termocamera OF	FLINE e sistema DES	25
3.5.	Materiale DP600		29
4. Pro	ocedura per la realizzazio	one dei campioni conformi	31
4.1.	Prove di setup e giunti	i di riferimento	31
4.2.	Risultati termografia p	bassiva per i giunti conformi	33
4.3.	Analisi micrografica de	ei giunti	37
4.4.	Analisi macrografica d	ei giunti conformi	41
4.5.	Prove di durezza		43
4.6.	Prove di trazione		46
5. Sce	lta difetti indotti e defir	nizione del piano sperimentale	47
6. Stu	dio completo campioni	con difetti	51

6.1.	Giunti con difetti indotti dalla variazione del gap	51
6.2.	Giunti con difetti indotti dalla variazione della portata di gas	58
6.3.	Giunti con difetti indotti dalla variazione della velocità del robot	66
7. Set	tting sistema DES e analisi lock-in	73
7.1.	Verifica della ripetibilità delle prove	74
7.2.	Variazione della risposta del segnale al variare dei parametri di prova	83
7.3.	Primi risultati dell'analisi lock-in	87
8. Co	nclusioni e possibili sviluppi futuri	90
9. Bib	bliografia	92
10. I	Ringraziamenti	93

Elenco delle tabelle

Tabella 2.2 Tipologie di difetti per saldatura MAG1Tabella 3.1 Parametri sistema di saldatura1Tabella 3.2 Specifiche tecniche Micro-durometro1Tabella 3.2 Specifiche tecniche Micro-durometro1Tabella 3.3 Parametri utilizzati sulla inglobatrice2Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online2Tabella 3.5 Condizioni di prova2Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc2Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W2Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP6003Tabella 3.9 Composizione chimica DP6003Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto3Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto3Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup3Tabella 4.2 Parametri di saldatura durante setup3
Tabella 3.1 Parametri sistema di saldatura1Tabella 3.2 Specifiche tecniche Micro-durometro1Tabella 3.3 Parametri utilizzati sulla inglobatrice2Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online2Tabella 3.5 Condizioni di prova2Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc2Tabella 3.7 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc2Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP6003Tabella 3.9 Composizione chimica DP6003Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto3Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto3Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup3Tabella 4.2 Dependeti achieve si eti perferenzi3
Tabella 3.2 Specifiche tecniche Micro-durometro12Tabella 3.3 Parametri utilizzati sulla inglobatrice24Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online25Tabella 3.5 Condizioni di prova24Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc26Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W26Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60036Tabella 3.9 Composizione chimica DP60036Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto36Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto36Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup37Tabella 4.2 Demostri activita editati activita di conferenci36
Tabella 3.3 Parametri utilizzati sulla inglobatrice20Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online21Tabella 3.5 Condizioni di prova20Tabella 3.5 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc20Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W20Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60030Tabella 3.9 Composizione chimica DP60030Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto30Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto30Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup31Tabella 4.2 Parametri onlocatione chimica termo32
Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online22Tabella 3.5 Condizioni di prova24Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc24Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W24Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60034Tabella 3.9 Composizione chimica DP60034Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto34Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto34Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup34Tabella 4.2 Parametri analizia edicamica34
Tabella 3.5 Condizioni di prova24Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc26Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W26Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60036Tabella 3.9 Composizione chimica DP60036Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto36Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto36Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup37Tabella 4.2 De e metri apidate e si prime formi36
Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc20Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W20Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60030Tabella 3.9 Composizione chimica DP60030Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto30Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto30Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup31Tabella 4.2 Parametri analizio nella setione chimica materiale d'apporto31
Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W20Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60030Tabella 3.9 Composizione chimica DP60030Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto30Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto30Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup31Tabella 4.2 Parametri addatura durante setup32
Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP60030Tabella 3.9 Composizione chimica DP60030Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto30Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto30Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup31Tabella 4.2 Parametri addatura durante setup31
Tabella 3.9 Composizione chimica DP600 30 Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto 30 Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto 30 Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup 31 Tabella 4.2 Parametri apholeta en si aphone formi 32
Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto 30 Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto 30 Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup 31 Tabella 4.2 Parametri aphilate maria atti apporto setup 32
Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto 30 Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup 31 Tabella 4.2 Parametri aphilate anni asti apporto setup 32
Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup 33
Tabella 4.2 Parametri saldatura giunti conformi 3.
Tabella 4.3 Velocità di raffreddamento "campione004_27Luglio" 34
Tabella 4.4 Velocità di raffreddamento di "medie_campioni_conformi" 31
Tabella 4.5 Dimensioni sezione cordone su punto P3 di "campione004_27Luglio" 43
Tabella 5.1 Piano sperimentale prove4
Tabella 6.1 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione di gap5
Tabella 6.2 Confronto delle velocità di raffreddamento del "campione005_30Ottobre" co
"campione004_27Luglio"5
Tabella 6.3 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione della portata di ga
5
Tabella 6.4 Confronto delle velocità di raffreddamento di "medie_campioni_gas_ridotto" con
"medie_campioni_confromi" 59
Tabella 6.5 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione della velocità c
avanzamento torcia 60
Tabella 6.6 Confronto delle velocità di raffreddamento di "campione002_27Novembre" con
"campione004_27Luglio"6"
Tabella 7.1 Parametri di processo di saldatura per giunti analizzati con il sistema DES 73
Tabella 7.2 Parametri su software Flir per lamiera non verniciata 74

Elenco delle figure

Figura 1.1 Sequenza prove eseguite	1
Figura 2.1 Cordone di saldatura	4
Figura 2.2 Tipologie di giunti saldati	4
Figura 2.3 Spettro elettromagnetico	8
Figura 2.4 Configurazione termografia passiva	9
Figura 2.5 Stima errata dell'emissività (inferiore)	9
Figura 2.6 Stima errata dell'emissività (superiore)	10
Figura 2.7 Configurazione termografia attiva	10
Figura 2.8 Schema termografia	11
Figura 3.1 Attrezzatura per saldatura	12
Figura 3.2 Robot Comau (sx) e saldatrice Fronius CMT (dx)	12
Figura 3.3 Wire buffer (sx) e motore integrato sulla torcia (dx)	14
Figura 3.4 Andamento parametri di processo CMT	15
Figura 3.5 Sistema di fissaggio mediante pinze grip (sx) e fixture (dx)	16
Figura 3.6 Micro-durometro Affri Wiki JS	18
Figura 3.7 Prova Vickers	19
Figura 3.8 Pressa inglobatrice PR-36 Leco	20
Figura 3.9 Macchina pulitrice metallografica	20
Figura 3.10 Macchina per trazioni Galdabini	21
Figura 3.11 AGEMA Thermovision [®] 900 SW-TE	22
Figura 3.12 Posizionamento termocamera all'interno della cella	23
Figura 3.13 Sistema MultiDES System LASER	25
Figura 3.14 Schermata sistema MultiDES R3.4.4 modulazione sorgente laser	27
Figura 3.15 Esempio immagine di ampiezza su software IRTA	28
Figura 3.16 Esempio immagine di fase su software IRTA	28
Figura 3.17 Geometria giunto saldato	29
Figura 4.1 Confronto giunto conforme e di scarto	31
Figura 4.2 Frame da termocamera online	33
Figura 4.3 Punti per analisi termografia passiva	33
Figura 4.4 Andamento T nel tempo per 3 punti di "campione004_27Luglio"	34
Figura 4.5 Andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_conformi"	35
Figura 4.6 Box per analisi termografia passiva	36
Figura 4.7 Andamento T nel tempo per box di "campione004_27Luglio"	36
Figura 4.8 Andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_conformi"	36
Figura 4.9 Micrografia "campione003_30Luglio" con relativo possibile diagramma Fe-C	37
Figura 4.10 L1: struttura ferritico martensitica	38
Figura 4.11 1A: ferrite, martensite, bainite	38
Figura 4.12 1B: martensite	39
Figura 4.13 C: bainite e martensite	39
Figura 4.14 Posizione punti esaminati sul cordone	41
Figura 4.15 Macrografia punto P3 di "campione004_27Luglio"	41
Figura 4.16 Valutazione profondità di penetrazione	41
Figura 4.17 Macrografia punto F12 di "campione002_30Luglio"	42

Figura 4.18 Test durezza su materiale base 4	43
Figura 4.19 Risultati prova di durezza su "campione004_27Luglio" 4	43
Figura 4.20 Risultati prova di durezza su "campione001_30Luglio" 4	14
Figura 4.21 Confronto risultati prove di durezza per i due diversi sistemi di fissaggio lamiere 4	45
Figura 4.22 Giunti saldati conformi secondo normative 4	45
Figura 4.23 Risultati prove di trazione su giunti conformi 4	46
Figura 4.24 "campione004_27Luglio" dopo trazione 4	46
Figura 5.1 Giunto di scarto con GAP da 1,5 mm "campione001_29Ottobre" 4	18
Figura 5.2 Giunto di scarto con GAP da 1,8 mm "campione003_30Ottobre" 4	19
Figura 5.3 Cordone giunto con gap di 1,5 mm (sx) e 1,8 mm (dx) 4	19
Figura 5.4 Giunto di scarto ottenuto con portata di gas da 7 l/min "campione001_21Novembre" 5	50
Figura 5.5 Cordone giunto con portata di gas da 7 l/min 5	50
Figura 6.1 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "campione005_30Ottobre" co	on
"campione004_27Luglio"5	51
Figura 6.2 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_gap_aumentato" co	on
"medie_campioni_conformi"5	52
Figura 6.3 Confronto andamento T nel tempo per box di "campione005_30Ottobre" co	on
"campione004_27Luglio"5	53
Figura 6.4 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_gap_aumentato" co	วท
"medie_campioni_conformi"5	53
Figura 6.5 Risultati prove di durezza punto 1 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglio	o" 54
Figura 6.6 Risultati prove di durezza punto 2 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglic_5	o" 54
Figura 6.7 Risultati prove di durezza punto 3 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglic	o" 55
Figura 6.8 Confronto macrografia del punto 1 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto	1
"campione004_27Luglio" (dx) 5	55
Figura 6.9 Confronto macrografia del punto 2 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto	2
"campione004_27Luglio" (dx) 5	56
Figura 6.10 Confronto macrografia del punto 3 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto	3
"campione004_27Luglio" (dx) 5	56
Figura 6.11 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante aumento gap tra	le
lamiere5	57
Figura 6.12 "campione005_30Ottobre" dopo trazione5	57
Figura 6.13 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_gap_ridotto" co	วท
"medie_campioni_conformi"5	59
Figura 6.14 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_conformi" co	on
"medie_campioni_gas_ridotto"6	50
Figura 6.15 Immagine RX di "campione008_21Novembre"6	51
Figura 6.16 Macrografie delle porosità rinvenute sul "campione008_21Novembre"6	51
Figura 6.17 Risultati dell'analisi termografia passiva condotta sul "campione008_21Novembre" 6	51
Figura 6.18 Risultati delle prove di durezza condotte sul "campione008_21Novembre" 6	52
Figura 6.19 Immagine RX di "campione009 21Novembre" 6	52

Figura 6.20 Macrografie dei difetti rinvenuti sul "campione009_21Novembre"63
Figura 6.21 Risultati dell'analisi termografia passiva condotta sul "campione009_21Novembre" 63
Figura 6.22 Risultati delle prove di durezza condotte sul "campione009_21Novembre" 64
Figura 6.23 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante riduzione portata di gas
64
Figura 6.24 "campione008_21Novembre" dopo trazione 65
Figura 6.25 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "campione002_27Novembre" con
"campione004_27Luglio"66
Figura 6.26 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di
"medie_campioni_velocità_aumentata" con "medie_campioni_conformi" 67
Figura 6.27 Confronto andamento T nel tempo per area cordone di "campione002_27Novembre"
con "campione004_27Luglio" 68
Figura 6.28 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_velocità_aumentata"
con "medie_campioni_conformi" 68
Figura 6.29 Confronto macro-grafia del punto 1 "campione002_27Novembre" (sx) con il punto 1
"campione004_27Luglio" (dx) 69
Figura 6.30 Confronto macro-grafia del punto 2 "campione002_27Novembre" (sx) con il punto 1
"campione004_27Luglio" (dx) 69
Figura 6.31 Confronto macro-grafia del punto 3 "campione002_2/Novembre" (sx) con il punto 1
"campione004_27Lugilo" (dx)69
Figura 6.32 Risultati prove di durezza punto 1 "campione002_27Novembre" con punto 1
Campioneou4_27Lugilo70
"rigura 6.33 Risultati prove di durezza punto 2 campione002_27Novembre con punto 2
Campioneoo4_27Euglio70
"campione004_27Luglio"
Figura 6.35 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante un aumento della
velocità di avanzamento della torcia
Figura 6 36 Rottura su "campione006_27Novembre"
Figura 6.37 "campione002_27Novembre" dopo trazione 72
Figura 7.1 "campione002_21Marzo" per analisi con sistema DES 73
Figura 7.2 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze Larmonica nel punto buono non
verniciato
Figura 7.3 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel punto buono
non verniciato 75
Figura 7.4 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto buono non
verniciato 76
Figura 7.5 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto buono non
verniciato 76
Figura 7.6 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto difettoso
non verniciato 77
Figura 7.7 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel punto
difettoso non verniciato77
Figura 7.8 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto difettoso non
verniciato 78

Figura 7.9 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto dife	ttoso non
verniciato	78
Figura 7.10 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto verniciato	difettoso 79
Figura 7.11 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica r difettoso verniciato	nel punto 79
Figura 7.12 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto verniciato	difettoso 80
Figura 7.13 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto verniciato	difettoso 80
Figura 7.14 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel pun centrale verniciato	to buono 81
Figura 7.15 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel pun centrale verniciato	ito buono 81
Figura 7.16 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto buono verniciato	o centrale 82
Figura 7.17 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel pun	to buono
centrale verniciato	82
Figura 7.18 Frame 142 punto con difetto e lamiera non verniciata	83
Figura 7.19 Frame 142 punto con difetto e lamiera verniciata	83
Figura 7.20 Andamento T nel tempo con e senza l'applicazione della vernice al punto difet Figura 7.21 Confronto ampiezze I armonica mediante vettore riga con e senza l'applicazi	ttoso_ 84 ione della
Figure 7.22 Confronte ampierro L'ormanico modiente vettere colonne con e conce l'orm	84
rigura 7.22 Contronto ampiezze i armonica mediante vettore colonna con e senza i app	Silcazione
Gena vernice al punto difettoso	85
al punto difettoso	la vernice 85
Figura 7.24 Confronto fase I armonica mediante vettore colonna con e senza l'applicazi	ione della
vernice al punto difettoso	86
Figura 7.25 Punti ispezionati sul "campione002 21Marzo"	87
Figura 7.26 Confronto ampiezza mediante vettore riga	87
Figura 7.27 Confronto ampiezza mediante vettore colonna	88
Figura 7.28 Confronto fase mediante vettore riga	88
Figura 7.29 Confronto fase mediante vettore colonna	89

1. Introduzione

Nel mondo dell'industria meccanica, e in particolar modo nel settore automotive, la saldatura rappresenta uno strumento fondamentale per la realizzazione delle giunzioni e per la creazione di complessivi partendo da elementi semplici. Diversamente da metodi quali imbullonatura, rivettatura o chiodatura, questa tecnica consente la realizzazione di giunzioni permanenti. Si tratta di una lavorazione complessa i cui effetti sono difficili da controllare e talvolta anche imprevedibili. È per monitorare costantemente il processo di saldatura e per evitare costosi addebiti o attività di richiamo che bisogna eseguire dei controlli periodici di qualità, che ad oggi sono realizzati principalmente mediante test distruttivi. Negli anni hanno trovato spazio anche tecniche non distruttive quali: radiografie, ultrasuoni e liquidi penetranti.

Questa tesi è il risultato di uno studio di applicabilità della termografia ad infrarossi come tecnica non distruttiva per i giunti saldati di lamiere sottili in applicazione automotive. È parte di un progetto che nasce dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino e il gruppo "Global Material Labs" (GML) del Centro Ricerche Fiat (CRF) di Torino, sito a Mirafiori.

L' attività è stata intrapresa con i seguenti obiettivi:

- I. impiegare la termografia ad infrarossi per individuare eventuali difetti presenti all'interno dei giunti saldati;
- II. definire un metodo per correlare le caratteristiche dei difetti con i risultati ottenuti con questa tipologia di analisi;
- III. ipotizzare un sistema automatico, nell'ottica di un'implementazione industriale, che garantisca un controllo di qualità dei campioni attraverso tecniche non distruttive.

Tutti i giunti sono stati realizzati con saldatura autogene per fusione ad arco elettrico con filo continuo e bagno fuso protetto da gas attivo (MAG).

I componenti sono stati congiunti secondo la configurazione propria delle saldature di testa.

È stato definito un piano sperimentale che comprende la realizzazione di giunti conformi secondo normativa e giunti in cui sono stati indotti dei difetti.

Prima di procedere con le prove pratiche, è stata svolta un'attività di ricerca. A tal proposito sono state individuate le norme Uni per saldatura standard (nomenclatura, strumentazione, processo e qualità), per controlli distruttivi (CD) e non distruttivi (CND) e per termografia. Alle normative è stata aggiunta la visione di manuali teorici e tecnici in merito all'attrezzatura usata. Questo studio è stato necessario per approfondire le conoscenze sull'argomento, per porre le basi per il dimensionamento delle lamiere al fine di eseguire le prove sperimentali e soprattutto per conoscere i possibili difetti rilevabili nei giunti prodotti con questa tecnica di saldatura.

Sono stati definiti i parametri necessari alla realizzazione di giunti di buona qualità e quindi esenti da difetti. Successivamente sono stati scelti i parametri controllabili in linea di produzione, col fine di realizzare ulteriori pezzi ove indurre dei difetti.



Il confronto tra i giunti conformi e quelli con difetti è stato svolto attraverso prove distruttive (CD) e non distruttive (CND), la cui sequenza di esecuzione è riportata in <u>figura 1.1</u>.

Il presente documento si articola in 10 capitoli. Il capitolo 2, "Stato dell'arte", riporta le conoscenze ad oggi disponibili in questo campo della ricerca. Sono riportate informazioni relative ai processi di saldatura, alle caratteristiche dei giunti, alle tipologie di difetti e alla ricerca in merito alle tecniche di controllo distruttive e non distruttive.

Il capitolo 3, "Strumentazione, materiali e metodi", include informazioni e specifiche tecniche relative ai macchinari utilizzati, approfondimenti sui metodi di lavoro e informazioni sul materiale base e su quello d'apporto.

Nel capitolo 4, "Procedura per la realizzazione di campioni conformi", vengono mostrati i risultati delle prove eseguite sui giunti di riferimento. Segue un capitolo in cui viene definito lo stato ultimo del piano sperimentale e la tipologia di difetti che sono stati indotti.

