POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA MECCANICA



Tesi di Laurea Specialistica

Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche

Relatore

Prof. Aurelio Somà

Ing. Mario Viola

Candidato
Stefano Russo

Indice

Introduzione	10
1. Giunti saldati	12
1.1. Classificazione saldature	12
1.2. Tecniche di saldatura	13
1.2.1. Saldobrasatura	13
1.2.2. Saldatura a gas	14
1.2.3. Saldatura ad arco con elettrodo rivestito, SMAW	15
1.2.4. Saldatura ad arco, con protezione di gas, con elettrodo fusibile GMAW	17
1.2.5. Saldatura ad arco, con protezione di gas, con elettrodo non fusibile TIG	19
1.2.6. Saldatura ad arco sommerso, SAW	20
1.2.7. Saldatura al plasma	21
1.2.8. Saldatura a resistenza	22
1.2.9. Saldatura laser LBW	24
1.3. Parametri di saldatura	25
1.3.1. Corrente di saldatura	26
1.3.2. Polarità	27
1.3.3 Tensione dell'arco e lunghezza d'arco	27
1.3.4. Velocità di spostamento della torcia	28
1.3.5. Stick-out	28
1.3.6. Posizione della torcia	30
1.4. Metodi di trasferimento	31
1.4.1. Short arc	31
1.4.2. Globular transfer	33
1.4.3. Spray arc	33
1.4.4. Pulsed-arc	35
1.5. Materiali d'apporto	36
1.6. Gas di protezione	37
1.7. Difetti di saldatura	40
1.8. Metallurgia saldatura	49

1.8.1. Zona fusa	50
1.8.2. Zona termicamente alterata	52
1.9. Tensioni residue e ritiri	54
1.9.1. Ritiri	55
1.10. Giunti saldati in macchine telescopiche	56
1.10.1. Normativa sulle giunzioni saldate	58
2. Prospettive future	59
2.1. Storia	59
2.2. Principi e funzionamento	60
2.2.1. Saldatura laser	60
2.2.2. Saldatura MIG/MAG	62
2.2.3. Saldatura ibrida Laser-MIG/MAG	63
2.3. Attrezzatura	67
2.4. Caratteristiche	69
2.4.1. Microstruttura	70
2.4.2. Durezza	70
2.4.3. Resistenza	71
2.4.4. Resilienza	72
2.5. Difetti	7 3
2.6. Esempi di confronto	74
2.7. Conclusioni	76
3. Inquadramento normative e giunti aziendali	78
3.1. Analisi normative per la certificazione	78
3.2. Normativa requisiti di qualità saldatura UNI EN ISO 3834	79
3.3. Qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici UNI 15614	81
3.3.1. Saggi di prova	84
3.3.2. Controlli e prove	87
3.3.3. Campi di applicazione	88
3.3.4. Processo di saldatura	91

3.3.5. WPS Specifica di procedura di saldatura 91 3.4. Prove di qualificazione dei saldatori, parte 1: acciai UNI EN ISO 9606-1 92 3.4.1. Processo di saldatura 93 93 3.4.2. Tipo di prodotto 3.4.3. Tipo di giunto 93 3.4.4. Tipo e gruppo materiale d'apporto 94 3.4.5. Dimensioni 94 3.4.6. Posizioni di saldatura 95 3.5. Prove di qualificazione degli operatori di saldatura e preparatori di saldatura 97 97 3.6. Analisi giunti interni all'azienda 3.7. Analisi patentini e operatori saldatura 108 3.7.1. Qualificazione saldatore manuale 108 3.7.2. Qualificazione operatore di saldatura 110 3.8. Problematiche 111 4. Analisi flussi interni 113 4.1. Centri di lavoro 113 4.2. Attribuzione giunti e patentini ai centri di lavoro 114 4.3. Creazione sistema gestione su Sharepoint 117 5. Analisi formulazioni empiriche di predizione della durezza 121 5.1. Microstruttura giunto saldato 121 5.1.1. Diagramma di fase 122 5.1.2. Curve CCT e TTT 125 5.1.3. Effetti di tempra 127 5.2. Apporto termico 131 5.3. Tempo di raffreddamento t_{8/5} 133 5.3.1. Calcolo del tempo di raffreddamento 134 5.3.2. Diagrammi per la definizione del tempo di raffreddamento 136 5.4. Formulazioni empiriche per la predizione della durezza 138 5.4.1. Modello Suzuki 138

. Russo				
Studio	e caratterizzazione d	li giunti saldat	i per macchine	telesconiche"

5.4.2. Modello Terasaki 1	1
5.4.3. Modello Terasaki 2	1
5.4.4. Modello Yurioka 1	1
5.4.5. Modello Yurioka 2	1
5.5. Prove sperimentali	1
5.5.1. Risultati	1
5.5.2. Conclusioni	1
6. Certificazione	1
6.1. Provini preliminari	1
6.2. Provini certificazione	1
Conclusioni	1

Elenco delle figure e delle tabelle

Figui	gura	
1.1.	Giunto saldato	12
1.2.	Reazione fiamma saldatura a gas	15
1.3.	Saldatura ad arco con elettrodo rivestito	17
1.4.	Saldatura ad arco con elettrodo fusibile GMAW	18
1.5.	Saldatura ad arco con elettrodo non fusibile TIG	20
1.6.	Saldatura ad arco sommerso	21
1.7.	Saldatura al plasma	22
1.8.	Saldatura a resistenza	23
1.9.	Saldatura laser LBW	25
1.10.	Stick-out	29
1.11.	Posizione della torcia	30
1.12.	Short arc	32
1.13.	Globular transfer	33
1.14.	Spray arc	34
1.15.	Corrente-tempo	35
1.16.	Frequenza-corrente	36
1.17.	Forma del cordone in funzione del gas	40
1.18.	Cricca	41
1.19.	Incisione marginale	42
1.20.	Spruzzi	43
1.21.	Porosità	44
1.22.	Eccesso di sovrametallo	45
1.23.	Inclusioni	46
1.24.	Fusione incompleta	47
1.25.	Incollatura	48
1.26.	Metallurgia giunto	49
1.27.	Microstruttura zona fusa	51
1.28.	Zona termicamente alterata	53

1.29.	Ritiro trasversale	
1.30.	Ritiro angolare	
1.31.	Componenti macchine telescopiche	
2.1.	Fascio laser saldatura e macrografia	
2.2.	Saldatura MIG/MAG	
2.3.	Funzionamento Hybrid welding	
2.4.	Configurazione torcia	
2.5.	Attrezzatura saldatura ibrida	
2.6.	Torcia saldatura ibrida	
2.7.	Microstruttura delle 3 diverse tecniche	
2.8.	Confronto durezza delle diverse tecniche	
2.9.	Confronto resistenza delle diverse tecniche	
2.10.	Resilienza giunto	
2.11.	Difetti saldatura ibrida	
2.12.	Confronto saldatura MAG- Hybrid	
2.13.	Confronto velocità di produzione	
3.1.	Provino testa a testa	
3.2.	Provino testa a testa tra tubi	
3.3.	Provino a T	
3.4.	Provino tubo tronchetto	
3.5.	Testata macchina telescopica	
3.6.	Giunto a T	
3.7.	Giunto particolare testata	
4.1.	Sistema di gestione Sharepoint	
4.2.	WPS	
5.1.	Diagramma ferro -carbonio	
5.2.	Curva TTT acciaio	
5.3.	Microstruttura ZTA	
5.4.	Efficienza termica dei processi di saldatura	
5.5.	Influenza della forma del giunto	
5.6.	Fattore d forma in funzione della saldatura	

5.7.	Provino per le prove sperimentali	
5.8.	Prove di durezza	
5.9.	Durometro Brinell	
5.10.	Serie impronte sul provino	
5.11.	Provino con attacco acido	
5.12.	Prove di durezza sul provino	
5.13.	Provini test S235JR	
5.14.	Grafico andamento durezza S650MC	
6.1.	Giunti da certificare prima fase	
6.2.	Documento pWPS	
6.3.	Provino 19/001	
6.4.	Provino 19/002	
6.5.	Provino 19/003	
6.6.	Provino 19/004	
6.7.	Provino 19/005	
6.8.	Provino 19/006	
6.9.	Provino 19/007	
6.10.	Provino 19/008	
6.11.	Prove con diversi parametri su giunto a T	
6.12.	Centro di lavoro automatizzato	
6.13.	Provino 19/001 con parametri modificati	
6.14.	Provino 19/002 con parametri modificati	
6.15.	Provino 19/003 con parametri modificati	
6.16.	Provino 19/004 con parametri modificati	
6.17.	Provino 19/006 con parametri modificati	
Tabe	ella	
1.1.	Gas protezione	
3.1.	Raggruppamento materiali ISO 15608	
3.2.	Posizioni saldatura testa a testa	
3.3.	Posizioni saldatura d'angolo	

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

3.4.	Giunti particolari	105
4.1.	Centri di lavoro	114
4.2.	Componenti nei centri di lavoro	115
4.3.	Giunti nei centri di lavoro automatizzati	115
4.4.	Giunti nei centri di lavoro manuali	116
4.5.	Patentini nei centri di lavoro	116
6.1.	Parametri preliminari	161
6.2.	Parametri definitivi	168

Abstract

Lo studio di questa tesi presenta come obbiettivo la certificazione dei giunti prodotti all'interno dell'azienda Merlo Spa di san Defendente di Cervasca (Cuneo) e la definizione di un sistema che possa predire la fattibilità di una saldatura. L'azienda Merlo Spa è, infatti, leader mondiale nei sollevatori telescopici: settore nel quale la saldatura è molto utilizzata ma in cui non vi è una normativa dedicata.

Lo studio è iniziato con l'analisi delle normative vigenti nell'ambito delle giunzioni saldate, le quali sono poi state applicate ai giunti prodotti in azienda per eseguirne la certificazione.

Lo scopo delle prove sperimentali è stato quello di valutare la qualità delle saldature che vengono eseguite in produzione e di verificare se i modelli di predizione di durezza potessero fornire uno strumento attendibile per l'analisi dei giunti.

Introduzione

La dissertazione scritta ha come argomento lo studio delle giunzioni saldate per macchine telescopiche, effettuato presso l'azienda Merlo Spa di san Defendente di Cervasca (Cuneo). Ha come obbiettivo l'analisi delle saldature necessarie per eseguire la certificazione e la verifica di modelli matematici di predizione del comportamento del processo.

Nel primo capitolo viene descritta la teoria relativa alla saldatura, ponendo maggior attenzione agli argomenti necessari per capire la normativa. Sono stati studiati i tipi di processo prevalentemente utilizzati in questo settore e le caratteristiche che definiscono il processo di saldatura, dai materiali alle microstrutture che si generano.

Viene anche descritta una panoramica delle normative e delle saldature nelle macchine a sollevamento telescopico.

Nel secondo capitolo viene rappresentata una tecnologia di saldatura innovativa ancora non utilizzata nel settore; è stata eseguita un'analisi tecnica del processo e dei possibili vantaggi che potrebbe fornire nella produzione.

Nella prima parte del terzo capitolo vengono studiate le normative relative al processo di saldatura e agli operatori, ponendo maggiore attenzione agli aspetti più critici. Nella seconda parte viene rappresentata l'analisi dei giunti e dei patentini prodotti all'interno dell'azienda ed il lavoro di ottimizzazione eseguito per la certificazione.

Nel quarto capitolo vengono descritti i flussi produttivi e viene presentato il sistema di gestione dei giunti certificati, creato su Sharepoint per utilizzare un canale unico su cui gestire la saldatura dalla progettazione al controllo qualitativo. matematici.

Il quinto capitolo descrive il lavoro eseguito sulle misure sperimentali: inizialmente è stato fatto uno studio relativo alla microstruttura del giunto saldato e degli effetti di tempra che si possono generare nella zona termicamente alterata e, successivamente, sono state eseguite le prove sperimentali sui provini per verificare l'attendibilità dei modelli

Nell'ultimo capitolo viene descritto il lavoro di certificazione che è stato eseguito sui giunti ottenuti dall'analisi del terzo capitolo. Sono stati realizzati dei giunti preliminari per verificare il processo di saldatura e, con i parametri utilizzati, in seguito sono stati prodotti i provini necessari per la certificazione.

Capitolo 1

Giunti saldati

La saldatura è il procedimento che permette la giunzione di due giunti, tramite la fusione del materiale di base o di un materiale d'apporto. L'apporto di calore fonde il materiale creando un bagno di fusione, che solidificandosi, genera il cordone di saldatura.

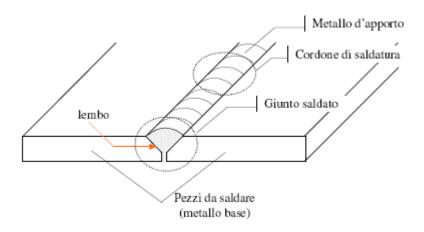


Figura 1.1. Giunto saldato

1.1. Classificazione saldature

Le giunzioni saldate, a seconda delle caratteristiche che presentano, vengono classificate nel seguente modo:

- saldatura omogenea: il materiale base è uguale al metallo d'apporto;
- saldatura eterogenea: il metallo base è differente da quello d'apporto;
- saldatura autogena: il materiale base fonde e prende parte alla composizione del giunto;

- saldatura eterogena: il materiale base non fonde e non prende parte alla composizione del giunto che è formato dal solo materiale d'apporto;
- saldatura per fusione: si ha quando il collegamento dei pezzi è ottenuto mediante fusione e susseguente solidificazione dei lembi, con o senza interposizione di metallo d'apporto;
- saldatura per pressione: si ha quando il collegamento dei pezzi è ottenuto
 esercitando una pressione meccanica sui pezzi da unire. L'azione della
 pressione deve essere combinata col calore necessario per far raggiungere i
 pezzi allo stato pastoso.

1.2 Tecniche di saldatura

Esistono molte tecniche di saldatura che differiscono per il funzionamento e per le caratteristiche del cordone di saldatura:

1.2.1 Saldobrasatura

La saldobrasatura è una saldatura eterogena, per questo motivo il metallo d'apporto ha un punto di fusione inferiore e quindi composizione diversa rispetto al metallo base. E' necessario avere evidentemente una zona di sovrapposizione abbastanza ampia poiché la resistenza meccanica del materiale d'apporto è molto bassa.

1.2.2 Saldatura a gas

Tecnica di saldatura che sfrutta la combustione di un gas per fondere un metallo. I gas utilizzati possono essere miscele di ossigeno con idrogeno (Ossidrica) o metano, propano (Ossipropanica) oppure acetilene (Ossiacetilenica).

La saldatura a gas più diffusa utilizza una miscela di ossigeno ed acetilene, che alimentano contemporaneamente una torcia, ed escono dall'ugello terminale dove tale miscela viene accesa. La temperatura massima raggiungibile è dell'ordine dei 2000 - 3000 °C e può essere quindi utilizzata anche per la saldatura degli acciai.

Piccoli spessori possono essere saldati semplicemente fondendone i bordi, che devono solo essere sufficientemente accostati. Spessori superiori possono essere saldati allontanando i due lembi e riempiendo con il metallo d'apporto il giunto.

La fiamma ossiacetilenica viene realizzata mediante la combustione di acetilene C2 H2 e ossigeno O2. Nel dardo avviene la reazione primaria: C2H2 + O2 -> 2CO + H2 i prodotti della combustione si combinano poi con l'ossigeno generando:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2} \; O_2 \rightarrow H_2 O$$

Per eseguire la saldatura i lembi devono trovarsi nella zona riducente dove si raggiungono i 3100°C e grazie all'atmosfera riducente si limita l'ossidazione del pezzo.

Dardo Saldatura Fiocco

Figura 1.2. Reazione fiamma saldatura a gas

1.2.3 Saldatura ad arco con elettrodo rivestito, SMAW (Shielded-Metal Arc Welding)

Il calore necessario per la fusione del metallo è prodotto da un arco elettrico che si instaura tra l'elettrodo e i pezzi del metallo da saldare, raggiungendo temperature variabili tra 4000-6000 °C.

L'arco elettrico è la manifestazione fisica del passaggio di una corrente in un mezzo gassoso ionizzato. Al momento del contatto scorre una corrente di corto circuito che surriscalda elettrodo e metallo base provocando anche la ionizzazione del gas interposto e innescando l'arco. L'arco elettrico è generato dal passaggio di elettroni dal polo negativo a quello positivo e l'energia ad esso associata si trasforma in calore e in onde elettromagnetiche di varia frequenza. Circa i 2/3 del calore sviluppato si riversa sul polo positivo per il bombardamento elettronico e si raggiungono temperature massime di 6000-7000°C. Una volta innescato, il fenomeno è in grado di autosostenersi, purché tra gli elettrodi vi sia una differenza di potenziale.

·

La corrente utilizzata può essere alternata o continua: nel primo caso si ha un arco più stabile e un cordone uniforme, ma si manifesta il problema del soffio magnetico ovvero una brusca deviazione che la corrente subisce al punto di innesco dell'arco determinando una forza magnetica che devia l'arco rispetto alla direzione dell'asse dell'elettrodo. Questo fenomeno si verifica anche quando si è vicini ad una massa elettrica come la terra e può essere limitato mantenendo l'arco il più corto possibile. Nella corrente continua, invece, abbiamo un elevato deposito e correnti molto alte con il vantaggio dell'assenza del soffio magnetico.

Un altro aspetto che influisce sulla saldatura è la polarità la quale può essere diretta o inversa; nella polarità diretta il materiale di base funge da anodo perciò si presenta un'elevata penetrazione mentre nel caso dell'inversa, con il materiale d'apporto che fa da anodo, si manifesta un elevato deposito.

Esistono vari tipi di rivestimento per l'elettrodo:

- elettrodi ossidanti: rivestimento di ossido di ferro, d\u00e0 ottimi cordoni ma di scadenti propriet\u00e0 meccaniche;
- elettrodi acidi: rivestimento di biossido di silicio, dà un giunto di caratteristiche meccaniche buone;
- elettrodi basici: rivestimento costituito da carbonati, silicati, floruri di calcio,
 dà un cordone senza cricche con elevata resistenza e allungamento a frattura;
- elettrodi al rutilio: rivestimento al biossido di titanio, il titanio ionizza fortemente conferendo elevata stabilità all'arco ma cordone non liscio;

·

 cellulosico: rivestimento a base di materie organiche, dà un giunto di buone qualità.

Il rivestimento esterno dell'elettrodo presenta diverse funzioni: genera un gas di protezione per il bagno di fusione, introduce deossidanti e agenti riducenti per il bagno, stabilizza l'arco e permette di controllare la microstruttura della saldatura fornendo elementi leganti.

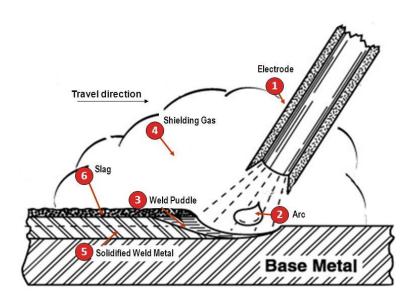


Figura 1.3. Saldatura ad arco con elettrodo rivestito

1.2.4 Saldatura ad arco, con protezione di gas, con elettrodo fusibile GMAW (Gas-Metal Arc Welding)

Questa tecnica presenta un elettrodo fusibile costituito da un filo continuo non rivestito, erogato da una torcia mediante un apposito sistema di trascinamento tramite il quale si può regolare la velocità per mantenere costante la lunghezza dell'arco; allo stesso

tempo la torcia emette un gas protettivo per la protezione del bagno di fusione. Il gas di protezione gioca due ruoli fondamentali:

- 1. proteggere dall'aria esterna l'arco;
- 2. fornire una desiderata caratteristica all'arco attraverso il suo effetto ionizzante.

Esistono principalmente due processi di saldatura con elettrodo fusibile, che si differenziano a seconda del gas utilizzato:

- Metal inert gas (MIG): il gas che si utilizza è elio o argon, i quali non presentano attività chimiche.
- Metal active gas (MAG): il gas di protezione ha un'attività ossidante, nel bagno di fusione. I gas principalmente usati sono: anidride carbonica, miscele aria e anidride carbonica o miscele aria ossigeno.

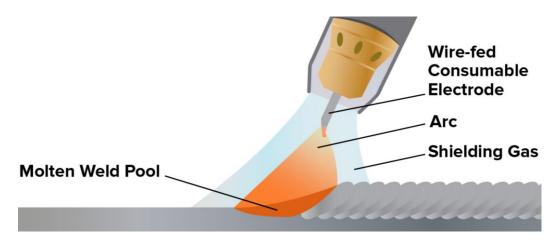


Figura 1.4. Saldatura ad arco con elettrodo fusibile GMAW

1.2.5 Saldatura ad arco, con protezione di gas, con elettrodo non fusibile TIG

(Tungsten Inert Gas)

L'arco elettrico si genera tra un elettrodo non fusibile in tungsteno e il pezzo da saldare. L'area di saldatura viene protetta da un flusso di gas inerte in modo da evitare il contatto tra il metallo fuso e l'aria.

Il processo di saldatura di tipo TIG ha raggiunto livelli di automazione talmente avanzata da farne una delle tecniche più diffuse.

Il gas di protezione in questo caso può essere: Argon, Elio oppure una miscela dei due. Questo processo può essere eseguito con o senza materiale d'apporto, senza di esso la distanza tra i lembi dev'essere molto piccola.

Esistono diverse modalità operative:

1. Direct Current-Straight Polarity:

Con la modalità a corrente continua e polarità diretta, il pezzo di lavoro è connesso al terminale positivo (+) mentre l'elettrodo è polarizzato negativamente.

2. Direct Current–Reverse Polarity:

Con la polarità inversa, il pezzo di lavoro è connesso al terminale negativo (-) mentre l'elettrodo è polarizzato positivamente.

3. Alternate Current: corrente alternata.

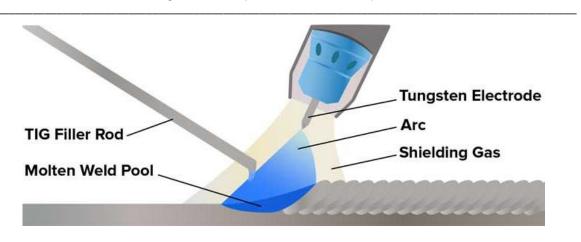


Figura 1.5. Saldatura ad arco con elettrodo non fusibile TIG

1.2.6 Saldatura ad arco sommerso, SAW (Submerged Arc Welding)

In questa tecnica, contemporaneamente alla fusione dell'elettrodo metallico, si ha l'immissione sull'arco di saldatura di un getto protettivo di polvere scorificante antiossidante a base di silicati di calcio, magnesio e ossido di manganese.

Il processo è protetto da una polvere granulare che viene depositata da una tramoggia sulla zona di saldatura, in questo modo l'arco viene sommerso dalla polvere.

Si tratta di una tecnica prevalentemente automatica a causa delle elevate correnti utilizzate e dall'alto tasso di deposito, utilizzata per grossi spessori.

Presenta notevoli vantaggi nella produttività e nella qualità della saldatura ma è ristretta a esecuzione di saldature orizzontali o piatte.

·

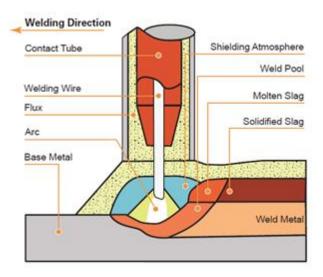


Figura 1.6. Saldatura ad arco sommerso

1.2.7 Saldatura al plasma

La saldatura al plasma è un processo molto simile al GTAW in quanto entrambi utilizzano un elettrodo di tungsteno infusibile per produrre l'arco voltaico. La differenza è che nella saldatura al plasma è presente l'azione convergente dei gas inerti provocando il restringimento dell'arco.

Innescando l'arco elettrico su questa colonna di gas si causa la sua parziale ionizzazione e, costringendo l'arco all'interno dell'orifizio, si ha un forte aumento della parte ionizzata trasformando il gas in plasma. Il risultato finale è una temperatura dell'arco più elevata (fino a 6.000 – 10.000 °C) a fronte di una sorgente di calore più piccola.

Esistono due diverse metodologie di saldatura al plasma:

- 1. Modalità in conduzione
- 2. Modalità Keyhole

I vantaggi di questa tecnica sono una maggior concentrazione dell'energia, una maggior penetrazione, un arco più stabile e un'alta produttività. Al contrario, però, è un processo che richiede un equipaggiamento molto costoso.

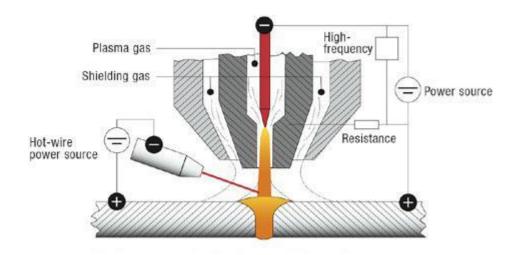


Figura 1.7. Saldatura al plasma

1.2.8 Saldatura a resistenza

In questo processo si genera calore attraverso la resistenza incontrata dalla corrente elettrica che scorre tra le parti da saldare. I lembi da saldare, generalmente, costituiscono parte integrante di un circuito elettrico, nel quale il calore e la saldatura hanno luogo nel punto di contatto, sfruttando il principio di Joule.

Una coppia di elettrodi, con raffreddamento ad acqua, conduce la corrente nella giunzione, applicando una pressione per incrementare il contatto tra elettrodo-metallo e aiutare a racchiudere il materiale fuso nel punto di giunzione.

Affinché il processo funzioni correttamente, la resistenza incontrata dalla corrente dev'essere maggiore nella regione di contatto rispetto alla zona circostante.

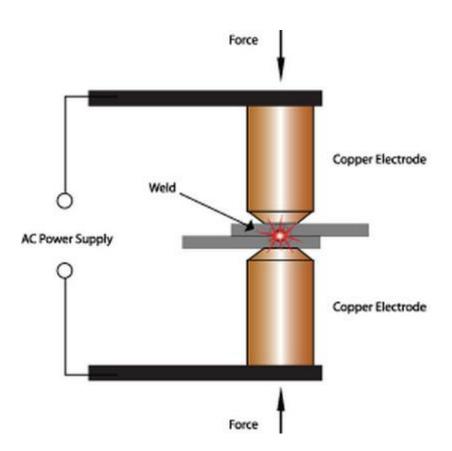


Figura 1.8. Saldatura a resistenza

1.2.9 Saldatura laser LBW (Laser Beam Welding)

Il procedimento utilizza l'energia cinetica immagazzinata nei fotoni per fondere il materiale e creare la saldatura.

Il laser è un insieme di intense radiazioni elettromagnetiche a frequenza ottica. L'unità saldatrice laser comprende: una sorgente eccitatrice, un sistema riflettente per dirigere le radiazioni dalla sorgente eccitatrice sul cristallo laser, un materiale capace di produrre un'azione laser, un sistema per la concentrazione del fascio emesso.

I parametri che un operatore deve valutare sono:

- Energia d'impulso: dipende dall'energia elettrica scaricata sulla sorgente eccitatrice, che può essere regolata agendo sul potenziale di appositi condensatori.
- Durata dell'impulso: può essere variata agendo sulla capacità dei condensatori.
- Lunghezza d'onda.
- Preparazione: la superficie dei pezzi da saldare deve essere ricoperta con sostanze ad alto coefficiente di assorbimento quando si trattano materiali molto riflettenti.
- Atmosfera: un'atmosfera di gas inerte può evitare l'evaporazione superficiale.