Il capitolo 6, "Studio completo campioni con difetti", presenta una valutazione dei risultati delle prove condotte sui giunti non conformi, mediante un confronto con i componenti di riferimento.

Il capitolo 7 fa riferimento all'applicazione della termografia passiva ad un ristretto gruppo di campioni. Si tratta di un capitolo associato allo studio e al setting del sistema DES introdotto presso i laboratori dell'università.

Nel capitolo finale sono riportate le conclusioni e gli eventuali possibili sviluppi futuri.

La bibliografia e i ringraziamenti chiudono il documento.

2. Stato dell'arte

2.1. Classificazione dei processi di saldatura

Le numerose tipologie di saldatura si possono raggruppare in tre categorie:

- saldature autogene: sono caratterizzate dal raggiungimento della temperatura di fusione del materiale base. Questo avviene senza l'applicazione di forze ma per apporto termico esterno (saldature autogene per fusione) o per il contemporaneo apporto termico da una sorgente esterna insieme ad una elevata pressione applicata tra i componenti da saldare (s. a. per pressione). In questa categoria il materiale la formazione del giunto può avvenire o grazie alla sola fusione del materiale base o con l'aggiunta del materiale d'apporto.
- saldature eterogene: sono caratterizzate dalla mancata fusione del materiale base. Il materiale d'apporto, necessariamente di tipo basso fondente, in questa categoria è sempre presente.
- saldature allo stato solido: in questo caso la saldatura è generata per mescolamento plastico del materiale base che quindi viene mantenuto ad una temperatura inferiore rispetto a quella di fusione. Non vi è materiale d'apporto.

Nella <u>tabella 2.1</u> è riportata una classificazione ordinata di tutti i diversi processi di saldatura esistenti [1].

Famiglia	Procedimento	
Saldature autogene per fusione	 Ad arco elettrico Con elettrodo rivestito (MMA) Ad arco sommerso (SAW) Con elettrodo infusibile e bagno fuso protetto da gas (TIG) Con filo continuo e bagno fuso protetto da gas (MAG e MIG) A sorgente termica alternata Ossiacetilenica (OFW) Saldatura al plasma (PAW) Ad elevata concentrazione di energia Laser (LBW) A fascio elettronico (EBW) 	
Saldature autogene per pressione	 A resistenza Per punti Per rilievi A rulli A scintillio 	
Saldature eterogenee	Saldobrasature	
Saldature allo stato solido	Friction stir weldingUltrasuoni	

Tabella 2.1 Elenco processi di saldatura

Si evidenzia in rosso all'interno della tabella il processo di saldatura adottato per l'esecuzione delle prove presso il CRF.

Si riportano in <u>figura 2.1</u> le caratteristiche del cordone di saldatura. Quella rappresentata è una sezione trasversale del cordone di un giunto di testa nella configurazione con lembi a V con spalla (UNI EN ISO 9692-1).



Figura 2.1 Cordone di saldatura

Si riportano in figura 2.2 tutte le tipologie di giunti saldati (normativa UNI 1307/2).



2.2. Tipologie di difetti in saldatura

L'idoneità alla saldatura viene valutata attraverso la saldabilità, la cui definizione è "un materiale si definisce saldabile nel momento in cui si presta alla realizzazione di strutture più o meno complesse, formate da elementi ben definiti, tra i quali si possa creare una continuità nel materiale e che si prestino a soddisfare la qualità richiesta in fase di progettazione" [1].

Il controllo qualità permette l'identificazione di eventuali difetti che possano compromettere la saldabilità e la conformità di un giunto.

Tramite la consultazione della normativa "UNI EN ISO 6520-1" sono stati raccolti tutti i difetti rilevabili nei giunti ottenuti mediante un processo di saldatura di tipo MAG.

Le imperfezioni geometriche nella norma vengono classificate in sei macro-gruppi:

- 1. cricche;
- 2. cavità;
- 3. inclusioni di solidi;
- 4. mancanza di fusione e di penetrazione;
- 5. imperfezioni di forma e di dimensioni;
- 6. imperfezioni varie non classificate.

Si riportano nella <u>tabella 2.2</u> le cause associate alla formazione di questi difetti.

Tipologia di difetti	Cause
1) Cricche	 Effetti ritiro del materiale Assenza di pre o post trattamento termico Bassa velocità di avanzamento Tensione/Voltaggio elevata Filo qualità scadente Impurità del materiale
2) Cavità	 Arco lungo Insufficienza gas inerte Insufficiente purezza gas inerte Impurità del materiale
3) Inclusioni di solidi	 Preparazione e pulizia lembi (ma poco probabile come difetto) Pulizia elettrodo (ma poco probabile come difetto) Filo qualità scadente Posizionamento torcia (troppo inclinata o distante) Eccessivo amperaggio della corrente Impurità del materiale
4) Mancanza di fusione e di penetrazione	
I. Mancanza di fusione	Eccessiva distanza tra i lembiEccessiva velocità di avanzamento

II. Mancanza di penetrazione	 Posizionamento torcia (troppo inclinata o troppo distante) Tensione/voltaggio troppo bassa eccessiva velocità di avanzamento Insufficiente distanza tra i lembi Eccessivo diametro dell'elettrodo Basso amperaggio corrente Filo di qualità scadente Posizionamento torcia (troppo distante)
5) Imperfezioni di forma e di dimensioni	
I. Excessive weld metal	 bassa velocità di avanzamento errata posizione torcia (ma poco probabile come difetto) Errata dimensione del filo d'apporto
II. Undercut	 Eccessiva velocità di avanzamento Eccessivo Amperaggio della corrente Posizionamento torcia
6) Imperfezioni varie non classificate	
I. Spruzzo	Filo di qualità scadenteTensione troppo alta

Tabella 2.2 Tipologie di difetti per saldatura MAG

Al primo gruppo appartengono le cricche, ovvero imperfezioni che possono formarsi per effetto termico o a causa delle tensioni in gioco. Una prima classificazione delle cricche può essere fatta in base al loro orientamento rispetto al cordone di saldatura e alla forma. A tal proposito è possibile individuare cricche longitudinali, trasversali, a raggiera, a cratere o ramificate.

Un'ulteriore distinzione può essere fatta da un punto di vista termico, tra cricche a caldo e a freddo. Le prime sono relative a problemi di natura tipicamente metallurgica e sono così chiamate perché si formano ad alta temperatura (tra i 900°C e i 1400°C), cioè durante il processo di saldatura nei primi stadi di solidificazione della zona fusa. Di solito sono localizzate al centro del cordone, dove gli stati tensionali risultano più elevati.

Le cricche a freddo, invece, sono legate all'indurimento per tempra del metallo, sotto l'azione dei cicli termici di saldatura, e alla presenza di idrogeno. Si verificano negli ultimi stadi del raffreddamento (300°C-200°C) e si trovano di solito ai bordi del cordone.

Sotto il termine cavità vengono raggruppate varie tipologie di difetti dovuti ad assenza di materiale e classificati in base alla posizione e alla forma. A questa famiglia appartengono i pori che hanno una

forma tondeggiante e che sono dovuti principalmente allo sviluppo di vapore acqueo nel cordone di saldatura.

Dall'unione di due o più pori si originano i tarli, i quali presentano una forma più allungata.

Altri difetti di questo tipo possono essere le cavità da ritiro, associate principalmente alle caratteristiche del materiale.

Il terzo gruppo è quello delle inclusioni solide, ovvero sostanze estranee di vario genere intrappolate nel metallo fuso. Possono essere isolate o raggruppate e sono causate dalle cattive condizioni dell'elettrodo, delle lamiere o del materiale d'apporto.

La mancanza di penetrazione si riscontra quando la fusione dei lembi presenta delle discontinuità più o meno intermittenti. Può manifestarsi in corrispondenza della successiva ripresa, in seguito ad un'interruzione del processo, oppure distribuita su tutto il cordone se non sono stati scelti degli opportuni parametri di processo. Questo difetto implica uno sviluppo incompleto del cordone lungo la direzione trasversale alla saldatura.

Nel caso invece di mancanza di fusione si tratta di un ridotto collegamento tra il metallo d'apporto ed il metallo base.

I difetti di forma e di dimensione sono causati unicamente dai parametri scelti durante il processo di saldatura, sono delle anomalie geometriche del cordone dal punto di vista estetico.

Nell'ultimo gruppo sono stati inclusi solo gli spruzzi che rappresentano piccole gocce di metallo fuso che si depositano sul materiale base.

2.3. Controlli distruttivi

La valutazione della qualità della zona fusa dei giunti saldati può essere svolta mediante svariate prove distruttive.

Ad oggi i controlli per le saldature autogene per fusione sono condotti principalmente mediante prove di trazione e di micro-durezza (Vickers e Brinell), su provini prelevati mediante taglio meccanico in direzione trasversale al giunto saldato. Queste prove valutano le caratteristiche meccaniche del giunto in termini di carico di rottura, comportamento a snervamento, allungamento e resistenza alla penetrazione.

Altra tipologia di controllo che richiede la distruzione del campione è l'indagine al microscopio ottico. In questo caso si analizza la microstruttura del materiale, con o senza attacco chimico, rilevando: dimensioni e forme dei grani cristallini, imperfezioni geometriche, distribuzione delle singole fasi metallurgiche ed eventuale presenza di impurezze all'interno del reticolo.

Sono disponibili anche prove di criccabilità a caldo e a freddo.

2.4. Controlli non distruttivi: termografia attiva e passiva

Il presente lavoro ha nell'apprendimento delle potenzialità della termografia, quale tecnica di controllo qualità secondo un metodo di analisi di tipo non distruttivo, il suo obiettivo principale.

Questa tecnica si basa sullo studio di anomalie termiche che si possono ricondurre ad errori associati alla fase di progettazione o all'insorgere di difetti.

Ad oggi i vantaggi riscontrati nell'impiego della termografia si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- possibile analisi a distanza del componente, con conseguente maggiore facilità di indagine e maggiore sicurezza per gli operatori in caso di ambienti di lavoro critici;
- mancato impiego di radiazioni pericolose, come invece accade nel caso di analisi mediante RX, che hanno anche dei costi elevati;
- immagini in alta risoluzione di facile interpretazione anche in tempo reale;
- possibile impiego con finalità preventive, così da ridurre guasti alle apparecchiature e/o fermi macchina;
- realizzazione di controllo qualità senza dover ricorrere alla rottura del componente.

La termografia è resa possibile, sia nella configurazione attiva che passiva, dall'utilizzo delle termocamere. Queste apparecchiature, aventi ormai dimensioni ed ingombri analoghi a quelle di una comune telecamera, acquisiscono le radiazioni elettromagnetiche di tipo infrarosso, invisibili all'occhio umano, e le convertono in immagini radiometriche ove è possibile reperire i valori termici [13]. La fonte principale dell'infrarosso è rappresentata dal calore: qualsiasi corpo ad una temperatura superiore allo 0 Kelvin emette delle radiazioni con una lunghezza d'onda compresa tra 10^{-2} e 10^{-5} m (figura 2.3).



Figura 2.3 Spettro elettromagnetico

Nel campo della termografia si possono riconoscere due tecniche di analisi: attiva e passiva [14], le quali vengono anche definite rispettivamente offline e online.

La differenza principale tra questi due approcci è riconosciuta nella sorgente di calore.

La termografia passiva permette di studiare dei materiali che si trovano naturalmente ad una temperatura superiore rispetto all'ambiente, mentre con il metodo di tipo attivo è necessario sollecitare termicamente il materiale dall'esterno con l'ausilio di specifiche sorgenti.

Per questo secondo metodo, a seconda della tipologia di eccitazione esterna adottata, si definiscono le seguenti tecniche: pulsata, a gradini, lock-in e a raffica di impulsi.

In <u>figura 2.4</u> si riporta uno schema qualitativo della configurazione tipica della termografia passiva.

In questo caso la termocamera viene posizionata frontalmente al componente da analizzare e

acquisisce i risultati termici superficiali.



Figura 2.4 Configurazione termografia passiva

I valori rilevati sono registrati e processati tramite apposito software. Le registrazioni vengono mostrate tramite una successione continua di frame di temperature espresse tramite andamenti in falsi colori.

I risultati possono fare riferimento a temperature reali o apparenti, in base all'esattezza con cui sono note le caratteristiche del materiale e le condizioni di lavoro.

A tal proposito bisogna opportunamente scegliere i seguenti parametri di prova: emissività, temperatura ambiente, temperatura riflessa e umidità.

Se temperatura ambiente e umidità non necessitano di particolari approfondimenti, lo stesso non vale per i restanti due parametri. L'emissività ε [13 e 17] viene definita come il grado di efficienza nell'emissione di radiazione infrarossa da parte di un oggetto. Dipende dalle condizioni della superficie del pezzo che si sta ispezionando (sporco, olio lubrificante), dalla rugosità e per alcuni materiali anche dalla temperatura. Può variare da 0 a 1, che corrisponde alla condizione di corpo nero: il valore unitario nella realtà non si verifica mai, in quanto i corpi reali non solo emettono ma anche riflettono le radiazioni.

I materiali metallici, in particolar modo quelli aventi una superficie lucida, hanno dei valori di emissività molto bassi e ad un incremento della temperatura corrisponde un aumento di questo coefficiente.

Come mostrano le <u>figure 2.5-2.6</u>, impostando dei valori di emissività errata è possibile sottostimare o sovrastimare il valore reale della temperatura.

Se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla T_{amb.}:

- ε alte determinano letture di T alte (cfr. 2);
- ε basse determinano letture di T basse (cfr. 1).



Figura 2.5 Stima errata dell'emissività (inferiore)



Figura 2.6 Stima errata dell'emissività (superiore)

La temperatura riflessa dipende dalle caratteristiche superficiali del pezzo, dalla temperatura in esercizio e dalla tipologia di materiale [17]. Esistono delle tecniche che permettono di rilevare la temperatura della radiazione riflessa, come quella del foglio di alluminio accartocciato, ma è buona norma approssimare questa temperatura con quella dell'ambiente.

La termografia passiva fornisce l'andamento della temperatura nel tempo per ogni punto del campione. Questi risultati possono essere sfruttati per effettuare degli studi sui valori massimi raggiunti e sulle curve di raffreddamento e di riscaldamento.

In figura 2.7 si riporta uno schema semplificato della termografia attiva.



Figura 2.7 Configurazione termografia attiva

La termografia attiva di tipo lock-in esamina la risposta termica del componente in regime stazionario durante la deposizione di calore. Sfrutta onde termiche per eccitare il materiale da esaminare mediante l'utilizzo di una sorgente di calore esterna, tipicamente un laser.

Con il termine lock-in ci si riferisce alla dipendenza del segnale di eccitazione di uscita da quello di ingresso. È necessario scegliere i parametri di prova del segnale di input sulla base del componente da esaminare: tipologia e numero di impulsi, periodo del singolo impulso e potenza di eccitazione laser.

La durata di eccitazione termica, o frequenza di eccitazione, dipende principalmente dallo spessore del campione e dalla posizione dei difetti che si vogliono indagare. In generale, per difetti superficiali si preferisce l'impiego di periodi brevi di impulso, mentre si adottano, in genere, periodi maggiori per analizzare i componenti in profondità, in base alla relazione che lega la massima profondità ispezionabile alla frequenza di eccitazione.

Da formule reperibili in letteratura è possibile concludere che frequenze elevate consentono uno

studio in prossimità dello strato superficiale, mentre basse frequenze permettono uno studio a profondità maggiori.

La selezione di una frequenza di modulazione non adatta potrebbe impedire la rilevazione di un difetto, è quindi buona prassi quella di procedere ad ispezioni, operando inizialmente con bassi periodi di eccitazione termica, aumentando gradualmente la durata in modo da avere uno studio completo lungo tutto lo spessore del materiale in esame [12].

Il valore di potenza con cui stimolare il campione dipende dal tipo di materiale. Materiali come i metalli con bassa emissività e che presentano caratteristiche termiche di elevata conduzione del calore, e quindi alta diffusività termica, necessitano di potenze più elevate ed è buona pratica condurre le prove che riguardano tali materiali combinando alti valori di potenza e brevi periodi di eccitazione.

La tecnica lock-in, tramite un software di post processing, fornisce delle informazioni di ampiezza e fase del segnale termico di risposta del materiale.

Le zone con difetti forniscono una risposta termica differente in termini di ampiezza e di fase rispetto alle zone sane. Le immagini di fase non dipendono dalle condizioni superficiali del componente e di conseguenza non sono influenzate dall'emissività scelta, permettendo un'analisi più in profondità rispetto all'ampiezza del segnale.

Lo schema in <u>figura 2.8</u> offre una panoramica completa della termografia e delle sue possibili applicazioni.

Si tratta di uno schema a blocchi attraverso cui è possibile selezionare una configurazione completa di tale tecnica di controllo non distruttivo.

La prima scelta è relativa alla tipologia di approccio: termografia passiva o attiva. In entrambi i casi è possibile poi individuare la configurazione della prova, avendo la possibilità di scegliere tra una simulazione statica o dinamica, in base alle collocazioni nel tempo della termocamera, della sorgente e dell'oggetto di analisi.

Un altro aspetto di cui bisogna tener conto è la modalità con cui avviene il trasferimento di energia e la successiva rilevazione del segnale termico. È possibile definire uno studio di tipo puntuale, lungo una linea o su di una superficie. La termografia può essere classificata anche in base al tipo di sorgente impiegata. Infine, è possibile scegliere tra differenti forme d'onda di eccitazione: modulata, pulsata, onda quadra e con sollecitazione a gradino.



Figura 2.8 Schema termografia

3. Strumentazione, materiali e metodi

3.1. Strumentazione saldatura: robot e saldatrice

I componenti saldati sono stati ottenuti impiegando il setting di figura 3.1.



Figura 3.1 Attrezzatura per saldatura

Si tratta di un robot antropomorfo della Comau a 6 assi (<u>figura 3.2</u>) equipaggiato con il sistema di saldatura digitale "Fronius CMT" costituito da due motori (<u>figura 3.2</u>):

- generatore per saldatura TransPuls Synergic 4000 CMT (O) con unità di controllo remoto RCU5000i;
- sistema di avanzamento del filo a rullini contro-rotanti VR4000 (O).



Figura 3.2 Robot Comau (sx) e saldatrice Fronius CMT (dx)

Oltre ai due motori si annoverano: l'unità di comando a distanza robot, il gruppo di raffreddamento ad acqua, la bombola di gas e la torcia di saldatura.

Il materiale d'apporto è raccolto sul generatore, secondo la modalità "rocchetto di filo", su di una bobina da cui viene trainato attraverso il VR4000.

Nella tabella 3.1 vengono riportati i parametri degli elementi macchina reperiti dal catalogo Fronius.