Reflecting Mirror
Flash Lamps
Partially
Reflecting Mirror
Laser Light Beam
Weld area

Figura 1.9. Saldatura laser LBW

Two Metal Workpiece

1.3 Parametri saldatura

Considerando le tecniche ad arco elettrico vi sono delle caratteristiche che definiscono il processo, tali variabili influiscono sulla microstruttura della saldatura, sui cicli termici, sulla penetrazione e sulla qualità del giunto:

- Corrente di saldatura
- Polarità della corrente
- Tensione dell'arco e lunghezza dell'arco
- Velocità di spostamento della torcia
- Stick-out
- Posizione torcia

La conoscenza della loro influenza ed il relativo controllo sono essenziali al fine di ottenere delle giunzioni saldate di qualità. Tali parametri non sono indipendenti tra loro; la variazione di una di queste variabili richiede il cambiamento delle altre per ottenere un buon equilibrio complessivo.

Possiamo dire che la geometria del cordone è funzione dei parametri del generatore, della velocità di spostamento della torcia e della posizione della torcia.

Le proprietà meccaniche e microstrutturali del metallo di saldatura e della zona termicamente alterata dipendono dal tipo di metallo base, dal metallo d'apporto, dalla velocità di raffreddamento e dalla severità del ciclo termico.

1.3.1 Corrente di saldatura

La corrente di saldatura è l'intensità di corrente, definita in Ampère, che viene impostata dal generatore.

Quando tutte le altre variabili sono mantenute costanti, la corrente di saldatura è una funzione non lineare della velocità di avanzamento del filo.

Un aumento della corrente di saldatura, e di conseguenza un aumento della velocità di avanzamento dell'elettrodo, determinerà un aumento del materiale depositato, ma anche un aumento della profondità e della larghezza di penetrazione con un aumento conseguente della sezione del cordone di saldatura.

1.3.2 Polarità

Con il termine polarità si definisce la connessione elettrica della torcia di saldatura con i terminali del generatore (polo positivo o polo negativo). Se la torcia è collegata al polo positivo, siamo in "corrente continua elettrodo positivo" (DCEP). Quando la torcia è collegata al polo negativo, la polarità è detta "corrente continua elettrodo negativo" (DCEN).

La metodologia più usata è la DCEP, anche detta polarità inversa; questa condizione determina un arco stabile, spruzzi relativamente bassi, buone caratteristiche del cordone di saldatura e grandi profondità di penetrazioni.

L'utilizzo della corrente alternata con il processo G.M.A.W ha generalmente avuto risultati negativi. La forma sinusoidale della corrente genera un arco instabile dovuto alla tendenza dell'arco ad estinguersi non appena la corrente attraversa lo zero.

1.3.3 Tensione dell'arco e lunghezza d'arco

Nel processo di saldatura ad arco elettrico la lunghezza dell'arco è una variabile critica che deve essere controllata. Nel caso in cui si abbia un arco corto si rischia di avere dei cortocircuiti che generano spallinatura; al contrario se è troppo lungo diventa instabile influenzando il cordone.

La lunghezza dell'arco è la variabile indipendente. La tensione d'arco dipende sia dalla lunghezza dell'arco sia da altre variabili come: la composizione chimica e la dimensione dell'elettrodo, il gas di protezione, la tecnica di saldatura.

La tensione d'arco è approssimativamente pari al valore medio della lunghezza d'arco; essa include la caduta di tensione che si verifica nello stick-out.

Anche se la lunghezza d'arco è la variabile principale da controllare, la tensione d'arco è più facilmente misurabile e quindi controllabile. Per questa ragione nelle specifiche tecniche relative ai procedimenti di saldatura si fa riferimento alla tensione d'arco.

Una riduzione d'arco eccessiva determina porosità, spallinatura e intaglio marginale.

Una riduzione della tensione d'arco determina un cordone di saldatura più stretto con una cresta del cordone più alta ed una maggiore penetrazione.

1.3.4 Velocità di spostamento della torcia

La velocità di spostamento è la velocità che viene imposta alla torcia per l'esecuzione della saldatura.

Quando la velocità di spostamento viene diminuita, la quantità di metallo d'apporto depositata per unità di lunghezza aumenta. Ad una velocità molto bassa l'arco di saldatura incide sul bagno di fusione, invece che sul metallo base, diminuendo la penetrazione ottenuta e producendo un cordone di saldatura più largo.

All'aumentare della velocità di spostamento della torcia, l'energia termica trasmessa dall'arco di saldatura in un primo momento aumenta, dato che l'arco elettrico incide direttamente sul metallo base; con un ulteriore aumento della velocità di spostamento, inizia a diminuire.

1.3.5 Stick-out

La sporgenza libera, o stick-out, è la distanza compresa tra l'estremità del guida-filo e l'estremità dell'elettrodo. Quando il filo è all'interno del guida-filo, la densità di

out and out a state of the stat

corrente che lo attraversa è bassa, ma quando il filo esce, la densità di corrente aumenta notevolmente portando ad un riscaldamento per effetto Joule.

Una sporgenza libera maggiore, determina un aumento della resistenza elettrica, e di conseguenza per la legge di Joule un aumento della temperatura dell'estremità del filo. Lo stick-out ha influenza anche sulla geometria del cordone e sulla fluidità del bagno di fusione: una sua diminuzione determina un allargamento del cordone ed un aumento della fluidità del bagno.

L'aumento dello stick-out allontana la torcia dalla zona di saldatura, riducendo il rischio di eventuali spruzzi. La sporgenza comunque non deve essere troppo grande altrimenti si possono verificare serpeggiamenti del filo.

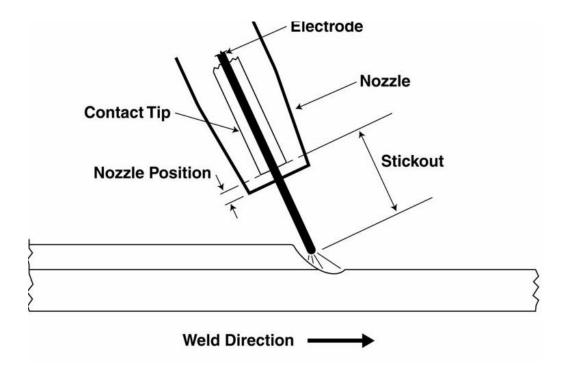


Figura 1.10. Stick-out

1.3.6 Posizione della torcia

La posizione dell'elettrodo rispetto al giunto di saldatura influenza la forma e la penetrazione del cordone di saldatura.

Se l'elettrodo è inclinato nello stesso verso dello spostamento della torcia, la tecnica è chiamata 'tecnica a tirare". Se l'elettrodo invece punta nella direzione di spostamento della torcia, la tecnica è chiamata 'tecnica a spingere'.

La massima penetrazione è ottenuta in posizione piana con una tecnica a tirare con un angolo di circa 15° dalla perpendicolare. La tecnica a tirare produce un cordone di saldatura più convesso e più stretto, un arco più stabile e minori spruzzi sul pezzo.

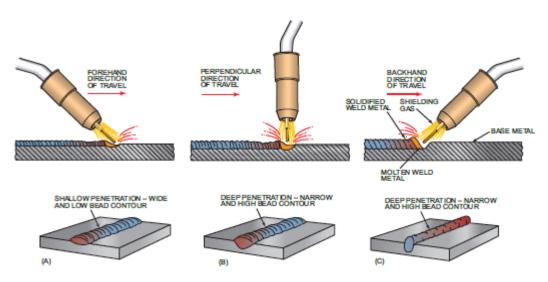


Figura 1.11. Posizione della torcia

1.4 Metodi di trasferimento

Nei processi G.M.A.W. (Gas Metal Arc Welding) sono definiti tre diversi meccanismi di trasferimento dell'elettrodo nel bagno di fusione:

- 1. "Short-arc" o per cortocircuito;
- 2. "Globular transfer";
- 3. "Spray-arc" o di tipo polverizzato, cioè a piccole gocce;
- 4. "Pulsed arc".

Per passare da un metodo di trasferimento ad un altro, per la maggior dei casi si va a modificare il valore di tensione e amperaggio sul generatore della saldatrice. In alcuni casi potrebbe essere necessario cambiare il gas di protezione, ma l'attrezzatura per tutti i processi è la stessa. Nel caso del metodo pulsato si richiede però un dispositivo apposito per generare i valori di tensione e corrente.

1.4.1 Short arc

Avviene quando l'alimentazione è tale da non far scattare l'arco ed il filo tocca il pezzo: nel filo passano delle forti correnti elettriche.

Il trasferimento di metallo avviene per effetto Joule, con il trasferimento di gocce grosse con bassa frequenza, ognuna delle quali genera un cortocircuito che estingue l'arco elettrico.

In questo metodo di trasferimento l'apporto termico è estremamente basso e si genera quindi un piccolo bagno di fusione che si raffredda velocemente determinando un basso riscaldamento del giunto. I problemi che si generano, dovuti alla presenza di un basso apporto termico, sono: una mancata fusione del metallo di base e la formazione di soffiature e porosità.

Viene utilizzato per la saldatura di spessori sottili, per saldature fuori posizione, per la saldatura di giunti caratterizzati da una luce tra i lembi elevata e per la saldatura di metalli a bassa temperatura di fusione.

Nella figura 1.12, si evidenzia come nella prima parte del trasferimento si presenta un picco di corrente, il quale tende a decrescere generando la goccia di materiale che si staccherà con il picco successivo. [1]

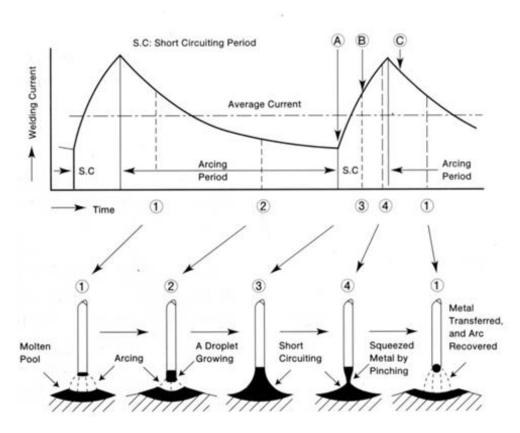


Figura 1.12. Short arc

1.4.2 Globular transfer

Il trasferimento globulare si ottiene quando il metallo è trasferito tramite gocce di grosse dimensioni e con frequenza di trasferimento più bassa rispetto alla modalità spray.

Questa modalità si ottiene quando il livello di alimentazione dell'arco è insufficiente a sviluppare adeguate forze elettromagnetiche capaci di spingere le gocce verso il metallo base, che grazie al loro significativo peso riescono ad esser deposte nel bagno di fusione per spinta gravitazionale.

Tale modalità avviene quando la corrente è relativamente bassa, indipendentemente dal tipo di gas di protezione.

L'arco dovrà essere abbastanza lungo da assicurare il distacco della goccia prima che essa entri in contatto con il bagno di fusione. Questo limita molto l'uso del tipo di trasferimento globulare nelle applicazioni industriali. [2]

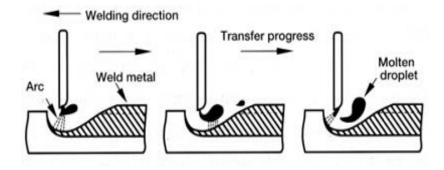


Figura 1.13. Globular transfer

1.4.3 Spray arc

Questo metodo di trasferimento si genera da correnti indotte tali da innescare e mantenere l'arco sempre attivo ed il valore minimo della corrente si chiama corrente di ·

transizione spray. In questa modalità si ha una continua fusione del materiale d'apporto e formazione di centinaia di gocce di piccole dimensioni, che vengono di continuo trasferite al pezzo da saldare per effetto delle forze elettromagnetiche presenti.

Con un gas di protezione ricco di argon è possibile produrre un tipo di trasferimento spray assiale privo di spruzzi e molto stabile.

Per ottenere questo tipo di trasferimento bisogna avere una corrente continua, l'elettrodo collegato al polo positivo e un valore di corrente superiore al valore della "corrente di transizione".

Al di sotto di questo valore il trasferimento si presenta di tipo globulare.

I vantaggi di questa modalità sono un arco più stabile, una maggiore penetrazione ed un cordone di saldatura migliore da punto di vista estetico. Le gocce sono molto più piccole della lunghezza dell'arco, per cui non avvengono cortocircuiti e gli spruzzi sono trascurabili, anche se non totalmente eliminabili.

Con questo metodo di trasferimento risulta difficile saldare spessori sottili perché si rischia di "sfondare" il giunto. In questi casi si utilizza una tecnica "Pulsata" che permette la saldatura in queste condizioni. [1-2]

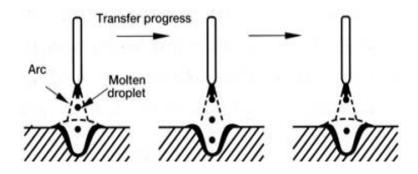


Figura 1.14. Spray arc

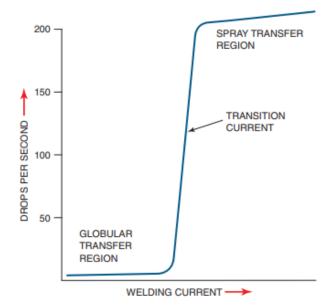


Figura 1.15. Corrente – tempo

1.4.4 Pulsed-Arc

La corrente prodotta dal trasferimento di metallo ad arco pulsato è una corrente a doppio impulso. L'alta corrente nella modalità spray produce una buona penetrazione e fusione, mentre la bassa corrente permette un raffreddamento e un ritiro controllato.

Questo metodo può essere utilizzato per eseguire saldature su un'ampia varietà di metalli. La maggior parte dei metalli può essere saldata in spessori che vanno dalla lamiera sottile alla lamiera spessa. L'alta penetrazione e le grandi caratteristiche di fusione del processo ad arco pulsato lo rendono ottimale per lavorare sull'alluminio. Il processo permette di produrre saldature a sezione spessa senza preriscaldamento sull'alluminio.

·

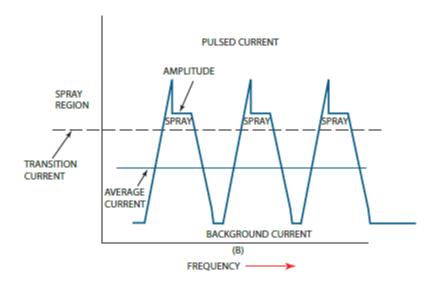


Figura 1.16. Frequenza - corrente

1.5 Materiali d'apporto

La composizione del metallo d'apporto è simile a quella del metallo base. La composizione del metallo d'apporto può essere modificata per compensare le perdite e i difetti che avvengono nella saldatura o per provvedere una disossidazione ed una degasazione del bagno di fusione.

In applicazioni particolari, comunque, per ottenere caratteristiche di saldatura soddisfacenti è richiesto un elettrodo con una diversa composizione chimica rispetto a quella del metallo base.

Le modifiche fatte sulla composizione dell'elettrodo, aggiungendo deossidanti o altri elementi degasanti, sono fatte per minimizzare la porosità della saldatura o per assicurare buone proprietà meccaniche della giunzione.

L'aggiunta di disossidanti è essenziale per la produzione di una saldatura con buone caratteristiche. I disossidanti più comuni usati negli elettrodi di acciaio sono il manganese,

il silicio e l'alluminio; per gli elettrodi in lega di nickel sono usati il titanio ed il silicio; per gli elettrodi in lega di rame sono usati il titanio, il silicio e il fosforo.

Gli elettrodi usati sono abbastanza più piccoli di diametro rispetto a quelli usati per la saldatura ad arco sommerso o per la saldatura in filo animato. I diametri più comuni che troviamo in commercio sono: 0.8 - 1.0 - 1.2 -1.6 - 2.4 mm.

1.6 Gas di protezione

Il gas di protezione selezionato ha un effetto importante sulla saldatura prodotta. Le proprietà che vengono interessate sono il metodo di trasferimento del metallo, la velocità di saldatura, l'effetto di pulizia dell'arco e la fluidità del bagno di fusione.

Alcuni metalli devono essere saldati con un gas inerte come l'argon o l'elio o miscele di argon ed elio. Altri metalli si lavorano meglio con gas reattivi come il carbonio o con miscele di gas inerti e gas reattivi come argon e ossigeno o argon e anidride carbonica.

Il simbolo atomico per l'argon è Ar ed è un gas inerte. I gas inerti non reagiscono con nessun'altra sostanza e sono insolubili nel metallo fuso. L'Argon al 100% viene utilizzato su metalli non ferrosi come alluminio, rame, magnesio, nichel e loro leghe, ma il 100% di argon non viene normalmente utilizzato per la realizzazione di saldature su metalli ferrosi.

L'Argon è più denso dell'aria, quindi protegge efficacemente le saldature spingendo via l'aria più leggera. L'argon è un gas facilmente ionizzabile che porta ad avere archi lunghi in basse tensioni, questo lo rende meno sensibile ai cambiamenti nella lunghezza d'arco. Il gas di protezione con l'argon o miscele di argon e altri gas vengono utilizzati nel processo di trasferimento spray.

·

Le comuni miscele di protezione dell'argon utilizzate per l'acciaio contengono elio o ossigeno.

L'ossigeno, l'anidride carbonica, l'elio e l'azoto possono essere miscelati con argon per ottenere caratteristiche di saldatura differenti.

Aggiungendo gas reattivi (ossidanti), come ossigeno o anidride carbonica, nell'argon essi tendono a stabilizzare l'arco, facilitano il trasferimento del materiale nel bagno di fusione e minimizzano gli spruzzi. Di conseguenza, la penetrazione viene migliorata. Aggiungendo elio o azoto aumenta il calore dell'arco, generando una penetrazione più profonda. Una piccola variazione della percentuale dei gas reattivi genera un effetto sulla saldatura. La maggior parte delle volte le miscele contengono dall'1% al 5% di ossigeno. L'anidride carbonica può essere aggiunta all'argon nell'intervallo dal 20% al 30%.

La miscela più comunemente usata con l'anidride carbonica è con il 25% di CO2.

L'argon al 100% genera problemi con l'acciaio poiché si genera un ossido di ferro sulla superficie, il quale può generare un'emissione di elettroni che attrae l'arco. Tuttavia, questi ossidi non sono distribuiti uniformemente: ciò comporta un movimento dell'arco molto irregolare e, a sua volta, irregolari depositi di saldatura. Questo problema è stato risolto aggiungendo piccole quantità di ossigeno all'argon, la reazione prodotta genera un film uniforme di ossido di ferro e fornisce un sito stabile per l'arco. La quantità di ossigeno necessaria per stabilizzare gli archi in acciaio varia con la lega. Generalmente, il 2% è sufficiente per gli acciai al carbonio e acciai a bassa lega. L'anidride carbonica può sostituire l'ossigeno, con un valore tra il 2% e l'8% per acciai a bassa lega. In molte

applicazioni, l'anidride carbonica è l'aggiunta preferita perché il cordone di saldatura ha una migliore geometria e l'arco tende ad essere più stabile.

L'anidride carbonica è un composto costituito da un atomo di carbonio (C) e due atomi di ossigeno (O2) e la sua formula molecolare è CO2. Il 100% di biossido di carbonio viene ampiamente utilizzato come gas di protezione per la saldatura ad arco, negli acciai. Permette maggiore velocità di saldatura, migliore penetrazione, buone proprietà meccaniche e costa meno dei gas inerti. Lo svantaggio nell'uso dell'anidride carbonica è un arco meno stabile e un notevole aumento degli schizzi di saldatura.

Lo spruzzo può essere ridotto al minimo mantenendo la lunghezza dell'arco molto corta e uniforme. [4]

GMAW Shielding Gases, Gas Blends, Metals, and Welding Process							
Gases/Blend	Gas Reaction	Application	Remarks	Gas/Blend	Gas Reaction	Application	Remarks
Argon (Ar)	Inert	Nonferrous metals	Provides spray transfer	CO ₂	Oxidizing	Mild, low alloy steels and stainless steel	Least expensive gas, deep penetration with short-circuiting or globular transfer
Helium (He)	Inert	Aluminum and magnesium	Very hot arc for welds on thick sections, usually used in gas blends to increase the arc temperature and penetration	Nitrogen	Almost inert	Copper and copper alloys	Has high heat input with globular transfer
Ar + 1% O ₂	Oxidizing	Stainless steel	Oxygen provides arc stability	Ar + 25% He	Inert	Al, Mg, copper, nickel, and their alloys	Higher heat input than Ar, for thicker metal
Ar + 2% O ₂	Oxidizing	Stainless steel	Oxygen provides arc stability	Ar + 50% He	Inert	Al, Mg, copper, nickel, and their alloys	Higher heat in arc use on heavier thickness with spray transfer
Ar + 5% O ₂	Oxidizing	Mild and low alloy steel	Provides spray transfer	Ar + 75% He	Inert	Copper, nickel, and their alloys	Highest heat input
Ar + 5% CO ₂	Oxidizing	Low alloy steel	Pulse spray and short-circuit transfer in out-of-position welds	Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidizing	Low alloy steel and some stainless steels	All metal transfer for automatic and robotic applications
Ar + 10% CO ₂	Oxidizing	Low alloy steel	Same as above with a wider, more ⊠uid weld pool	Ar + CO ₂ + N	Almost inert	Stainless steel	All metal transfer, excellent for thin gauge material
Ar + 25% CO ₂	Oxidizing	Mild, low alloy steels and stainless steel	Smooth weld surface, reduces penetration with short-circuiting transfer	He + Ar + CO ₂	Almost inert	Stainless steel and some low alloy steels	Excellent toughness; excellent arc stability, wetting characteristics, and bead contour; little spatter with short-circuiting transfer

Tabella 1.1. Gas di protezione

Nella tabella 1.1, viene indicato per ogni gas o miscela di gas la reazione, l'applicazione più comune e le caratteristiche che genera.

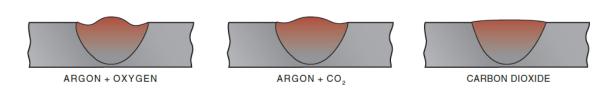


Figura 1.17. Forma del cordone in funzione del gas

Nella figura 1.17. si vede come le differenti miscele portino ad avere comportamenti differenti del bagno di fusione e quindi una differente forma del cordone di saldatura.

1.7 Difetti di saldatura

I difetti di saldatura possono essere definiti come le irregolarità formate nel metallo di saldatura. Il difetto può differire dalla forma del cordone, dalla dimensione e dalla qualità desiderate. I difetti di saldatura possono verificarsi all'esterno o all'interno del metallo di saldatura. Alcuni dei difetti possono essere accettati se i difetti sono sotto i limiti consentiti, ma altri difetti come le cricche non vengono mai accettati.

I difetti si possono suddividere in due tipologie: esterni ed interni.

Nei difetti esterni abbiamo:

• Cricche (Cracks): le cricche sono il difetto più grave e temibile di un giunto saldato. Infatti una cricca, anche se di piccole dimensioni, rappresenta un alto fattore di concentrazione delle tensioni (effetto di intaglio) alle sue estremità. La cricca (Figura 1.18) può essere definita come una rappresentazione di discontinuità originatasi per distacco cristallino in un

materiale metallico. Le cricche possono a loro volta essere suddivise in: cricche a caldo che presentano tendenzialmente un orientamento longitudinale e si formano durante il raffreddamento del bagno di fusione; mentre le cricche a freddo si formano durante il raffreddamento del cordone quando la temperatura scende sotto i 100°C, ciò può avvenire anche molto dopo l'esecuzione del processo.

Le cause di questo difetto sono: una scarsa duttilità del metallo di base, la presenza di stress residuo, la possibile presenza di zolfo e carbonio e l'idrogeno presente nel gas di protezione.

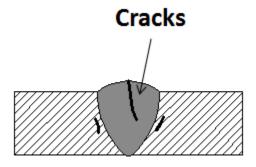


Figura 1.18. Cricca

Incisioni marginali (Undercut):

Le incisioni marginali sono una solcatura a margine del cordone, avviene quando il metallo di base si fonde formando una scanalatura. Questo tipo di difetto si presenta spesso nei cordoni eseguiti manualmente sia in giunti di testa sia in cordoni d'angolo, più frequentemente in posizione diversa da quella piana. Le incisioni marginali sono essenzialmente causate da una

·

tensione dell'arco molto elevata, una posizione dell'elettrodo non corretta o una eccessiva velocità di alimentazione del filo.

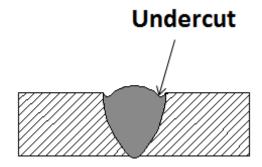


Figura 1.19. Incisione marginale

Spruzzi (Spatter):

Avviene quando alcune gocce di metallo vengono espulse dalla saldatura e rimangono attaccate alla superficie, tipico della saldatura manuale a elettrodi rivestiti (basico e cellulosico) e del procedimento MAG (CO2).

Questo tipo di difetto è pericoloso, soprattutto per i giunti che operano in ambienti chimicamente aggressivi, poiché rappresentano un facile innesco per l'attacco corrosivo. Su acciai ad elevata resistenza, in corrispondenza degli spruzzi possono avere luogo pericolosi fenomeni di tempra localizzati, che possono essere accompagnati dalla formazione di cricche. Le principali cause sono: un'elevata corrente di saldatura, una polarità errata e una protezione inadeguata del gas.

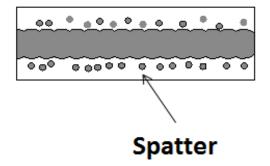


Figura 1.20. Spruzzi

Porosità (Porosity):

Le inclusioni gassose sono cavità provocate da gas intrappolati nel bagno che si è solidificato troppo rapidamente; esse sono tipicamente di forma tondeggiante e assumono la denominazione di pori o soffiature a seconda che la loro dimensione sia inferiore o superiore ad 1 mm. Le inclusioni gassose possono essere provocate dalla presenza, sui lembi da unire, di ruggine, vernice o sporcizia in genere. Altre cause sono un eccessivo tasso di umidità nel rivestimento degli elettrodi o nei flussi oppure nei gas impiegati. Anche l'uso di procedimenti ad elevata velocità di deposito o di saldatura e un non corretto maneggio della torcia o della pinza sono causa di inclusioni gassose. Contrariamente a quanto ritenuto dalla maggior parte degli operatori di saldatura, questi difetti non sono molto pericolosi per la resistenza del giunto; in particolare una porosità diffusa nella saldatura MIG di leghe leggere è praticamente inevitabile e accettabile, mentre tali difetti diventano inaccettabili solo quando sono di grandi dimensioni o numerosi (nidi di porosità o di soffiature) o quando, come nel caso della porosità

diffusa, sono di entità tale da mascherare l'eventuale presenza di altri difetti più gravi.

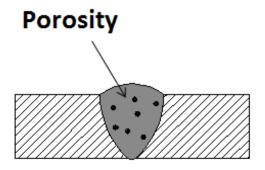


Figura 1.21. Porosità

Eccesso di sovrametallo (overlap):

È un difetto che si riscontra tipicamente nei giunti di testa, di solito è dovuto ad una scorretta esecuzione del processo di saldatura. Talvolta questo difetto può essere dovuto alla non corretta scelta della preparazione del giunto, in tali casi occorre cambiare la preparazione del giunto affinché questo sia adatto a poter accogliere il maggiore apporto.