Parametri sul sistema di saldatura		
Parametri sul generatore di corrente (codice tps 5000 del manuale tecnico)		
Parametri	<u>Valori</u>	
Efficienza	89%	
Intervallo corrente saldatura	3-500 [A]	
Tensione al minimo	70 [V]	
Tensione di esercizio	14,2-390 [V]	
Parametri sulla sbobinatrice (codice vr 4000 del manuale tecnico)		
Parametri	<u>Valori</u>	
Diametro filo	0,8-1,6 [mm]	
Parametri standard sul robot		
Parametri Valori		
Stick-out	15 [mm]	
Flusso Gas Attivo	15 [l/min]	

Tabella 3.1 Parametri sistema di saldatura

Questo equipaggiamento è il più adatto ad essere telecontrollato e dunque robotizzato attraverso una modalità di funzionamento di tipo semi-automatica. L'operatore configura i parametri di saldatura agendo sull'unità di controllo remoto a bordo della saldatrice e definisce il percorso del robot attraverso la manopola dell'unità di comando a distanza.

Nelle saldatrici di più recente sviluppo le variabili del processo (tensione, intensità di corrente e velocità di avanzamento filo) sono legate tra loro da relazioni empiriche individuate in fase di progettazione. Queste relazioni vengono definite "curve sinergiche" e sono memorizzate nel sistema RCU5000i.

Tutti i parametri di saldatura risultano tra loro interdipendenti e questo consente di realizzare delle configurazioni di processo ottimali in base al materiale scelto, in termini di tipologia e geometria, al materiale d'apporto, al diametro del filo e alla tipologia di gas.

Il macchinario "Fronius CMT" è programmato per funzionare con tre possibili modalità:

- I. saldatura Synergic ad impulsi;
- II. saldatura Synergic di tipo standard;
- III. Cold Metal Transfer (CMT).

La tecnologia utilizzata per la realizzazione dei provini è la "Cold Metal Transfer", brevettata dalla Fronius agli inizi del 2000.

3.1.1 Saldature Cold Metal Transfer

È una modalità di saldatura innovativa rispetto alla tradizionale MAG: si ha un trasferimento freddo di metallo, ovvero con un apporto termico ridotto rispetto ai processi di saldatura tradizionali, e un controllo meccanico della lunghezza di arco elettrico [3].

Ha una buona applicabilità nel campo delle saldature di lamiere molto sottili e garantisce un migliore risultato finale del giunto. Si eliminano gli spruzzi e si riducono anche le distorsioni delle lamiere a causa del minor apporto termico.

È simile al processo short arc, con la differenza principale che si sfruttano correnti più basse.

Nei sistemi tradizionali il filo di materiale d'apporto viene spinto in avanti verso il materiale base fino alla realizzazione del corto circuito con conseguente aumento di intensità di corrente elettrica, apporto termico elevato e fusione del metallo. Il filo viene così gestito attraverso movimenti fissi o variabili ma preimpostati.

I livelli di corrente imposti sul CMT sarebbero troppo bassi per garantire una strizione della goccia e il suo deposito sul bagno fuso secondo le modalità proprie dello short arc. Il materiale d'apporto resterebbe incollato al bagno fuso e il processo di saldatura si arresterebbe o genererebbe dei giunti non conformi.

Con il CMT il movimento del filo è correlato alla presenza e allo sviluppo dell'arco elettrico. Rispetto ai sistemi tradizionali si ottiene un arco elettrico più stabile con lunghezza non correlata alla qualità superficiale delle lamiere. Al controllo dei parametri già descritti si aggiunge anche quello automatico della velocità del filo. A tale scopo sono fondamentali altri due equipaggiamenti del robot (figura 3.3):

- wire buffer;
- motore in AC integrato sulla torcia.



Figura 3.3 Wire buffer (sx) e motore integrato sulla torcia (dx)

Il primo è un buffer che permette di accumulare una riserva di filo in modo da disaccoppiare i due sistemi di movimentazione del materiale d'apporto (VR4000 e motore su torcia); il secondo è un meccanismo di traino a rullini del filo di materiale d'apporto che coopera con il medesimo meccanismo a valle della bobina.

Il filo durante il processo di saldatura, grazie al motore in corrente alternata sulla torcia che permette una rotazione dei cilindri in senso orario e antiorario, può procedere con velocità positiva o negativa. La frequenza con cui il materiale d'apporto viene ritratto è molto bassa. Questa dinamica necessita dell'utilizzo di sistemi di movimentazione molto precisi per un corretto funzionamento e per risultati ottimali.

Il funzionamento simultaneo dei due motori a rullini garantisce un maggior controllo e una migliore precisione durante il distaccamento della singola goccia sul bagno fuso. La goccia risulta anche più piccola per via dei valori di potenza e di corrente impiegati.

Il trasferimento del materiale si verifica nella fase di short arc con intensità di corrente prossima allo zero.

Si riportano in <u>figura 3.4</u> gli andamenti, durante un singolo ciclo, dei tre principali parametri di processo.



Figura 3.4 Andamento parametri di processo CMT

Come si può osservare dagli andamenti della velocità, il filo viene ritratto nel momento in cui si realizza il corto circuito. La velocità diventa positiva quando termina il corto circuito e si ha l'apertura dell'arco.

L'intensità di corrente è quasi nulla durante l'arco elettrico e quindi durante il trasferimento di materiale d'apporto. Questo andamento di corrente è responsabile del minore apporto termico rispetto ai metodi tradizionali. La corrente aumenta durante la fase di breakup ma è il movimento del filo a determinare l'apertura dell'arco, così da rendere il processo meglio controllato.

3.2. Sistema di fissaggio

Sono stati tenuti in considerazione due diversi sistemi (figura 3.5):

- pinze grip su appoggio a 2 assi;
- fixture.



Figura 3.5 Sistema di fissaggio mediante pinze grip (sx) e fixture (dx)

Nel primo caso, nella configurazione definitiva adottata in laboratorio, sono state utilizzate 3 pinze grip a forcella e 2 a morsetto. Non è stato possibile applicare una perfetta simmetria delle strumentazioni a causa dell'ingombro generato dal supporto dalla base di appoggio. Si è cercato comunque di riprodurre un sistema di vincoli il più possibile simmetrico rispetto al cordone.

La procedura di fissaggio prevede, in ordine di esecuzione, i seguenti step:

- Posizionamento sul braccio antropomorfo a due assi di due lamiere di acciaio grezzo aventi uno spessore di 4 mm, mantenendo al centro una distanza tra i lembi tale da creare una cavità utile alla realizzazione del cordone per la saldatura di testa, in modo da distanziare la zona fusa dalla base di appoggio;
- Posizionamento delle 2 lamiere da saldare con un gap definito tramite piccoli distanziali posizionati alle due estremità;
- Fissaggio tramite pinze;
- Controllo tramite spessimetro dell'effettivo gap creato;
- Eventuali riposizionamenti;
- Definizione del percorso della torcia tramite le coordinate spaziali del braccio robotico.

A causa di alcune problematiche riscontrate con questo sistema di fissaggio, relative soprattutto alle distorsioni delle lamiere e alla precisione nella ripetibilità del posizionamento, si è deciso di provare ad utilizzare anche la maschera di saldatura. È costituita da due premi-lamiera in rame e sei morsetti di chiusura.

Durante le prove sono emersi i seguenti svantaggi relativi all'impiego della fixture:

- acquisizione della ripresa con termocamera limitata alla sola zona del cordone di saldatura;
- configurazione differente alle condizioni di linea di produzione;
- base e premi lamiera in rame che perturbano la conduzione del calore con conseguenze anche a livello micrografico.

Considerato l'obiettivo finale del progetto, si è deciso di approfondire ugualmente i risultati ottenuti con la fixture svolgendo tutte le prove distruttive richieste, ma i giunti con difetti indotti sono stati realizzati unicamente con il sistema con pinze di serraggio.

3.3. Strumentazione prove distruttive

Le attrezzature impiegate per il controllo qualità e conformità, mediante CD, dei giunti saldati sono:

- micro-durometro Affri Wiki JS;
- pressa inglobatrice Leco per campioni metallografici;
- macchina per lucidatura metallografica;
- macchina per trazione Galdabini SUN 20/v55b;

Si riportano le caratteristiche tecniche e le linee guida di utilizzo di ciascuno strumento.

3.3.1. Micro-durometro Affri Wiki JS

Questo macchinario (<u>figura 3.6</u>) viene impiegato per l'esecuzione delle prove di micro-durezza. Segue gli standard normativi EN-ISO 6507.

Nella <u>tabella 3.2</u> sono riportate le informazioni tecniche relative al macchinario.

Grandezza	Valore
Tavola x/y	Motorizzata 200x100
	mm
Corsa lungo z	135 mm
Accuratezza spostamenti	0.5 μm
Range forza applicabile	0.1-30 kgf
Accuratezza di carico	0.1%

Tabella 3.2 Specifiche tecniche Micro-durometro

Si tratta di un sistema completamente automatizzato, con interfaccia grafica tramite software su pc. Quest'ultima viene impiegata per definire: il carico da applicare ad ogni singola indentazione, il pattern con la distribuzione geometrica delle indentazioni sulla superficie del pezzo e la lente di lettura dei risultati.

Il campione è posizionato su di una tavola orizzontale che consente degli spostamenti in direzione X e Y.

La torretta verticale, la quale ha la possibilità di traslare lungo la direzione Z, monta quattro lenti e un indentatore che possono ruotare automaticamente attorno all'asse Z.

La prova si suddivide nelle seguenti operazioni:

- Definizione area di lavoro;
- Setup del pattern;
- Ottimizzazione prova con messa a fuoco del campione;
- Realizzazione impronte;
- Lettura risultati.



Figura 3.6 Micro-durometro Affri Wiki JS

Possiede un penetratore piramidale a base quadrata e 4 lenti per la misura delle diagonali (50X, 100X, 400X e 500X).

Il software fornisce in output il valore della durezza in funzione della posizione dell'impronta.

La formula da cui deriva il valore di durezza è la seguente:





Figura 3.7 Prova Vickers

La prova Vickers è eseguita con una punta di diamante (<u>figura 3.7</u>), base quadrata e carico di 0,5 kgf, per un tempo effettivo di mantenimento di 10 s. Il codice associato alla prova è pertanto HV0.5/10. Si definiscono prove di micro-durezza proprio per via dell'applicazione di carichi molto piccoli per un quantitativo di tempo limitato.

Il carico applicato, reputato il più idoneo per un'analisi microstrutturale, determina una maggiore dispersione dei risultati ma consente di eseguire delle impronte più ravvicinate.

Si utilizza un pattern, ovvero una traiettoria dei punti di durezza, di tipo lineare con impronte ad una distanza di 0,5mm nel tratto iniziale e finale. La distanza viene ridotta a 0,25 mm in corrispondenza della zona centrale dove si verifica una sensibile variazione del valore di durezza.

Il pattern è centrato rispetto al cordone, sia in direzione orizzontale che verticale. Il centro del giunto si trova a circa 11mm dall'origine del pattern lineare.

La cucitura conta 60 impronte su ogni campione.

Le prove sono state eseguite verificando che la distanza tra i centri di due indentazioni adiacenti sia pari almeno a tre volte il valore del diametro medio, come richiesto da normativa [10].

3.3.2. Pressa inglobatrice Leco per campioni metallografici

Prima di eseguire le prove di durezza e micrografiche, è necessario preparare il campione.

Per ogni campione sono stati ricavati dei tagli longitudinali e ortogonali al cordone di saldatura.

Le dimensioni del campione, lungo la direzione ortogonale al cordone di saldatura, sono ridotte a circa 30 mm in modo da garantire un corretto posizionamento all'interno dello stampo.

Il modello di pressa utilizzato è la PR-36 della Leco (figura 3.8). Si tratta di un macchinario di tipo elettro-idraulico che in un unico ciclo completamente automatico (pressione, riscaldamento e raffreddamento) consente di inglobare i campioni.



Figura 3.8 Pressa inglobatrice PR-36 Leco

Si utilizza della resina termoindurente costituita da polvere nera di bachelite. Si realizzano degli stampi aventi diametro Ø38mm e un'altezza di circa 25 mm, variabile in base alle dimensioni del trancio di lamiera ricavato dai processi di taglio.

Nella tabella 3.3 sono riportati i parametri impostati sulla pressa.

Grandezza	Valore
Temperatura	150 °C
Pressione	4100 psi (282,6 bar)
Тетро	8 min

Tabella 3.3 Parametri utilizzati sulla inglobatrice

3.3.3. Macchina per lucidatura metallografica

Una volta inglobati i campioni, questi vengono lavorati in modo da ottenere una superficie perfettamente lucida.

Si utilizza la macchina utensile modello LS3V della Remet (<u>figura 3.9</u>). L'operazione viene eseguita a mano premendo in modo uniforme il provino contro un foglio di carta abrasiva fissato ad un disco rotante.

Si utilizza acqua come fluido refrigerante.

La lappatura prevede i seguenti step di granulometria a grana sempre più fine:

- P180 con due lavorazioni sul campione lungo due direzioni ortogonali;
- P320 con lucidatura lungo un'unica direzione;
- P600 con lucidatura lungo un'unica direzione;
- P800 con lucidatura lungo un'unica direzione;
- P1200 con lucidatura lungo un'unica direzione;
- Panno finale con sospensione diamantata avente un diametro medio delle particelle



Figura 3.9 Macchina pulitrice metallografica

dm=9 μm.

Segue un attacco chimico leggero della durata di circa 10s della superficie con Nital 3%. Si tratta di una miscela con 3% di HNO₃ in una soluzione di alcool etilico. È utile per rilevare in modo grossolano la struttura del materiale con un successivo ingrandimento al microscopio ottico di 7,21X.

Il nital infatti corrode i bordi di grano del materiale, rendendo visibile la microstruttura dell'acciaio. Il pezzo viene nuovamente lucidato con il panno, in modo che l'attacco chimico non interferisca con la lettura delle dimensioni delle diagonali durante la prova di durezza Vickers.

3.3.4. Macchina per trazioni Galdabini

Questo macchinario è utilizzato per delle prove con carico di tipo mono assiale su provini piatti rettangolari ricavati dai giunti saldati. È impiegata per la realizzazione di prove di tipo statico con un aumento graduale del carico fino al raggiungimento della condizione di rottura.

È una macchina universale per prove su materiali metallici, avente un carico massimo di 200 kN.

La <u>figura 3.10</u> mostra la Galdabini Sun 20/v55b che è costituita da:

- Basamento;
- Elementi di sostegno;
- Una traversa fissa con testa di chiusura di tipo pneumatico;
- Una traversa mobile solidale ad uno stantuffo posizionato sopra la traversa fissa e anch'essa con testa di chiusura di tipo pneumatico;
- Due barre montanti.

La macchina è stata configurata per realizzare delle prove senza l'ausilio di estensimetri e con controllo di velocità, la quale viene mantenuta costante ad un valore di 6 mm/min. Si adotta un precarico sul serraggio del pezzo di 0,1 kN.

La prova può essere gestita in modo computerizzato con lettura risultati automatica o semiautomatica.



Figura 3.10 Macchina per trazioni Galdabini

3.4. Strumentazione prove non distruttive

Le attrezzature impiegate per il controllo qualità e conformità, mediante CND, dei giunti saldati sono:

- Termocamera online equipaggiata con software FLIR;
- Termocamera offline integrata sul sistema DES.

Si riportano le caratteristiche tecniche e le linee guida di utilizzo di ciascuno strumento.

3.4.1. Termocamera ONLINE

La termocamera ad infrarossi impiegata per acquisire il segnale termografico del processo di saldatura è del tipo AGEMA Thermovision 900 SW-TE della FLIR Systems, <u>figura 3.11</u>, equipaggiata con detector SPRITE raffreddato termo-elettricamente, avente una risoluzione termica NETD pari a 0,1 °C e adatta al range spettrale da 2 a 5,4 μ m. Le specifiche sono state raccolta in <u>tabella 3.4</u>.



Figura 3.11 AGEMA Thermovision[®] 900 SW-TE

Detector	2 x SPRITE (Signal Processing in the
	elements), raffreddamento termo-elettrico
	a -70°C (TE), serial scanning
Campo spettrale	Da 2 a 5,4 µm (Short Wave lenght)
Sensibilità termica	0,1°C a 30°C
Campo di vista (FOV)	20°x 12,5°
Risoluzione geometrica	2,5 mrad
Numero di range di temperature	4
Filtri disponibili	5 (Flame, Sun reflex, CO2, Atmospheric,
	Glass High Temperature)
Accuratezza	$\pm 1^{\circ}$ C (nel range 1), $\pm 1\%$ (nei range 2-4)
Ripetibilità	$\pm 0,5^{\circ}$ C (nel range 1), $\pm 0,5\%$ (range 2-4)
Frequenza acquisizione immagine	20/30 Hz (senza filtri)
Intervallo di misura della temperatura	da -10°C a +500°C (+2000°C con uso
	filtri)
Risoluzione spaziale	140 elementi per linea (modulazione 50%)
Risoluzione delle immagini	204x128 pixel (204x86 a 30 Hz)
Numero di linee per frame	128 (86 a 30 Hz)
Pixel per linea	204
Numero di pixel	25728 (17286 a 30 Hz)
Frequenza IR di linea	3,5 kHz
Digitalizzazione immagini	12bit

Tabella 3.4 Specifiche tecniche termocamera online

La sequenza di immagini, o termogramma, è acquisita dallo strumento direttamente collegato con un'interfaccia PCMCIA al PC che, mediante il software specifico del costruttore (ThermaCAM ResearcherTM Pro 2.8), consente di generare file di acquisizione in formato ".SEQ", filmati termografici che possono essere visualizzati a video per estrarre informazioni qualitative degli andamenti termici superficiali. Le impostazioni dei parametri di visualizzazione possono essere modificate e calibrate in seguito alla registrazione delle immagini.

Lo scanner converte la radiazione infrarossa in segnali digitali a 12bit che vengono trasmessi via cavo o collegamento in fibra ottica al processore e sono interpretati dal sistema di controllo che li usa per visualizzare l'immagine dell'oggetto a colori o in scala di grigi tramite driver di grafica che impiega un sistema a 8bit, fornendo un massimo di 256 colori a video.

Il filtro utilizzato per la registrazione delle prove di saldatura è il Glass High Temperature, che consente delle rilevazioni termiche fino a 2500°C. L'intervallo di temperatura, selezionato tra le opzioni disponibili al software per tale filtro, è da 500°C a 2500°C. Non è quindi possibile per il presente studio tenere sotto controllo il processo nella fase di riscaldamento e raffreddamento al di sotto dei 500°C. L'uso di questo filtro non permette registrazioni a massimo *frame rate* di 30 Hz, infatti il sensore scansiona le temperature durante la saldatura acquisendo 208×86 pixel, in modalità di finestra ridotta che permette di avere il massimo frame rate possibile di circa 7 Hz.