L'eccesso di sovrametallo non garantisce una maggiore resistenza ma, al contrario, genera ai margini del sovrametallo una concentrazione di tensioni (effetto di intaglio) che sotto certe condizioni di servizio come fatica, urti o bassa temperatura, può ridurre la capacità di resistenza del giunto. La sua causa, oltre ad un processo errato, può essere l'utilizzo di elettrodi con dimensioni elevate oppure dovuto a correnti elevate.

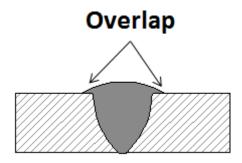


Figura 1.22. Eccesso di sovrametallo

• Crateri (Craters):

E' un difetto che si verifica quando non viene eseguito un corretto riempimento prima della rottura dell'arco, il che provoca un raffreddamento più rapido dei bordi esterni rispetto al centro. Questo porta ad uno stress che forma una crepa. Questo fenomeno può essere ridotto al minimo non interrompendo l'arco alla fine di una saldatura; si tende a far decadere la corrente gradualmente permettendo al cratere di riempirsi e raffreddare più lentamente.

Difetti interni:

• Inclusioni (Inclusion):

Le inclusioni (solide o gassose) sono difetti situati in zona fusa, dovuti alla presenza di sostanze diverse dal metallo del cordone di saldatura, che risultano inglobate nel cordone stesso. La presenza di queste scorie influisce negativamente sulla saldabilità del materiale e sulle caratteristiche meccaniche. Le inclusioni solide si classificano, a seconda del materiale che

le costituisce, in inclusioni di scorie e inclusioni di tungsteno. Le prime sono cavità in zona fusa contenenti solo scoria o scoria e gas. Le inclusioni da scoria sono uno dei difetti più comuni nei cordoni realizzati con elettrodi rivestiti e ad arco sommerso, quando l'esecuzione del giunto sia stata effettuata passate multiple: ciò è causato principalmente con dall'asportazione poco accurata di scorie prima dell'esecuzione della passata successiva; tuttavia le inclusioni possono essere anche dovute ad un uso scorretto dell'elettrodo rivestito, ad un non preciso posizionamento della testa saldatrice oppure ad una non corretta scelta dei parametri della preparazione. Le inclusioni di tungsteno sono originate dalla presenza di minute schegge di tungsteno sia isolate che raggruppate.

Le cause che generano questo difetto sono: un'intensità di corrente troppo bassa che non porta a fusione il materiale, una velocità di saldatura elevata, la mancanza di pulizia tra le passate e una posizione della torcia non corretta.

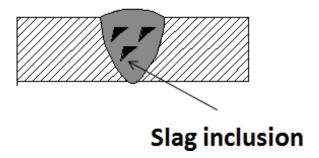


Figura 1.23. Inclusioni

·

• Fusione incompleta (Incomplete fusion):

La fusione incompleta è la mancanza di coalescenza tra il metallo d'apporto fuso e il metallo di base o il metallo precedentemente depositato. La mancanza di fusione tra il metallo d'apporto e il metallo saldato, precedentemente depositato, si chiama interpass cold lap. La mancanza di fusione tra il metallo depositato e la faccia laterale è chiamata mancanza di fusione del fianco. Entrambi questi problemi di solito viaggiano lungo tutto o quasi la lunghezza della saldatura.

La causa principale della loro comparsa è da ricercarsi nella non corretta preparazione dei lembi, talvolta nella mancanza di opportuna puntatura o di cavallotti distanziatori che evitino che i lembi si chiudano, a mano a mano che la saldatura procede, per effetto del ritiro trasversale o della scarsa abilità del saldatore.

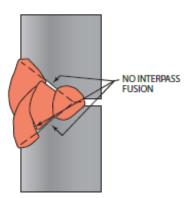


Figura 1.24. Fusione incompleta

·

• Incollatura

Le incollature si presentano con caratteristiche molto simili alle mancanze di fusione, ma tra il lembo del componente e la zona fusa si trova interposto uno strato di ossido: questo comporta che la saldatura diventa una brasatura all'ossido del materiale. Questo difetto è tipico dell'acciaio, qualora si proceda a saldatura ossiacetilenica e MAG ad immersione, ma si presenta anche nei materiali facilmente ossidabili come le leghe di alluminio. Un giunto nel quale siano presenti incollature possiede caratteristiche meccaniche molto inferiori rispetto alla qualità desiderata, poiché non essendoci stata la fusione non vi è una coalescenza tra i materiali che garantisca una solidità strutturale.

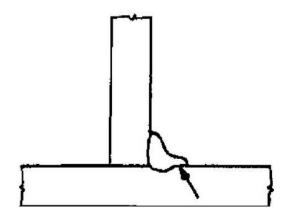


Figura 1.25. Incollatura

1.8 Metallurgia saldatura

La saldatura è un processo di fusione localizzata, che richiede un'elevata energia. L'apporto di questa fonte di calore porta alla formazione di 3 zone distinte sul giunto: la zona fusa, la zona termicamente alterata e la zona inalterata.

La zona fusa è la parte del giunto che durante la saldatura ha superato la temperatura di fusione; mentre la zona termica alterata (ZTA) è quella parte del materiale base, a ridosso della zona fusa, che non ha raggiunto la temperatura di fusione ma ha subìto delle trasformazioni allo stato solido con conseguenti variazioni della struttura. Il metallo base inalterato è quella parte del giunto che, in relazione alla distanza dalla zona fusa e quindi alle temperature alle quali è stata esposta, non ha subìto cambiamenti di struttura e di proprietà.

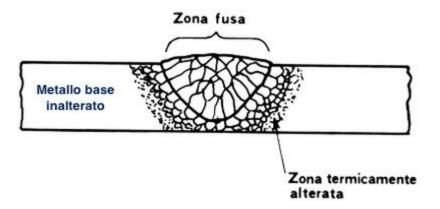


Figura 1.26. Metallurgia giunto

Come si evidenzia bene dalla figura 1.26., queste zone sono soggette a temperature e cicli termici differenti; questo comporta inevitabilmente di avere delle strutture cristalline differenti.

1.8.1 Zona fusa

Nelle saldature autogene vi è la fusione di una parte del materiale di base e del materiale d'apporto: la mescolanza di questi due materiali porterà alla formazione di una nuova struttura cristallina che caratterizzerà la zona fusa.

Il parametro che descrive il rapporto tra i due materiali è il rapporto di diluizione, che definisce la composizione chimica della zona fusa in funzione della quantità del metallo d'apporto e del metallo di base.

A seconda del processo di saldatura il parametro assume diversi valori, i più comuni sono:

- Brasatura Rd= 0%
- Tig Rd= 20-40%
- Arco sommerso Rd= 10-65%
- Mig-Mag Rd =5-40%
- Plasma, laser, fascio elettronico Rd=100%

Questo parametro è molto importante ai fini della composizione chimica finale e, come si vede dai valori soprastanti, varia in funzione del processo; avrà un valore pari al 100% per i procedimenti senza metallo d'apporto e valori molto bassi 5 - 10% per quei procedimenti che provocano la fusione di una piccola quantità di materiale base. La quantità di materiale base che entra nella zona fusa di un giunto saldato ne influenza decisamente l'analisi chimica e le caratteristiche meccaniche.

La solidificazione della zona fusa inizia con la nucleazione di nuovi grani in corrispondenza della superficie di separazione con la ZTA, successivamente avverrà un

·

accrescimento dentritico che faciliterà lo smaltimento del calore. Per la determinazione delle caratteristiche meccanica un ruolo fondamentale viene rivestito dalla dimensione dei grani che è influenzata dalla velocità di raffreddamento, dal numero di trasformazioni allotropiche allo stato solido e dalle dimensioni del materiale di base.

La solidificazione del bagno di fusione incomincia con la formazione di grani austenitici, che tendono a svilupparsi perpendicolarmente rispetto alla linea di separazione tra la zona fusa e il materiale di base tendendo verso il centro con la formazione di una struttura dentritica colonnare. L'orientamento è funzione della direzione di raffreddamento.

La dimensione delle dentriti è influenzata dalla dimensione dei grani della fase solida e dal tempo di solidificazione, più il tempo sarà rapido più le dentriti saranno fini.

I principali problemi che si generano nella zona fusa sono la possibile formazione delle cavità di ritiro e l'inglobamento di particelle non metalliche. [5]

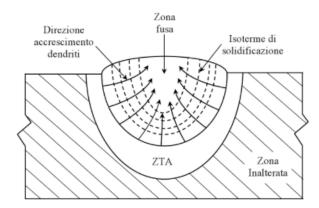


Figura 1.27. Microstruttura zona fusa

1.8.2 Zona termicamente alterata

La zona termicamente alterata è quella porzione di metallo base, nelle immediate vicinanze della zona fusa, dove i cicli termici di saldatura hanno portato a delle variazioni della microstruttura. Quest'ultima dipende da: ciclo termico, composizione chimica del materiale di base e struttura del materiale di base.

I trattamenti termici portano a delle trasformazioni diverse a seconda del riscaldamento, della composizione della lega, della temperatura massima raggiunta, della velocità di raffreddamento e della struttura iniziale.

La temperatura massima decresce in funzione della distanza dalla zona: si può evidenziare come, solo in prossimità del cordone, il metallo base subisca delle trasformazioni strutturali. Ovviamente l'ampiezza della zona termicamente alterata dipende dal processo e dai parametri di saldatura.

Il fenomeno più vistoso che appare all'analisi macrografica della ZTA nel caso della saldatura degli acciai al carbonio e a bassa lega, è la variazione delle dimensioni del grano in funzione della distanza della zona fusa.

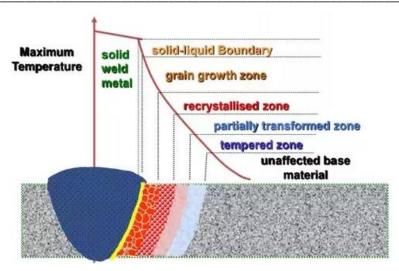


Figura 1.28. Zona termicamente alterata

Come si evidenzia dalla figura 1.28, in prossimità della zona fusa vi è una zona con una crescita dei grani (Grain growth zone): man mano che ci allontaniamo il materiale di base presenta una zona ricristallizzata e una zona che non è stata influenzata da un cambio di struttura.

Le principali variabili che influiscono sulla struttura della ZTA sono le seguenti:

- Velocità di riscaldamento: all'aumentare della velocità di riscaldamento, si
 ha un minore ingrossamento del grano con una minore temprabilità.

 All'aumentare della velocità di riscaldamento, si ha una distribuzione
 disomogenea del carbonio con un conseguente incremento della possibilità
 di trovare zone ad elevata durezza.
- Massima temperatura e tempo di mantenimento: all'aumentare della temperatura e del tempo di permanenza, si verifica un ingrossamento del grano austenitico che determina una maggiore tendenza alla tempra.

• Tenore di carbonio: all'aumentare del tenore di carbonio aumenta sensibilmente la temprabilità.

 Velocità di raffreddamento: all'aumentare della velocità di raffreddamento, aumenta la possibilità di formazione di strutture fuori equilibrio dure e poco tenaci.

1.9 Tensioni residue e ritiri

La formazione di zone fuse e il riscaldamento localizzato che si verifica nelle saldature per fusione ha come conseguenza che, durante il raffreddamento, si verificano fenomeni di ritiro, con deformazioni del pezzo e tensioni residue. In particolare, il cordone di saldatura tende ad accorciarsi e a restringersi di sezione, trascinando con sé le parti circostanti.

Questo fenomeno è determinato da:

- la tendenza del metallo a dilatarsi tanto più quanto maggiore è la temperatura;
- la sorgente termica è concentrata ed in movimento, il che significa che la distribuzione di temperatura è sensibilmente disomogenea;
- all'aumentare della temperatura diminuisce la tensione di snervamento del materiale per cui è sufficiente uno sforzo minore per ottenere una deformazione locale permanente.

Attraverso questi meccanismi di dilatazione e deformazione termica, si originano le tensioni interne e i ritiri nel metallo.

1.9.1 *Ritiri*

Analizziamo due tipi di ritiri: il ritiro trasversale e il ritiro angolare. Nel ritiro trasversale se consideriamo una porzione di materiale, perpendicolare rispetto alla direzione di saldatura, essa subisce prima un riscaldamento nella zona centrale per cui tenderebbe a deformarsi; questa dilatazione risulta bloccata dalla porzione di materiale contigua precedentemente saldata che già è a temperatura più bassa. La zona della striscia considerata subisce, pertanto, una notevole deformazione a caldo; nel successivo raffreddamento essa risulta più corta di quello che sarebbe stato se fosse stata libera, per cui si una forza di ritiro che tende ad avvicinare i lembi.

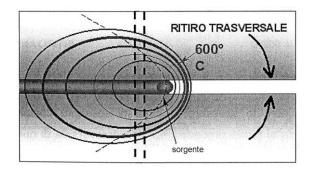


Figura 1.29. Ritiro trasversale

Il ritiro angolare si genera principalmente nei giunti di testa e soprattutto d'angolo. Nei giunti di testa esso si genera dalla variazione di larghezza del cordone lungo il suo spessore, questo viene influenzato dal modo in cui vengono preparati i lembi.

In un giunto con preparazione a V il ritiro trasversale aumenta dal basso verso l'alto in quanto aumenta la lunghezza della zona che si ritira: questo determina a fine saldatura una certa deformazione angolare.

Nei giunti ad angolo invece con il progressivo aumento del ritiro trasversale dal vertice alla superficie, si ha una deformazione risultante che tende a chiudere l'angolo. Per evitare ciò si mettono dei sostegni oppure si salda con un angolo maggiore così da compensare la distorsione.



Figura 1.30. Ritiro angolare

1.10 Giunti saldati in macchine telescopiche

La giunzione di componenti metallici tramite la saldatura riveste un importante ruolo nella costruzione delle macchine telescopiche a sollevamento frontale: questo perché moltissime parti strutturali vengono saldate tra loro.

Risulta quindi di notevole importanza lo studio e il controllo delle giunzioni per garantire le caratteristiche meccaniche e la qualità richiesta.

Le saldature maggiormente sollecitate dai carichi sono quelle che collegano il braccio con la testata, le saldature della testata, quelle degli steli e delle camere.

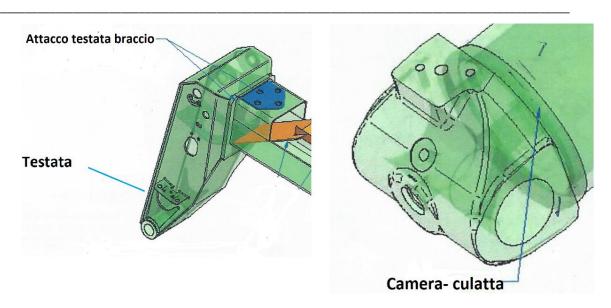


Figura 1.31. Componenti macchina telescopica

Le tecniche principalmente utilizzate sono la MIG-MAG oppure l'arco sommerso sulle giunzioni in piano, come le lineari dei bracci.

Si utilizzano queste tecnologie poiché garantiscono una buona produttività data la grossa quantità di materiale da saldare e delle buone caratteristiche meccaniche. Un altro vantaggio di queste tecnologie è che possono essere automatizzate con diversi livelli: questo porta ad avere un aumento ulteriore della produttività con un buon controllo della ripetibilità e della qualità.

Un ulteriore vantaggio sono i materiali utilizzati: il materiale di base è tipicamente un acciaio strutturale a basso contenuto di carbonio oppure degli acciai altoresistenziali ma solo ove ci siano carichi elevati.

1.10.1 Normative sulle giunzioni saldate

La costruzione di macchine a sollevamento telescopico deve rispettare la Direttiva Macchine (2006/42/CE), che definisce i requisiti essenziali, in materia di sicurezza e di salute pubblica, ai quali devono rispondere le macchine in occasione della loro progettazione, della loro fabbricazione e del loro funzionamento, prima della loro immissione sul mercato. La definizione di Macchina è applicabile ad un insieme equipaggiato o destinato ad essere equipaggiato di un sistema di azionamento diverso dalla forza umana o animale diretta, composto di parti o di componenti, di cui almeno uno mobile, collegati tra loro solidamente per un'applicazione ben determinata o per una specifica attività. Nella vita di tutti i giorni utilizziamo diverse tipologie di macchine, sia nelle industrie e luoghi di lavoro sia nelle nostre case.

Nella direttiva macchine non vi è un chiaro riferimento alle norme specifiche per la saldatura. La norma di riferimento utilizzabile anche per le aziende che rispettano la direttiva macchine è la UNI ISO 3834.

Essa è lo standard dedicato alla saldatura e definisce linee guida utili per le attività di saldatura, sia per chi le esegue sia per chi le valuta.

Capitolo 2

Prospettive future

Nel seguente capitolo verrà studiata una nuova tecnologia di produzione per l'esecuzione di giunti saldati. Lo studio di questo nuovo processo è stato eseguito per valutarne i vantaggi e gli svantaggi e la sua possibile introduzione all'interno del sistema produttivo.

L'Hybrid Welding è una tecnologia che si è diffusa principalmente nell'ultimo decennio e che ha riscontrato un buon successo grazie alla sua elevata produttività e alla qualità del processo.

Il processo di saldatura ibrido laser-arco elettrico è un processo innovativo che sfrutta le potenzialità delle singole tecnologie. Permette di ottenere dei giunti con caratteristiche meccaniche superiori e una velocità di esecuzione più rapida.

2.1. Storia

Fu studiato la prima volta dal Prof. Sten dell'università di Londra nel 1970, il quale combinò insieme i due sistemi di saldatura ed evidenziò già dai primi test i notevoli vantaggi applicativi rispetto ai singoli processi. Dopo questa ricerca, gli studi su questo metodo furono rallentati poiché, per poter utilizzare il sistema, era necessaria un'ottima conoscenza della tecnologia laser e un buon controllo.

Negli anni '90 lo sviluppo di questa tecnologia ottenne dei notevoli passi avanti con l'introduzione dei CO2 laser. La prima stazione di saldatura ibrida utilizzata in ambito industriale è stata attivata nel 2000 in Germania per la saldatura di serbatoi per l'olio.

Negli anni a seguire si è diffuso anche in altri ambiti industriali: navale, automobilistico e ferroviario.

2.2. Principi e funzionamento

La saldatura ibrida laser-arco elettrico sfrutta essenzialmente il processo di saldatura laser in combinazione con il processo ad arco elettrico. L'utilizzo combinato dei due processi permette di sfruttare i vantaggi dei singoli metodi e di limitarne gli svantaggi. Inizialmente andremo ad analizzare le singole tecniche.

2.2.1. Saldatura laser

La saldatura laser è un processo di fabbricazione che si basa sulla fusione e sulla vaporizzazione del materiale, le quali si ottengono grazie all'elevata densità di potenza del fascio laser focalizzato sulla superficie.

Quando la radiazione del laser incide sulla superficie, una parte significativa del fascio viene riflessa e solo una piccola percentuale è assorbita ed inizia a riscaldare la superficie. All'aumentare della temperatura segue un aumento della capacità di assorbimento del metallo e quindi un ulteriore aumento di temperatura può portare alla fusione localizzata e all'evaporazione del metallo. Si individuano due differenti regimi di saldatura: conduzione e keyhole (maggiormente utilizzato).

L'intensità di energia produce un foro, in cui si genera un plasma surriscaldato. Le pareti del foro fondono e il metallo liquido penetra nella cavità. Questo processo è privo di materiale d'apporto, solo in alcuni casi viene introdotto per migliorare la composizione del materiale ed evitare la formazione di porosità.

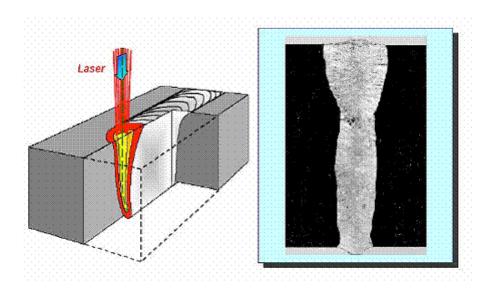


Figura 2.1. Forma del cordone in funzione del gas

I vantaggi di questa tecnologia sono:

- Alta irradiazione
- Alta velocità di processo
- Elevata penetrazione
- Zona termicamente alterata di ridotte dimensioni e basse distorsioni
- Elevata precisione

Svantaggi:

- Posizione lembi (distanza non superiori a 2 mm)
- Costo macchina

2.2.2. Saldatura MIG/MAG

La saldatura a filo continuo, tecnicamente definita MIG/MAG, è un tipo di processo che si basa sulla fusione del materiale di base e del materiale d'apporto per generare un cordone.

L'arco elettrico viene innescato quando l'operatore tocca il pezzo con la torcia, generando un corto circuito che porta il materiale alla temperatura di fusione.

Il materiale d'apporto (filo) può essere di diversi tipi ma essenzialmente è costituito da un materiale simile al materiale di base e da additivi che vanno a migliorare il cordone di saldatura e i difetti.

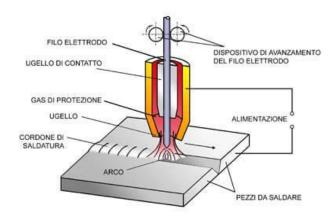


Figura 2.2. Saldatura MIG/MAG

Un altro aspetto molto importante è la presenza del gas che si attiva durante la saldatura e ha il compito principale di proteggere il "bagno fuso" e prevenire l'ossidazione.

Vantaggi:

- Alta produttività
- Basso costo
- Protezione da scorie mediante il gas

Svantaggi:

- Il materiale d'apporto può variare la composizione del bagno fuso
- Minor penetrazione

2.2.3. Saldatura ibrida Laser-MIG/MAG

Dallo studio delle singole tecniche di saldatura si può notare come il laser presenti dei vantaggi ove la saldatura ad arco ha i suoi punti deboli; per questo le due tecnologie sono state unite per ottenere la saldatura ibrida che sfrutta le capacità di entrambi i metodi per ottenere dei risultati migliori. Il funzionamento è caratterizzato da un'applicazione simultanea di un raggio laser focalizzato e di un arco elettrico, generando un bagno di fusione comune.

La combinazione offre un incremento dei parametri rispetto al singolo processo, il risultato è un processo di saldatura più flessibile e robusto.

I parametri fondamentali per il processo sono la potenza del laser e dell'arco, la lunghezza d'onda del fascio e la modalità di trasferimento del processo MIG/MAG.

Generalmente uno dei limiti del processo può essere l'accessibilità del laser al giunto poiché al di sotto dei 30° si possono generare dei problemi.

etadie e saratterizzazione ai giariti saraati por massimis tolossopisiio

La tecnologia Laser accoppiata alla MIG/MAG è la più diffusa, poiché la torcia a filo continuo permette di apportare il materiale necessario per colmare il vuoto o riempire la scanalatura, mentre il fascio laser genera un vapore all'interno del bagno fuso per garantire la penetrazione.

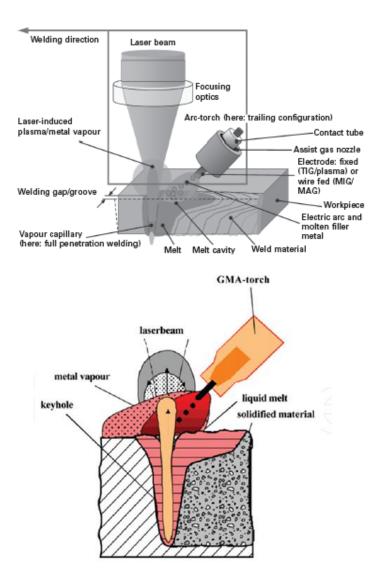


Figura 2.3. Funzionamento Hybrid welding

Il laser può precedere l'arco voltaico o seguirlo a seconda della modalità che si vuole utilizzare, questo dipende dalle caratteristiche che si vogliono ottenere.

I tre parametri che influenzano il processo sono:

- Potenza del raggio laser e velocità di saldatura: nella saldatura ibrida, la
 potenza del raggio laser è il parametro principale che controlla la profondità
 di penetrazione. Pertanto, tramite la potenza del raggio laser, viene
 selezionata la velocità di saldatura, analogamente al raggio laser saldatura.
- Posizione del punto focale: di norma, la posizione del punto focale nella saldatura laser è sulla superficie del pezzo per raggiungere massima profondità di penetrazione. Nella saldatura ibrida, la situazione è simile. La principale differenza rispetto alla saldatura a raggio laser è che i cambiamenti nella posizione del punto focale non riducono significativamente la profondità di penetrazione. Cambiamenti nella posizione del punto focale possono verificarsi a causa del riscaldamento dell'ottica e tendenzialmente avvengono nella saldatura di lastre lunghe.
- Disposizione della torcia: la disposizione della torcia ad arco in relazione al raggio laser può avere un effetto significativo su produttività e qualità generale della saldatura. Il flusso di metallo fuso nella saldatura ibrida dipende dalla posizione dell'arco e dalla composizione del gas di protezione. La disposizione della torcia influisce sulla qualità della saldatura e sulla tendenza a creare alcuni difetti dovuti al flusso del metallo fuso. Una configurazione con l'arco che precede il fascio laser produce incisioni

marginali più frequentemente, specialmente durante la saldatura ad alta velocità quando il processo MIG / MAG non riesce a fondere correttamente i bordi a causa della mancanza di tempo. Un'altra causa dell'incisione è che durante la saldatura ibrida l'arco è più stretto e non è in grado di fondere i bordi. La profondità di penetrazione è maggiore con configurazione dell'arco principale. Il laser colpisce il materiale già fuso e richiede meno energia per generare il "buco". Il preriscaldamento della saldatura ad arco consente anche un migliore assorbimento della potenza del laser. Inoltre, concorda con il processo di saldatura ad arco, in cui la modalità a tirare fornisce una penetrazione più stretta e profonda. Però in qualche misura dipende anche dal materiale, dal livello di potenza del laser e dell'arco (modalità di trasferimento), dalla distanza del processo, dal processo dell'arco tipo (arco di gas metallo, gas inerte di tungsteno o arco sommerso), dal tipo di scanalatura e dal gap dei lembi. [6]

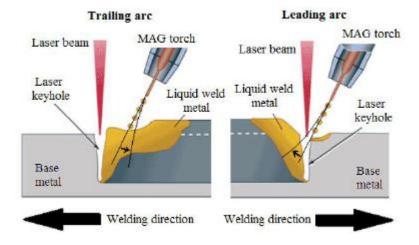


Figura 2.4. Configurazione torcia

 Potenza dell'arco: la potenza dell'arco può aumentare leggermente la profondità di penetrazione e controllare anche la parte superiore (larghezza, microstruttura, imperfezioni correlate all'arco) della saldatura ibrida. Una scelta accurata della potenza dell'arco può ridurre i difetti di saldatura come le incisioni marginali.

Distanza di processo: la distanza determina la vicinanza di entrambi i processi per sfruttare i vantaggi delle singole tecnologie. Di norma, se la distanza tra raggio laser e arco è inferiore a 3-5 mm, la profondità di penetrazione aumenta e viene generato plasma comune. Tuttavia, se la distanza di separazione è compresa tra 0 e 1 mm, il processo di saldatura può essere destabilizzato, soprattutto se si utilizza un filo metallico di riempimento (MAG / MIG), poiché il raggio laser iniziando a urtare il filo di riempimento riflette gran parte dell'energia. D'altra parte, con la configurazione a trascinamento (Trailing) dell'arco, è più probabile che il processo sia stabile a causa dell'inclinazione favorevole della traiettoria delle goccioline fuse dal filo di riempimento.