La termocamera è stata posizionata all'interno della cella di saldatura nella posizione mostrata in figura 3.12.

La ripresa è effettuata dall'alto focalizzando l'inquadratura su tutta la zona di interesse, ovvero su tutta la lunghezza del cordone. In questo modo si possono ottenere i risultati termici superficiali per ogni istante del processo, riuscendo anche ad analizzare le fasi di riscaldamento e di raffreddamento.

La scelta della posizione è stata effettuata tenendo in considerazione gli ingombri dei movimenti del braccio robotico, la distanza minima di sicurezza al riparo da possibili lapilli di saldatura che rischiano di danneggiare la lente al germanio e fattori che influiscono sulla misurazione termografica, come l'angolo di vista rispetto al corpo osservato. A questo riguardo si è perciò imposto un posizionamento con un'angolazione relativa inferiore ai 25°, così da non influenzare il valore di emissività.



Figura 3.12 Posizionamento termocamera all'interno della cella

Prima di effettuare le registrazioni è necessario impostare i parametri di prova sul software. Si considerano stabili le condizioni dell'ambiente.

Durante il processo di saldatura il range di temperatura rilevato è molto ampio, si passa infatti dalla temperatura ambiente a quella di fusione dell'acciaio DP600. In queste condizioni operative risulta assai complesso poter definire un valore costante dell'emissività ed inoltre il software non permette una variazione continua del coefficiente al variare della temperatura e della microstruttura durante l'intero processo. Non è inoltre possibile valutare il reale valore del coefficiente a causa delle limitazioni imposte dagli strumenti elettronici (termocoppie). Tenuto conto di queste difficoltà è stato stimato un valore di emissività che permette di visualizzare a video un valore di temperatura massima consono alla fusione dell'acciaio (T_f = 1400÷1500 °C).

Questo metodo consente però di giungere a una valutazione piuttosto qualitativa degli andamenti termici superficiali, con temperature che si prefigurano maggiormente come apparenti nel momento in cui ci si discosta dai valori più elevati.

Coefficiente di emissività	0,4	
Distanza tra oggetto e	0,8 m	
termocamera		
Temperatura riflessa	20°C	
Temperatura ambiente	20°C	
Umidità relativa	30%	
Range di temperatura	450÷1700 °C	
Tabella 2 E Condizioni di prova		

Le condizioni di laboratorio e di prova sono riportate in tabella 3.5.

Tabella 3.5 Condizioni di prova

Dai dati raccolti è possibile effettuare sulle registrazioni i seguenti studi:

- Analisi puntuale tramite cursore che effettua una media della temperatura per ogni istante • di tempo su 9 pixel;
- Analisi tramite box che effettua una media della temperatura di un'area per ogni istante di tempo;
- Andamento curva di riscaldamento e di raffreddamento.

I grafici generati possono essere elaborati su Matlab.

3.4.2. Termocamera OFFLINE e sistema DES

È stato utilizzato uno strumento modulare di eccitazione termica fornito dalla DES, denominato MultiDES System LASER, <u>figura 3.13</u>, brevettato per effettuare controlli non distruttivi mediante termografia su diverse tipologie di materiali. Attraverso questa apparecchiatura è possibile realizzare delle analisi di integrità e di conformità dei componenti, nonché dei giunti saldati. Questa configurazione laser, che trova la sua principale applicazione nell'ispezione di metalli e nell'analisi delle saldature, assicura elevata duttilità, grazie alla possibilità di modulare la potenza e la dimensione del fascio, garantendo ottima risoluzione geometrica.



Figura 3.13 Sistema MultiDES System LASER

I vantaggi di tale sistema sono legati alla semplicità, alla precisione di analisi e alla possibilità di un'implementazione in linea.

Il multiDES System LASER è costituito da:

- Centralina elettronica con software di gestione MultiDES R 3.0 che consente di generare differenti forme d'onda e di gestire le fonti di eccitazione termica;
- Centralina "Laser Control Unit" (LCU) che consente di gestire le forme d'onda, le caratteristiche degli impulsi (ripetizioni, durata e potenza), la movimentazione della testa di scansione e le interazioni con il laser, sia in fase di avvio sia a fine stimolazione termica;
- Modulo Laser IPG 50W (<u>tabella 3.7</u>);
- Unità di governo costituita da un PC di controllo;
- Termocamera FLIR A6751sc di tipo raffreddata (<u>tabella 3.6</u>) con software ResearchIR della FLIR per gestione e settaggio dei parametri del sensore termico;
- Software di analisi dati termografici IRTA 1.6.13 programmato per eseguire diverse tecniche di indagine: Lock-in, Transient e analisi termoelastica delle sollecitazioni TSA;
- Strumentazione di supporto in dotazione;
- Cabina protettiva e di sicurezza per il laser.

Detector	FLIR Indium Antimonide (InSb) raffreddamento a ciclo chiuso
Campo spettrale	Da 3.0 a 5,0 μm
Risoluzione	640x512 pixel (Full frame), 320x256 e 160x128
Numero di linee per frame	512

Pixel per linea	640
Numero di pixel	327680
Windowing	320x256/160x128
Digitalizzazione immagini	14bit
Pitch	15 μm
Sensibilità termica NETD	< 20mK
Integration time	Da 480 ns a Full Frame
Pixel clock	50 MHz
Frequenza acquisizione immagine	Da 0.0015 Hz a 125 Hz (Full frame)
Range di temperatura standard	Da -20°C a 350°C (senza filtri)
Accuratezza	$\pm 1^{\circ}$ C o $\pm 1\%$ della lettura
Lenti disponibili	17 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm
Messa a fuoco	Manuale

Tabella 3.6 Specifiche tecniche termocamera FLIR A6751sc

Tipologia	Pulsed Itterbium Fiber Laser
Potenza massima	50 W
Forma d'onda	Impulso singolo/treni di impulsi
Ripetizioni	1-65025
Durata impulso	5 ms – 10000 s (step 1 ms)
Modulazione potenza	11-100% (step 1%)
Dimensione spot laser	?

Tabella 3.7 Specifiche tecniche modulo Laser IPG 50W

Utilizzando questa strumentazione sono state eseguite delle prove di termografia attiva, con tecnica lock-in e in configurazione di riflessione, cioè con termocamera e laser posizionati dalla stessa parte rispetto al campione in esame.

Il giunto saldato è posizionato all'interno della cabina protettiva in modo da disporre il cordone frontalmente alla termocamera ad una distanza di 1 m, come si può notare in <u>figura 3.13</u>, ed è fissato tramite appositi supporti.

Posizionato il componente e orientata opportunamente la termocamera si procede con la configurazione dei parametri di prova per il controllo del sensore termico tramite il software ResearchIR Max. In questa prima fase è possibile impostare la finestra di visualizzazione, scegliendo tra le tre diverse risoluzioni disponibili (tabella 3.6).

La scelta dei numeri di pixel da visualizzare è importante anche perché ad essa è legata la frequenza di acquisizione: minore è la dimensione della finestra di visualizzazione, maggiore è il valore massimo della frequenza di acquisizione disponibile.

Questa deve essere scelta in modo da soddisfare il requisito minimo che è rappresentato da 100 frame per impulso di eccitazione laser durante la prova.

È possibile anche definire l'intervallo di temperatura, selezionandolo tra i range disponibili sul software.

La scelta del range termico è fondamentale per evitare il fenomeno di saturazione, il quale impedisce la registrazione di risultati termici corretti.

Attraverso un algoritmo interno, alla scelta della frequenza di acquisizione e del range di temperatura è associato un valore di integration time, ovvero il tempo necessario al sensore per l'acquisizione dei dati.
Aumentando l'intervallo di temperatura e riducendo la frequenza di acquisizione si ottiene un tempo di integrazione minore e quindi una maggiore velocità di acquisizione.

Bisogna impostare anche gli altri parametri di prova (emissività, distanza, temperatura riflessa, temperatura ambiente e umidità), che però possono essere impostati anche dopo l'acquisizione.

Da analisi fatte in laboratorio utilizzando un termometro ad infrarossi e utilizzando un metodo di tipo iterativo è stata stimata un'emissività per il materiale base pari a 0,4 e 0,8 per il cordone di saldatura. Questi valori si devono intendere per una superficie pulita, senza l'ausilio di nastri o vernici di colore nero.

Dopodiché si procede con la configurazione del software Multides R 3.0, essenziale per il posizionamento dello *spot laser* sulla lamiera e per la scelta del tipo di stimolazione termica per la prova.

È possibile realizzare una prova su di un singolo punto di misura, mantenendo fisse le coordinate del puntatore laser per tutta la durata della prova, oppure si può definire un percorso abilitando la movimentazione della testa di scansione.

È disponibile una configurazione che permette di avviare la registrazione della prova con termocamera con un certo anticipo rispetto all'avvio della stimolazione termica.

Si può scegliere tra sorgente di tipo onda quadra a singolo impulso o nella modalità di treno d'impulsi (figura 3.14).



Figura 3.14 Schermata sistema MultiDES R3.4.4 modulazione sorgente laser

In entrambi i casi bisogna definire il periodo di eccitazione e la modulazione della percentuale di potenza rispetto al valore massimo disponibile al laser (50 W). Nel caso del treno d'impulsi è disponibile anche la scelta del numero di impulsi e del numero di cicli.

Il segnale termico acquisito dalla termocamera, disponibile in formato ".ats", può essere elaborato attraverso il software "Infrared Thermography Analysis" (IRTA). Tramite questo software è possibile eseguire l'analisi di tipo lock-in.

Per l'elaborazione dei dati è sufficiente fornire in input il valore del periodo di acquisizione e

l'intervallo di frame da analizzare tra quelli acquisiti.

È opportuno identificare il frame iniziale come quello antecedente la visualizzazione a video della risposta termica del materiale. Trascurando tutti i frame iniziali si riducono le dimensioni dei file da elaborare.

L'analisi di tipo lock-in eseguita su forma d'onda quadra permette uno studio multi-frequenziale, fornendo dei risultati sulla I, III e V armonica tramite un'unica acquisizione.

L'output dell'analisi lock-in è costituito da 6 immagini in falsi colori: 3 figure rappresentanti l'ampiezza della risposta del materiale rispetto all'eccitazione termica (<u>figura 3.15</u>) e 3 riferite al ritardo di fase (<u>figura 3.16</u>).



Figura 3.15 Esempio immagine di ampiezza su software IRTA



Figura 3.16 Esempio immagine di fase su software IRTA

Ogni coppia di immagini fa riferimento ad una frequenza di acquisizione e ogni pixel esprime un valore di ampiezza di unità di segnale o di angolo di fase.

Questi dati si possono analizzare sotto forma di matrici. Esistono diversi metodi di studio, quello utilizzato in fase progettuale è quello relativo all'identificazione del massimo valore di ampiezza. Con l'ausilio di Matlab si possono estrapolare delle sottomatrici dalle immagini di ampiezza e fase. Dopodiché si procede all'elaborazione di grafici 2D in cui si riportano:

- sull'asse y i valori del segnale lungo la riga o la colonna, centrate sul valore massimo;
- sull'asse X il corrispettivo pixel.

Si possono anche elaborare dei grafici 3D che forniscono sull'asse z i valori del segnale per ogni pixel identificato sul piano xy.

3.5. Materiale DP600

Sono state saldate delle lamiere rettangolari di 100 mm x 150 mm e uno spessore di 1,5 mm (figura 3.17). Il maggior numero delle saldature di interesse per il CRF ha un cordone con una lunghezza compresa tra 30 e 70 mm. Generando un cordone di 110-100 mm, escludendo tratto iniziale e finale come definito da normativa [7], si ha una zona intermedia sufficiente alla realizzazione dei test di verifica di conformità.



Figura 3.17 Geometria giunto saldato

Come materiale base è stato utilizzato un acciaio ad alta resistenza la cui designazione commerciale è DP600 zincato.

Secondo il sistema di codifica per lastre di acciaio il codice corrispondente al materiale in questione è:

DPC330Y590T GI60/60U

Si tratta di un acciaio bifasico (DP), la cui microstruttura è costituita da una matrice ferritica duttile con una fase dispersa, principalmente martensite, la quale garantisce una più elevata resistenza a rottura.

La scelta di questo materiale non è casuale. In ambito automotive è sempre maggiore la richiesta di materiale dotato di buona resistenza ma anche di buona formabilità, contenendo il peso in modo da ridurre anche i consumi.

Si tratta di acciai comuni aventi un rapporto di snervamento basso e una buona capacità di incrudimento, che invece determina un carico di rottura elevato. Complessivamente quindi il rapporto YS/TS è minore di quello rilevato per gli acciai comuni.

Per queste caratteristiche questi materiali vengono impiegati soprattutto per operazioni di formatura con stiramenti elevati.

Si tratta di un prodotto laminato a freddo, da lì la lettera "C" nel codice.

Nella designazione vengono riportati anche i valori di carico di snervamento (330 MPa) e di carico di rottura (590 MPa).

Nella tabella 3.8 sono state riassunte le proprietà meccaniche in direzione longitudinale.

Nomenclatura	YS [Mpa]	TS [MPa]	A ₅₀ %	A ₈₀ %	n _{4-6%}	n 10%-UE	BH2 [MPa]
DPC330Y590T	330-430	590	21	20	0.18	0.14	30

Tabella 3.8 Proprietà meccaniche DP600

Il valore $n_{4-6\%}$ indica la percentuale di aumento dell'allungamento dopo incrudimento. È possibile estrapolare questo parametro dalla curva di trazione.

Il BH2 invece indica di quanto aumenta il carico di snervamento in MPa dopo ricottura.

Il processo di rivestimento è il GI. Questo codice corrisponde ad un rivestimento di zinco per immersione a caldo mediante processo continuo, immergendo la lastra di acciaio in un bagno fuso con un tenore di zinco pari in massa almeno al 99%. La classe di rivestimento è 60, ovvero con una densità superficiale di rivestimento di 60 g/m² per lato della lamiera.

La composizione chimica per questo acciaio è stata riportata nella tabella 3.9.

Nomenclatura	С	Si	Mn	Р	S	AI	Cu	Ti+Nb	Cr+Mo	В
DPC330Y590T	0.15	0.75	2.5	0.08	0.015	0.01	0.2	0.15	1.4	0.005
Tabella 2.9 Composizione chimica DB600										

Tabella 3.9 Composizione chimica DP600

Le superfici non esposte (U) sono prive di difetti di laminazione gravi come pieghe, segregazioni, scorie, incrostazioni, bave, fori e schegge. Le lamiere sono ricoperte su tutti i lati con un olio per laminazione approvato da FCA.

Per quanto riguarda invece il materiale d'apporto è stato utilizzato del filo con nome commerciale G3Si1 con un diametro di 1.2 mm, rivestito con una guaina in Cu per migliorarne la fluidità e ridurre i casi di blocco macchina.

Nella <u>tabella 3.10</u> sono state riportate le proprietà meccaniche del materiale d'apporto, mentre la composizione chimica è riportata nella <u>tabella 3.11</u>.

Nomenclatura	YS [Mpa]	TS [MPa]	A ₅ %		
G423MG3Si1	420	530	24-29		
Taballa 2.10 Proprietà massanisha matariala d'annorte					

Tabella 3.10 Proprietà meccaniche materiale d'apporto

Nomenclatura	С	Si	Mn
G423MG3Si1	0.08	0.6-0.8	1.18-1.25

 Tabella 3.11 Composizione chimica materiale d'apporto

Trattandosi di un processo di saldatura di tipo MAG, è stato impiegato il gas attivo M21 Ar+18%CO₂. Si tratta di una miscela composta da 82% da Argon e per un 18% da CO₂.

4. Procedura per la realizzazione dei campioni conformi

In questo capitolo vengono presentati i risultati di saldatura ottenuti nelle diverse prove che concorrono alla definizione del riferimento per il piano sperimentale.

4.1. Prove di setup e giunti di riferimento

Sono state eseguite innumerevoli prove col fine di individuare i parametri di setup necessari alla realizzazione dei 5 giunti sani consecutivi. Per giunto sano si intende un giunto privo di qualsiasi tipo di difetto. In questo primo step la valutazione è stata fatta solo a livello macroscopico, riuscendo a scartare quei giunti saldati che presentano dei difetti visibili ad occhio nudo.

Durante il setup i valori riportati nella <u>tabella 4.1</u> sono stati mantenuti costanti in quanto ritenuti ottimali per il processo in studio, grazie all'esperienza dell'operatore e alle informazioni riportate all'interno delle normative.

Grandezza	Valore
Stick out [mm]	15
Arc start potenza macchina	100% (costante)
Portata in volume di gas attivo [l/min]	15
Preapertura gas [s]	1
Ritardo chiusura gas [s]	1
Distanza tra i lembi/Gap [mm]	1.2

Tabella 4.1 Parametri di saldatura durante setup

L'ottimizzazione del processo è stata eseguita intervenendo sulla velocità di avanzamento del filo [m/min] e sulla velocità di avanzamento lineare del robot [mm/min].

Si riportano a titolo d'esempio in <u>figura 4.1</u> i risultati ottenuti per due diverse combinazioni di parametri.



Figura 4.1 Confronto giunto conforme e di scarto

La prova fallita (riquadro rosso) corrisponde alla prova con codice "campione001_14Giugno", con parametri di saldatura pari a:

- velocità di avanzamento filo 2.8 m/min;
- velocità di avanzamento robot 500 mm/min.

Questa coppia di parametri rende il pezzo non conforme per via degli sfondamenti distribuiti lungo tutto il cordone.

Durante la prova ottimale (riquadro verde) con codice "campione004_27Luglio", sono state utilizzate delle velocità di 2 m/min e 500 mm/min, quindi è stata ridotta la velocità di avanzamento del filo.

Le prove di setup hanno prodotto 58 giunti saldati non conformi secondo normativa UNI EN ISO 6520-1 e capitolato interno CRF PS50001/01.

In seguito a questi test è stato possibile elaborare le seguenti considerazioni:

- una velocità di avanzamento robot elevata crea il problema di avere scarso materiale di apporto, con conseguente formazione di fori, e mancanza di fusione per livelli di temperatura raggiunta inferiore a quella di fusione del materiale base; una velocità ridotta invece crea un cordone con eccessivo materiale di apporto e con sfondamenti.
- una velocità di avanzamento filo elevata comporta un eccessivo apporto di materiale, mentre una velocità ridotta causa sfondamenti, mancanza di fusione e di penetrazione.