2.3. Attrezzatura

La macchina presenta, come nel caso della saldatura laser e MIG/MAG, un generatore che fornisce i parametri di potenza necessari, un'unità di controllo del robot e la torcia.

Risulta semplicemente come un robot di saldatura ad arco ma con l'aggiunta del fascio laser disposto sulla torcia.

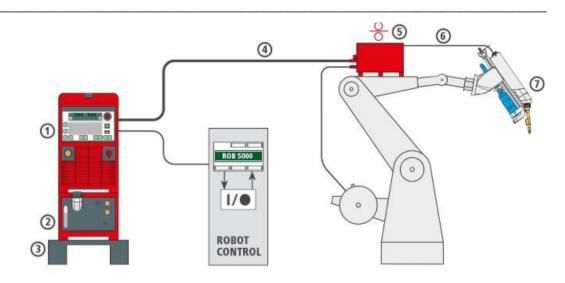


Figura 2.5. Attrezzatura Hybrid welding

La torcia è il particolare più complesso della struttura poiché deve ospitare sia l'ugello per il sistema MIG/MAG che il fascio laser.

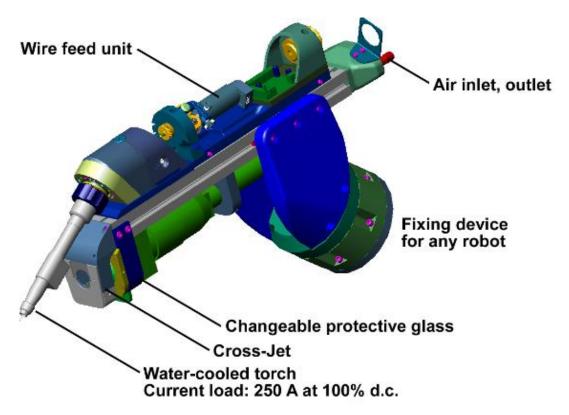


Figura 2.6. Torcia saldatura ibrida

Il cuore del sistema di saldatura LaserHybrid è la testa con una torcia di saldatura MIG / MAG integrata e ottica laser. Un supporto per robot collega la testa LaserHybrid a un robot industriale standard. Ciò offre alla testa la flessibilità necessaria per accedere alle aree del pezzo difficili da raggiungere. Il filo di saldatura può essere posizionato in qualsiasi posizione rispetto al raggio laser, consentendo di adattare il processo di giunzione in modo preciso all'ampia varietà di preparazioni di giunti di saldatura.

Molto importante per la realizzazione della saldatura è la distanza tra la torcia dell'arco elettrico e il fascio laser, poiché la distanza e l'inclinazione tra le due può portare a delle variazioni nella formazione del bagno fuso.

2.4. Caratteristiche

In un processo di saldatura per fusione si genera un'elevata quantità di calore che porta il materiale al di sopra della temperatura di fusione (migliaia di gradi): questo porta ad avere un cambiamento all'interno della struttura dei grani poiché essi, scaldandosi e raffreddandosi rapidamente, vanno a generare una struttura caratterizzata da fasi diverse. Queste fasi andranno a variare il comportamento del cordone di saldatura definendone le caratteristiche meccaniche.

2.4.1. Microstruttura

L'aspetto relativo alla composizione è molto importante; le tre tecniche (Laser, MAG, Hybrid) presentano tra loro dei cambiamenti strutturali differenti che ne influiscono le caratteristiche meccaniche.

Il materiale di base nei diversi processi presenta una microstruttura molto simile, caratterizzata principalmente da ferrite e perlite. La grande differenza è la composizione del metallo saldato: nella saldatura laser la microstruttura è caratterizzata prevalentemente da martensite, questo perché c'è un apporto termico ridotto; nel processo MAG è presente ferrite, bainite, perlite e una piccola quantità di martensite mentre nel caso ibrido la struttura viene caratterizzata dalla presenza di ferrite, bainite e martensite.

Nella zona termicamente alterata si cerca di evitare la presenza di martensite poiché riduce le proprietà meccaniche, in questi casi sarebbe opportuno fare un trattamento di ricottura per trasformare tutta la martensite in ferrite oppure eseguire un pre-riscaldo. [7]

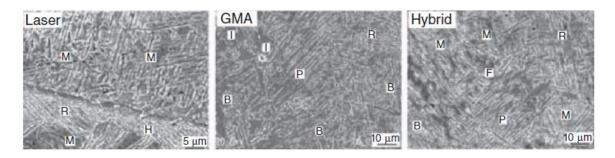


Figura 2.7. Microstruttura delle diverse tecniche

2.4.2. Durezza

La durezza è una proprietà meccanica molto importante e viene spesso utilizzata per definire la qualità di un giunto saldato. Questo parametro varia in funzione della composizione e della concentrazione di carbonio; indirettamente un parametro che influenza la durezza è il raffreddamento della zona fusa poiché, se troppo rapido, si rischia di temprare la ZTA (zona termicamente alterata).

Il cordone della saldatura laser presenta una durezza di circa 350 HV, mentre la saldatura ibrida nello stesso punto fornisce un valore inferiore (310 HV).

Questo ci dimostra come sia più semplice il controllo dei livelli di durezza con la saldatura ibrida rispetto a quelle autogene. [8]

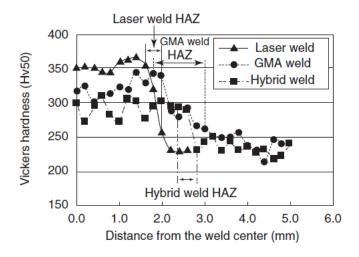


Figura 2.8. Confronto durezza diverse tecniche

2.4.3. Resistenza

La resistenza del giunto saldato dipende dalle caratteristiche della microstruttura e dal ciclo termico che subisce il cordone e la zona termicamente alterata.

La resistenza del giunto saldato risulta essere, nel caso della saldatura ibrida, superiore o uguale rispetto al metallo base. Negli acciai basso legati ad alta resistenza, le proprietà meccaniche sono fortemente influenzate dal trattamento termico del materiale base durante la produzione; in questo caso la resistenza potrebbe essere inferiore se non si utilizzasse il materiale d'apporto.

Negli acciai altoresistenziali la resistenza risulta essere molto inferiore nel caso della saldatura laser rispetto alla ibrida, mentre la MAG presenta una differenza meno marcata, avendo però una velocità di produzione del 75% in meno.

GMAW: 1 m min⁻¹, 140 A Laser: 4 m min⁻¹, 3 kW Hybrid: 4 m min⁻¹, 3 kW, 140 GMAW Joint strength (N mm⁻²) 1000 Laser 500 Hybrid Laser: break in weld metal Laser Hybrid (Sample 980MPa) 0 500 1000 Tensile strength of base metal (N mm⁻²)

Figura 2.9. Confronto resistenza diverse tecniche

Molto importante è l'analisi della durezza nella ZTA poiché in questa zona, fortemente soggetta a cicli termici, la durezza e la resistenza sono inversamente proporzionali. Quindi il poter controllare la durezza è fondamentale. [9]

2.4.4. Resilienza

La resilienza è un'altra caratteristica fondamentale nella caratterizzazione del materiale in quanto definisce la capacità di un corpo di assorbire energia prima di giungere a rottura.

Nel caso degli acciai da costruzione che presentano una struttura cubica a corpo centrato risulta avere un'importanza maggiore, poiché a basse temperature si presenta un fenomeno di transizione che porta a passare da una rottura di tipo duttile ad una fragile.

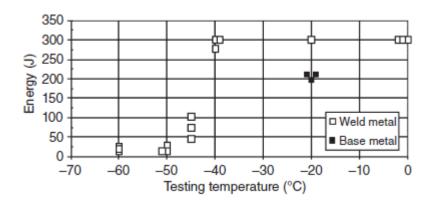


Figura 2.10. Grafico resilienza giunto

Il grafico fa riferimento ad un esperimento (Kristensen,2007) nel quale sono state eseguite delle prove con il pendolo di Charpy di una piastra in S235. Si nota come il punto di transizione del metallo saldato sia intorno ai -40°.

La differenza tra i 3 processi di saldatura è minima, nel caso della saldatura laser si mostra un valore inferiore di energia di impatto alle basse temperature. La zona fusa presenta un minore valore di energia di impatto rispetto al materiale di base: questo è dovuto alla struttura aciculare che si forma con il rapido raffreddamento. [10]

2.5. Difetti

I principali difetti che si possono riscontrare nella saldatura ibrida sono relativi a "Solidification flaws", tipici del processo laser. Sono diversi dalle cricche e si presentano in punti isolati del cordone.



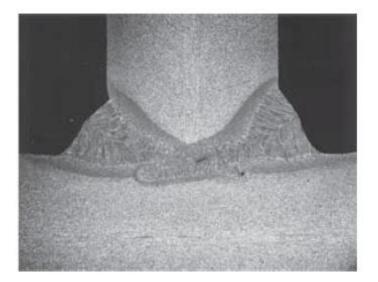


Figura 2.11. Difetti saldatura ibrida

2.5. Esempi di confronto

Per concepire meglio la differenza che intercorre tra le diverse tecniche analizziamo degli esempi di macrografie.

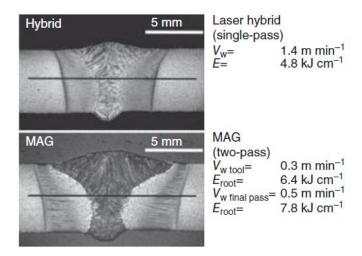


Figura 2.12. Confronto saldatura MAG-Hybrid

In questo cordone di saldatura eseguito con due differenti processi si nota come la tecnologia ibrida permetta di avere una ZTA minore rispetto al caso MAG, una velocità di esecuzione quasi tripla ed eseguita in una sola passata ottenendo una penetrazione completa. L'altro aspetto importante da evidenziare è l'apporto termico che risulta essere del 40% inferiore.

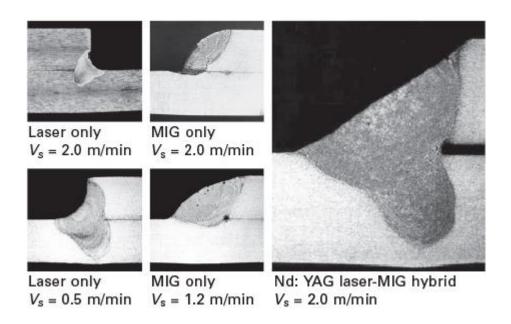


Figura 2.13. Confronto velocità di produzione

La velocità è un altro aspetto molto importante di questo processo di saldatura poiché, come si può notare dall'immagine, a parità di velocità di esecuzione il processo ibrido permette una penetrazione nettamente superiore rispetto alle altre tecniche.

2.7. Conclusioni

La saldatura ibrida è un processo tecnologico innovativo che fornisce notevoli vantaggi rispetto ai singoli metodi di saldatura.

Tuttavia la combinazione di due processi è una sfida poiché aumenta la complessità fisica e l'impostazione dei parametri di processo. L'interazione tra due diverse fonti di calore richiede una profonda conoscenza per controllare il procedimento. Inoltre, l'arco laser ibrido a volte può non riuscire a focalizzarsi strettamente, con conseguente imprecisione dei prodotti.

La saldatura ad arco laser ibrida può avere un impatto significativo in un grande numero di industrie, in quanto può migliorare la qualità della saldatura, il tasso di produzione, i costi e influenzare i metodi di costruzione.

Nella realtà, tale processo richiede molti investimenti, anche se porta un notevole ritorno economico nel lungo periodo. Utilizza una fonte di energia non consumabile, il suo funzionamento coinvolge solo la miscela di vapore e plasma metallici. Alla luce della sicurezza, la saldatura ibrida ad arco laser appare più sicura rispetto ad altri processi di saldatura come la saldatura ad arco elettrico.

Concludendo, la saldatura ad arco laser ibrida agisce come uno strumento eccellente per migliorare la qualità del prodotto, aumentare la produttività, ridurre costi di manodopera, ridurre le distorsioni e creare prodotti migliori in modo più semplice. Tuttavia, la sua implementazione richiede una vera dedizione e una considerevole attenzione per migliorare processo e prodotto.

Vantaggi	Svantaggi
Maggiore capacità di saldatura con lembi	Necessaria una buona conoscenza del
distanziati	funzionamento
Minore preparazione dei lembi	Elevato costo investimento
Miglioramento nella gestione del ciclo termico	Minor sperimentazione rispetto alle altre
	tecniche
Maggiore velocità	Minor conoscenza sui possibili difetti
Maggiore penetrazione	
Minori distorsioni di conseguenza minori	
tensioni residue	
Elevata capacità produttiva	
Bassi costi produttivi	
Giunto di qualità superiore	
Riduzione potenza laser	

Capitolo 3

Inquadramento normative e giunti aziendali

3.1. Analisi normative per la certificazione

Il lavoro in azienda è iniziato dallo studio delle normative relative alla saldatura. L'obbiettivo di questo studio preliminare è stato quello di comprendere al meglio le indicazioni e le limitazioni della norma per riuscire ad ottimizzare il più possibile il processo di certificazione.

L'azienda Merlo Spa nella gestione e nel controllo delle saldature rispetta la normativa UNI EN ISO 3834.

Secondo la normativa, le aziende che realizzano strutture saldate devono essere in accordo con la norma UNI EN 3834 "Requisiti di qualità per la saldatura per fusione dei materiali metallici".

E' suddivisa in tre livelli (elementare, normale, estesa) e viene applicata alle operazioni di saldatura nei riguardi della qualità di produzione. E' una certificazione che non può mai sostituire la ISO 9001 ma la integra, poiché la 3834 certifica il processo di saldatura mentre la 9001 certifica tutti i processi aziendali.

Nell'azienda i processi di saldatura possono essere automatizzati, parzialmente meccanizzati e meccanizzati a seconda del centro di lavoro. Il controllo sul processo viene eseguito in maniera visiva al termine dell'operazione da parte dell'operatore, il quale nell'esecuzione del processo rispetta delle procedure metodologiche e tecniche.

3.2. Normativa requisiti di qualità saldatura UNI EN ISO 3834

La norma di riferimento è la UNI ISO 3834 che definisce le linee guida per il processo di saldatura sotto ogni aspetto.

Al fine di assicurare il livello di qualità richiesto per i prodotti saldati e per ottimizzare i costi di fabbricazione, l'intero processo produttivo di saldatura deve essere controllato a partire dall'arrivo dei materiali in officina. Per tenere in debita considerazione tutti i differenti fattori che possono influenzare la qualità, il costruttore deve implementare un sistema di assicurazione della qualità. Lo standard ISO 3834 definisce i requisiti che i costruttori debbono soddisfare per operare in accordo ai criteri della buona pratica di fabbricazione.

Essa è composta in totale di 5 parti:

Parte 1: Criteri per la scelta del livello appropriato dei requisiti di qualità.

Parte 2: Requisiti di qualità estesi (oggetto di certificazione).

Parte 3: Requisiti di qualità normali (oggetto di certificazione).

Parte 4: Requisiti di qualità elementari (oggetto di certificazione).

Parte 5: Documenti ai quali è necessario conformarsi.

A seconda del livello che si decide di scegliere vi sono dei limiti e delle richieste da soddisfare più o meno restrittive.

La norma ISO 3834 (parte 1a) è una guida utile e necessaria all'azienda per scegliere le norme ISO 3834 da richiedere ai fini della Certificazione, mentre la norma ISO 3834 (parte 5a) è in ogni caso obbligatoria e sempre applicabile all'iter di Certificazione di conformità del Sistema di Gestione per la Saldatura qualunque sia la norma ISO 3834 (parte 2a-3a-4a) scelta.

La norma ISO 3834 è pensata in modo da poter essere utilizzata sia per la fabbricazione (che includa qualsiasi tipo di costruzione saldata per fusione) sia per la valutazione. È usata da organizzazioni interne ed esterne (committenti, Direzione Lavori), per valutare l'abilità di un "costruttore di manufatti saldati" nel soddisfare i requisiti del cliente, dei regolamenti o i propri requisiti.

Gli obbiettivi di questa norma sono:

- Assicurare la competenza dell'azienda e l'applicazione di un adeguato controllo del processo di saldatura e fornire un metodo per dimostrare la capacità di fabbricare prodotti di qualità specificata.
- Garantire ai clienti la conformità dei prodotti realizzati ai requisiti di qualità prescritti.
- Definire requisiti di qualità per la saldatura nelle officine.
- Fornire una base per valutare la capacità e l'abilità nella saldatura di un costruttore e del personale utilizzato.
- Verificare il metodo impiegato per la realizzazione ed il controllo dei manufatti realizzati tramite saldatura per apporto termico con e senza metallo d'apporto.
- Assicurare che la fase realizzativa del manufatto sia praticabile ed in accordo a quanto previsto dal progetto.
- Fare in modo che la produzione dei componenti avvenga garantendo sia la sicurezza di chi ci lavora, sia quella degli utenti finali.
- Impiegare tecniche adeguate che assicurino costantemente la buona qualità del prodotto.

La norma è molto utilizzata per le costruzioni e le opere di ingegneria civile. Ma spesso viene sfruttata anche da aziende in settori in cui non è obbligatoria, poiché fornisce uno strumento utile per definire e rispettare i requisiti di qualità e in più è una certificazione che dà maggiore importanza all'azienda.

La norma citata si collega poi a diverse altre norme che, per ogni settore specifico, definiscono le regole e le indicazioni necessarie. All'interno dello studio si è andati ad analizzare quelle che interessavano l'azienda Merlo SPA. [11]

3.3. Qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici UNI EN ISO 15614

La norma UNI EN ISO 15614 definisce le condizioni per la procedura di qualificazione dei processi di saldatura, cioè verificare che l'esecuzione del processo sia eseguita nel rispetto delle indicazioni della norma, grazie all'utilizzo di prove distruttive e non distruttive.

La norma è divisa in più parti:

- 15614-1 Saldatura ad arco e a gas degli acciai e saldatura ad arco del nichel e sue leghe
- 15614-2 Saldatura ad arco dell'alluminio e delle sue leghe
- 15614-3 Saldatura per fusione delle ghise non legate e debolmente legate
- 15614-4 Saldatura di finitura di getti di alluminio
- 15614-5 Saldatura ad arco di titanio, zirconio e loro leghe

- 15614-6 Saldatura ad arco e a gas del rame e di sue leghe
- 15614-7 Riporto mediante saldatura
- 15614-8 Saldatura di tubi a piastra tubiera
- 15614-10 Saldatura iperbarica in ambiente asciutto
- 15614-11 Saldatura a fascio elettronico e a fascio laser
- 15614-12 Saldatura a resistenza a punti, a rulli e a rilievi
- 15614-13 Saldatura a resistenza testa a testa e a scintillio
- 15614-14 Saldatura a laser ibrido di acciai, nichel e leghe di nichel

Per ottenere la certificazione bisogna eseguire dei provini, secondo le indicazioni definite nella norma, che verranno sottoposti ad alcune prove distruttive e non distruttive per verificarne l'esecuzione.

Nella norma, oltre alla definizione geometrica dei provini, vi sono tutte le indicazioni per il processo di saldatura (posizione, materiale d'apporto, preparazione, passate, materiali).

Nel caso in cui un giunto saldato non venga rappresentato dai casi di riferimento della norma, si può eseguire la qualificazione eseguendo un saggio di pre-produzione in conformità con la UNI EN 15613.

In particolare ci siamo riferiti alla UNI EN ISO 15614-1 "Specifica e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici", poiché questa parte della norma è quella che fa riferimento alla saldatura ad arco e a gas degli acciai; ovvero la tecnologia utilizzata nell'azienda.

·

Molto importante è stato l'ultimo aggiornamento apportato alla norma nel 2017; quest'ultimo è particolarmente significativo in quanto segna un punto di svolta a livello mondiale nella contrapposizione storica fra l'approccio americano e quello europeo alla qualificazione delle procedure di saldatura. Viene lasciata all'azienda la scelta tra questi due approcci in base alle costruzioni e alle normative e direttive applicabili.

A tal fine la norma si struttura su due livelli:

- livello 1: si riferisce all'approccio americano che fa riferimento al tradizionale Codice
 ASME, sezione IX;
- livello 2: prosegue ed aggiorna l'approccio europeo che era già presente nella precedente edizione della EN ISO 15614 e che risulta essere molto più restrittivo rispetto al metodo americano.

Le prove di procedura eseguite al livello 2 si qualificano automaticamente per i requisiti del livello 1, ma non viceversa.

3.3.1. Saggi di prova

Il giunto saldato al quale si riferisce la procedura di saldatura da utilizzare in produzione deve essere rappresentato da un saggio di prova di riferimento. Nel caso del livello 1 qualsiasi prova per giunto testa-testa qualifica tutte le configurazioni di giunti, mentre per il livello 2 ci si riferisce ai saggi di riferimento e nel caso in cui non siano sufficiente si esegue un provino di pre-produzione.

Abbiamo 4 saggi di prova di riferimento:

• Saggio di prova per un giunto testa a testa

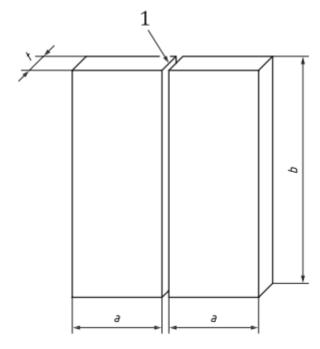


Figura 3.1. Provino testa a testa

a=150 mm

b=350 mm

t = spessore del materiale definito

• Saggio di prova per un giunto testa a testa tubo

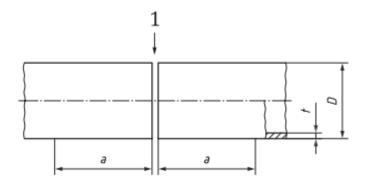


Figura 3.2. Provino testa a testa tra tubi

a=150 mm

D= diametro tubo

t = spessore del materiale definito

• Saggio di prova per un giunto a T

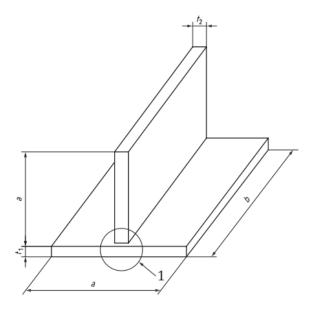


Figura 3.3. Provino T

a=150 mm

b=350 mm

t1, t2 = spessore del materiale definito

• Saggio di prova giunto tubo-tronchetto

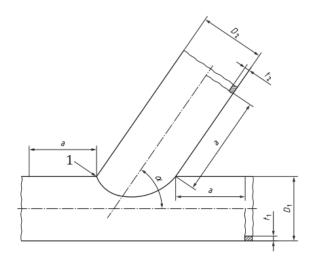


Figura 3.4. Provino tubo tronchetto

 α = angolo del tronchetto

a=150 mm

D1= diametro esterno tubo

D2= diametro esterno tronchetto

T1 = spessore del tubo

T2= spessore tronchetto

3.3.2. Controlli e prove

La normativa definisce l'entità e le prove che devono essere eseguite sui provini a seconda della tipologia e del livello.

Livello 1

Saggio	Prove	Entità prove	
Giunto testa a testa a piena	Prova visiva	100%	
penetrazione	Prova trazione trasversale	2 provini	
	Prova di piegamento	4 provini	
Saldatura d'angolo	Prova visiva	100%	
_	Esame macroscopico	2 provini	
	_	_	

Livello 2

Saggio	Prove	Entità prove	
Giunto testa a testa a piena	Prova visiva	100%	
penetrazione	Controllo radiografico o	100%	
	con ultrasuoni		
	Rilevazione di cricche sup	100%	
	Prova trazione trasversale	2 provini	
	Prova di piegamento	4 provini	
	Prova resilienza	2 serie (zona fusa e zta)	
	Prova di durezza	Richiesta	
	Esame macroscopico	1 provino	
Giunto a T a piena	Prova visiva	100%	
penetrazione	Controllo radiografico o	100%	
Giunto tubo-tronchetto	con ultrasuoni		
piena penetrazione	Rilevazione di cricche sup	100%	
	Prova di durezza	Richiesta	
	Esame macroscopico	2 provini	
Saldatura d'angolo	Prova visiva	100%	
	Rilevazione di cricche sup	100%	
	Prova di durezza	Richiesta	
	Esame macroscopico	2 provini	

Si evidenzia facilmente come nel secondo livello ci siano molte più prove richieste: questo perché, come detto in precedenza, il metodo europeo richiede dei livelli di qualità e controllo superiori.

3.3.3. Campi di validazione

Una volta definito il giunto di prova da eseguire, le sue caratteristiche genereranno dei campi di validazione che valideranno altri giunti simili a quello definito.

Il primo campo di validazione è il materiale di base, poiché la normativa definisce che, per il secondo livello, un materiale non qualifica tutti gli altri ma qualifica in funzione della seguente tabella.

Materiale provino A	Materiale provino B		
	1	2	
1	1-1	-	
	1-1	1-1	
2	2-1	2-1	
		2-2	
	1-1	1-1	
	2-1	2-1	
3	3-1	2-2	
		3-1	
		3-2	

Dove i numeri riferiti al materiale sono dei gruppi nei quali gli acciai, con caratteristiche meccaniche simili, vengono raggruppati per diminuire il numero delle prove necessarie alla procedura. La normativa che definisce questi gruppi è la ISO 15608.

Group Sub-group Type of steel Steels with a specified minimum yield strength $R_{eH} \le 460 \text{ N/mm}^2 \text{ a}$ and with analysis in %: C ≤ 0,25 Si ≤ 0,60 Mn ≤ 1,8 $Mo \le 0.70^{b}$ $S \le 0,045$ $P \le 0.045$ Cu ≤ 0,40 b $Ni \le 0,5^b$ $Cr \le 0.3$ (0.4 for castings) b $Nb \le 0.06$ $V \le 0,1^{b}$ $Ti \leq 0,05$ 1.1 Steels with a specified minimum yield strength $R_{eH} \le 275 \text{ N/mm}^2$ 1.2 Steels with a specified minimum yield strength 275 N/mm² $< R_{eH} \le 360 \text{ N/mm}^2$ 1.3 Normalized fine-grain steels with a specified minimum yield strength R_{eH} > 360 N/mm² 1.4 Steels with improved atmospheric corrosion resistance whose analysis may exceed the requirements for the individual elements as indicated in group 1 Thermomechanically treated fine-grain steels and cast steels with a specified minimum yield strength $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$ 2.1 Thermomechanically treated fine-grain steels and cast steels with a specified minimum yield 2 strength 360 N/mm² $< R_{eH} \le 460 \text{ N/mm}^2$ 2.2 Thermomechanically treated fine-grain steels and cast steels with a specified minimum yield strength R_{eH} > 460 N/mm² Quenched and tempered and precipitation-hardened fine-grain steels except stainless steels with a specified minimum yield strength $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$ 3.1 Quenched and tempered fine-grain steels with a specified minimum yield strength $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \le 690 \text{ N/mm}^2$ 3

Tabella 3.1. Raggruppamento materiali norma ISO 15608

Precipitation-hardened fine-grain steels except stainless steels

Quenched and tempered fine-grain steels with a specified minimum yield strength

3.2

3.3

 $R_{\rm eH} > 690 \, \rm N/mm^2$

Il secondo campo di validazione della norma fa riferimento allo spessore del materiale, questo perché un provino con uno spessore t qualificherà altri provini uguali che presentano uno spessore contenuto all'interno del range di validazione del provino di riferimento.