Questo studio ha portato alla definizione di un set di parametri che garantisce un risultato ottimale e la cui qualità è stata verificata mediante analisi metallografica condotta presso i laboratori di microscopia del CRF. Si riportano in <u>tabella 4.2</u> tutti i parametri del processo di saldatura relativi ai giunti conformi, di riferimento per l'attività sperimentale successiva.

Grandezza	Valore
Gap lamiere [mm]	1.2
Stick out [mm]	15
Velocità avanzamento filo [m/min]	2
Velocità avanzamento torcia	500
[mm/min]	
Flusso di gas [l/min]	15
Voltaggio medio [V]	13.6
Intensità di corrente media [I]	92
Apporto termico specifico [J/cm]	1501.44
Lunghezza cordone [mm]	100

Tabella 4.2 Parametri saldatura giunti conformi

4.2. Risultati termografia passiva per i giunti conformi

Analizzando le immagini acquisite con la termocamera durante il processo di saldatura è possibile osservare un campo termico che si sposta insieme alla torcia, generando delle isoterme di forma ellittica come mostrato in figura 4.2.

Con spessori di materiale contenuti e con completa penetrazione è possibile ipotizzare un andamento qualitativo delle isoterme ortogonale alle superfici maggiori del pezzo.



Figura 4.2 Frame da termocamera online

Per i giunti di riferimento una prima analisi è stata condotta estrapolando l'andamento della temperatura per tre distinti punti del cordone. Questo approccio è stato pensato per individuare il minimo numero di punti per singolo cordone che potesse essere sufficiente a descrivere il comportamento complessivo della saldatura ed è stato anche adottato per le prove distruttive.

Come definito dalla normativa interna FCA "PS.50001/01", su di un cordone saldato è possibile trascurare i primi 3 mm e gli ultimi 5 mm. La lunghezza di saldatura rimanente deve essere priva al 90% di lunghezze discrepanti [7]. Tenuto conto di questi requisiti, le prove sono state condotte su tre punti lungo il cordone, identificati rispettivamente a 15 mm dall'inizio della saldatura, al centro del cordone e a 15 mm dalla goccia di fine saldatura (figura 4.3).



Figura 4.3 Punti per analisi termografia passiva

Ogni punto rappresenta un'area di 3x3 pixel, quindi il valore termico fornito è una media dei valori posseduti da 9 pixel vicini.

Gli andamenti rilevati sul componente di riferimento con codice "campione004_27Luglio" sono riportati in figura 4.4.



Questi andamenti evidenziano una curva di riscaldamento con rapida salita, quasi verticale. Sono state calcolate le pendenze delle curve di raffreddamento, approssimate con delle polinomiali di primo grado e quindi lineari tra i valori di temperatura di 1100 °C e 500°C.

In <u>tabella 4.3</u> si riportano i valori di pendenza determinati per ogni singolo punto.

-44,3
-35,2
-46,4

Tabella 4.3	Velocità	di raffreddamento	"campione004	_27Luglio
-------------	----------	-------------------	--------------	-----------

Da questi risultati si evince che il tempo di raffreddamento è maggiore nel punto centrale e questo risultato può essere spiegato con il fatto che questa zona subisce una sollecitazione termica maggiore: si trova in una posizione tale per cui, diversamente dal tratto iniziale e finale, è sottoposta ad un preriscaldamento quando la torcia deve ancora sopraggiungere e un successivo post riscaldamento quando invece la torcia si allontana, rimanendo però ancora sul piano di lavoro.

Il tempo di raffreddamento del punto 3 è simile a quello valutato nel punto posizionato ad inizio cordone. Presumibilmente, nonostante poco dopo vi sia il completamento del processo con conseguente allontanamento della torcia, il tratto finale risente del fatto che la torcia permane fissa all'estremità del cordone per un paio di secondi, prima di allontanarsi dal giunto saldato, formando il caratteristico gocciolone dell'arc end.

I 5 giunti di riferimento mostrano un comportamento simile e ripetuto lungo tutto il cordone, non soltanto come andamento termico nel tempo ma anche come valori assoluti massimi di

temperatura raggiunta (1300÷1450 °C). Per completezza si riportano in <u>figura 4.5</u> gli andamenti termici della media dei 5 campioni conformi per ogni singolo punto.



Figura 4.5 Andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_conformi"

In <u>tabella 4.4</u> si riportano i valori di pendenza delle tre curve relative alle medie.

Curva in esame	Pendenza tratto decrescente
T1	-44,9
T2	-36,5
Т3	-46,8

Tabella 4.4 Velocità di raffreddamento di "medie_campioni_conformi"

Permane una minore velocità di raffreddamento al centro del cordone del giunto. La media dei massimi dei tre punti sulla media di tutti i campioni fornisce un valore di 1385 °C.

Osservando entrambi i grafici è evidente un andamento in corrispondenza del picco termico irregolare. Questa caratteristica si può ricondurre a due diverse cause:

- non ottimale inclinazione della torcia che si interpone tra la termocamera e la zona di saldatura, non garantendo una completa visuale;
- eventuali lapilli prodotti durante il processo di giunzione.

La velocità di raffreddamento è nettamente minore rispetto a quella di riscaldamento, ma resta comunque elevata. Dopo un certo lasso di tempo le velocità di raffreddamento diventano abbastanza simili, con curve piatte e parallele.

La velocità di raffreddamento è influenzata da: apporto termico specifico, spessore del materiale e temperatura iniziale del materiale base. È direttamente proporzionale al salto termico che esiste tra lo stato iniziale e quello finale. Una tecnica spesso utilizzata in saldatura consiste nel preriscaldare le lamiere fino ad un massimo di 300° C prima di effettuare la saldatura, così da ridurre gli effetti termici e le eventuali distorsioni che ne derivano.

Un'altra valutazione termica è stata condotta tramite un'analisi della temperatura media lungo tutto il cordone per ogni singolo istante di tempo, utilizzando non più dei singoli cursori ma un "box".

L'area analizzata è un rettangolo che esclude i primi e gli ultimi 15 mm del cordone di saldatura in lunghezza, con una larghezza di circa 9 mm corrispondente a 7 pixel (<u>figura 4.6</u>).



Figura 4.6 Box per analisi termografia passiva

Si riportano nelle <u>figure 4.7</u> e<u>4.8</u> gli andamenti della temperatura media lungo tutto il cordone per ogni singolo istante di tempo sia nel caso del giunto "campione004_27Luglio" sia per la media.



Figura 4.7 Andamento T nel tempo per box di "campione004_27Luglio"



Figura 4.8 Andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_conformi"

Anche con questo approccio emerge un comportamento della media molto simile al singolo campione, sia come massimo raggiunto (1100 °C) sia come distribuzione nel tempo.

Questi studi forniscono un'ulteriore dimostrazione della stabilità, della ripetibilità e dell'omogeneità del processo di saldatura per questa classe di giunti saldati.

4.3. Analisi micrografica dei giunti

Tenuto conto dei requisiti di qualità definiti nel capitolo 4.2, le micrografie sono state condotte sugli stessi tre punti lungo il cordone.

I pezzi sono stati tagliati in officina tramite due lavorazioni, in quanto tranciando direttamente il giunto in corrispondenza della zona da ispezionare, si è visto che si può alterare la geometria del cordone producendo uno schiacciamento superficiale.

È stata utilizza una cesoia a ghigliottina di tipo idraulico per un taglio grossolano, successivamente il campione è stato sottoposto a taglio tramite una taglierina a disco.

A titolo d'esempio, si riportano i risultati forniti dal laboratorio di micrografia del CRF ad un ingrandimento di 12.5X in <u>figura 4.9</u>, riferito al giunto con codice "campione003_30Luglio".





Figura 4.9 Micrografia "campione003_30Luglio" con relativo possibile diagramma Fe-C

L'alterazione microstrutturale dei materiali a seguito della saldatura è influenzata dall'andamento della temperatura nel giunto nel tempo, sia durante la fase di riscaldamento che nel successivo raffreddamento.

Il calore si può propagare secondo tre diverse modalità: conduzione, convezione e irraggiamento. Durante il processo di saldatura gli scambi termici avvengono principalmente per conduzione, quindi il quantitativo di calore che si scambia con l'ambiente esterno si può ritenere trascurabile.

I cicli termici realizzati con il processo di saldatura costituiscono dei veri e propri trattamenti termici che hanno delle conseguenze sia di tipo meccanico (tensioni residue, ritiro) sia di tipo metallurgico (zona termicamente alterata ZTA e zona fusa ZF).

La ZTA e la ZF presentano delle proprietà che dipendono dalla natura dei materiali impiegati, sia come metallo base che di apporto, dalla tecnica di saldatura utilizzata e dalle variabili di processo.

Le seguenti microstrutture sono associate alle diverse zone del giunto saldato, come indicate in figura 4.9:

- lamiera L1: struttura ferritico martensitica;
- zona 1A: ferrite, martensite, bainite;
- zona 1B: martensite;
- zona C: bainite e martensite;
- zona 2B: martensite;
- zona 2A: ferrite, martensite, bainite;
- lamiera L2: struttura ferritico martensitica.

Di seguito vengono riportate delle immagini rappresentative delle diverse microstrutture, con un ingrandimento di 500X, riferite alle zone: L1(<u>figura 4.10</u>), 1A (<u>figura 4.11</u>), 1B (<u>figura 4.12</u>) e C (<u>figura 4.13</u>).



Figura 4.10 L1: struttura ferritico martensitica

X500

X500



Figura 4.11 1A: ferrite, martensite, bainite



X500

Figura 4.12 1B: martensite



Figura 4.13 C: bainite e martensite

La zona 1L si riferisce alla tipica microstruttura degli acciai DP.

La denominazione "Dual Phase" si riferisce proprio al fatto che questi acciai presentano una microstruttura costituita da due fais: una matrice di ferrite fine in cui sono disperse delle isole di martensite. La prima garantisce una buona duttilità al materiale, la fase metastabile invece contribuisce ad aumentare la durezza e la resistenza meccanica dell'acciaio.

Con il processo di saldatura si assiste ad alterazioni del materiale base riconducibili ad un trattamento di tempra vicino alla zona fusa, l'acciaio viene raffreddato bruscamente dalla temperatura di austenitizzazione, ed un trattamento di rinvenimento e ingrossamento del grano nella ZTA lontano dalla zona fusa. Il processo di tempra è quello responsabile della formazione di martensite nel giunto.

Il ciclo termico nel giunto saldato altera la microstruttura dell'acciaio e generalmente riduce le proprietà meccaniche del materiale. È importante studiare queste alterazioni per soddisfare i requisiti di qualità, tra cui la necessità che il cordone di saldatura non rappresenti la parte critica del campione metallico.

Il processo di raffreddamento più intenso si verifica in prossimità del bordo della zona fusa, dove c'è un maggiore gradiente termico e quindi un flusso termico dal bagno fuso verso il materiale base. Maggiore è l'apporto termico specifico, minore è la velocità di raffreddamento e più lunghi sono i tempi di raffreddamento.

Nella zona termicamente alterata si ottengono delle dimensioni di grani differenti. I punti più vicini alla zona fusa (1B) presentano dei grani grossolani orientati secondo la direzione principale di scambio termico. I punti del giunto più lontani dalla zona fusa hanno raggiunto temperature minori. In questo caso il materiale si è temprato parzialmente (il materiale si è riscaldato nella zona intercritica) e rinvenuto (nella zona più laterale della ZTA) portando alla formazione di un grano fine simile a quello mostrato in <u>figura 4.11</u>.

La microstruttura della zona fusa (C) è influenzata dalla presenza del materiale d'apporto, che presenta caratteristiche meccaniche leggermente diverse dal metallo di base. In tal caso, è utile definire il rapporto di diluizione:

$$R_d = \frac{V \text{ metallo base fuso}}{V \text{ totale zona fusa}} \cdot 100$$

Da letteratura, il rapporto di diluizione in una saldatura MAG si stima essere $R_d = 10 \div 20\%$. Gli studi micrografici non sono stati eseguiti per ogni classe di giunto poiché la microstruttura dei giunti non cambia modificando i parametri di processo. Possono, invece, cambiare le estensioni della ZTA e della ZF. Esse possono essere misurate direttamente dalle micrografie e indirettamente mediante test di micro-durezza.

4.4. Analisi macrografica dei giunti conformi

La dimensione del cordone di saldatura è stata misurata in sezione in corrispondenza di 3 punti (figura 4.14).

Per ogni classe di campioni appartenente al piano sperimentale, l'analisi è stata condotta su 15 campioni inglobati, 3 per ogni giunto saldato. Le analisi macroscopiche sono state condotte impiegando un attacco chimico con Nital al 3%.



Figura 4.14 Posizione punti esaminati sul cordone

A titolo d'esempio, si riporta in <u>figura 4.15</u> l'acquisizione relativa al punto P3 del giunto "campione004_27Luglio". Questa figura mostra un possibile metodo di misura della geometria del giunto saldato lungo la sua sezione.



Figura 4.15 Macrografia punto P3 di "campione004_27Luglio"



Figura 4.16 Valutazione profondità di penetrazione

Il campione mostrato in figura rispetta gli standard definiti dalle normative poichè non sono visibili difetti ed è stata rilevata una completa penetrazione (<u>figura 4.16</u>). Per profondità di penetrazione si

intende la profondità a cui è arrivata la fusione del pezzo, prendendo come riferimento la superficie dello stesso.

Il capitolato interno "PS.50001/01" del CRF impone che la penetrazione minima richiesta deve essere pari al 15% dello spessore del materiale base. Nei campioni esaminati in questo studio, le penetrazione è stata sempre pari ad almeno 0,6 mm, quindi ben oltre il limite minimo richiesto (0,22 mm). Anche il profilo del cordone, sia sulla parte superiore sia alla radice, risulta ottimale.

La <u>tabella 4.5</u> riassume alcune misure dimensionali utili a definire la geometria della sezione del giunto saldato.

Grandezza	Valore medio [mm]
Altezza superiore del	0.6
cordone	
Profondità radice cordone	0.5
Altezza totale cordone	2.6
Bagno fuso superiore	4.4
Bagno fuso centrale	2.3
Bagno fuso inferiore	2.9
Profondità di penetrazione	0.6

Tabella 4.5 Dimensioni sezione cordone su punto P3 di "campione004_27Luglio"

Come già riportato al paragrafo "3.2.Sistema di fissaggio", alcuni giunti sono stati realizzati utilizzando la fixture mostrata in <u>figura 3.8</u>. L'analisi macrografica condotta sui campioni realizzati con questo secondo sistema di fissaggio evidenzia un migliore allineamento tra le lamiere, quindi fenomeni di ritiro meglio controllati.

Si riporta in figura 4.17 la macrografia relativa al punto F12 del giunto "campione002_30Luglio".



Figura 4.17 Macrografia punto F12 di "campione002_30Luglio"

4.5. Prove di durezza

Misure di micro-durezza sono state eseguite lungo il giunto saldato a completamento delle informazioni sulla microstruttura del giunto, ottenute con il microscopio ottico. In fase di indagine preliminare, con l'obiettivo di determinare il range di durezza del metallo base, sono state eseguite delle prove su 3 diversi campioni non saldati. Questi test hanno fornito un valore di durezza dell'acciaio compreso in un intervallo di 185-245 HV0.5/10. I risultati puntuali sono mostrati in <u>figura 4.18</u>.



In questo diagramma, come anche in tutti i successivi relativi a test di micro-durezza, sull'asse delle ascisse è riportata la posizione misurata rispetto ad un sistema di riferimento avente origine in corrispondenza della prima indentazione.

L'estensione della ZTA dei giunti saldati è stata valutata mediante prove di micro-durezza condotte su tre provini per ogni condizione di saldatura. In <u>figura 4.19</u> sono stati riportati, come esempio, i risultati ottenuti sul giunto "campione004_27Luglio", lo stesso mostrato nel paragrafo relativo alla termografia passiva.





La ZTA può essere valutata in due modi:

- escludendo il tratto iniziale e finale di ogni curva a cui corrispondono dei valori di durezza similari a quelli ottenuti sul materiale base;
- identificando due punti di flesso per ogni curva.

Dato il range registrato per lo studio del materiale base, è stata reputata più attendibile la prima tecnica. Il riscaldamento ai bordi della zona termicamente alterata provoca un rinvenimento della microstruttura, che a fine processo presente dei valori di durezza inferiori a quella del metallo di base. Dall'analisi dei risultati ottenuti in <u>figura 4.19</u> si può considera una ZTA con un'estensione di circa 13 mm, da 2-3 mm a 15-16 mm.

Le tre curve, ricavate su tre distinti punti sul cordone di saldatura, presentano un andamento analogo con valori massimi e minimi confrontabili.

L'andamento delle curve è coerente con le microstrutture evidenziate dall'analisi metallografica.

Il tratto iniziale e finale della curva di durezza, 200 HV, corrisponde al metallo base. Muovendosi verso il giunto, la ZTA mostra una durezza inferiore al metallo base dovuto al rinvenimento della martensite. Il successivo aumento di durezza è associato alla graduale riduzione della frazione in volume di ferrite e all'aumento di quella di bainite e martensite. Il valore massimo di durezza si raggiunge nella ZTA prossima alla ZF, dove la microstruttura è completamente martensitica.

Il tratto centrale della curva di durezza indentifica la zona fusa. La riduzione della durezza è principalmente dovuta alla presenza del materiale d'apporto che riduce il tenore di carbonio del giunto. In questa zona, infatti, generalmente si ha un quantitativo di metallo base dell'ordine del 20 % rispetto al volume totale del bagno fuso [2].

Il materiale d'apporto presenta una durezza inferiore rispetto al DP600.

Facendo un confronto tra i risultati ottenuti con i due sistemi di serraggio, come già fatto al paragrafo precedente, si evidenziano differenze nei valori di durezza: massimi e minimi tra i diversi campioni risultano differenti con un Δ pari a circa 50 HV 0.5/10.

Si riportano a titolo d'esempio in <u>figura 4.20</u> i risultati delle prove di durezza su 3 punti di un campione realizzato mediante fixture.





Un'ulteriore differenza (figura 4.21) si può riscontrare sull'estensione della ZTA: i campioni con fixture presentano una zona influenzata termicamente dal processo di saldatura meno estesa dei campioni con serraggio tramite pinze, con una riduzione poco inferiore ai 2 mm di lunghezza.

Le differenti durezze ed estensioni della ZTA possono essere associate all'utilizzo di premi lamiera in rame nel fissaggio fixture. In questo caso, il raffreddamento del giunto è accelerato per via della maggiore conducibilità termica del rame (302 W/mK) rispetto all'aria (0,026 W/mK). Pertanto, le lamiere si riscaldano meno in prossimità del giunto, così da ridurre la quantità di metallo riscaldato dal processo di saldatura.