Livello 1: qualsiasi prova di saldatura testa a testa o saldatura d'angolo qualifica tutte le dimensioni del cordone e tutti gli spessori del materiale.

Livello 2: il campo di validità di qualificazione delle saldature d'angolo qualificate da una prova testa a testa a piena penetrazione o da una prova di saldatura d'angolo dipende dai prospetti seguenti.

Campo di validità di qualificazione per lo spessore del materiale di giunti testa a testa per lo spessore del metallo depositato

	Campo di validità				
Spessore saggio t	Spessore materiale base				
	Livello 1 Livello 2				
		Singola passata	Passata multipla		
t ≤ 3		0.5 t a 2 t			
$3 < t \le 12$	Da 1.5 a 2 t	Da 0.5 t a 1.3 t	Da 3 a 2t		
$12 < t \le 20$	Da 5 a 2t	Da 0.5 t a 1.1 t	Da 0.5 t a 2 t		
$20 < t \le 40$	Da 5 a 2t	Da 0.5 t a 1.1 t	Da 0.5 t a 2 t		
$40 < t \le 100$	Da 5 a 200	-	Da 0.5 t a 2 t		
$100 < t \le 150$	Da 5 a 200	-	Da 50 a 2t		
t > 150	Da 5 a 1.33t	-	Da 50 a 2 t		

Per il livello 2: Campo di validità di qualificazione per lo spessore del materiale e per l'altezza di gola delle saldature d'angolo

Spessore del saggio di prova t	Campo di validità Spessore materiale Altezza di gola		
1			
		Passata singola	
t ≤ 3	Da 0.7 t a 2 t		
3 < t < 30	Da 3 a 2t	Da 0.75 α a 1.5 α	
t ≥ 30	≥ 5	Da 0.73 d a 1.3 d	

α: l'altezza di gola nominale come specificata da pWPS

3.3.4. Processo di saldatura

Per il livello 1, il grado di meccanizzazione non è essenziale. Se si utilizza più di un processo o materiale d'apporto in un singolo saggio, ciascun processo o materiale può essere utilizzato individualmente o con combinazioni differenti nel rispetto dei parametri della pWPS.

Mentre nel livello 2, ciascun grado di meccanizzazione deve essere qualificato indipendentemente. Procedura valida solo per la sequenza di processi usata per il saggio di prova.

3.3.5. WPS Specifica di procedura di saldatura

Durante l'esecuzione di un saggio di prova tutti i parametri di saldatura sono riportati in un documento chiamato WPS (Welding Procedure Specification o Specifica di procedura di saldatura); gli stessi parametri saranno poi utilizzati dall'operatore durante la fase di realizzazione del giunto di produzione.

Le informazioni riguardano l'indicazione del materiale base e del materiale d'apporto, la precisazione del gas di protezione e della tecnica utilizzati e la descrizione di ulteriori parametri tecnici (posizione, preriscaldo, temperatura ambiente).

Il giunto saldato, secondo i parametri specificati dalla WPS, viene sottoposto alle prove di laboratorio (test distruttivi e controlli non distruttivi), al termine dei quali viene emesso un verbale, detto WPQR (Welding Procedure Qualification Report), che riporta i risultati dei test e qualifica l'azienda o l'operatore a realizzare giunti di produzione secondo le condizioni e i parametri precisati. La WPQR viene redatta da un ente terzo che

ha il compito di certificare l'applicazione della norma e che il tallone superi i test di laboratorio.

La WPS deve fornire i dettagli di come deve essere eseguita un'operazione di saldatura e deve contenere tutte le informazioni necessarie. [12]

3.4. Prove di qualificazione dei saldatori, parte 1: acciai UNI EN ISO 9606-1

La seguente norma fornisce una serie di regole tecniche per la prova di qualificazione dei saldatori; i processi di saldatura considerati comprendono i processi di saldatura meccanizzata per fusione designati come saldature manuali o parzialmente meccanizzate.

La qualificazione del saldatore è basata sull'individuazione delle variabili essenziali, le quali definiscono ciascuno un campo di validità. Le variabili essenziali sono:

- Il processo di saldatura;
- Il tipo di prodotto;
- Il tipo di giunto di saldatura;
- Il gruppo del metallo d'apporto;
- Il tipo di metallo d'apporto;
- Le dimensioni (spessore e diametro);
- La posizione di saldatura;
- I dettagli di saldatura.

3.4.1. Processo di saldatura

Ciascuna prova qualifica solo un processo di saldatura. Un saldatore può essere qualificato per due o più processi di saldatura saldando un saggio di prova unico (giunto con più processi).

3.4.2. Tipo di prodotto

La prova di qualificazione deve essere eseguita su piastra, tubo o altra forma di prodotto idonea. Criteri:

- a) Saggio di prova con D >25 mm coprono le saldature nelle piastre.
- b) Le saldature del saggio di prova nelle piastre coprono le saldature nel tubo fisso per $D \ge 500$ mm.
- c) Le saldature del saggio di prova delle piastre coprono le saldature in posizione tubo rotante di $D \ge 75$ mm (PA,PB,PC,PD).

3.4.3. Tipo di giunto

Le prove di qualificazione devono essere eseguite su saldature testa a testa o d'angolo. Criteri:

Tipo giunto	Qualifica	
Giunto testa a testa	Giunti testa a testa ogni tipo escluso	
	tubo-tronchetto	
Saldature testa a testa tubi	Derivazioni con angolo ≥ 60°	

Per le applicazioni in cui il tipo di giunto non può essere qualificato mediante una saldatura testa a testa o d'angolo o per connessioni a tronchetto di meno di 60°, per qualificare il saldatore si dovrebbe usare un saggio di prova specifico.

3.4.4. Tipo e gruppo del materiale d'apporto

I materiali d'apporto vengono suddivisi in gruppi in funzione del tipo di acciaio da saldare. La classificazione non è più considerata come una variabile essenziale.

I due gruppi principali maggiormente utilizzati sono:

Gruppo FM1: Acciai non legati e a grano fine -> ISO 14341

Gruppo FM2: Acciai ad alta resistenza -> ISO 16834

Materiale d'apporto	Campo di validità	
	FM1	
FM1	si	
FM2	si	

La saldatura con materiale d'apporto si qualifica per la saldatura senza materiale d'apporto, ma non viceversa.

3.4.5. Dimensioni

La prova di qualificazione dei saldatori per i giunti testa a testa è basata sullo spessore depositato e sui diametri esterni dei tubi.

Campo di validità dello spessore depositato per le saldature testa a testa

Spessore depositato saggio di prova s	Campo di validità
	Da s a 3
s < 3	o
	da s a 2s
3 ≤ s <12	Da 3 a 2s
s ≥ 12	> 3

Campo di validità della qualificazione per il diametro esterno del tubo

Diametro esterno del tubo del saggio di prova	Campo di validità della
D	qualificazione
D ≤ 25	Da D a 2D
D > 25	≥ 0.5 D

NB: Per profili cavi non circolari, D è la dimensione del lato più corto.

Campo di validità della qualificazione degli spessori del materiale per le saldature d'angolo

Spessore del materiale del saggio di	Campo di validità
prova t	
t < 3	Da t a 2t o 3 (val maggiore)
t ≥ 3	≥ 3

3.4.6. Posizioni di saldatura

Le seguenti tabelle specificano il campo di validità della qualificazione per ciascuna posizione di saldatura. Le posizioni di saldatura ed i simboli si riferiscono alla ISO 6947. [13]

Campo di validità della qualificazione per le posizioni di saldatura per le saldature di testa a testa

	Range of qualification				
Testing position	PA Flat	PC Horizontal	PE Overhead	PF Vertical up	PG Vertical down
PA	×	_	_	_	_
PC	×	×	_	_	_
PE (plate)	×	×	×	_	_
PF (plate)	×	_	_	×	_
PH (pipe)	×	_	×	×	_
PG (plate)	_	_	_	_	×
PJ (pipe)	×	_	×	_	×
H-L045	×	×	×	×	_
J-L045	×	×	×	_	×
NOTE See also 5.3.					
× indicates those welding positions for which the welder is qualified.					
 indicates those welding positions for which the welder is not qualified. 					

Tabella 3.2. Posizioni saldatura testa a testa

Campo di validità della qualificazione per le posizioni di saldatura per le saldature d'angolo

	Range of qualification									
Testing position	PA Flat	PB Horizontal	PC Horizontal	PD Overhead	PE Overhead	PF Vertical up	PG Vertical down			
PA	×	_	_	_	_	_				
PB	×	×	_	_	_	_	_			
PC	×	×	×	_	_	_	_			
PD	×	×	×	×	×	_	_			
PE (plate)	×	×	×	×	×	_	_			
PF (plate)	×	×	_	_	_	×	_			
PH (pipe)	×	×	×	×	×	×	-			
PG (plate)	_	_	_	_	_	_	×			
PJ (pipe)	×	×	_	×	×	_	×			

Tabella 3.3 Posizioni saldatura d'angolo

3.5. Prove di qualificazione degli operatori di saldatura e dei preparatori di saldatura UNI EN ISO 14732

La qualifica ha lo scopo di verificare la capacità dell'operatore nel controllo e nella regolazione dell'unità di saldatura di procedimenti completamente meccanizzati e automatici e di qualificarlo secondo i campi di validità previsti dalla normativa di riferimento impiegata per la certificazione.

La norma si applica a procedimenti completamente meccanizzati e automatici di materiali metallici. La prova prevede inoltre la verifica delle conoscenze funzionali dell'unità di saldatura come la preparazione del giunto, la regolazione dei parametri e dei dispositivi di fissaggio, ecc. [14]

La qualificazione per gli operatori di saldatura può essere eseguita in uno di questi quattro metodi:

- Qualificazione basata su una prova di processo in accordo con la ISO 15614
- Qualificazione basata su una prova di pre-produzione in accordo con la ISO 15613
- Qualificazione basata su una prova in accordo con la ISO 9606
- Qualificazione basata su una prova di produzione

3.6. Analisi dei giunti interni all'azienda

Dopo aver studiato le normative necessarie per la qualificazione dei giunti e del personale addetto, è stata eseguita un'analisi approfondita delle saldature che vengono eseguite all'interno dell'azienda.

L'analisi è stata eseguita per evidenziare i giunti di produzione che si possono rappresentare con i provini di riferimento della normativa e per classificare quelli particolari, ovvero quelli che non possono essere rappresentati dalla ISO 15614.

Per semplificare e organizzare meglio lo studio si è andati a suddividere le saldature nei sottogruppi dei componenti che formano la macchina. I sottogruppi sono: testate, zattere, braccio, martinetti, telaio, cabina, scalmi e piedini.

Poiché la quantità e la diversità dei componenti non permetteva di eseguire uno studio di tutte le saldature presenti su ogni macchina, le saldature sono state suddivise in tre grandi classi in base alla loro funzione operativa sul componente e sul sistema, a seconda del rischio e del danno che possono provocare in caso di rottura:

- Classe A: sono tutte quelle saldature ritenute importanti per il funzionamento di un qualunque sistema o macchina in sicurezza. La rottura di una saldatura appartenente a questa classe provoca il fermo immediato e l'impossibilità di utilizzare il gruppo o la macchina.
- Classe B: sono tutte quelle saldature ritenute necessarie per il corretto funzionamento di un qualunque sistema. La rottura di una di queste potrebbe provocare il fermo e l'impossibilità di utilizzare la macchina.
- Classe C: sono tutte quelle saldature ritenute accessorie per il corretto funzionamento di un qualunque sistema o macchina in sicurezza.

Partendo dal primo sottogruppo studiato, le testate, si è iniziato ad analizzare le saldature presenti facendo soprattutto riferimento al tipo di giunzione, ai materiali e allo spessore dei materiali, oltre che alla tecnica utilizzata. Questo poiché, essendo delle

·

variabili essenziali all'interno della normativa, il cambiamento di una di esse può portare ad avere un provino differente.

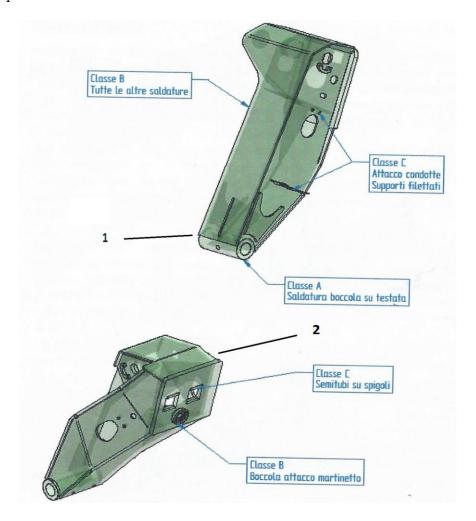


Figura 3.5. Testata macchina telescopica

Il giunto 2 che collega le due piastre disposte a 90° l'una rispetto all'altra, è una saldatura riconducibile al giunto a T presente nella normativa. Per classificare il giunto è necessario quindi capire il tipo di giunzione, i materiali, gli spessori e la tecnologia usata.

etadio o darattorizzazione di giariti dalada poi madorimo toroccopione

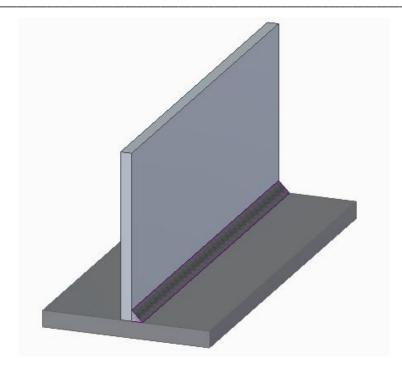


Figura 3.6. Giunto a T

Per fare ciò si è eseguita una classificazione dei giunti presenti in azienda man mano che venivano analizzati, facendo in modo che quelli già presenti in altri sottogruppi coprissero il più possibile tutti i giunti di quel tipo.

Tipo di giunto		Caratteristiche giunto	Mat base	Tipo di materiale d'apporto	Passata	Penetrazio ne	Modo di trasferim ento	Livello di automazi one	Spessore depositato/ altezza gola
FW 3 R	1	Piastra- piastra t1= 18, t2=12	Piastra 1: S355J2(1) Piastra 2: S700MC(2)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot	a=5 b=7

Il primo passo è quello di definire il tipo di giunto che stiamo analizzando: in questo caso abbiamo attribuito un codice "FW3R" e inserito lo schemino del giunto, successivamente abbiamo definito le caratteristiche come lo spessore e il materiale di base

e d'apporto. Il secondo step è quello che riguarda come la saldatura è stata eseguita, ovvero il numero di passate e il tipo di penetrazione, il tipo di automazione e il modo di trasferimento.

Le variabili che definiscono il giunto sono:

- Caratteristiche giunto: viene definito da cosa è composto il giunto e le dimensioni che hanno i componenti, che andranno poi a creare il campo di validità degli spessori.
- Materiale base: descrive il materiale di base delle due piastre con indicato il gruppo di appartenenza della normativa; in questo caso viene usato un S700MC su una delle due piastre poiché permette di coprire, oltre che i materiali del gruppo 2, anche quelli del gruppo 1.
- Tipo materiale d'apporto: il materiale d'apporto è una variabile molto importante poiché un cambiamento nel filo utilizzato può portare ad un giunto non qualificato. Nell'azienda vengono usati due tipi di filo: una tipologia per la saldatura degli acciai strutturali e un altro per gli acciai altoresistenziali. Il secondo non copre il primo e questo ha portato a dover eseguire alcuni provini sia con un materiale d'apporto che con l'altro.
- Passata: il numero di passate è un aspetto molto restrittivo poiché la passata multipla non qualifica la passata singola.
- Penetrazione: in questo caso la completa penetrazione qualifica anche la parziale ma in azienda vengono eseguite solo delle parziali.
- Modo di trasferimento: da normativa i modi di trasferimento qualificano solo quello che viene utilizzato per il provino di qualificazione.

sistemi di automazione.

- Livello di automazione: nell'azienda sono presenti tre livelli robot, parzialmente meccanizzata e meccanizzata; un provino eseguito con un livello non lo qualifica anche negli altri perciò, per alcuni, è stato necessario eseguirlo anche negli altri
- Spessore depositato/altezza gola: come per lo spessore anche la dimensione del cordone definisce un range di qualificazione, quale può essere uno spessore "s" nel caso di saldature testa a testa oppure la dimensione della diagonale "a" nel caso di un cordone d'angolo.

Questi dettagli sono funzione della normativa poiché, come visto in precedenza, essa stabilisce delle variabili essenziali che definiscono il tipo di giunto e come esso è eseguito. Tutti i giunti con quelle caratteristiche, se rientrano nel campo di validità del giunto di riferimento, saranno qualificati.

In questo caso il campo di validità del giunto è:

Spe	ssore 1	Spess	ore 2	Dian	netro	Gruppi	Penetrazi	Max
da	а	da	а	da	а	mat base	one	Spessore saldatura/
3	36	3	24	/	/	1-1, 2- 1	Parziale	a =3,75-7,5 b=5,3-10,6

Come si può facilmente evidenziare, si definisce un range per lo spessore, i sottogruppi qualificati del materiale di base e il range qualificato per lo spessore

depositato.

Questo tipo di lavoro è stato eseguito per tutti i sottogruppi di componenti presenti sulla macchina, procedendo con l'analisi si sono riscontrati alcuni giunti "particolari", i quali non rientravano all'interno della normativa ISO 15614. Per queste saldature è stata eseguita un'analisi a parte con il consulente per riuscire ad ottimizzare il più possibile il numero dei giunti da eseguire. Si è cercato di capire quali giunti potessero essere ricondotti a dei casi comuni e quali invece dovessero essere eseguiti come provini di preproduzione.

Il giunto 1 nella figura 3.7, è uno dei giunti particolari che sono stati studiati a parte rispetto a quelli di riferimento della normativa.

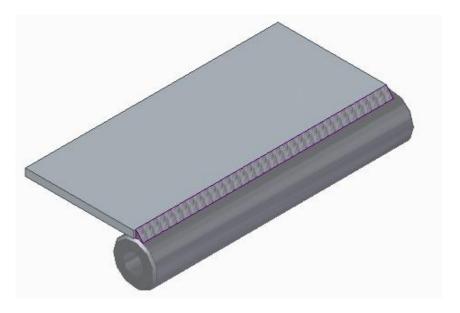


Figura 3.7. Giunto particolare testata

·

Anche in questo caso è stato classificato come il giunto precedente.

La normativa per i giunti di pre-produzione fa riferimento alla ISO 15614 per la definizione dei range di validità e per le variabili essenziali, per questo uno dei lavori eseguiti su queste saldature particolari è stato quello di capire a quale dei quattro provini di riferimento si potesse ricondurre in termini di definizione del campo di validità.

I giunti "speciali" che sono stati analizzati sono:

Schizzo	Tipo di giunto			
	Testa a testa con piena penetrazione			
	Giunto testa a testa, piastra-cilindro			
	Giunto d'angolo piastra-cilindro			
	Giunto testa a testa con angolo			
	Giunto d'angolo con angolo diverso da 90° (altezza massima spigolo 2 mm)			
	Giunto d'angolo			

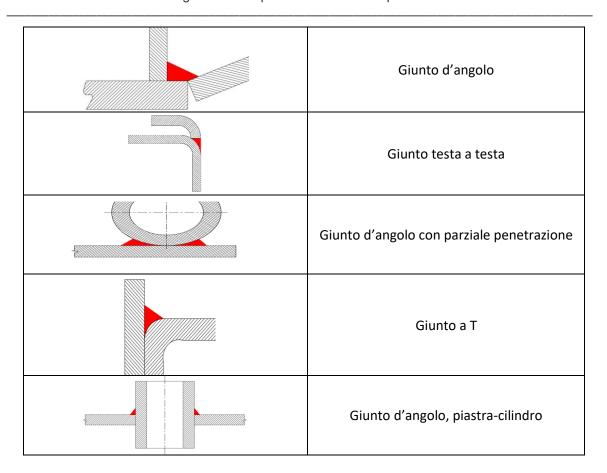


Tabella 3.4. Giunti particolari

Una volta classificate tutte le saldature è iniziato il lavoro di ottimizzazione il cui obbiettivo è stato essenzialmente quello di riuscire a coprire più giunti possibili con il minor numero di provini certificati.

Per fare questo è stato necessario lavorare sugli spessori dei provini per far sì che si riuscisse, con quel provino, ad avere un range di validità il più ampio possibile e ridurre il numero dei giunti da certificare.

Con questo lavoro si è riusciti, con circa 30 talloni da qualificare, a coprire gli oltre 200 giunti che vengono prodotti all'interno dell'azienda.

Si è arrivati ad ottenere una tabella dei giunti da certificare che rispecchia il maggior

numero delle saldature presenti all'interno dell'azienda. La tabella è suddivisa nei tre

livelli di automazione presenti all'interno dell'azienda: robot, parzialmente meccanizzata

e meccanizzata.

L'ultima colonna presente nella tabella contiene alcuni schemi di giunti saldati

particolari che il provino qualifica, questo è stato fatto anche per semplificare il sistema

facendo in modo che un progettista sappia quali sono i giunti qualificati e quali giunti

particolari esso copre.

Nella tabella dei giunti completa, si evidenzia come i giunti siano stati suddivisi in

tre gruppi: verdi, gialli e rossi. Questo perché per motivi aziendali si è suddiviso in tre

parti l'esecuzione della qualifica dei giunti, i verdi sono considerati i giunti che coprono le

saldature più importanti delle macchine e per questo verranno eseguiti prima degli altri.

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

Spessore Spessore 1 depositato/ da a	a=7 b=9,9	b=0,9	a 3 36 b=7	s=7 5 13
Penetrazi rrasferime automazi one nto one	Parziale Spray arc Robot	ziale Spray arc Robot	Singola Parziale Sprayarc Robot	Singola Parziale Spray arc Robot
Tipo di Pen Pen Pen d'apporto	Singola	Sidergas Singola Parziale G4 Si1	Sidergas Singola Par G4 Si1	Sidergas Singola Par G4 Si1
Caratteristiche Mat base	Piastra- S700MC piastra (2.2)	Piastra- piastra S35512 (1) t1,t2=36	Piastra 1: S35512(1) piastra piastra 2: t1=18, t2=12 S700MC(2)	1: S355J2 Piastra-piastra (1) t1,t2=10 2: S700MC
Tipo di giunto		2 2 1	1	1 2
	9/001/ FW 1 R	9/002/ FW 2 R	9/003/ FW 3 R	9/004/ BW 1 R
N giunto	1	2	3	4

3.7. Analisi patentini e operatori saldatura

L'analisi dei giunti interni permette, oltre che di eseguire la qualificazione, anche di conoscere il tipo di saldature che vengono eseguite internamente; questo permette di eseguire la qualificazione degli addetti alla saldatura secondo la normativa ISO 9606 per i saldatori e la ISO 14732 per gli operatori.

Come visto precedentemente, la normativa relativa agli operatori di saldatura permette di eseguire la qualificazione con più metodi, in questo caso è stato scelto di eseguire la qualificazione come per la ISO 9606.

L'obbiettivo di questa fase è stato quello di riuscire, con il minor numero di patentini, a coprire il maggior numero di giunti. Questo poiché da normativa il saldatore o chi si occupa della gestione del robot deve essere certificato sulla tipologia di giunti su cui opera.

3.7.1. Qualificazione saldatore manuale

Nella qualifica del saldatore manuale o più comunemente detto "patentino da saldatore", viene richiesta l'esecuzione di uno o più provini che verranno testati, nel caso in cui i risultati siano positivi il saldatore riceverà la qualifica e potrà lavorare sui giunti che rispettano le caratteristiche definite dalla qualifica.

Dopo l'analisi dei giunti presenti nell'azienda sono stati definiti due "patentini":

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

N. patentino	Ti	ipo giunto	P	Provino			Mat apporto	Dettaglio saldatura
FP1	FW	tubo-piastra	P: t= 12,T: D=60 d=36 PB		S235JR	135	FM1	ml
BP2	BW	tubo-tubo	Text: D=122 d=97,2 Tint D=96 d=84 PA		S235JR	135	FM1	ss,ml

Il primo, chiamato FP1, richiede la saldatura di un provino costituito da un tubo e una piastra disposti a 90° e viene eseguito in due passate per qualificare sia la passata multipla che la singola. Il materiale di base non è una variabile restrittiva come nel caso della qualifica dei giunti. Il provino deve essere saldato in posizione PB ovvero con torcia a 45°.

Il secondo è più complesso poiché, per qualificare la giunzione tra tubi e piastre senza eseguire due provini, è stato necessario eseguire un provino testa a testa tra tubi in doppia passata con sostegno interno che permette di qualificare la saldatura testa a testa anche delle piastre. In questo caso la saldatura avviene in posizione PA ovvero in piano.

In entrambi i casi si è utilizzato un materiale d'apporto appartenente alla categoria FM1 che permette di qualificare l'operatore con tutti i materiali d'apporto della FM1 e della FM2.

Il campo di qualificazione dei due giunti è:

		Campo di qualificazione								
N. patentino	Tipo giun	Tipo giunto			Diametro		Posizioni	Dettagli	Mat	
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	P - 0 -		da	а	da	а			apporto	
FP1	P-P,T-P	FW	3	∞	30	∞	РА,РВ	gb,sl	FM1,FM2	
BP2	T-T,T-P,P-P	BW	3	∞	61	∞	PA	nb,mb,bs,gb,fb ,sl	FM1,FM2	

Il patentino FP1 qualifica i giunti d'angolo tra piastre e nel caso di piastra-tubo per spessori da 3 mm ad infinito, sia per le piastre che per i tubi e un diametro superiore a 25 mm.

Nel BP2 invece si qualifica l'operatore sui giunti testa a testa sia tra tubi che tra piastre. Essendo eseguito in passata multipla si qualifica anche la singola.

3.7.2. Qualifica operatore di saldatura

Nella qualifica per l'operatore di saldatura, non essendo eseguita in prima persona dall'addetto, non viene richiesta l'esecuzione di un particolare giunto. La normativa richiede semplicemente la saldatura di un giunto qualsiasi per certificare la capacità da parte dell'operatore di gestire la macchina.

Per questo non sono stati eseguiti dei giunti particolari ma l'operatore è stato certificato eseguendo la giunzione dei provini necessari per la qualificazione dei giunti.

In alcuni casi l'operatore può essere chiamato a rispondere ad alcuni quesiti che vengono posti dall'esaminatore al fine di verificare la conoscenza del sistema di controllo della macchina.

All'interno dell'azienda sono presenti diversi sistemi di controllo per i robot, ma gli operatori sono stati certificati tutti sul controllo di ultima generazione presente.

3.8. Problematiche

Le principali problematiche incontrate sono state quelle relative alla comprensione della normativa poiché, come si è evidenziato precedentemente, la variazione di una caratteristica della saldatura porta alla creazione di un nuovo provino da qualificare. Perciò è stato necessario capire quali fossero le caratteristiche utilizzate nell'azienda per riuscire ad eseguire un'ottimizzazione dei giunti prodotti.

Un altro aspetto complicato nello studio è stato quello di riuscire, con il minor numero possibile di giunti, a coprire il range di spessori utilizzati; la difficoltà risiedeva nel fatto che le macchine, avendo una notevole quantità di componenti saldati, presentano delle giunzioni di lamiere molto sottili (circa 5 mm) fino ad arrivare alle piastre del telaio con spessori anche superiori a 60 mm. Per riuscire in questo compito sono stati eseguiti più tentativi per arrivare ad un compromesso, il più vantaggioso possibile sia sotto l'aspetto normativo che economico.

Per quanto riguarda i patentini invece, la difficoltà maggiore è stata quella di riuscire con due soli patentini (uno per i giunti d'angolo e l'altro per i giunti di testa) a

coprire tutti i giunti che sono presenti nell'azienda: per fare ciò è stato necessario discutere, insieme al consulente, quale potesse essere la configurazione più conveniente per il provino della qualifica.

Capitolo 4

Analisi flussi interni

Eseguito lo studio dei giunti prodotti all'interno dell'azienda, è stato necessario analizzare la produzione delle lavorazioni di saldatura per definire, per ogni centro di lavoro, quali fossero i giunti presenti e, di conseguenza, quali fossero le qualificazioni necessarie.

4.1. Centri di lavoro

Studiando i centri di lavoro di saldatura interni all'azienda, è stato possibile suddividerli ponendo maggior attenzione a quelli di Classe1; ovvero quelli in cui vengono prodotti i componenti più importanti della macchina e che devono rispettare normative dedicate.

Per ogni centro di lavoro è presente: il suo codice, il descrittivo che lo identifica, il tipo di processo, la classe del centro di lavoro e delle matricole e la classe della saldatura.

Un centro di lavoro è definito di Classe 1 se almeno un componente prodotto al suo interno è di Classe 1.

Centro di Classe Classe Classe **Processo** Nome cdl lavoro cdl matricole giunti **CAR100** Saldatura robot sottogruppi roto Robot 1 A-B CAR101 Saldatura robot telai roto Robot A-B-C **CAR102** Saldatura robot torrette Robot A-B-C **CAR103** Saldatura robot vasche telaio Robot A-B **CAR104** Saldatura robot ponti motoman Robot 1 1 Α **CAR120** A-B-C Saldatura a mano telaio torretta Manuale **CAR126** Saldatura robot telai Robot A-B-C **CAR134** Saldature robot testate braccio -1 Robot 1 1 A-B Robot **CAR135** Saldature robot testate braccio -2 1 1 A-B CAR30 Saldatura testate su bracci 1 1 A-B Manuale CAR31 Saldatura testate su bracci aisi Manuale 1 1 A-B CAR32 1 Saldature bracci speciali Manuale CAR35 Saldatura ex telaio e cabina Manuale A-B-C CAR67 Finitura saldatura testate bracci Manuale 1 CAR91 Saldatura robot culatte telai A-B-C Robot CAR94 Saldatura robot telai lunghi Robot A-B-C CAR95 Saldatura robot bracci corti Robot 1 1 A-B CAR96 Saldatura robot bracci lunghi Robot 1 1 A-B CAR97 Saldatura robot cabine Robot A-B CB041 Saldatura quinto braccio R50 A-B Manuale 1 1 1 **CB080** Saldatura robot bracci corti Robot 1 A-B CB081 Saldatura robot bracci lunghi Robot 1 1 A-B CB082 Saldatura robot bracci medi Robot 1 A-B 1 MSG15 Saldatura camere steli corti Manuale 1 1 A-B MSG16 Manuale 1 1 A-B Saldatura camere steli lunghi MSG17 Saldatura camere steli robot Robot 1 1 A-B A-B MSG18 Saldatura camere steli R50.35 Manuale 1 1 P020 Saldatura prototipi Manuale 1

Tabella 4.1 Centri di lavoro

4.2 Attribuzione giunti e patentini ai centri di lavoro

Il compito successivo è stato quello di attribuire ad ogni centro di lavoro i giunti qualificati e i patentini necessari per far sì che il centro di lavoro fosse qualificato sia per il processo sia per gli operatori.

Ogni voce relativa alla stazione di lavoro contiene, al suo interno, l'elenco dei componenti prodotti.

Centro di lavoro	Nome CdL	Tipologia CdL	Nome articolo
CAR100	SALDATURA ROBOT SOTTOGRUPPI ROTO (CLASSE-1)	The region can	
CAR101	SALDATURA ROBOT TELAI ROTO	Automatico	TRAVE PORTANTE R40.26MCSS
			TEL.BASE PREM. R40.26MCSS ASSEMBL, GREZZO
			TRAVE PORTANTE ROTO 40.26 MOTORE TIER 3B
			TRAVE ASSEMBLATO X ROTO 60.24 VERS.2013
			TRAVE PORTANTE ROTO 38 SOSPENS.MOTORE KUBOTA
			TEL.BASE PREM. ROTO 38 CON SOSP.E MOT.KUBOTA ASSEMBL. GREZZO
			TRAVE CENTRALE ROTO 38 SENZA SOSPENSIONI ASS.MOT.KB
			TEL.BASE PREM.ROTO 38 SENZA SOSP.E MOT.KUBOTA ASSEMBL.GREZZO
			TEL.BASE PREM. R40.26MCSS ASSEMBL. GREZZO X MOTORE TIER 4A
			TEL.BASE PREM. ROTO SERIE 50 MODULARE ASSEMBL. GREZZO
			TEL.BASE PREM. R40.26MCSS ASSEMBL. GREZZO (MOT.STAGE 3A EE)
			TRAVE PORTANTE R40.26 MOTORE STAGE 4F
			TEL.BASE PREM. ROTO40.26-MCSS 4F ASSEMBL. GREZZO
			TEL.BASE PREM. ROTO40 CON SOSP.E MOT.DEUTZ 4F ASSEMBL.GREZZO
			TEL.BASE PREM. ROTO40 FISSO E MOT.DEUTZ 4F ASSEMBL.GREZZO
			TEL.BASE PREM. ROTO MODULARE SERIE 50 PONTI FISSI ASSEMBL.
			MATERIALE MENSILE PER RICAMBI
CAR102	SALDATURA ROBOT TORRETTE		
CAR103	SALDATURA ROBOT VASCHE TELAIO-A		
CAR104	SALDATURA ROBOT PONTI MOTOMAN (CLASSE 1)		

Tabella 4.2. Componenti nei centri di lavoro

Conoscendo le parti che vengono saldate all'interno del centro di lavoro, è stato possibile capire quali fossero le qualifiche di processo necessarie e, di conseguenza, quelle necessarie per gli operatori.

Centro		Tipo giunti													
di								Robot							
lavoro	FW 1	FW 2	FW 3	BW 1	BW P.3	FW P.1	FW P.6	BW P.7	BW 2	BW4	FW P.2	BW 3	BW P.4	FW P.5	BW P.8
CAR100	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No
CAR101	No	Si	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si	No	No
CAR102	No	Si	No	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si	No	Si	No	No
CAR103	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No
CAR104															
CAR120															
CAR126	No	Si	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No
CAR134	Si	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	No	No	Si	No
CAR135	Si	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	No	No	Si	No
CAR30															
CAR31															
CAR32															
CAR35															
CAR67															
CAR91	No	Si	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si	No	No	No	No
CAR94	No	Si	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si	No	No
CAR95	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
CB041															
CB080	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
CB081	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No
MSG15															
MSG16															
	No	No	No	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No
MSG18															
P020															

Tabella 4.3 Giunti nei centri di lavoro automatizzati

Centro								Tipo giunt	i								
di		Manuale								Mecca	nizzata						
lavoro	FW 1	FW 4	FW 2	FW 3	BW 1	BW 3	BW5	FW P.1	BW P.4	BW P.5	FW P.2	FW P.8	FW P.7	BW P.6	FW 9	BW M1	BW M2
CAR100																	
CAR101																	
CAR102																	
CAR103																	
CAR104																	
CAR120	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	No		
CAR126																	
CAR134																	
CAR135																	
CAR30	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No		Si	Si
CAR31	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No		Si	Si
CAR32	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		
CAR35																	
CAR67	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No		
CAR91																	
CAR94																	
CAR95																	
CAR96																	
CAR97																	
CB041	No	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No		Si	Si
CB080															?		
CB081															?		
CB082															?		
MSG15	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	No		
MSG16	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	No		
MSG17																	
MSG18	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No		Si	Si	No		
P020	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No		

Tabella 4.4 Giunti nei centri di lavoro manuali

Centro di	Tipo	di paten	tino
lavoro	FP1	BP2	RP1
CAR100	Si	Si	Si
CAR101	Si	Si	Si
CAR102	Si	Si	Si
CAR103	Si	Si	Si
CAR104	Si	Si	Si
CAR120	Si	No	No
CAR126	Si	Si	Si
CAR134	Si	Si	Si
CAR135	Si	Si	Si
CAR30	Si	No	No
CAR31	Si	No	No
CAR32	Si	Si	No
CAR35			Si
CAR67	Si	Si	No
CAR91	Si	Si	Si
CAR94	Si	Si	Si
CAR95	Si	Si	Si
CAR96	Si	Si	Si
CAR97	Si	Si	Si
CB041	Si	Si	No
CB080	Si	Si	Si
CB081	Si	Si	Si
CB082	Si	Si	Si
MSG15	Si	Si	No
MSG16	Si	Si	No
MSG17	Si	Si	Si
MSG18	Si	Si	No
P020	Si	Si	No

Tabella 4.5 Patentini nei centri di lavoro

·

Grazie all'attribuzione dei giunti ai centri di lavoro è stato facilmente evidenziabile quali fossero quelli maggiormente utilizzati all'interno della produzione: ciò ha permesso di eseguire la suddivisione in base alla criticità e di definire quali fossero i giunti più importanti effettuandone subito la qualificazione.

Dalla tabella 4.5 si evidenzia come le due qualifiche manuali siano necessarie in tutti i centri di lavoro, in quanto, anche nei centri robot, l'addetto deve essere in grado, se necessario, di correggere una saldatura non eseguita correttamente dal sistema automatizzato.

Per quanto riguarda la qualifica degli operatori robot, invece, il patentino è necessario in tutte le stazioni di saldatura automatizzate, ponendo attenzione al tipo di controllo.

Questo lavoro ha permesso di avere una panoramica sulle saldature eseguite internamente all'azienda, ma soprattutto di avere un'analisi produttiva dei giunti che vengono eseguiti, potendo così evidenziare quelli maggiormente prodotti e definendo in quale centro di lavoro vengono eseguiti.

4.3 Creazione sistema gestione su Sharepoint

Sharepoint è un software, ad uso prevalentemente aziendale, che permette la condivisione di informazioni e documenti tra più utenti autorizzati.

E' possibile lavorare sui documenti in collaborazione: due utenti possono collegarsi da due posti differenti e visualizzare o lavorare sullo stesso documento. In base all'architettura del software, un solo utente alla volta può modificare un certo documento mentre più persone possono visualizzarlo in contemporanea.

Il software ha permesso di generare un sito "Processo di saldatura" che, a sua volta, ha dato la possibilità di creare un sistema utile per la gestione della qualificazione dei giunti. Sono state caricate tutte le pWPS (Specifiche preliminari di processo) con tutti i dati necessari per la descrizione del giunto, in più ogni giunto è stato associato al suo centro di lavoro e questo ha permesso di condividere l'informazione con la produzione e di sapere quali operatori, in caso di necessità, potessero operare su quella stazione.

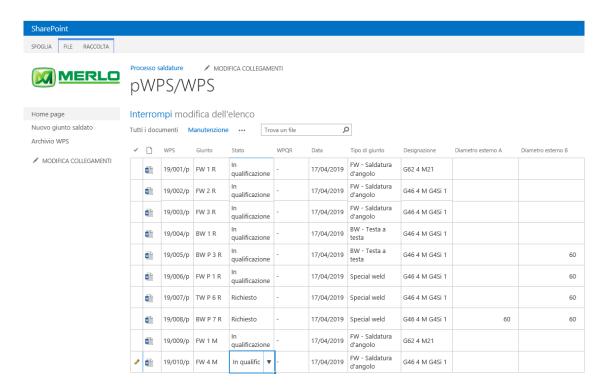


Figura 4.1. Sistema di gestione Sharepoint

Le pWPS sono consultabili sul sito da chiunque abbia l'autorizzazione. Il sistema è stato creato anche per semplificare la progettazione di nuovi e futuri componenti: questo perché, avendo a disposizione tutti i giunti qualificati, è facilmente consultabile da parte dei progettisti, quali siano le giunzioni qualificate che, quindi, possono essere introdotte

·

nella produzione. Mentre, nel caso in cui ci sia necessità di creare un nuovo giunto, si andrà ad eseguirne la qualificazione e si introdurrà nell'elenco del sito.

Le pWPS/WPS vengono caricate come documento di testo non modificabile, ma possono essere facilmente consultate nei vari campi attraverso la griglia presente nella figura 4.1.

Per la realizzazione delle pWPS/WPS è stato creato un formato di riferimento, come quello in figura 4.2, dove i campi possono essere completati solo tramite le scelte già impostate: questo semplifica il sistema generando un formato unico e univoco.

Le pWPS, una volta qualificate, saranno collegate alla WPQR (Welding Procedure Qualification Record), che, essendo una qualifica di procedimento di saldatura, ha lo scopo di validare una o più WPS.

pWPS WPS N°. **MERLO** WPAR/PQR N° Norma UNI EN ISO 15609-1 17/04/2019 Tipo di processo Type Processo(i) di saldatura Automatizzato Welding process(es).
> GIUNTO/JOINT Tipo di giunto Tipo di giunto Type FW - Saldatura d'angolo ▼ Schizzo del giunto Giunto tipo Tipo di materiale di sostegno Type of backing material Preparazione saldatura FW - Saldatura d'angolo BW - Testa a testa Weld preparation
Metodo di pre.ne e pulizia
method of prep & cleaning
Altro Special weld MATERIALE DI BASEZ PARENT S355JR UNI EN 10025 Diametro esterno A Qutside diameter S 700MC UNI EN 10149 Materiale B Tipo Spessore B Thickness range Diametro esterno B MATERIALE D'APPORTO / WELDING GONSUM TRATTAMENTO TERMICO/ HEAT TREATME EN ISO 14341 - A: 02 Norma No. Specification No. Designazione Classification Dimensioni Temperature Tempo di mantenimento G46 4 M G4Si 1 size Nome Commerciale ➤ GAS Trade Name Deposito di saldatura Miscela % Gas [l/min] ➤ POSIZIONE DI SALDATURA / WELDING POSITION osition rogressione di saldatura (elding progressione PA Modo di trasferimento Spray arc Diametro dell'ugello Crifice or gas cup size Pendolamento (argo, freg, sosta) Solcatura a rovescio Method of back gouging Pulizia fra le passate Internass & final cleaning Mode of metal transfer Distanza stick-out Distance contact tube Distance contact tube
Tipo cordone
Type of bead
Angolo e direzione torcia
Torch direction of welding Passata singola > PARTICULARI DI SALDATURA / WELDING DE Vel. Avanzam Apporto termico Passate Parametri di saldatura Dimensioni mat apporto Toll I [A] I [A] V [V] Toll V [V] [mm/s] [kJ/mm] [mm/s]

Figura 4.2. WPS

Il conseguimento della qualifica si ottiene analizzando un campione di prova saldato mediante l'utilizzo dei parametri riportati sulla WPS. La WPQR, una volta generata dall'ente di certificazione, verrà caricata sul sito e collegata a tutte le WPS che qualifica.

Capitolo 5

Analisi formulazione empirica di predizione della durezza

Prima di eseguire i provini necessari per la qualificazione, l'azienda ha richiesto di effettuare uno studio per verificare se i parametri utilizzati in produzione fornissero un valore accettabile di qualità e se tramite dei calcoli operativi si riuscisse a definire dei range di sicurezza per le variabili del processo. Per fare ciò, si è partiti da uno studio teorico sull'argomento calcolando l'apporto termico e il tempo di raffreddamento e, successivamente, sono state eseguite delle prove su alcuni provini.

5.1. Microstruttura di un giunto saldato

La saldatura degli acciai è un'operazione che richiede cure particolari e va affrontata avendo ben presente il complesso di proprietà di questi materiali e le tipiche problematiche metallurgiche che ad essi sono correlate. Infatti, a variazioni microstrutturali impercettibili possono corrispondere comportamenti sostanzialmente diversi nella resistenza alla corrosione.

Come già accennato, la saldatura è un fenomeno nel quale viene trasmessa un'elevata quantità di calore ad un componente metallico: nel caso degli acciai, l'applicazione di una fonte di calore porta il materiale a generare dei cambiamenti di fase localizzati che modificano la microstruttura del metallo.

Molti processi metallurgici avvengono allo stato solido, tra cui trasformazioni di fase, diffusione, reazioni di precipitazione, ricristallizzazione e crescita del grano. A

·

seconda del metallo da saldare, alcuni o tutti questi processi possono contribuire alla creazione di quella che è conosciuta come la zona interessata dal calore di saldatura (ZTA o HAZ). L'entità di queste reazioni può alterare in modo significativo la microstruttura e le proprietà della saldatura rispetto al metallo base. Molte di queste reazioni, o combinazioni di reazioni, possono provocare infragilimento delle saldature.

5.1.1. Diagramma di fase

Gli approcci allo studio e alla comprensione della metallurgia della saldatura spesso si basano sull'uso dei diagrammi di fase che definiscono le fasi di equilibrio presenti in una lega metallica come una funzione di temperatura e composizione. I diagrammi di fase possono essere molto complessi, ma il più comune è il diagramma di fase binario che definisce la stabilità delle fasi tra solo due metalli (o elementi) ed è spesso usato per prevedere e comprendere come si solidifica una saldatura e la successiva microstruttura che forma. I diagrammi di fase contengono sempre linee di liquidus, solidus e solvus. Il liquidus sono le linee che separano tutto il materiale liquido da una miscela di liquido e solido. Le linee del solidus separano completamente il solido da una miscela di liquido e solido. Le linee di solvus forniscono informazioni sulla quantità di un elemento che può essere completamente dissolta nell'altro.

La metallurgia fisica degli acciai si basa sul noto diagramma ferro-carbonio, si noti che questo diagramma in figura rappresenta una piccola porzione del diagramma ferro-carbonio con un contenuto massimo di carbonio del 6,67% in peso.

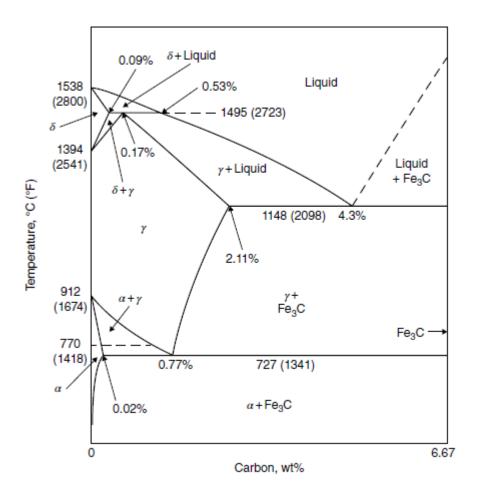


Figura 5.1. Diagramma ferro-carbonio

Ad alta temperatura la fase delta (δ) è interessante ma di minima importanza per gli acciai. Ciò che è di particolare importanza per la lavorazione degli acciai è la transizione dalla temperatura della fase austenite (γ) alla temperatura inferiore della fase alfa (α) ferrite. Si noti che il campo della fase austenite si estende fino alla destra, il che significa che può dissolvere una quantità significativa di carbonio. D'altra parte, la massima quantità di carbonio che può essere disciolta in ferrite α è 0,02%. Poiché praticamente tutti gli acciai contengono più dello 0,02% di carbonio, la conseguenza di questa differenza è

che, al raffreddamento dell'austenite, il carbonio in eccesso supererà il limite di solubilità della ferrite e provocherà la formazione di cementite.

A seconda della velocità di raffreddamento dalla temperatura dall'austenite, la cementite Fe3C può assumere varie forme. Se le velocità di raffreddamento sono estremamente lente si generano particelle arrotondate di Fe3C. In pratica, le velocità di raffreddamento durante la saldatura non sono mai lente abbastanza per formare questa morfologia.

Quando le velocità di raffreddamento sono abbastanza veloci da creare condizioni di non equilibrio, ma sono ancora relativamente lente, il costituente che si forma in genere è una struttura a strati nota come perlite.

È costituita da colonie di strati sottili di Fe3C (6,67% carbonio) e ferrite (0,02% di carbonio) che si formano al raffreddamento dall'austenite.

Velocità di raffreddamento ancora più elevate possono produrre prodotti di trasformazione noti come martensite e bainite.

Le temperature A3 e A1 rappresentano dei valori molto importanti, alla temperatura A3, la ferrite α inizierà a formarsi dall'austenite. Con un ulteriore raffreddamento fino alla temperatura A1, tutta l'austenite rimanente si trasformerà in perlite. Formazione di perlite e ferrite nella zona termicamente alterata sarà più probabile durante la saldatura di acciai a bassa lega e basso tenore di carbonio e durante l'utilizzo di processi di saldatura con elevato apporto di calore, che producono basse velocità di raffreddamento. Tuttavia, per un dato acciaio, quando le velocità di raffreddamento sono relativamente elevate potrebbe non essere sufficiente il tempo per gli atomi di austenite di riorganizzarsi per formare ferrite. Ciò può comportare la formazione di una struttura tetragonale a corpo centrato

(BCT) nota come martensite. Se visto sotto un microscopio ottico, la martensite mostra tipicamente una morfologia simile ad un ago. È nota per essere dura e fragile, con livelli di durezza che aumentano con l'aumentare del contenuto di carbonio. Al fine di recuperare un po' di duttilità, alla martensite viene generalmente somministrato un trattamento termico noto come rinvenimento.

La formazione di martensite avrà più probabilità di formarsi nella ZTA durante la saldatura di acciai altamente legati con elevate quantità di carbonio e con processi con calore ridotto che creano velocità di raffreddamento elevate. [15]

5.1.2. Curve CCT (trasformazione a raffreddamento continuo) e TTT (curve di trasformazione isoterma)

Il diagramma di fase può essere utilizzato per determinare le fasi che si generano nell'acciaio in condizioni di raffreddamento molto lento, non è il caso delle saldature dove si verificano velocità di raffreddamento rapide. Di conseguenza, è necessario un altro tipo di diagramma che considera la velocità di raffreddamento. Tali diagrammi sono noti come curve di trasformazione isoterma (TTT) e trasformazione a raffreddamento continuo (CCT).

I diagrammi TTT e CCT possono essere utilizzati per prevedere le microstrutture in acciaio in funzione della velocità di raffreddamento a partire dalle temperature dell'austenite.

La Figura 5.2. è ad esempio un diagramma TTT molto semplice, mostra solo una curva iniziale di trasformazione e una curva finale di trasformazione, applicabile ad un acciaio con composizione eutettoide (0,77% di carbonio).

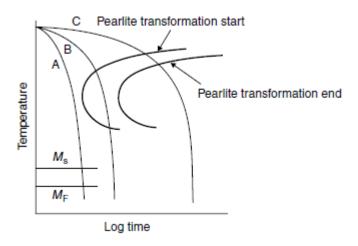


Figura 5.2. Curva TTT acciaio

I diagrammi TTT e CCT sono in genere costituiti da curve di trasformazione di ferrite e perlite e temperature di inizio martensite (Ms) e fine martensite (Mf). La Ms rappresenta la temperatura alla quale inizia la formazione di martensite e la Mf è la temperatura alla quale la trasformazione della martensite è completa. Una volta completata la trasformazione della ferrite/perlite dall'austenite, nessuna altra microstruttura (come martensite) può formarsi.

Il particolare diagramma mostrato include anche varie velocità di raffreddamento che potrebbero essere previste durante un tipico processo di trattamento termico o durante una saldatura. In questo caso, una velocità di raffreddamento rapida come la curva "A" produrrebbe 100% martensite, mentre la curva di raffreddamento "B" produrrebbe una microstruttura di perlite + martensite perché la trasformazione della

perlite non è completa, l'austenite residua si trasforma in martensite al raggiungimento della temperatura di trasformazione iniziale della martensite.

Una velocità di raffreddamento come "C" dovrebbe formare il 100% di perlite.

La martensite è un componente microstrutturale molto importante negli acciai che può portare ad aspetti positivi e negativi. A causa della sua elevata resistenza, molti acciai fanno affidamento sulla sua formazione durante l'elaborazione. Un successivo trattamento termico di tempra consente al produttore di acciaio di "personalizzare" le proprietà per creare un equilibrio tra resistenza e duttilità.

5.1.3. Effetti di tempra

La formazione di martensite diventa problematica quando si crea nella zona di fusione della saldatura e nella ZTA, poiché può portare a scarsa tenacità e duttilità ed è suscettibile al cracking dell'idrogeno.

Gli acciai che formano martensite durante la saldatura richiedono quasi sempre un trattamento post-saldatura, che in alcuni casi può richiedere molto tempo e denaro. Ad esempio, mentre esso può essere relativamente facile da eseguire su un piccolo piatto, per componenti più grandi risulta più complesso.

La durezza della martensite è direttamente correlata al contenuto di carbonio dell'acciaio. Martensite con durezza più elevata sarà più suscettibile al cracking dell'idrogeno. Quando si studia la saldatura di acciai è importante capire i concetti di durezza e temprabilità. La temprabilità è uno dei concetti più importanti relativamente agli acciai strutturali ed è semplicemente definito come la facilità con cui un determinato acciaio forma martensite. La massima durezza si ottiene quando si forma una struttura

·

completamente martensitica. Il diagramma CCT può fornire prove immediate della temprabilità di un acciaio.

Le curve CCT spostate più a destra (tempi più lunghi) indicano una maggiore temprabilità poiché la formazione di martensite al 100% può verificarsi a velocità di raffreddamento più basse rispetto a una minore temprabilità.

Una grana di grandi dimensioni farà rallentare la trasformazione in ferrite o perlite permettendo la formazione di martensite, aumentando così la durezza.

La ZTA degli acciai ha grani di grandi dimensioni, quindi la martensite si può facilmente formare in questa regione. Aumenti del contenuto di carbonio non solo aumentano la durezza della martensite ma anche svolgono un ruolo nell'aumento della temprabilità.

Infine, lo spessore dell'acciaio gioca indirettamente un ruolo nella temprabilità poiché influisce sulla velocità di raffreddamento.

Per evitare la formazione di martensite si eseguono dei trattamenti post-saldatura, come detto in precedenza, oppure si può eseguire il preriscaldamento che rallenta la velocità di raffreddamento per evitare la formazione di martensite al 100%: questo perché, dopo il preriscaldamento, la temperatura del metallo base circostante è più vicina alla temperatura di saldatura. Il preriscaldamento può anche aiutare a ridurre le sollecitazioni residue e la distorsione e ridurre il contenuto di idrogeno promuovendo la diffusione dell'idrogeno fuori dalla regione di saldatura. I diagrammi CCT possono essere utilizzati per stimare le velocità di raffreddamento desiderate con il preriscaldamento per evitare martensite.