Figura 4.21 Confronto risultati prove di durezza per i due diversi sistemi di fissaggio lamiere

A conclusione dello studio delle micrografie dei campioni conformi, si riportano in <u>figura 4.22</u> gli andamenti di durezza di ogni singolo giunto mediati sui tre punti. Si ricavano così 5 curve di risultati di micro-durezza per l'intera classe di giunti conformi.



4.6. Prove di trazione

La prova di trazione è una prova standard per la caratterizzazione meccanica dei giunti saldati poiché permette di valutare la loro resistenza meccanica e la duttilità. Un giunto di qualità dovrebbe mostrare una resistenza meccanica ed una duttilità simili a quella del metallo base, e non rappresentare l'elemento critico della giunzione [7].

Per le prove di trazione è stato utilizzato un provino estratto da ogni giunto saldato.

I test sono stati eseguiti su campioni piatti e non su provini standard dogbone (con la caratteristica forma a "doppia T") per motivi di costi e tempi.

La <u>figura 4.23</u> riporta le curve tensione-deformazione ingegneristiche ottenute per i 5 provini ricavati dai giunti conformi.

Il carico di rottura in ogni test è risultato superiore a 590 Mpa, che è il valore limite minimo dichiarato dal fornitore per il DP600.



Figura 4.23 Risultati prove di trazione su giunti conformi



Figura 4.24 "campione004_27Luglio" dopo trazione

Le prove confermano che il cordone di saldatura non rappresenta l'elemento debole del giunto saldato. Anche se il campione utilizzato non è ottimale per la prova di trazione, la rottura si sarebbe potuta manifestare comunque nella ZTA, in prossimità del metallo base dove si è verificato un rinvenimento.

Come riportato nell'esempio di <u>figura 4.24</u>, la quale è relativa al provino ricavato dal "campione004_27Luglio", le rotture sono state ottenute in punti distanti dal cordone.

5. Scelta difetti indotti e definizione del piano sperimentale

Sulla base delle numerose prove condotte in fase di setup e avendo acquisito maggiore esperienza nella gestione del processo di saldatura e delle attrezzature, è stata eseguita un'ulteriore selezione dei difetti indicati al paragrafo 2.2, col fine di individuare quelli più facilmente riproducibili. I campioni con difetti indotti sono stati ottenuti mediante:

- variazione di gap (aumento);
- variazione della portata di gas (riduzione);
- variazione velocità avanzamento robot (aumento).

Queste 3 classi di giunti, insieme a quelli di riferimento, costituiscono il piano sperimentale di progetto.

Per ogni classe di giunto l'iter seguito è stato quello di variare il parametro di riferimento sino ad individuare un limite oltre il quale il giunto saldato mostrasse una non conformità macroscopica, per la quale non sono richiesti ulteriori approfondimenti con tecniche distruttive e non distruttive. Si riportano in <u>tabella 5.1</u> i parametri relativi alle diverse prove.

Giunti di testa	N° Replica	N° Test	Gap tra i lembi: distanza da lembo a lembo [mm]	Iniezione Gas [I/min]	Velocità avanzamento torcia [mm/min]	Test
		1	1,2	15	500	Test distruttivi:
Giunti esenti		2	1,2	15	500	 Macro e micrografia
da difetti con	1°	3	1,2	15	500	 Durezza Trazione
pinze		4	1,2	15	500	Test non distruttivi:
		5	1,2	15	500	Online e lock-in
		1	1,2	15	500	
Giunti esenti		2	1,2	15	500	
da difetti con fixture	1°	3	1,2	15	500	Test distruttivi
		4	1,2	15	500	
		5	1,2	15	500	
Giunti con difetti indotti	1°	1	1,3	15	500	
		2	1,3	15	500	Test distruttivi e non
		3	1,3	15	500	ustruttivi
	2°	1	1,5	15	500	
dalla		2	1,5	15	500	Analisi visiva
variazione del		3	1,5	15	500	
gap		1	1,8	15	500	
	3°	2	1,8	15	500	Analisi visiva
		3	1,8	15	500	
Giunti con	1°	1	1,2	7	500	Angligi visiva
difetti indotti	2°	1	1,2	9	500	Analisi visiva
dalla		1	1,2	10	500	
variazione di	3°	2	1,2	10	500	Test distruttivi distruttivi
gas		3	1,2	10	500	ustruttivi

		4	1,2	10	500	
		5	1,2	10	500	
	1°	1	1,2	15	540	Analici viciva
	2°	1	1,2	15	560	ANAIISI VISIVA
Giunti con difetti indotti dalla variazione della velocità		1	1,2	15	580	
	3°	2	1,2	15	580	
		3	1,2	15	580	lest distruttivi e non distruttivi
		4	1,2	15	580	ustruttivi
robot		5	1,2	15	580	
	4°	1	1,2	15	600	Analici viciva
	5°	1	1,2	15	620	

Tabella 5.1 Piano sperimentale prove

Prima di procedere con l'analisi dei risultati è opportuno approfondire ulteriormente la procedura adottata per la selezione dei campioni, mediante i quali fare il confronto con i giunti conformi.

Le saldature discrepanti che non superano l'analisi visiva sono proprie dei giunti nei quali, in seguito al processo di giunzione, sono stati generati degli sfondamenti.

Questo controllo può essere eseguito ad occhio nudo dall'operatore, ma le anomalie si sono anche rese visibili durante le registrazioni a schermo con termocamera online.

A titolo d'esempio è possibile osservare dei singoli frame estratti dalle registrazioni relative ad un aumento di gap: 1,5 mm (<u>figura 5.1</u>) e 1,8 mm (<u>figura 5.2</u>).



Figura 5.1 Giunto di scarto con GAP da 1,5 mm "campione001_29Ottobre"



Figura 5.2 Giunto di scarto con GAP da 1,8 mm "campione003_30Ottobre"

Per questa classe di giunti il parametro, impiegato successivamente nel confronto con i campioni di riferimento, è stato individuato nel gap di 1,3mm.

I campioni con gap da 1,5 e 1,8 mm mostrano infatti numerosi sfondamenti lungo il cordone (<u>figura</u> <u>5.3</u>) e curve di temperatura irregolare, sia nei valori sia nella forma.



Figura 5.3 Cordone giunto con gap di 1,5 mm (sx) e 1,8 mm (dx)

Stesse considerazioni si possono fare nel caso del giunto ottenuto con una portata di gas ridotta a 7 l/min (<u>figura 5.4</u>).

Osservando il singolo frame, ove l'effetto termico viene mostrato in una scala di falsi colori, è possibile notare la presenza di tre sfondamenti lungo il cordone.

Il grafico tridimensionale dello stesso frame mostra dei salti termici e quindi, al pari di quanto già mostrato per la variazione di gap, un andamento della temperatura non lineare.



Figura 5.4 Giunto di scarto ottenuto con portata di gas da 7 l/min "campione001_21Novembre"

Ai risultati forniti dalla termocamera corrisponde un cordone con porosità macroscopiche che si traducono in sfondamenti della lamiera (<u>figura 5.5</u>).



Figura 5.5 Cordone giunto con portata di gas da 7 l/min

6. Studio completo campioni con difetti

In questo capitolo vengono mostrati i confronti tra i campioni con difetti indotti e i giunti conformi. Il confronto viene fatto sulla base dei risultati ottenuti con le prove distruttive e mediante gli andamenti termici relativi alla termografia passiva.

In ogni paragrafo è trattata una diversa classe di giunto appartenente al piano sperimentale.

6.1. Giunti con difetti indotti dalla variazione del gap

I parametri di processo relativi a questa classe di giunti sono elencati in tabella 6.1, ove in rosso viene indicato il parametro modificato rispetto alla configurazione propria dei giunti conformi.

Grandezza	Valore	Riferimento		
Gap lamiere [mm]	1.3	1.2		
Stick out [mm]	15	15		
Velocità avanzamento filo [m/min]	2	2		
Velocità avanzamento torcia	500	500		
[mm/min]				
Flusso di gas [l/min]	15	15		
Voltaggio medio [V]	13.6	13.6		
Intensità di corrente media [I]	92	92		
Apporto termico specifico [J/cm]	1501.44	1501.44		
Lunghezza cordone [mm]	100	100		
Tabella 6.1 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione di gan				

inti con difetti indotti dalla variazio

Una prima analisi è stata condotta plottando gli andamenti termici per tre punti del cordone di saldatura, rispettando le modalità definite al paragrafo 4.2.

sono riportati in figura 6.1 i risultati relativi al codice A titolo esemplificativo, "campione005 30Ottobre".



Figura 6.1 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "campione005_30Ottobre" con "campione004_27Luglio"

Emerge una differenza nei valori massimi raggiunti, con riduzione nei picchi anche di 100 °C rispetto ai campioni sani. Le tre curve non risultano omogenee nella loro distribuzione rispetto alla posizione lungo il cordone di saldatura. Osservando i picchi massimi raggiunti si nota un andamento decrescente.

Il tratto della curva durante la fase di riscaldamento mantiene un andamento circa verticale. Le velocità di raffreddamento nel caso di difetto indotto da un aumento di gap, come riportato in <u>tabella 6.2</u>, sono maggiori. In prossimità dell'arc end si mantengono dei tempi di raffreddamento minori rispetto al punto più vicino all'arc start.

Curva in esame	Pendenza tratto decrescente campione gap 1,3 mm	Pendenza tratto decrescente campione gap 1,2 mm
T1	-50,3	-44,3
T2	-45,1	-35,2
Т3	-54,5	-46,4

Tabella 6.2 Confronto delle velocità di raffreddamento del "campione005_30Ottobre" con "campione004_27Luglio"

Per completezza di risultati si riporta in <u>figura 6.2</u> anche un confronto, tra le due classi di giunti, degli andamenti medi della temperatura nel tempo per 3 punti.



Figura 6.2 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_gap_aumentato" con "medie_campioni_conformi"

Le curve ottenute confermano quanto rilevato nel confronto fatto considerando un singolo giunto per ogni classe di appartenenza. In base ai risultati ottenuti si può sostenere che, aumentando la distanza tra i lembi delle lamiere, si riduce il quantitativo di materiale base fuso e si riduce anche la media delle medie dei massimi con un ΔT di circa 50 °C.

A supporto di ciò si riporta anche l'andamento della temperatura nel tempo mediata all'interno di un'area. Il confronto è relativo sia ai singoli campioni precedenti (<u>figura 6.3</u>), sia alle medie delle due classi di giunto (<u>figura 6.4</u>).



Figura 6.3 Confronto andamento T nel tempo per box di "campione005_30Ottobre" con "campione004_27Luglio"



Figura 6.4 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_gap_aumentato" con "medie_campioni_conformi"

Per realizzare questi confronti, per entrambe le registrazioni dei giunti, sono stati disegnati due box sul software Flir avente una stessa larghezza di 7 pixel, con una lunghezza definita in base alla geometria del cordone. La maggiore distanza tra i lembi ha come conseguenza una curva di valore medio con massimo più basso di circa 150 °C. L'abbassamento della curva conferma che effettivamente la sollecitazione termica interessa una zona del materiale base più ristretta con anche dei valori di temperatura minori.

La variazione del parametro geometrico induce anche delle alterazioni a livello microstrutturale, le quali sono state studiate mediante confronti dei risultati di micro-durezza.

Vengono riportati nelle <u>figure 6.5-6.7</u> i confronti per ognuno dei tre punti, tra gli stessi singoli campioni presentati all'interno di questo paragrafo per l'analisi degli andamenti termici.



Figura 6.5 Risultati prove di durezza punto 1 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglio"



Figura 6.6 Risultati prove di durezza punto 2 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglio"



Figura 6.7 Risultati prove di durezza punto 3 "campione005_30Ottobre" e "campione004_27Luglio"

I tre grafici mostrano un andamento delle curve molto simile, nonostante l'appartenenza a due diverse classi del piano sperimentale. Le differenze tra i picchi non sono rilevanti e non è possibile definire un Δ HV0.5/10 costante.

Si può osservare una zona termicamente alterata meglio evidenziata sui campioni con gap da 1,3mm. La sua estensione è poco minore rispetto a quella misurata sui giunti di riferimento, seppur questa differenza è complessivamente stimata inferiore al millimetro di lunghezza.

È evidente che questa tipologia di analisi non offre delle indicazioni significative che possano evidenziare una piccola variazione del gap tra le lamiere.

Questa difficoltà è palesata anche nelle analisi macrografiche disponibili nelle figure 6.8-6.10.



Figura 6.8 Confronto macrografia del punto 1 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto 1 "campione004_27Luglio" (dx)



Figura 6.9 Confronto macrografia del punto 2 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto 2 "campione004_27Luglio" (dx)



Figura 6.10 Confronto macrografia del punto 3 "campione005_30Ottobre" (sx) con il punto 3 "campione004_27Luglio" (dx)

Il cordone rispetta gli standard di normativa. Si può soltanto constatare una geometria differente, in particolare un lieve assottigliamento della zona corrispondente al bagno fuso, che però, non variando nessun parametro di processo di saldatura, è inevitabile.

Mantenendo costante il diametro del materiale d'apporto e non modificando le velocità di avanzamento della torcia e del sistema di alimentazione del filo, sulla sezione trasversale al cordone di saldatura si deposita lo stesso quantitativo di materiale. Avendo aumentato il gap, il materiale d'apporto deve però rifornire una distanza maggiore.

Questi giunti saldati, aventi un gap superiore di 0,1 mm rispetto ai campioni di riferimento, non rappresentano comunque dei componenti di scarto.

A conferma di questa considerazione ci sono anche i risultati relativi alle prove di trazione (<u>figura</u> <u>6.11</u>), durante le quali la rottura si è verificata ancora una volta, per tutti i 3 giunti appartenenti a questa classe, lontana dalla zona di saldatura.

A titolo esemplificativo, si riporta l'immagine dopo rottura del provino ricavato dal "campione005_300ttobre" (figura 6.12).



Figura 6.11 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante aumento gap tra le lamiere



Figura 6.12 "campione005_30Ottobre" dopo trazione

6.2. Giunti con difetti indotti dalla variazione della portata di gas

Per questa seconda classe di giunti la variazione rispetto ai parametri ottimali consiste nella riduzione dell'apporto di gas protettivo al bagno di fusione.

Questo viene impiegato durante le operazioni di saldatura perché i materiali metallici, soprattutto se si trovano in forma liquida, risultano fortemente reattivi dal punto di vista chimico con gli elementi disponibili in atmosfera (ossigeno, azoto e idrogeno).

L'interazione può compromettere il risultato ultimo del giunto saldato. L'ossigeno, ad esempio, reagisce con il ferro dei metalli portando alla formazione di inclusioni solide. Queste alterano la microstruttura del metallo e di conseguenza le proprietà meccaniche del materiale base. L'ossigeno legato al carbonio (CO) può anche restare intrappolato all'interno del bagno fuso, generando delle porosità che non in tutti i casi riescono a fuoriuscire prima della completa solidificazione del cordone. Per limitare gli effetti dell'ossigeno si introducono solitamente, tramite il materiale d'apporto o il gas protettivo, manganese e silicio che reagendo con l'ossigeno formano una fase liquida con densità minore rispetto al materiale che compone il bagno fuso e che può essere facilmente rimossa dopo saldatura dato che si configura come scoria superficiale.

L'azoto invece porta alla formazione di nitruri i quali favoriscono l'infragilimento del materiale. Si formano soluzioni interstiziali che possono causare distorsioni reticolari con conseguente riduzione di tenacità e resilienza.

L'idrogeno che entra in soluzione nel bagno di fusione può provenire dall'atmosfera ma anche da umidità presente sul bagno fuso o sul materiale d'apporto. Le molecole di idrogeno, data la rapidità con cui avviene il raffreddamento dopo saldatura, possono rimanere intrappolate all'interno del bagno fuso creando delle porosità interne. L'idrogeno genera anche delle distorsioni all'interno del reticolo cristallino, causando un infragilimento del materiale.

È per evitare l'insorgere di questi difetti che si utilizza del gas protettivo nel caso di saldatura autogena per fusione ad arco elettrico.

In questo caso, mediante una riduzione della portata di gas si è cercato di generare delle porosità. Il metodo impiegato ha comportato delle riduzioni graduali della portata di gas fino ad individuare quel valore che fornisse un giunto non conforme, con sfondamenti evidenziabili anche tramite una semplice analisi visiva. Le analisi sono state condotte sui giunti generati con una portata di gas di 10 I/min. I parametri di processo per questa tipologia di giunti sono raccolti nella <u>tabella 6.3</u>.

Grandezza	Valore	Riferimento
Gap lamiere [mm]	1.2	1.2
Stick out [mm]	15	15
Velocità avanzamento filo [m/min]	2	2
Velocità avanzamento torcia	500	500
[mm/min]		
Flusso di gas [l/min]	10	15
Voltaggio medio [V]	13.6	13.6
Intensità di corrente media [I]	92	92
Apporto termico specifico [J/cm]	1501.44	1501.44
Lunghezza cordone [mm]	100	100

Tabella 6.3 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione della portata di gas

Volendo conoscere l'esatta collocazione delle porosità interne al cordone, si è fatto uso anche del controllo non distruttivo mediante RX, eseguito all'interno dei laboratori del CRF.

Per lo studio mediante termografia passiva di questa tipologia di giunto è necessario ampliare il numero di analisi puntuali. Considerando infatti punti del cordone lontani da porosità interne o sfondamenti, si ottengono dei picchi termici con valori similari a quelli riscontrati sui giunti di riferimento, trascurando l'influenza dell'inclinazione della torcia.

A conferma di ciò, si riportano gli andamenti della temperatura nel tempo sui tre punti mediati per l'intera classe di giunti (figura 6.13). Si riscontra una variazione delle velocità di raffreddamento (tabella 6.4). Quest'ultimo fenomeno si può ricondurre alla formazione di macro-fori sui cordoni soprattutto in corrispondenza del tratto iniziale e finale.



Figura 6.13 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_gap_ridotto" con "medie_campioni_conformi"

Curva in esame	Pendenza tratto decrescente campione gas 10 l/min	Pendenza tratto decrescente campione gas 15 l/min
T1	-47,4	-44,9
T2	-37,4	-36,5
T3	-50,2	-46,8

Tabella 6.4 Confronto delle velocità di raffreddamento di "medie_campioni_gas_ridotto" con "medie_campioni_confromi"

Analizzando delle zone del cordone in corrispondenza di difetti, anche i valori massimi cambiano. La presenza di porosità infatti riveste un duplice effetto perché localmente trattiene maggiormente il calore, causando un aumento del picco massimo di temperatura raggiunta, e contemporaneamente ostacola la conducibilità riducendo il carico termico sulle zone circostanti (figura 6.14).

Lo studio della temperatura media per ogni istante di tempo, valutata su tutta l'area di interesse del cordone, fornisce una curva che non si discosta molto dalla caratteristica del giunto realizzato con parametri nominali. Tra i due picchi massimi vi è una differenza inferiore ai 50 °C. La differenza non è quindi molto significativa, probabilmente perché non si è stati in grado di generare un elevato

numero di porosità.



Figura 6.14 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_conformi" con "medie_campioni_gas_ridotto"

Avendo comunque a disposizione le immagini radiografiche dell'intero giunto, non sono state realizzate delle macrografie e delle cuciture sui tre punti posizionati ad inizio, centro e fine cordone di saldatura. Le analisi di tipo distruttivo sono state condotte solo su punti ritenuti significativi. Per ogni giunto sono stati esaminati:

- una sezione trasversale corrispondente ad una zona priva di difetti;
- uno o più punti in cui sono state individuate delle porosità interne o altri difetti.

In alcuni casi non si è riusciti ad individuare, dopo taglio e lucidatura dei campioni, le porosità che erano state rilevate mediante RX. A tal proposito bisogna considerare che i difetti che sono stati indotti mediante riduzione della portata di gas, in alcuni casi non inficiano la buona qualità della giunzione perché di dimensioni contenute.

Il capitolato interno FCA "PS.50001" definisce il controllo qualità rispetto alla presenza di porosità, distinguendo queste tra difetti superficiali ed interni:

- nel caso di porosità superficiali il diametro massimo non deve superare l'80% dello spessore della lamiera più sottile;
- la singola porosità interna deve avere un ingombro minore del 15% della sezione resistente e la somma delle porosità non deve ridurre l'area del cordone saldato al di sotto del 60%.

Sulla base delle informazioni appena fornite, si riportano gli andamenti termici più significativi, con le corrispettive acquisizioni ai raggi x e le macrografie.

Per il codice "campione008_21Novembre" sono state analizzate due porosità interne (O) la cui collocazione è definita sull'acquisizione ai raggi x di <u>figura 6.15</u>.

L'immagine mostra, oltre ai due sfondamenti già individuati dopo semplice analisi visiva, la presenza di numerose porosità concentrate su più zone all'interno del cordone.



Figura 6.15 Immagine RX di "campione008_21Novembre"

Vengono mostrate in <u>figura 6.16</u> le macrografie relative alle due zone difettose evidenziate.



Figura 6.16 Macrografie delle porosità rinvenute sul "campione008_21Novembre"

In entrambi i casi le porosità presentano un ingombro superiore al 15% della sezione resistente. Si tratta di difetti che inficiano la qualità della giunzione.

L'analisi termica è stata condotta mediante un confronto tra l'andamento di un punto buono (**O**) e i due difettosi (**O**).



Figura 6.17 Risultati dell'analisi termografia passiva condotta sul "campione008_21Novembre"

Le due porosità mostrano dei comportamenti termici differenti. Il secondo difetto presenta un picco termico massimo raggiunto più basso e una maggiore velocità di raffreddamento.

Questo si può attribuire alla diversa collocazione dei difetti all'interno della sezione trasversale del cordone saldato e soprattutto al fatto che il secondo si trovi adiacente ad uno sfondamento.

Le prove eseguite al micro-durometro, realizzate in corrispondenza del piano medio delle lamiere, hanno fornito i risultati mostrati in <u>figura 6.18</u>, i quali evidenziano degli andamenti anomali su entrambe le zone in prossimità delle porosità.



Figura 6.18 Risultati delle prove di durezza condotte sul "campione008_21Novembre"

Sulla stessa immagine è plottato l'andamento relativo ad un punto esente da difetti. La conformazione di questa curva, i due picchi massimi e il minimo nella zona centrale sono confrontabili con i risultati ottenuti sui giunti conformi.

Le impronte relative alle sezioni trasversali del cordone con porosità interne evidenziano invece una differente microstruttura. Vi è una distribuzione non omogenea del materiale d'apporto e quindi del rapporto di diluizione. La porosità ha causato anche un'alterazione microstrutturale in corrispondenza della zona fusa perché, aumentando la permanenza del materiale alle alte temperature, è possibile incorrere in un aumento delle dimensioni dei grani di martensite con conseguente incremento della durezza e della fragilità.

Dei riscontri positivi agli RX sono stati ottenuti anche per un altro giunto saldato, il cui codice è "campione009_21Novembre" (figura 6.19).



Figura 6.19 Immagine RX di "campione009_21Novembre"
Le due macrografie relative alle zone evidenziate con cerchietto rosso sono disponibili in figura 6.20.



Figura 6.20 Macrografie dei difetti rinvenuti sul "campione009_21Novembre"

La prima macrografia mostra la presenza di una porosità interna molto estesa, che compromette la buona qualità del giunto. Nella seconda, oltre a una porosità interna, è presente sul lembo di destra una mancanza di fusione del metallo di base.

La seconda macrografia è stata effettuata per una sezione del cordone vicina ad uno sfondamento che, come visibile nella radiografia di <u>figura 6.19</u>, si estende in modo differente sui due lati del cordone.

L'analisi tramite termografia passiva è stata condotta mediante un confronto dell'andamento termico di un punto buono (**O**) e i due difettosi (**O**). Viene mostrato in <u>figura 6.21</u>.



Figura 6.21 Risultati dell'analisi termografia passiva condotta sul "campione009_21Novembre"

Le due zone difettose mostrano un picco termico massimo più elevato. La seconda curva evidenzia anche una velocità di raffreddamento maggiore, riconducibile alla vicinanza allo sfondamento. Le prove eseguite al micro-durometro sulle due sezioni con difetti, mostrano gli andamenti di

resistenza plottati nella figura 6.22.



Figura 6.22 Risultati delle prove di durezza condotte sul "campione009_21Novembre"

Le curve di durezza ottenute evidenziano dei massimi nella zona centrale confrontabili con i risultati dei giunti conformi. Le differenze si riscontrano principalmente nella zona centrale, dove il mantenimento ad elevate temperature per più tempo ha comportato l'aumento della concentrazione di martensite e quindi dei valori di durezza.

Le ZTA risultano meno estese in prossimità dei difetti, con riduzione di circa 1,5 mm.

I test sono stati interrotti in corrispondenza delle zone prive di materiale saldato.

Le prove di trazione sono state condotte su dei provini ricavati dalle zone centrali dei giunti, in corrispondenza di tratti di cordone privi di sfondamenti ma con piccole porosità sparse.



Figura 6.23 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante riduzione portata di gas

Tutte le prove hanno fornito un carico di rottura poco inferiore ai 700 MPa, con piccole differenze nei valori di allungamento ultimo raggiunto (figura 6.23).

Anche in questo caso l'interruzione della prova si è verificata in punti distanti dalla ZTA, come mostrato a titolo esemplificativo in <u>figura 6.24</u>.



Figura 6.24 "campione008_21Novembre" dopo trazione

Dalle prove distruttive effettuate è emersa una certa difficoltà nel riuscire ad individuare questa tipologia di difetti e soprattutto nel poterne fare un'accurata stima quantitativa. Le porosità interne devono essere necessariamente analizzate tramite tecniche non distruttive, quali la radiografia o la termografia. Quest'ultima ha fornito dei riscontri positivi seppur non sono stati creati molti difetti fuori dagli standard di normativa senza incorrere in sfondamenti.

6.3. Giunti con difetti indotti dalla variazione della velocità del robot

Il confronto tra questa classe di giunti e quelli di riferimento è sicuramente quello che ha prodotto dei risultati più significativi per tutti i metodi di indagine.

I campioni appartenenti a questo gruppo del piano sperimentale, analizzati attraverso CD e CND, sono stati realizzati con una variazione della velocità di avanzamento torcia di 80 mm/min (<u>tabella</u> <u>6.5</u>).

Grandezza	Valore	Riferimento
Gap lamiere [mm]	1.2	1.2
Stick out [mm]	15	15
Velocità avanzamento filo [m/min]	2	2
Velocità avanzamento torcia	580	500
[mm/min]		
Flusso di gas [l/min]	10	15
Voltaggio medio [V]	13.6	13.6
Intensità di corrente media [I]	92	92
Apporto termico specifico [J/cm]	1501.44	1501.44
Lunghezza cordone [mm]	100	100

Tabella 6.5 Parametri di processo dei giunti con difetti indotti dalla variazione della velocità di avanzamento torcia

L'analisi di termografia passiva post processing evidenzia delle differenze sia nello studio condotto sui tre punti, sia sull'area che include tutto il tratto utile del cordone di saldatura.

Si riportano in figura 6.25 i risultati delle analisi puntuali relative al "campione002_27Novembre".



Figura 6.25 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "campione002_27Novembre" con "campione004_27Luglio"

Aumentando la velocità di avanzamento del braccio robotico, il tempo di permanenza della torcia su ogni punto della saldatura si riduce. Questo, come visibile in <u>figura 6.25</u>, causa un minor apporto termico locale con valori massimi di temperatura, raggiunti al variare del tempo nel singolo punto, più bassi rispetto al giunto saldato di riferimento.

La durata della saldatura si riduce, infatti vi è una traslazione verso destra delle curve relative ai

punti posizionati ad una stessa distanza dall'inizio del cordone.

A parità di estensione del tratto di saldatura, nel caso di giunti conformi, la durata del processo si stima essere pari a circa 20 s, mentre nel caso in cui si aumenta la velocità di avanzamento la durata si riduce a 18 s.

Questi risultati vengono confermati anche dagli andamenti delle medie sui giunti appartenenti alle due classi (figura 6.26).



Figura 6.26 Confronto andamento T nel tempo per 3 punti di "medie_campioni_velocità_aumentata" con "medie_campioni_conformi"

In <u>tabella 6.6</u> si evidenzia anche come cambiano quantitativamente le velocità di raffreddamento tra i due giunti presi a campione in precedenza.

Curva in esame	Pendenza tratto decrescente campione velocità 500 mm/min	Pendenza tratto decrescente campione velocità 580 mm/min
T1	-54,6	-44,3
T2	-44,3	-35,2
Т3	-55,4	-46,4

Tabella 6.6 Confronto delle velocità di raffreddamento di "campione002_27Novembre" con "campione004_27Luglio"

La velocità di raffreddamento mantiene lo stesso andamento con velocità minima in corrispondenza del punto centrale e massima in prossimità dell'arc end.

Dal confronto si evince un processo di raffreddamento più rapido nei campioni realizzati imponendo una velocità di avanzamento torcia superiore, che si giustifica con il minor apporto termico.

Questo fattore di incidenza è evidenziato anche dallo studio effettuato attraverso un'area che comprende tutto il cordone tra il punto 1 e il punto 3.

Nelle <u>figure 6.27</u> e <u>6.28</u> sono plottati rispettivamente i risultati per questa tipologia di studio nel confronto di due singoli campioni e delle medie relative alle due diverse classi del piano sperimentale.

La curva caratteristica dei campioni ottenuti con un processo di saldatura più rapido presenta un picco massimo più basso dei campioni conformi con un ΔT di circa 150 °C. Anche l'area sottesa alla curva è minore con un raffreddamento più rapido.



Figura 6.27 Confronto andamento T nel tempo per area cordone di "campione002_27Novembre" con "campione004_27Luglio"



Figura 6.28 Confronto andamento T nel tempo per box di "medie_campioni_velocità_aumentata" con "medie_campioni_conformi"

L'effetto causato dalla variazione di questo parametro di processo è stato evidenziato anche dai risultati derivanti dall'applicazione di tecniche di controllo di tipo distruttivo.

Da un confronto delle macro-grafie dei tre punti generati dal giunto "campione004_27Novembre" con gli stessi punti del giunto di riferimento si possono evidenziare delle sottili differenze geometriche sul cordone saldato (figura 6.29-6.31). Quest'ultimo risulta poco più piatto sulla facciata superiore del giunto e quindi l'altezza complessiva in corrispondenza del centro della

giunzione si riduce. Nonostante ciò viene comunque rispettata la profondità minima richiesta dagli standard di normativa, secondo i quali essa deve essere pari almeno al 15% dello spessore del materiale più sottile [7].

Sui campioni analizzati non sono state riscontrate altre tipologie di difetti del tipo inclusioni o porosità interne.



Figura 6.29 Confronto macro-grafia del punto 1 "campione002_27Novembre" (sx) con il punto 1 "campione004_27Luglio" (dx)



Figura 6.30 Confronto macro-grafia del punto 2 "campione002_27Novembre" (sx) con il punto 1 "campione004_27Luglio" (dx)



Figura 6.31 Confronto macro-grafia del punto 3 "campione002_27Novembre" (sx) con il punto 1 "campione004_27Luglio" (dx)

I valori di durezza del materiale in corrispondenza del cordone mostrano delle differenze. Si assiste ad una riduzione dell'estensione della zona termicamente alterata (circa 2 mm) e ad un aumento dei picchi dei valori di durezza massimi raggiunti.

Avendo dei processi di raffreddamento più rapidi, la sollecitazione subita dal materiale di base è simile ad un processo di tempra più rapido. Di conseguenza aumenta la concentrazione di martensite, aumenta la resistenza meccanica e anche la durezza del materiale.

Nelle <u>figure 6.32-6.34</u> sono riportati i confronti, punto per punto, tra due campioni appartenenti alle due diverse classi trattate fin qui in questo paragrafo.



Figura 6.32 Risultati prove di durezza punto 1 "campione002_27Novembre" con punto 1 "campione004_27Luglio"



Figura 6.33 Risultati prove di durezza punto 2 "campione002_27Novembre" con punto 2 "campione004_27Luglio"



Figura 6.34 Risultati prove di durezza punto 3 "campione002_27Novembre" con punto 3 "campione004_27Luglio"

I cinque campioni generati sfruttando una velocità di avanzamento torcia di 580 mm/min sono stati sottoposti anche a prove di trazione. Come già fatto per i casi precedenti, sono stati ricavati da ogni giunto dei provini rettangolari che sono stati sottoposti a prova con carico uniassiale e velocità costante. I risultati delle prove per i 5 giunti sono raccolti in <u>figura 6.35</u>.



Figura 6.35 Risultati prove di trazione su tutti i campioni ottenuti mediante un aumento della velocità di avanzamento della torcia

Tra questi campioni in un solo caso si è ottenuta la rottura ad un carico inferiore rispetto a quello dichiarato dal fornitore (463 Mpa < 590 Mpa). Per questo campione si è ottenuta una rottura che ha avuto inizio in corrispondenza di uno dei due lembi (figura 6.36), ove è ipotizzabile una non completa penetrazione durante il processo di rottura. L'andamento anomalo della curva relativa al "campione001_27Novembre" è da imputare ad un errore macchina: i sistemi di bloccaggio non hanno funzionato correttamente, non impedendo la traslazione del provino verso l'alto.



Figura 6.36 Rottura su "campione006_27Novembre"

In 4 delle 5 prove di trazione si è ottenuta una rottura distante dalla ZTA.

A titolo esemplificativo, si riporta il risultato della prova di trazione valido per il "campione002_27Novembre" (figura 6.37).



Figura 6.37 "campione002_27Novembre" dopo trazione

7. Setting sistema DES e analisi lock-in

Lo studio dei campioni del piano sperimentale mediante termografia attiva è stato oggetto del lavoro di un altro tesista e non viene pertanto qui approfondito.

Vengono adesso mostrati degli studi preliminari condotti, sempre tramite termografia attiva su sistema DES, su altri giunti saldati.

Questi sono stati realizzati unendo lamiere di acciaio DP600, con processo di saldatura ad arco di tipo MAG/CMT secondo la configurazione di giunti di testa.

I parametri di processo sono riportati in tabella 7.1.

Grandezza	Valore	Riferimento
Gap lamiere [mm]	1.2	1.2
Stick out [mm]	15	15
Velocità avanzamento filo [m/min]	2	2
Velocità avanzamento torcia	440	500
[mm/min]		
Flusso di gas [l/min]	10	15
Voltaggio medio [V]	13.6	13.6
Intensità di corrente media [I]	92	92
Apporto termico specifico [J/cm]	1501.44	1501.44
Lunghezza cordone [mm]	100	100

Tabella 7.1 Parametri di processo di saldatura per giunti analizzati con il sistema DES

Si tratta di giunti realizzati con una configurazione di parametri che sperimentalmente è stata ritenuta non adeguata alla realizzazione di giunti conformi secondo normative. In particolare, è stata ridotta la velocità di avanzamento torcia da 500 mm/min a 440 mm/min.

Questi giunti, allo stesso modo di quanto fatto nel caso di studio di processi di giunzione con difetti indotti dalla riduzione della portata di gas, sono stati studiati mediante RX.

In questo si è resa disponibile una caratterizzazione del cordone, così da individuare e localizzare eventuali difetti interni su ogni giunto.

Lo studio che viene mostrato è stato condotto sul giunto con codice "campione002_21Marzo" (figura 7.1).



Figura 7.1 "campione002_21Marzo" per analisi con sistema DES

La particolarità di questo campione è data dal fatto che in corrispondenza del cerchietto rosso (O) si è verificata un'interruzione della macchina, da cui è scaturito un difetto.

Le indagini agli RX hanno mostrato un cordone privo di anomalie in tutto il rimanente tratto utile. Sono stati inizialmente condotti degli studi che hanno consentito la definizione di alcuni parametri di prova da introdurre sia sul software della termocamera sia sulla centralina di controllo della sorgente laser.

È stata fissata una finestra di acquisizione sul software Flir di dimensioni intermedie (320x256 pixel). Sono stati tenuti in considerazione due diversi range di temperatura:

- 10°C 90°C a cui con la configurazione di 100 frame per ciclo corrisponde un tempo di integrazione pari a 1.160 ms;
- 35°C 150°C a cui con la configurazione di 100 frame per ciclo corrisponde un tempo di integrazione pari a 0.326 ms.

Le prove sono state condotte sfruttando la modalità "trigger", ovvero azionando la registrazione con la termocamera 1 secondo prima dell'avvio della stimolazione termica della lamiera.

Sono state eseguite delle prove di tipo puntuale, mantenendo la posizione dello spot laser fissa nel tempo.

Per le prove sono stati adottati treni di impulsi di eccitazione in forma d'onda quadra, di cui si conoscono le potenzialità e i vantaggi rispetto ad una forma d'onda termica di tipo sinusoidale [15]. I parametri fondamentali che caratterizzano la prova sono la modulazione della potenza del laser e il tempo di riscaldamento per singolo impulso.

Lo studio è stato condotto mediante l'applicazione di un singolo ciclo di tre impulsi aventi ciascuno una durata di 200 ms, con una percentuale di potenza pari al 35%.