Quando si studia la microstruttura della zona termicamente alterata, è importante considerare le temperature di picco che sono state raggiunte durante la saldatura. La porzione di ZTA (2) più vicina alla zona di fusione presenta temperature elevate nel campo della fase dell'austenite. Qui si formano i grani più grandi, aumentando la probabilità che si formi martensite: questo perché all'aumentare delle dimensioni del grano, ci vuole più tempo perché avvenga la trasformazione da austenite in ferrite o perlite. Questa regione è comunemente nota come ZTA a grana grossa (CGHAZ) ed è spesso la regione più suscettibile al cracking dell'idrogeno. Più lontano dalla zona fusa, le dimensioni del grano si riducono e la zona 4 è nota come ZTA a grana fine (FGHAZ).

Ancora più lontano (5) c'è una porzione di austenite nel campo di fase di ferrite. Questa porzione di ZTA può contenere una varietà di microstrutture, tra cui una potenziale miscela di ferrite, perlite e martensite. Questa regione viene spesso definita ZTA intercritica (ICHAZ).

Le velocità di raffreddamento delle saldature variano nella zona termicamente alterata: saranno più veloci più vicino alla zona di fusione, questo comporta un maggiore rischio di tempra.

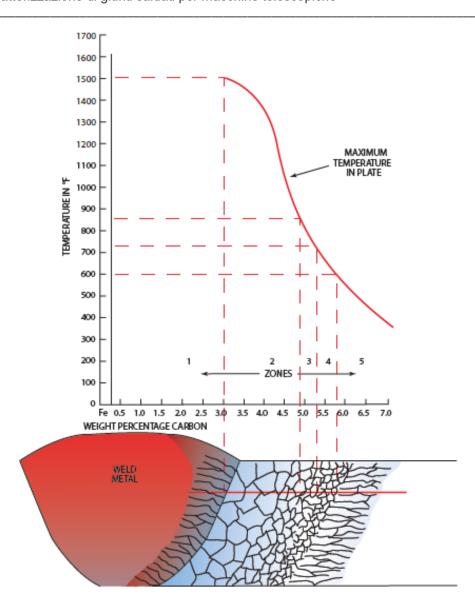


Figura 5.3. Microstruttura ZTA

5.2. Apporto termico

Come visto in precedenza, lo studio della microstruttura risulta essere molto importante, soprattutto nella zona termicamente alterata: questo perché la formazione di

martensite porta a temprare la zona in prossimità del cordone di saldatura e inevitabilmente a generare un indebolimento del giunto che può formare crepe o rotture.

Per riuscire a capire se il giunto è stato temprato o meno si fa riferimento alla durezza che si genera nella ZTA, sapendo che una riduzione della tenacità comporta un aumento della durezza.

Prima di arrivare a verificare la durezza si è andati ad analizzare una variabile che viene anche richiesta all'interno della normativa ISO 15614-1, l'apporto termico, poiché esso influisce sulla velocità di raffreddamento e perciò sulla formazione di martensite.

L'apporto termico è l'energia che la sorgente fornisce ai pezzi per unità di lunghezza e viene espresso dalla formula:

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ [kJ/mm]}$$

k = efficienza di trasmissione termica della sorgente

U = tensione [V]

I = intensità della corrente [A]

v = velocità di avanzamento [mm/s]

N° procedimento	Procedimento	Fattore &
121	Saldatura ad arco sommerso con filo elettrodo	1,0
111	Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti	0,8
131	Saldatura ad arco in gas inerte con filo elettrodo fusibile; saldatura MIG	0,8
135	Saldatura ad arco in gas protettivo attivo con filo elettrodo fusibile; saldatura MAG	0,8
114	Saldatura ad arco con filo elettrodo animato senza gas protettivo	0,8
136	Saldatura ad arco in gas protettivo attivo con filo elettrodo animato contenente flusso	0,8
137	Saldatura ad arco in gas inerte con filo elettrodo animato contenente flusso	0,8
138	Saldatura ad arco in gas protettivo attivo con filo elettrodo animato contenente polvere metallica	0,8
139	Saidatura ad arco in gas inerte con filo elettrodo animato contenente polvere metallica	8,0
141	Saldatura ad arco in gas inerte con elettrodo di tungsteno; saldatura TIG	0,6
15	Saldatura al plasma	0,6

Figura 5.4. Efficienza termica processi di saldatura

Maggiore è il valore dell'apporto termico specifico e più rilevante è la quantità di calore che il giunto deve smaltire, quindi il raffreddamento sarà più lento, con minore possibilità di incontrare le curve di inizio della trasformazione martensitica. A parità di altre condizioni il raddoppio di Q riduce ad un terzo la velocità di raffreddamento. Un altro aspetto importante da controllare quando si applica una sorgente di energia è la possibile formazione di tensioni residue, questo accade poiché le differenti zone del materiale sono vincolate ad altre zone che si trovano a differente temperatura; non potendosi dilatare e contrarre liberamente, sotto l'effetto dei gradienti termici si generano delle deformazioni plastiche localizzate ed il conseguente permanere di tensioni residue che possono assumere valori elevati.

La forma e la dimensione del giunto influiscono sulla severità del ciclo termico, questo perché il calore introdotto dal processo di saldatura trova sfogo principale per conduzione attraverso il materiale base, mentre la parte ceduta per convezione all'aria può essere comparativamente ignorata. A parità d'apporto termico specifico, il ciclo termico sarà tanto più severo quanto alto sarà lo spessore dei pezzi. La dispersione

termica è diversa, a parità di apporto termico, se il cordone di saldatura è eseguito sulla superficie del pezzo o costituisce una passata di riempimento oppure se il giunto è un testa a testa o un giunto a T come si vede nella figura 5.5.

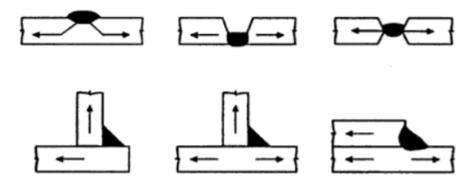


Figura 5.5. Influenza della forma del giunto

Un altro aspetto che influenza la velocità di raffreddamento è la temperatura del materiale di base, più è alta e minore sarà la severità del ciclo portando, però, ad avere un aumento della ZTA; per questo viene eseguito il preriscaldo. [16]

5.3. Tempo di raffreddamento t 8/5

Un altro parametro utile per la predizione del comportamento del giunto dopo la saldatura è il tempo di raffreddamento t_{8/5}, ovvero il tempo che il pezzo ci mette a passare da una temperatura di 800° C a 500° C. Questo intervallo di temperatura è molto importante poiché è quello in cui avviene l'inizio della trasformazione dell'austenite in martensite: maggiore è il tempo, minore sarà la possibilità di temprare il pezzo. Al contrario, però, un tempo troppo lungo porterà ad avere una grana grossa che tenderà a ridurre le caratteristiche meccaniche. Non esiste un intervallo di tempo ideale che

garantisca sicurezza per tutti i giunti, il calcolo di questo tempo è una predizione per definire un indicatore che possa aiutare a capire se si stanno utilizzando dei parametri in grado di fornire dei risultati di buona qualità nella saldatura.

5.3.1. Calcolo del tempo di raffreddamento

Il primo metodo per la definizione di questo parametro è l'utilizzo di alcune formulazioni, che presentano diversità sul tipo di flusso di calore e su alcune caratteristiche del processo.

 Flusso di calore tridimensionale e tempo di raffreddamento indipendente dallo spessore:

$$t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} x \left(\frac{1}{500 - To} - \frac{1}{800 - To} \right)$$

 Flusso di calore tridimensionale, tempo di raffreddamento indipendente dallo spessore e considera la forma:

$$t_{8/5} = (6700 - 5xTo)x Q x \left(\frac{1}{500 - To} - \frac{1}{800 - To}\right) x F3$$

 Flusso di calore bidimensionale e tempo di raffreddamento dipendente dallo spessore:

$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi\rho c d^2} x \left(\frac{1}{(500 - To)^2} - \frac{1}{(800 - To)^2} \right)$$

• Flusso di calore bidimensionale, tempo di raffreddamento dipende dallo spessore e considera la forma:

$$t_{8/5} = (4300 - 4.3\,To)x\,10^5 x \frac{Q^2}{d^2} x \left[(\frac{1}{500 - To})^2 - (\frac{1}{800 - To})^2 \right] x F2$$

Q = apporto termico specifico [KJ/mm]

d = spessore lamiera [mm]

To = temperatura iniziale lamiera [°C]

 λ = conducibilità termica [J/cm K s]

 ρ = densità [kg/m³]

c = capacità termica specifica [J/kg K]

F2= fattore di forma per flusso bidimensionale

F3 = fattore di forma per flusso tridimensionale

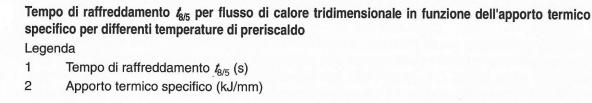
Forma della saldatura	Fattore	Fattore di forma				
	F ₂ flusso di calore bidimensionale	F ₃ flusso di calore tridimensionale				
Cordone su lamiera		1				
Tra le passate nelle saldature testa a testa	0,9	0,9				
Saldatura d'angolo a cordone singolo in giunto ad L	da 0,9 a 0,67	0,67				
Saldatura d'angolo a cordone singolo in giunto a T	da 0,45 a 0,67	0,67				

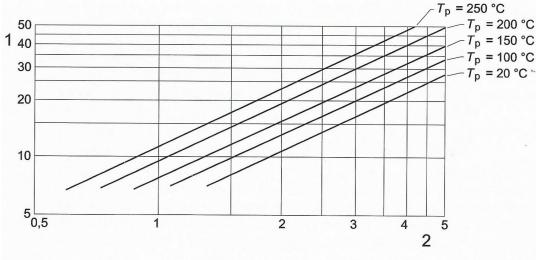
Figura 5.6. Fattore di forma in funzione della saldatura

5.3.2. Diagrammi per la definizione del tempo di raffreddamento

Un altro metodo per definire il tempo di raffreddamento è attraverso dei diagrammi che sono suddivisi in funzione del tipo di flusso di calore e contengono anche le informazioni relative al preriscaldo Tp. [17]

Flusso di calore tridimensionale:





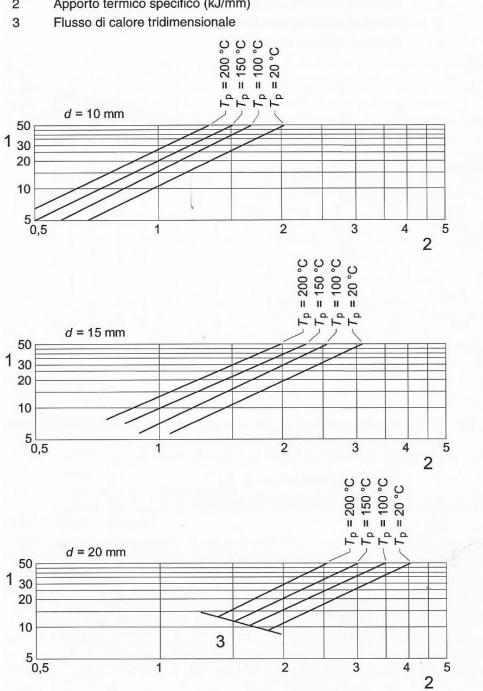
"Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

Flusso di calore bidimensionale in funzione dello spessore d:

Tempo di raffreddamento $\emph{t}_{8/5}$ per flusso di calore bidimensionale in funzione dell'apporto termico specifico per differenti temperature di preriscaldo

Legenda

- Tempo di raffreddamento $t_{8/5}$ (s) 1
- Apporto termico specifico (kJ/mm) 2



5.4. Formulazioni empiriche per la predizione della durezza

L'apporto termico e il tempo di raffreddamento sono due parametri interessanti per definire la possibile generazione di tempra durante un processo di saldatura, ma sono purtroppo solo indicativi e spesso poco attendibili per riuscire a basare una produzione su questi valori.

Per questo motivo si è continuato a cercare all'interno della letteratura un altro possibile metodo che potesse essere di riferimento per saldature di buona qualità. In alcuni articoli scientifici e nelle norme vengono citate delle formule di predizione di durezza che sono state studiate da più esperti.

I modelli di seguito presentati si basano sulle curve TTT e CCT precedentemente viste e su un database di prove sperimentali che ne ha determinato i coefficienti. In generale riescono a fornire dei valori attendibili nel caso in cui venga fornita la composizione reale del materiale e il tempo di raffreddamento reale.

Sono state pubblicate diverse formulazioni, qui di seguito andremo ad analizzare quelle che sono state maggiormente riconosciute.

5.4.1. Modello Suzuki

Il modello espresso da Suzuki nel 1984 è uno dei modelli di predizione della durezza nella ZTA che simula le curve CHC.

$$Hmax = Hbm + \frac{K}{1 + \exp(a(\log t \, 8/5 - Y))}$$

Hmax = durezza ZTA

Hbm= metallo di base

$$K = 269 + 454C - 36Si - 79Mn - 57Cu - 12Ni - 53Cr - 122Mo - 169Nb - 7089B$$

$$Hbm = 884C + 287 - K$$

$$aK = 478 + 3364C - 256Si + 66Ni - 408Mo - 1321V - 1559Nb$$

$$Y = -0.085 + 2.07C + 0.495Mn + 0.655Cu + 0.122Ni + 0.222Cr$$

Questo modello è per gli acciai basso legati e microlegati con un contenuto di carbonio compreso tra 0.017%-0.3%. [18]

5.4.2. Modello Terasaki 1

Terasaki propone due possibili formulazioni per la simulazione delle curve CHC. Il primo modello viene utilizzato per la predizione di durezza in acciai con contenuto di C compreso tra 0 e 0.6%. [19-20]

$$Hmax = Hv0 + (Hvm - Hv0) \exp\left(-0.2\left(\frac{t_{8\backslash 5}}{tm} - 1\right)\right)$$

Durezza con 100% martensite:

$$HVm = HV max = 812 * C + 293$$

Durezza con 0% martensite:

$$HV0 = 164 * \left(C + \frac{Si}{2} + \frac{Cr}{7} + \frac{Mo}{2} + V + Nb + 7 * B\right) + 153$$

Tempo di raffreddamento da 800°C a 500°C per 100% martensite:

$$Log \ tm = 2.5 * Ceq - 1.27$$

Carbonio equivalente:

$$Ceq = C + \frac{Mn}{3} + \frac{Cu}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{3} + 5 * B$$

5.4.3. Modello Terasaki 2

Il secondo metodo di predizione della durezza di Terasaki è stato formulato per acciai con una composizione di carbonio compresa tra 0-0.26 %C. [19-20]

$$Hv = (Hvm - Hv0)\exp(-0.05\left((t_{\frac{8}{5}} - t_{\mu})^{A}\right) + Hv0$$

Durezza 100% martensite:

$$Hvm = 812C + 293$$

Durezza 0% martensite:

$$Hv0 = 293C + 47Mn + 48Si + 44Cr + 91Mo + 8Ni + 165V + Cu + 95Nb + 794B + 87$$

Costante A e tµ:

$$A = 5.1C + 1.7Si - 0.39Mn + 0.6Ni - 1.3Cr - 0.8Mo + 6.4V + 3Ni - 45B + 0.29$$

$$Log(t_{\mu}) = 0.83 \arctan(8C) + 0.6Mn + 0.38Ni + 0.73Cr + 0.76Mo + 0.65Cu + 150B - 1.505$$

5.4.4. Modello Yurioka 1

La terza formulazione di predizione della durezza analizzata è divisa in due modelli: il primo per acciai basso legati, mentre il secondo per acciai alto legati.[21-22]

Il metodo di Yurioka prende in considerazione il calcolo di Carbonio equivalenti e non solo uno come nel caso precedente.

$$Hv = 406C + 164 C_{eq1} + 183 - (369C - 149C_{eq1} + 100) * \arctan(y)$$
$$y = \frac{Log \ t_{8/5} - 2.822C_{eq2} + 0.262}{0.526 - 0.195C_{eq2}}$$

Carbonio equivalente 1:

$$C_{eq1} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{5} + 10B + \frac{Cr}{6}$$

Carbonio equivalente 2:

$$C_{eq2} = C - \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{5} + \frac{Ni}{20} + \frac{Mo}{6} + \frac{Cr}{4} + 10B$$

·

Questa formulazione può essere utilizzata con contenuti di carbonio compresi tra 0 e 0.6%.

5.4.5. Modello Yurioka 2

Questo tipo di formulazione è prevalentemente utilizzato nel caso di acciai alto legati e con contenuto di carbonio compreso tra 0 e 0.8%. [22]

$$Hvmax = 220 + 442C(1 - 0.3C^{2}) + 65 Tan y$$

$$+ (68 + 402C(1 - 0.3C^{2}) - 59 Tanh y) \arctan x$$

$$x = \frac{Log t_{8/5} - 2.3C_{eq1} - 1.35C_{eq3} + 0.882}{1.15 C_{eq1} - 0.673C_{eq3} - 0.601}$$

$$y = 2.65C_{eq2} - 0.69$$

Carbonio equivalente 1:

$$C_{eq1} = Cp + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr(1 - 0.16\sqrt{Cr})}{8} + \frac{Mo}{4} + \Delta H$$

Carbonio equivalente 2:

$$C_{eq2} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3}$$

Carbonio equivalente 3:

$$C_{eq3} = Cp + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}$$

Cp= carbonio effettivo

Cp=C se C \leq 0.3%

Cp = 0.25 + C/6 se C > 0.3%

ΔH è l'aumento di durezza dovuto alla presenza del Boro (B):

Boron Content (ppm)	ΔH value
≤1	0
=2	0.03
=3	0.06
≥4	0.09

5.5. Prove sperimentali

Conoscendo a questo punto la teoria che governa la predizione della durezza nella ZTA di un processo di saldatura, si è andati ad eseguire delle prove sperimentali su alcuni provini per capire se queste formule potevano essere utilizzate, all'interno dell'azienda, per la determinazione della durezza e, quindi, della possibile formazione di martensite.

Come prima cosa è stato necessario definire il tipo di provino sul quale eseguire le prove sperimentali e, per semplicità, è stato deciso di eseguire un "bead on plate", ovvero un semplice cordone di saldatura su una piastra.

Sono stati utilizzati i materiali principalmente saldati nell'azienda, cioè un S235JR e un S650MC.

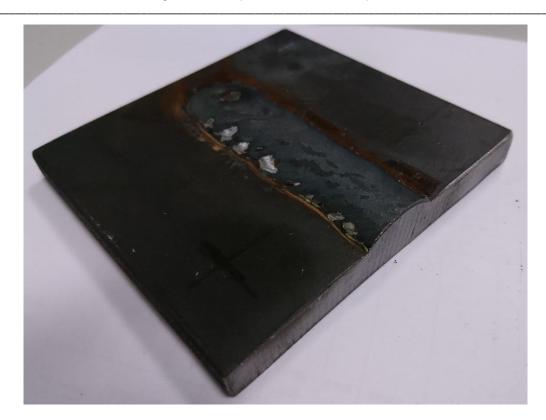


Figura 5.7. Provino prove sperimentali

La prima serie di prove è stata eseguita sul S235JR procedendo con due serie di test: la prima andando a variare la velocità di avanzamento ma mantenendo costanti gli altri parametri; mentre nel secondo caso sono state modificate la corrente e la tensione mantenendo, invece, costante la velocità; in entrambi i casi questo è stato fatto per generare una variazione dell'apporto termico.

Dopo aver calcolato l'apporto termico con i parametri definiti si è andati a calcolare il tempo di raffreddamento $t_{8/5}$ visto precedentemente, ottenendo:

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

													Temp	o t 8/5
	I	U	٧	k	Q	Тр	Tipo flusso	λ	T0	ρ	С	t	D.3	D.4
1a serie test	Α	V	mm/s		KJ/mm	°C	TIPO HUSSO	J/mm K s	K	g/mm3	J/g K	mm	S	S
Test 1	330	28	3	0,8	2,46	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	64,35	69,28
Test 2	330	28	4,19	0,8	1,76	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	32,93	35,45
Test 3	330	28	6,84	0,8	1,08	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	12,37	13,32
Test 4	330	28	10,00	0,8	0,74	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	5,79	6,23
2a serie test														
Test 5	200	16,7	2,89	0,8	0,92	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	9,07	9,76
Test 6	230	19,4	2,83	0,8	1,26	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	16,91	18,20
Test 7	260	23,2	3,17	0,8	1,52	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	24,55	26,43
Test 8	290	25,9	2,83	0,8	2,13	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	47,91	51,58
Test 9	320	27,7	2,83	0,8	2,51	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	10	66,73	71,84

Come visto nella teoria precedente, per riuscire ad ottenere dei risultati attendibili per la predizione di durezza è necessario conoscere la composizione dell'acciaio; per fare ciò sono stati richiesti i certificati delle colate del materiale ottenendo i seguenti valori:

Materiale	С	Mn	Si	Cr	Cu	Мо	V	Ni	В	N
S235 JR	0,089	0,428	0,016		0,018					0,012
max	0,17	1,4			0,4					0,012

Conoscendo la composizione sono stati calcolati, per l'acciaio S235JR, tutti i parametri necessari per il calcolo della durezza:

Materiale	CE*	CE1	CE2	CE3	Pv	Pcm	tnb	tnm	Y5	K	H∞	αΚ	α	Ceq 1	Ceq 2
S235 JR	0,146	0,1622	0,1771	0,2088	0,2362	0,1118	0,0459	7,6484	0,3049	252,95	109,17	736,27	2,9108	0,1622	0,1777

Dopo aver inserito le formule nell'Excel abbiamo ottenuto i seguenti valori:

			Т	erasaki n	nod 1			Terasal	ci m	od 2		Suz	zuki		Yı	urioka	
	Q	Log tm	tm	H0	HVM	HVt	Hv0	Hvm	Α	Logt	Hvt2	Hbm	Hvs	х1	HV mod	Arctan	HV mod 1
1a serie test	KJ/mm																
Test 1	2,46	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	255,2	143,0	145,9	-3,7	132,2	3,3	107,4
Test 2	1,76	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	284,4	143,0	149,6	-3,2	136,3	2,7	114,0
Test 3	1,08	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	316,5	143,0	164,3	-2,4	144,9	1,8	130,1
Test 4	0,74	-0,7	0,2	168,9	365,3	169,5	134,0	365,3	0,6	-0,7	333,4	143,0	192,0	-1,8	155,7	1,1	153,7
2a serie test																	
Test 5	0,92	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	324,2	143,0	173,3	-2,2	148,8	1,5	138,1
Test 6	1,26	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	307,6	143,0	157,8	-2,7	141,7	2,1	123,8
Test 7	1,52	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	295,4	143,0	152,4	-3,0	138,4	2,4	117,8
Test 8	2,13	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	268,7	143,0	147,1	-3,5	133,9	3,0	110,0
Test 9	2,51	-0,7	0,2	168,9	365,3	168,9	134,0	365,3	0,6	-0,7	253,5	143,0	145,7	-3,8	132,0	3,3	107,1

Lo stesso procedimento è stato eseguito per l'acciaio S650MC, in questo caso è stata effettuata solo una serie di test in cui si variava la velocità di avanzamento.

													Tempo	T8/5
	- 1	U	V	k	Q	Тр	Tipo flusso	λ	T0	ρ	С	t	D.3	D.4
	Α	V	mm/s		KJ/mm	°C	Tipo Husso	J/mmKs	K	g/mm3	J/g K	mm	S	S
Test 10	320	26,5	3,10	0,8	2,19	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	8	79,56	85,65
Test 11	320	26,5	3,94	0,8	1,72	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	8	49,11	52,87
Test 12	320	26,5	5,20	0,8	1,30	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	8	28,19	30,35
Test 13	320	26,5	8,67	0,8	0,78	21	Bidimensionale	0,052	293	0,0078	0,502	8	10,15	10,92

Dal certificato di colata del materiale abbiamo ottenuto i seguenti valori:

Materiale	С	Mn	Si	Cr	Cu	Мо	V	Ni	В	N
S650MC	0,055	1,832	0,03	0,041	0,016	0,006	0,007		1E-04	0,012
max	0,12	2	0,5		0,4	0,5	0,2		0,005	0,012

Successivamente abbiamo eseguito i calcoli per la durezza:

Materiale	CE*	CE1	CE2	CE3	Pv	Pcm	tnb	tnm	Y5	K	H∞	αΚ	α	Ceq 1	Ceq 2
S650MC	0,3	0,37	0,436	0,574	0,676	0,152	0,417	73,75	0,821	150,9	182,49	432,45	2,865	0,373	0,436

			1	erasaki	Mod1	•		Tera	saki N	lod2		Su	zuki		Yur	ioka	
	Q	Log tm	tm	H0	HVM	HVt	Hv0	Hvm	Α	Logt	Hvt2	Hbm	Hvs	x1	HV mod 2	Arctan	HV mod 1
	KJ/mm																
Test 10	2,19	0,42	2,63	260,00	337,66	260,14	194,25	337,66	-0,06	0,07	332,22	260,00	266,00	-2,11	202,53	2,19	192,70
Test 11	1,72	0,42	2,63	260,00	337,66	261,71	194,25	337,66	-0,06	0,07	332,07	260,00	270,59	-1,74	207,53	1,71	199,14
Test 12	1,30	0,42	2,63	260,00	337,66	269,46	194,25	337,66	-0,06	0,07	331,89	260,00	279,75	-1,31	215,69	1,17	210,80
Test 13	0,78	0,42	2,63	260,00	337,66	301,36	194,25	337,66	-0,06	0,07	331,51	260,00	312,71	-0,52	243,23	0,16	256,26

Una volta formulati i calcoli sono stati eseguiti i provini: il processo è stato fatto da un saldatore manuale al quale venivano imposti i parametri di corrente e tensione, successivamente cronometrando il tempo di esecuzione del cordone veniva calcolata la velocità di avanzamento.

Una volta eseguite le saldature sulle piastre sono stati tagliati i provini al centro del cordone per eseguire le prove di durezza. La normativa richiederebbe di ottenere una durezza Vickers; nei laboratori aziendali era presente soltanto un durometro Brinnell che è stato utilizzato per l'esecuzione delle prove e i valori ottenuti sono poi stati convertiti in durezza HV (Vickers).



Figura 5.8. Prove di durezza



Figura 5.9. Durometro Brinell

5.5.1. Risultati

Per ogni provino ottenuto dalla piastra sono state eseguite 7 impronte equamente distanziate l'una dall'altra per evitare di alterare i valori.

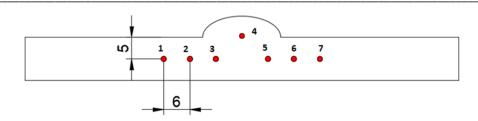


Figura 5.10. Serie impronte sul provino

Le impronte di maggiore interesse sono quelle in prossimità del cordone, ovvero quelle che risultano essere nella zona termicamente alterata; come sappiamo, a seconda dell'apporto termico, la ZTA potrà essere più o meno grande perciò le due impronte potranno trovarsi entrambe all'interno oppure soltanto una.

Per riuscire a disporre le impronte il più possibile nella zona interessata, si è andati ad eseguire sul provino una lucidatura e un attacco acido con un Nital 5 che ci ha permesso di evidenziare bene la zona termicamente alterata.



Figura 5.11. Provino con attacco acido

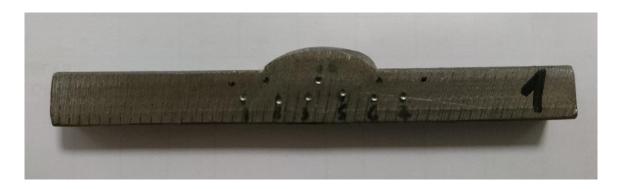


Figura 5.12. Prove di durezza sul provino

Successivamente sono state eseguite le prove sul durometro e sono stati registrati i risultati.