Questi parametri sono stati scelti anche in modo da massimizzare il rapporto segnale-rumore SNR: maggiori sono il numero di cicli e il valore di frame rate, maggiore è il rapporto segnale-rumore.

7.1. Verifica della ripetibilità delle prove

Le indagini preliminari sono state condotte col fine di verificare la ripetibilità delle prove, mediante confronto delle immagini di ampiezza e fase, mantenendo costanti i parametri di prova e il punto del cordone ispezionato. Queste immagini possono essere analizzate perché rappresentano dei set di dati forniti in forma matriciale. Lo studio è stato condotto mediante confronti di linee centrate sul massimo valore di ampiezza. Si considera una linea orizzontale, quindi disposta lungo la stessa direzione del cordone di saldatura, ed una verticale che invece risulta ortogonale al cordone.

Il primo confronto fa riferimento ad un punto esente da difetti collocato ad inizio cordone, ad una distanza di 20 mm dall'arc start (**O** in <u>figura 7.1</u>).

In questo caso è stata analizzata una lamiera non verniciata.

Sono stati imposti i parametri della tabella 7.2 sul software della termocamera "Flir ResearchIR".

Grandezza	Valore
Emissività	1
Temperatura riflessa [°C]	20
Temperatura atmosferica [°C]	20
Distanza [m]	1
Umidità	30%
Trasmissibilità	0.97

Tabella 7.2 Parametri su software Flir per lamiera non verniciata

È stato sufficiente condurre delle analisi con un range di temperatura pari a 10-90 °C.

Avendo imposto un valore di emissività pari ad 1, quello che si può estrapolare dalle analisi è solo un andamento qualitativo. Le temperature in gioco sono infatti solo dei valori apparenti.

Questo valore di emissività non esiste nella realtà e non è sicuramente proprio dei materiali metallici, i quali possiedono un'emissività molto bassa a basse temperature.

All'interno del laboratorio questo parametro, mediante l'ausilio di termocoppie, è stato stimato pari a 0,4 sul materiale base e 0,8 invece sul cordone di saldatura.

Si riporta nelle <u>figure 7.2</u> e <u>7.3</u> il confronto delle ampiezze relative alla I armonica (5 Hz) estrapolando dei vettori riga e colonna dalle matrici, centrati sul valore massimo di ampiezza.

Allo stesso modo nelle <u>figure 7.4</u> e <u>7.5</u> è mostrato il confronto relativo alle fasi, la cui interpretazione non è stata ancora opportunamente delineata.

In entrambi i casi i vettori contano 71 elementi della matrice di immagine.



Figura 7.2 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto buono non verniciato



Figura 7.3 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel punto buono non verniciato

La I armonica è quella a cui viene associata un'ampiezza maggiore.

La ripetibilità della prova è sicuramente verificata in quanto ai tre diversi test corrispondono stessi valori massimi e stessi andamenti delle curve. Un'ulteriore considerazione può essere fatta sullo sviluppo della curva di ampiezza ed in particolare sulla presenza del doppio picco nel caso di vettore riga: lungo i pixel vi è una minima variazione superficiale, quindi anche di spessore di materiale, riconducibile alla direzione di fusione e successiva solidificazione durante il processo di saldatura.



Figura 7.4 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto buono non verniciato



Figura 7.5 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto buono non verniciato

Commento analogo si può sviluppare anche per le fasi, le quali manifestano un andamento qualitativo molto simile con piccole traslazioni delle intere curve.

Ciò che bisogna valutare effettivamente delle curve di fase è il tratto centrale, parte iniziale e finale

costituiscono rumore che non ha alcuna utilità di analisi.

Mantenendo le stesse condizioni della lamiera, ma variando il range di temperatura a 35-150 °C per non incorrere nel fenomeno della saturazione del segnale, sono state condotte le stesse prove sul punto con difetto indotto dall'arresto della macchina durante il processo di saldatura (O in <u>figura</u> 7.1). La saturazione del segnale è un fenomeno che impedisce la corretta valutazione del segnale di risposta del materiale dopo stimolazione. Si è pertanto reso necessario l'utilizzo di un range di temperatura che fornisse un valore massimo più elevato.

Si riportano i risultati di ampiezza (figure 7.6 e 7.7) e di fase (figure 7.8 e 7.9).



Figura 7.6 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto difettoso non verniciato



Figura 7.7 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze l armonica nel punto difettoso non verniciato



Figura 7.8 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto difettoso non verniciato



Figura 7.9 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto difettoso non verniciato

Anche in questo punto è verificata la ripetibilità della prova.

In merito al risultato della prova 1 di figura 7.9 è necessario sottolineare che il capovolgimento della curva è dovuto ad un algoritmo interno al software. Questo fornisce dei risultati di ritardo di fase in un range limitato tra -90° e +90°, per cui gli angoli superiori a 90° vengono mostrati negativi.

La stessa verifica di ripetibilità delle prove è stata eseguita sullo stesso punto con difetto, ma con lamiera colorata mediante vernice nera.

In questo caso è stato imposto un valore noto di emissività pari a 0,92 e range di temperatura 35-

150°C. Si riportano gli andamenti di ampiezza (<u>figura 7.10</u> e <u>7.11</u>) e di fase (<u>7.12</u> e <u>7.13</u>) lungo vettori riga e colonna.



Figura 7.10 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto difettoso verniciato



Figura 7.11 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel punto difettoso verniciato



Figura 7.12 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto difettoso verniciato



Figura 7.13 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto difettoso verniciato

Anche in questo caso la ripetibilità è stata verificata in termini di ampiezza.

Sulle immagini di fase si osserva un'anomalia relativa alla prova 2. Questa, in virtù dei risultati fin qui ottenuti, può essere classificata come un outlier.

Si discosta completamente dagli altri risultati e mostra oscillazioni molto ampie e frequenti.

La variazione ottenuta sulle immagini di fase, la cui funzione viene riportata rispetto al campo spaziale dei pixel, necessita di ulteriori studi e dell'esecuzione di un maggior numero di prove per una corretta interpretazione.

L'ultima verifica di ripetibilità è stata condotta su un altro punto buono collocato nella mezzeria del cordone di saldatura. Le prove sono state condotte sulla lamiera verniciata, utilizzando come range

di temperatura 35-150°C. Si riportano le curve di ampiezza (<u>figura 7.14</u> e <u>7.15</u>) e di fase (<u>figura 7.16</u> e <u>7.17</u>).



Figura 7.14 Analisi ripetibilità mediante vettore riga delle ampiezze I armonica nel punto buono centrale verniciato



Figura 7.15 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna delle ampiezze I armonica nel punto buono centrale verniciato



Figura 7.16 Analisi ripetibilità mediante vettore riga della fase I armonica nel punto buono centrale verniciato



Figura 7.17 Analisi ripetibilità mediante vettore colonna della fase I armonica nel punto buono centrale verniciato

7.2. Variazione della risposta del segnale al variare dei parametri di prova

Come già anticipato nel precedente paragrafo, la lamiera è stata analizzata mediante termografia attiva utilizzando due diverse condizioni operative:

- Cordone non verniciato con emissività teorica pari a 1;
- Cordone verniciato con emissività nota pari a 0,92.

La vernice riduce gli errori relativi alla riflessione e garantisce una risposta termica del materiale più omogenea. Nelle <u>figure 7.18</u> e <u>7.19</u> sono mostrate le risposte termiche del materiale alla sollecitazione mediante sorgente laser, nelle due diverse condizioni operative e per lo stesso frame di acquisizione.



Figura 7.18 Frame 142 punto con difetto e lamiera non verniciata



Figura 7.19 Frame 142 punto con difetto e lamiera verniciata

L'effetto positivo dell'utilizzo della vernice è stato verificato anche plottando l'andamento della temperatura al variare del tempo, acquisendo i valori termici tramite un cursore di 9 pixel posizionato al centro del punto del cordone (figura 7.20).

L'istante in cui si ha un incremento della temperatura è lo stesso per le due curve, in quanto è stata imposta una stessa modalità di trigger con avvio della registrazione con un anticipo di 1 secondo rispetto all'inizio della stimolazione termica con il laser.

Nei due casi i massimi e le forme delle curve di risposta del materiale sono differenti, con picchi termici maggiori nel caso di lamiera non verniciata.



Figura 7.20 Andamento T nel tempo con e senza l'applicazione della vernice al punto difettoso

I risultati di ampiezza relativi alla I armonica sono mostrati nelle <u>figure 7.21</u> e <u>7.22</u>, facenti riferimento rispettivamente a vettore riga e vettore colonna della matrice.

È evidente come la presenza del difetto sia meglio evidenziata nella risposta del segnale verniciato, la quale sembra riprodurre la geometria dell'anomalia. Una possibile spiegazione consiste nel fatto che in questo caso non vi siano altri fattori, come la riflessione, che disturbino il segnale.



Figura 7.21 Confronto ampiezze I armonica mediante vettore riga con e senza l'applicazione della vernice al punto difettoso



Figura 7.22 Confronto ampiezze I armonica mediante vettore colonna con e senza l'applicazione della vernice al punto difettoso

Per completezza, sono riportati nelle <u>figure 7.23</u> e <u>7.24</u> anche i confronti delle fasi relative alla I armonica.

Anche questi andamenti risultano più omogenei nel caso di lamiera verniciata: il ritardo di fase è lineare nella zona centrale.



Figura 7.23 Confronto fase I armonica mediante vettore riga con e senza l'applicazione della vernice al punto difettoso



Figura 7.24 Confronto fase I armonica mediante vettore colonna con e senza l'applicazione della vernice al punto difettoso

7.3. Primi risultati dell'analisi lock-in

Dopo aver condotto delle prove atte a verificare l'affidabilità della strumentazione e la selezione di corretti parametri di prova, si è proceduto con il confronto tra punti definiti buoni, perché privi di anomalie, e zone invece difettose.

Viene quindi mostrata l'analisi condotta su due punti della lamiera verniciata di nero.

Si valutano i risultati in termini di ampiezza per un punto buono (**O**) e il punto in cui si ha il difetto causato dall'interruzione del processo di saldatura (**O**), le cui posizioni sono indicate in <u>figura 7.25</u>. Il confronto evidenzia delle sensibili variazioni tra i due punti nelle immagini di ampiezza.

In <u>figura 7.26</u> è mostrato lo studio effettuato mediante un vettore di valori rilevati su pixel orientati lungo la stessa direzione del cordone.

Il punto esente da difetti mostra un andamento che ricorda la campana di Gauss. La risposta in termini di ampiezza genera una curva con massimo di 160 unità.

La curva relativa al secondo punto mostra invece due picchi, entrambi ad un valore più elevato. Anche le pendenze dei due tratti, crescente e decrescente della misura di ampiezza, risultano maggiori.



Figura 7.25 Punti ispezionati sul "campione002_21Marzo"



Figura 7.26 Confronto ampiezza mediante vettore riga

Le stesse considerazioni si possono fare sugli andamenti della risposta in ampiezza del materiale, valutata mediante un vettore di pixel ortogonali al cordone di saldatura (<u>figura 7.27</u>). Anche in questo caso si hanno due picchi sulla curva di ampiezza relativa al punto con difetto e un andamento molto più omogeneo sul punto buono.



Figura 7.27 Confronto ampiezza mediante vettore colonna

Per completezza, si mostrano anche i vettori estrapolati dalle immagini di fase per la I armonica (figura 7.28 e 7.29).



Figura 7.28 Confronto fase mediante vettore riga





8. Conclusioni e possibili sviluppi futuri

In questo capitolo vengono raccolte delle valutazioni conclusive in merito ai risultati ottenuti dall'analisi, condotta attraverso tecniche distruttive e non distruttive, dei giunti presenti all'interno del piano sperimentale.

Il progetto è nato come studio di applicabilità della termografia ad infrarossi come strumento di indagine per il controllo della qualità di giunti saldati.

La termografia passiva, la quale è ormai largamente diffusa anche come metodo di controllo predittivo nel campo della manutenzione all'interno di impianti industriali e di edifici, ha mostrato delle ottime potenzialità. È stata in grado di individuare delle piccole variazioni dei parametri di processo, anche laddove le tecniche di analisi di tipo distruttivo non hanno invece rilevato particolari differenze. Le capacità discriminanti aumentano man mano che ci si discosta di più dai parametri nominali di saldatura. Si è visto come sia perfettamente in grado di sostituire il controllo visivo dell'operatore e di provvedere in tempi brevi all'individuazione di giunti non conformi nel caso di sensibili discostamenti dai parametri nominali. Nel caso di variazioni minime, questa strumentazione è comunque in grado di individuare delle differenze, non prima però dell'esecuzione di un'analisi degli andamenti termici.

Un grande vantaggio risiede nel fatto che permette dei controlli completi sull'intero cordone di saldatura, operazione che invece non sarebbe possibile con le sole analisi al microscopio o al microdurometro. Questo potrebbe tornare molto utile ad esempio nel caso in cui si stiano analizzando dei campioni all'interno dei quali sono diffuse delle porosità.

Un altro vantaggio è relativo ai costi, che rendono questa strumentazione molto competitiva e di più larga applicazione rispetto ai raggi x. Rispetto a questi ultimi possiede anche il vantaggio della minor pericolosità, visto che non ricorre a nessuna forma di radiazioni ionizzanti.

Con gli elementi raccolti è possibile sostenere che vi sono le condizioni per una possibile applicazione di questa strumentazione in linea di produzione. Ciò garantirebbe un'ottimizzazione delle tempistiche relative al controllo qualità e soprattutto un controllo su più larga scala.

L'implementazione su linea di produzione consentirebbe un controllo su ogni prodotto e non più su soli alcuni campioni all'interno di interi lotti di produzione, con evidenti vantaggi di costi e di affidabilità.

Discorso diverso può essere fatto invece per la termografia passiva, in particolare per la tecnica di analisi di tipo lock-in. Questo metodo di studio più recente necessita di ulteriori approfondimenti e dell'esecuzione di un maggior numero di prove.

Sono abbastanza chiare le informazioni che possono essere fornite dalle risposte del materiale in termini di ampiezza, un po' meno invece i risultati in merito alla risposta come ritardo di fase.

Le considerazioni fatte sulla tecnologia lock-in sono quindi da intendersi come risultati di uno studio preliminare.

Questo lavoro di tesi ha riguardato l'analisi dei soli processi di saldatura mediante una configurazione di testa e secondo un processo di tipo MAG/CMT. In futuro si potrebbe pensare di estendere questo studio ad altre tipologie di processi di saldatura e ad altre configurazioni, come i giunti per sovrapposizione, i quali possiedono un'ampia applicazione in ambito automotive.

Si potrebbe ampliare lo studio anche ad altre tipologie di materiali e ad altri tipi di difetti.

Alcuni suggerimenti possono riguardare le attrezzature e il setting per la realizzazione delle prove. Sarebbe utile utilizzare un sistema di fissaggio mediante maschera, la quale garantirebbe una migliore ripetibilità delle prove, maggior controllo dei fenomeni di distorsione dei giunti e una riduzione delle tempistiche associate alla definizione del corretto posizionamento delle lamiere.

Un miglior controllo del processo di saldatura si potrebbe ottenere modificando il sistema di avanzamento filo, così da ridurre le interruzioni della macchina di saldatura.

Per ottenere delle prove di durezza più lineari, sarebbe più opportuno impiegare un carico più grande di 50 g così da misurare l'effetto della media delle fasi, piuttosto che delle singole tipologie di microstrutture.

Oltre alle attrezzature relative alla realizzazione dei giunti e alle prove distruttive, si potrebbe pensare di apportare delle migliorie anche alle strumentazioni relative alla termografia.

Per quanto riguarda lo studio mediante termografia passiva si potrebbe ottimizzare la configurazione, in modo da ridurre i disturbi causati dagli elementi macchina, come la torcia di saldatura. Si potrebbe adottare un sistema che consenta la movimentazione della termocamera insieme alla torcia.

Per la termografia attiva in futuro si potrebbe estendere l'analisi puntuale ad una su tutto il cordone, attivando la movimentazione della testa del laser così da definire un percorso da compiere sull'intera lamiera.

9. Bibliografia

[1] A. Ascari, A. Fortunato "Introduzione ai processi di saldatura", Società editrice Esculapio, (2015).

[2] Istituto italiano della saldatura, "Saldatura per fusione", Biblioteca tecnica Hoepli, (1995).

[3] Fronius, "Il processo di saldatura CMT", presentazione, (2009).

[4] Normativa UNI 1307/2, Saldatura e tipologia di giunti.

[5] Normativa UNI EN ISO 9692-1, Saldatura e procedimenti connessi - Tipologie di preparazione dei giunti.

[6] Normativa UNI EN ISO 6520-1, Saldatura e procedimenti connessi - Classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici.

[7] Normativa PS.50001/01 Controllo qualità saldatura ad arco

[8] S. Rusca, M. Murgia, F. Lezzi, "Gestione dei livelli di qualità nella fabbricazione di strutture e componenti saldati", Seminario Roma, (2009).

[9] Normativa MS.50002, Acciaio DP600.

[10] Normativa EN-ISO 6507, Metallic materials- Vickers hardness test.

[11] C. Ibarra-Castanedo et al, "Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures", Research in Nondestructive Evaluation, 20, 1–31, (2009).

[12] U. Galietti, "Uso avanzato della termografia nell'analisi dei giunti saldati", Convegno Genova, (2016).

[13] Flir, "Manuale di termografia ad infrarossi per applicazioni industriali".

[14] Norma UNI EN 16714 Prove non distruttive - Prove termografiche.

[15] Meola, C., & Carlomagno, G. M. "Recent advances in the use of infrared thermography", Measurement Science and Technology, (2004).

[16] I. Ibrahim, S. Mohamat, A. Amir, "The effect of gas metal arc welding processes on different welding parameters", Procedia Engineering, (2012).

[17] "Guida tascabile della termografia", Testo Spa, (2009).

10. Ringraziamenti

Giunto al termine di questo progetto e del mio percorso di studi, desidero ringraziare tutti coloro i quali hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

Desidero ringraziare la Prof.ssa Sesana, la Prof.ssa Curà, il Prof. Lombardi e in particolare la Prof.ssa De Maddis per la loro professionalità e per la loro disponibilità fornita durante lo sviluppo di questo lavoro.

Desidero inoltre ringraziare tutto il personale del Centro Ricerche Fiat, in particolare Cesare e Fabio, per i loro consigli e il supporto durante i mesi di stage.

Un sentito ringraziamento va a tutti gli amici e i colleghi che ho avuto la fortuna di conoscere in questi anni e che hanno rappresentato la mia famiglia qui a Torino.

Un ultimo ringraziamento va alla mia famiglia e alla mia fidanzata, pilastri della mia vita, a cui il presente lavoro è dedicato.