Nel caso del S235JR abbiamo ottenuto:

	Q	Pro	va 1	Pro	va 2	Pro	va 3	Pro	va 4	Pro	va 5	Pro	va 6	Pro	va 7
	KJ/mm	НВ	HV												
Test 1	2,46	157	164	137	144	150	157	177	179	152	159	153	160	150	157
Test 2	1,76	151	158	150	157	150	157	192	202	159	167	150	157	144	151
Test 3	1,08	144	151	137	144	157	165	197	207	160	168	132	139	135	142
Test 4	0,74	132	139	129	136	143	150	221	232	144	151	144	151	141	148
Test 5	0,92	133	140	139	146	148	155	210	219	153	160	135	142	135	142
Test 6	1,26	150	157	153	160	167	175	188	198	151	158	147	154	148	155
Test 7	1,52	141	148	165	173	149	156	168	192	161	169	151	158	137	144
Test 8	2,13	130	137	132	139	146	153	179	188	144	150	143	150	146	153
Test 9	2,51	150	157	155	162	146	153	173	182	157	164	158	166	143	150

Il materiale di base, prima dell'esecuzione della saldatura, presentava dei valori di durezza pari a: 136 HB, 134 HB, 139 HB.



Figura 5.13. Provini test su S235JR

Nella seconda analisi con l'acciaio S650MC sono stati ottenuti:

	Q	Pro	va 1	Pro	va 2	Pro	va 3	Pro	va 4	Pro	va 5	Pro	va 6	Pro	va 7
	KJ/mm	НВ	HV												
Test 1	2,19	283	298	209	220	225	237	241	253	233	245	251	264	264	279
Test 2	1,72	258	272	242	254	221	232	237	266	223	234	243	255	259	273
Test 3	1,30	281	296	268	283	219	230	233	245	230	242	258	272	274	289
Test 4	0,78	225	237	288	304	245	257	229	241	287	303	272	287	250	263

In questo caso il materiale di base presentava dei valori, prima della saldatura, pari a: 243 HB, 250 HB, 252 HB.

5.5.2. Conclusioni

Una volta acquisiti tutti i dati di durezza dalle prove sperimentali, li abbiamo confrontati con i valori ottenuti dalle formule di predizione.

Dalle prove eseguite sul S235JR abbiamo ottenuto:

	Q	HV ter 1	HV ter 2	HV suz	HV yur 2	LIV/ your 1	•		In	npront	a	•	
	KJ/mm	nv ter 1	nv ter z	nv suz	nv yur z	HV yur 1	1	2	3	4	5	6	7
Test 1	2,46	168,91	255,20	145,86	132,22	107,39	164	144	157	179	159	160	157
Test 2	1,76	168,91	284,39	149,58	136,26	114,02	158	157	157	202	167	157	151
Test 3	1,08	168,91	316,50	164,32	144,94	130,11	151	144	165	207	168	139	142
Test 4	0,74	169,53	333,42	192,00	155,71	153,74	139	136	150	232	151	151	148
Test 5	0,92	168,93	324,17	173,35	148,77	138,05	140	146	155	219	160	142	142
Test 6	1,26	168,91	307,61	157,77	141,70	123,78	157	160	175	198	158	154	155
Test 7	1,52	168,91	295,36	152,43	138,45	117,82	148	173	156	192	169	158	144
Test 8	2,13	168,91	268,72	147,14	133,86	110,02	137	139	153	188	150	150	153
Test 9	2,51	168,91	253,47	145,74	132,03	107,09	157	162	153	182	164	166	150

A primo impatto si nota subito come i valori delle impronte non abbiano un andamento uniforme: questo, come già detto, è dovuto al fatto che il durometro Brinell rispetto al Vickers presenta una punta più grossa, rendendo così più difficile riuscire a eseguire la prova di durezza sempre nello stesso punto della ZTA. Ciò risulta essere evidente nel test 4 dove, come si può notare, l'andamento delle impronte 3 e 5, ovvero quelle nella zona termicamente alterata, abbiano un andamento crescente: la riduzione dell'apporto termico porta, infatti, ad un ciclo più severo e, quindi, ad una formazione di maggiore martensite; ma nel test 4 il risultato decrementa notevolmente: questo è dovuto al fatto che, essendo minore l'apporto termico, la ZTA sarà molto inferiore con una maggiore difficoltà nel riuscire a generare l'impronta nella zona interessata.

Questo fenomeno si nota ancora di più nell'impronta 6: quando abbiamo un Q elevato il valore è di 160HV e ciò è dovuto al fatto che la ZTA è molto grossa mentre, diminuendo il valore di apporto termico, la durezza diminuisce notevolmente; ciò implica che l'impronta sia uscita dall'area influenzata dal processo.

Analizzando invece i valori teorici ottenuti notiamo subito come, nel modello di Terasaki 1, il valore resta costante: questo è dovuto al fatto che la formula dipende dalla percentuale di carbonio e, nel caso del S235JR, risulta essere molto bassa portando ad un non corretto funzionamento della formulazione.

Per quanto riguarda invece il secondo modello di Terasaki si presenta una sovrastima rispetto ai valori riscontrati: ciò è dovuto al fatto che questo tipo di formulazione è tendenzialmente più adatta ad acciai con elementi come Cromo, Molibdeno, Vanadio e Boro.

Il metodo Suzuki invece è il modello che più si avvicina ai valori ottenuti nella zona termicamente alterata, perché viene utilizzato maggiormente per acciai basso legati. Gli unici valori che risultano essere distanti rispetto al valore teorico sono quelli del test 4 e 5 perché, come precedentemente detto, è stato problematico con la punta del durometro riuscire a centrare la ZTA.

Entrambi i modelli di Yurioka tendono a sottostimare i valori sperimentali, in questo modello vengono considerati più carboni equivalenti che contengono molti elementi leganti non presenti in questo acciaio.

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

Nel caso invece del S650MC:

	Q	U\/ +or 1	Un tor 2	Hyguan	U\/ \	⊔\ <i>/</i>			In	npron	te		
	KJ/mm	nv ter 1	nv ter z	nv suzu	HV yur 2	nv yur 1	1	2	3	4	5	6	7
Test 10	2,19	260,14	332,22	266,00	202,53	192,70	298	220	237	253	245	264	279
Test 11	1,72	261,71	332,07	270,59	207,53	199,14	272	254	232	266	234	255	273
Test 12	1,30	269,46	331,89	279,75	215,69	210,80	296	283	230	245	242	272	289
Test 13	0,78	301,36	331,51	312,71	243,23	256,26	237	304	257	241	303	287	263

In questo caso è maggiormente evidente come, al variare dell'apporto termico, la zona termicamente alterata varia nella sua dimensione; le durezze delle due impronte in prossimità del cordone (2,3-5,6) aumentano al diminuire dell'apporto perché si esegue un ciclo termico più severo.

Allo stesso tempo, rispetto al caso precedente, si nota però che le impronte più lontane dal centro del cordone presentano anch'esse dei valori abbastanza alti: questo è dovuto al fatto che, nel test 10, l'apporto termico risulta essere molto elevato e porta ad avere un ingrossamento dei grani nella ZTA.

Si nota comunque come, anche con valori di apporto termico molto severi, il valore della durezza riscontrata non superi mai i 304 Hv circa.

Analizzando invece i modelli teorici visti in precedenza, la formula di Terasaki 2 tende ad un valore costante.

Per quanto riguarda il primo modello di Terasaki, i risultati sono molto vicini ai valori ottenuti soprattutto per quanto riguarda i test 11,12,13: questa formulazione tende, infatti, a funzionare meglio con una presenza maggiore di %C.

Come già visto nel caso del S235JR, anche in questo il modello di Suzuki di predizione riesce a fornire dei valori teorici molto prossimi ai valori realmente ottenuti.

I due metodi di Yurioka, invece, come nel caso precedente, tendono entrambi a sottostimare il valore di durezza: si pensa sia dovuto al fatto che considerano molti elementi leganti per il calcolo del carbonio equivalente.



Figura 5.14. Grafico andamento durezza S650MC

Dal grafico si nota come la ZTA abbia una durezza maggiore rispetto al centro del cordone, questo perché si genera una microstruttura con caratteristiche differenti e composizione diversa.

Si evidenzia anche come la zona termicamente alterata si avvicini all'asse delle ordinate al diminuire dell'apporto termico.

Poiché tutte le formule di durezza dipendevano dal tempo $t_{8/5}$, si è provato a determinare questo tempo sperimentalmente misurandolo con una sonda K: il problema si è generato nell'acquisizione dei dati poiché la sensibilità della sonda non era tale da riuscire a eseguire la misurazione dell'intero intervallo da 800° C a 500° C.

Concludendo, come già analizzato nella letteratura, queste formule di predizione sono state maggiormente studiate per gli acciai alto legati e meno per gli acciai strutturali come quelli utilizzati maggiormente in azienda. Questo lavoro, come detto in precedenza, è stato fatto per verificare se i materiali utilizzati in azienda rischiassero di subire un effetto di tempra nella ZTA e per verificare se queste formule potessero essere utilizzate come indice per capire se un determinato valore di apporto termico fosse pericoloso durante il processo di saldatura.

I test hanno confermato la teoria esposta in precedenza, ovvero che questi acciai strutturali non presentano particolari rischi nella formazione di martensite nella ZTA poiché, pur avendo dei cicli termici molto severi, il contenuto di carbonio risulta essere molto basso e ciò limita il passaggio dell'austenite in martensite. Tutti i valori ottenuti sono risultati essere inferiori al valore limite imposto dalla normativa ISO 15614 che risulta essere pari a 380 HV.

Per quanto riguarda invece le formule di predizione, alcuni modelli sono risultati poco attendibili con i materiali utilizzati in azienda; mentre altri modelli, come quello di Suzuki e di Terasaki 1, sono risultati essere un buono strumento per capire se dei determinati parametri utilizzati su un materiale possono generare degli effetti di tempra. In più bisogna considerare che il tempo di raffreddamento è stato stimato con le formule della normativa perciò questo introduce un'imprecisione nella definizione di esso.

Capitolo 6

Certificazione

Individuati i giunti aziendali e i relativi patentini per gli operatori, si è iniziata la fase di certificazione del processo secondo la normativa ISO 15614.

Dopo aver stilato la lista dei giunti che vengono prodotti in azienda, abbiamo deciso di suddividere la certificazione in tre gruppi temporali differenti: nel gruppo verde i giunti maggiormente critici da certificare subito, nei gialli quelli importanti ma che verranno certificati in un secondo momento e nei rossi quelli di minor importanza che saranno certificati per ultimi.

Le tre fasi sono state divise equamente, in totale i giunti da certificare sono 31.

Per la prima fase di certificazione sono stati scelti 10 giunti di cui 8 con processo automatizzato e 2 manuali.

La seconda fase è costituita da 10 giunti di cui 4 con processo automatizzato e 6 con processo manuale.

L'ultima fase comprende invece i giunti di minor criticità, è costituita da 11 giunti di cui 3 con processo automatizzato, 6 con processo manuale e 2 con processo meccanizzato.

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

N giunto			Tipo di giunto	Caratteristic he giunto	Mat base	Tipo di materiale d'apporto	Passata	Penetrazion e	Modo di trasferimen to	Livello di automazione
1	19/001/p	FW1R	1	Piastra- piastra t1,t2=12	S700MC (2.2)	Pittarc G 62	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
2	19/002/p	FW 2 R	1	Piastra- piastra t1,t2=36	5355J2 (1)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
3	19/003/p	FW 3 R	1	Piastra- piastra t1= 18, t2=12	Piastra 1: S355J2(1) Piastra 2: S700MC(2)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
4	19/004/p	BW 1 R	1 2	Piastra- piastra t1,t2=10	1: S355J2 (1) 2: S700MC (2)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
5	19/005/p	BW P.3 R	D ti	t1=12,t2=1 4,D=72	Piastra: S700MC(2) Boccola: S355J2 (1)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
6	19/006/p	FW P.1 R	12 0 (11	t1=12, t2=18,D=72	Piastra: S700MC (2) Boccola: S355J2 (1)	Sidergas G4 Si1	Singola	Parziale	Spray arc	Robot
7	19/007/p	TW P.6	a a	t1=24, t2=12, D=168 Pezzo di produzione	Camera: E355 (1) Culatta(piastra): S355 J2 (1)	Sidergas G4 Si1	Multipla	Parziale	Spray arc	Robot

8	19/008/p	BW P.7		D=t1=t2=84 Pezzo di produzione	Tondo: C45E (11) Tondo: S355J2 (1)	Sidergas G4 Si1	Multipla	Parziale	Spray arc	Robot
9	19/009/p	FW 1 M	1	Piastra - piastra t1,t2=12	\$700MC (2)	Pittarc G 62	Singola	Parziale	Spray arc	Parzialmente meccanizzata
10	19/010/p	FW 4 M	1	Piastra - Piastra t1= 18, t2=12	Piastra 1: S355J2 (1) Piastra 2: S700MC (2)	Sidergas G4 Si1	Multipla	Parziale	Spray arc	Parzialmente meccanizzata

Figura 6.1. Giunti da certificare prima fase

Si è iniziato quindi a lavorare sui giunti di maggiore importanza ovvero i verdi: per questi giunti la normativa richiedeva la PWPS, la specifica di saldatura preliminare nella quale viene descritto come deve essere eseguito il giunto e le caratteristiche che presenta.

All'interno di questo documento vengono espresse tutte le variabili che sono descritte nella normativa UNI ISO 15614, questa procedura una volta certificata sarà molto importante ai fini produttivi poiché descriverà come un giunto dovrà essere eseguito per far sì che rispetti i livelli di accettabilità prestabiliti.

MERLO				pWPS						19/009
	ME	KLU	SPECIFICA DI PROCEDURA DI SALDATURA PRELIMINARE PRELIMINARY WELDIN PROCEDURE SPECIFICATION				FICATION	WPAR/PQR N°		
				N	orma L	INI EN I	SO 15609	-1	Data	17/04/2019
Welding p	(i) di saldatura rocess(es) TO/JOINT			135	V-129-5-7		Tipo di pro		almente mecca	nizzato
Tipo di gi		F	W - Sa	ildatura d	d'angolo		Schizze	o del giunto	Giunto tipo	FW - Saldatura d'angolo
Type of ba	ateriale di sostegno acking material one saldatura	6						Sp B		T d dilgolo
Weld prep Metodo di	aration i pre.ne e pulizia	Lembi retti Pulizia						$\vdash \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \!$		
method of Altro Other	prep & cleaning	-		T GIIZIG						
	ERIALE DI BASE / PA	ARENT METAL	1000	SERVE !						
Materiale	A Tipo	S 700	OMC UN	NI EN 10	149					
	range esterno A	10		Gruppo N Group N°.	°2					
Outside di Materiale		S 70	0MC U	NI EN 10	149					
Spessore Thickness	range	10		Gruppo N Group N°.	°. 2		5		a	Sp A
Outside di Altro	esterno B iameter									
Other MATE	ERIALE D'APPORTO	/ WELDING CON	SUMABL	.ES	CING ID	5000	> TRATTA	MENTO TERMICO) / HEAT TREATME	ENT
Norma No Specificati			EN I	SO 1683	34 -A		Temperatura			
Designazi		9=		200 4 140	4		Temperature Tempo di ma	ntenimento		
Classificat		9		662 4 M2	:1		time Altro			
size	ini			1.2 mm			Other			
Nome Cor Trade Nan	mmerciale	-		GTH			> GAS			
	di saldatura			a = 7 mm	ı			Gas	Miscela %	Portata [l/min]
Costrutto Manufactu Altro				Pittarc			Protezione shielding Rovescio	Ar + O ₂	96.5 + 3.5	20-22
Other	ZIONE DI SALDATUF	A / WEI DING BO	MOITISE	AND SALVES	(19) E.M.U.I.		backing	ALDO / PREHEA	-	
Posizione Position		(A) WEEDING! C	OITION	РВ				di preriscaldo	>5° (
Welding p	ione di saldatura rogression							fra le passate perature	NA	
Altro Other									-	
TECN	ICA / TECNIQUE		100		Name of		Diametro del	l'ugello	CONTRACTOR OF THE PARTY OF	
Mode of m	netal transfer			Spray are	0		Orifice or gas	cup size	15 m	m
Distanza : Distance d				15 mm			Pendolament (amp, freq, so			
Distance contact tube Tipo cordone Type of bead Angolo e direzione torcia Torch direction of welding		-	Passata singola				Solcatura a r	ovéscio	-	
			22 ° a spingere				Method of bac Pulizia fra le Interpass & fi	passate		
- PARTIC	COLARI DI SALDATU	JRA / WELDING D	ETAILS	H (1204		(CSC USEC	N. J. Wallet		City and Charles	
Passate	Procedimento	Dimensioni Parametri di saldatura			Tipo di	Vel. alimentazione filo	Vel. Avanzamento	Apporto termico		
No.	saldatura	mat apporto	I [A]	Toll. I	v [v]	Toll. V [V]	corrente	[m/min]	[mm/s]	[kJ/mm]
1	135	1.2	315	±10	26.6	±1	DC/EP	10.8	4.3	1.52
			-							

Figura 6.2. Documento pWPS

Per ogni giunto è stata eseguita la pWPS, la quale contiene anche le informazioni relative ai parametri di saldatura che sono stati scelti in funzione di quelli che vengono utilizzati in azienda. Questo è stato fatto per verificare se i parametri aziendali

·

garantissero una buona qualità e per fare in modo che si riuscisse a qualificare i parametri usati nella produzione.

6.1. Provini preliminari

Prima di eseguire i provini con l'ente certificatore, abbiamo eseguito dei provini preliminari per capire se i parametri impostati per l'esecuzione dei giunti da certificare non creassero problemi.

Per fare questo tutti i giunti sono stati realizzati seguendo la pWPS di riferimento e utilizzando i seguenti parametri:

n\A/DC	I	U	V	k	Q
pWPS	Α	V	mm/s		KJ/mm
19/001/p	300	24,5	3	0,8	1,96
19/002/p	310	25,5	3	0,8	2,11
19/003/p	360	27,4	5,2	0,8	1,52
19/004/p	310	25,5	3	0,8	2,11
19/005/p	300	24,1	3	0,8	1,93
19/006/p	330	29,2	5,5	0,8	1,40
19/007/p	340	27,2	4	0,8	1,85
19/008/p	300	29	10,2	0,8	0,68
	290	28,5	9,4	0,8	0,70
	290	28,5	9,2	0,8	0,72
	280	28	8,6	0,8	0,73
	280	28	8,8	0,8	0,71
	280	28	8,7	0,8	0,72
19/009/p	340	28	4	0,8	1,90
19/010/p	320	29,5	5	0,8	1,51
	320	29,5	5	0,8	1,51
	320	29,5	5	0,8	1,51

Tabella 6.1. Parametri preliminari

Questi parametri, come detto in precedenza, sono stati definiti in funzione di quelli che vengono utilizzati in azienda; si sono presi dei giunti aziendali che avessero le stesse caratteristiche del provino e si sono utilizzati i parametri.

Una volta effettuati i provini, sono state eseguite delle macro per analizzare come effettivamente avesse lavorato il processo.

• pWPS 19/001



Figura 6.3. Provino 19/001

La macro nel primo giunto ha evidenziato un'ottima penetrazione al vertice, per questo non sono state applicate delle modifiche ai parametri.

• pWPS 19/002

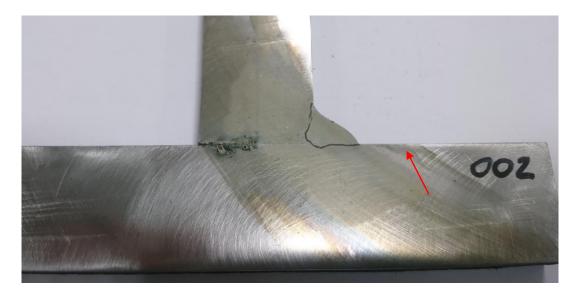


Figura 6.4. Provino 19/002

Nel secondo provino si è evidenziato come la penetrazione non fosse particolarmente profonda e in più ci fosse un lato incollato. Per cercare di ovviare a questi problemi si è andati ad aumentare la tensione e la corrente per aumentare la temperatura del bagno fuso.

• pWPS 19/003



Figura 6.5. Provino 19/003

Nel terzo provino si evidenzia come, anche in questo caso, la penetrazione al vertice non fosse sufficiente e come nel caso precedente ci fosse un lato incollato. Si è provato, perciò, a modificare i parametri rallentando la velocità di avanzamento.

• pWPS 19/004



Figura 6.6. Provino 19/004

In questo testa a testa si nota come in entrambe le piastre ci sia stata una buona penetrazione, ma il cordone di saldatura risulta essere troppo alto per la normativa e questo è stato modificato diminuendo la velocità di avanzamento del filo.

·

• pWPS 19/005



Figura 6.7. Provino 19/005

In questo giunto formato da una boccola e una piastra, si nota come si sia generato un vuoto al vertice e come un lato della saldatura sia incollato. Per cercare di migliorare questi difetti si è aumentata la tensione e la corrente per ottenere una maggiore penetrazione e si è modificata la posizione della torcia.

• pWPS 19/006



Figura 6.8. Provino 19/006

·

Nella macro del sesto provino si è evidenziata un'incollatura sulla boccola e una penetrazione al vertice scarsa. Per riuscire a migliorare il processo è stata diminuita la velocità di avanzamento.

• pWPS 19/007

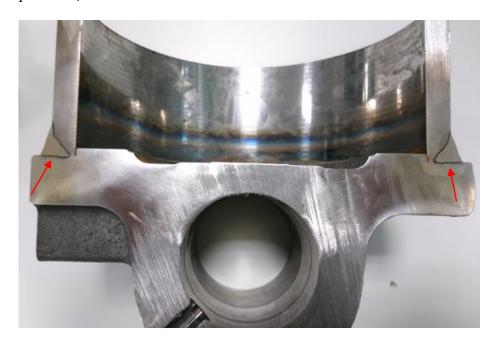
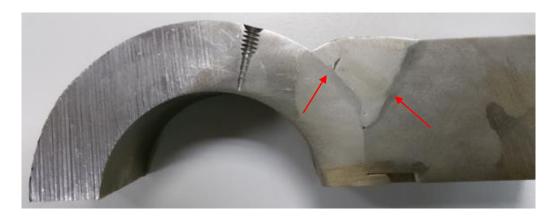


Figura 6.9. Provino 19/007

Nel provino della camera si è visto come i due lati del cordone a contatto con la culatta non fossero fusi ma ci fosse un'incollatura.

• pWPS 19/008



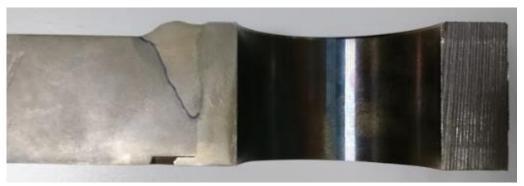


Figura 6.10. Provino 19/008

Nelle macro dello stelo si sono evidenziati alcuni difetti, nella figura 6.10. vi è un'inclusione probabilmente dovuta a dello sporco presente sui componenti e l'altro difetto molto importante è l'incollatura presente sul lato dello stelo.

Per riuscire ad ottenere delle saldature di qualità superiore e eliminare i difetti visti in questi provini preliminari si è deciso di effettuare altri provini eseguendo su essi alcuni cordoni con diversi parametri. Questo tipo di lavoro è stato eseguito su tutti i giunti

esclusi quelli dei martinetti poiché, essendo pezzi di produzione, non si è riusciti a creare saldature con diversi parametri per verificare quale garantisse i risultati migliori.



Figura 6.11. Prove con diversi parametri su giunto a T

I singoli cordoni sono poi stati analizzati eseguendo delle macro per verificare quale dei parametri riuscisse a garantire le migliori caratteristiche. In seguito abbiamo definito i parametri considerati ottimali per superare i test per la certificazione.

S. Russo "Studio e caratterizzazione di giunti saldati per macchine telescopiche"

n)A/DC	I	U	V	k	Q
pWPS	Α	V	mm/s		KJ/mm
19/001/p	305	24,9	5,5	0,8	1,10
19/002/p	340	28	4	0,8	1,90
19/003/p	330	27,2	4,3	0,8	1,67
19/004/p	330	29,2	5,5	0,8	1,40
19/005/p	360	29,4	5,2	0,8	1,63
19/006/p	310	29,5	3	0,8	2,44
19/007/p	300	28	6,8	0,8	0,99
19/008/p	300	29	10,2	0,8	0,68
	290	28,5	9,4	0,8	0,70
	290	28,5	9,2	0,8	0,72
	280	28	8,6	0,8	0,73
	280	28	8,8	0,8	0,71
	280	28	8,7	0,8	0,72
19/009/p	315	26,7	3,8	0,8	1,78
19/010/p	330	25,6	7	0,8	0,97
	330	25,6	7	0,8	0,97
	330	25,6	7	0,8	0,97

Tabella 6.2. Parametri definitivi

6.3. Provini certificazione

L'esecuzione dei provini necessari alla certificazione è stata fatta con la presenza dell'ente di certificazione, che aveva il compito di verificare il procedimento di esecuzione. I giunti eseguiti al robot sono stati fatti dagli operatori così da ottenere anche la qualifica per l'operatore di saldatura, mentre i due provini manuali sono stati eseguiti da due saldatori per ottenere il patentino.

L'operatore, per conseguire la qualifica, doveva saper leggere e interpretare la pWPS relativa al provino da eseguire e saper modificare il processo in caso di problemi. I due giunti relativi ai martinetti sono stati eseguiti nel centro di lavoro apposito poiché,

otado e caratterizzazione di giariti saldati per macorine telescopione

essendo pezzi di produzione, si necessitava del sistema di bloccaggio e rotazione necessario per l'esecuzione della saldatura. Il primo provino è stato eseguito sul centro di lavoro delle testate: questo perché era l'unico in cui vi fosse il materiale d'apporto per l'acciaio altoresistenziale. Tutti gli altri provini a robot sono stati eseguiti nel centro di lavoro dei roto.

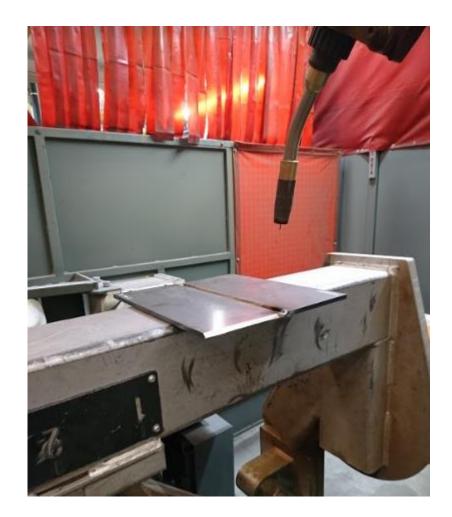


Figura 6.12. Centro di lavoro automatizzato

Una volta eseguiti tutti i provini da qualificare, sono stati fatti tagliare e su una porzione è stato eseguito un attacco acido. Questo è stato fatto per verificare che il processo di saldatura non avesse creato particolari difetti evidenti, che avrebbero potuto portare a risultati negativi durante i test di certificazione.

Dalle macro abbiamo ottenuto:

• pWPS 19/001

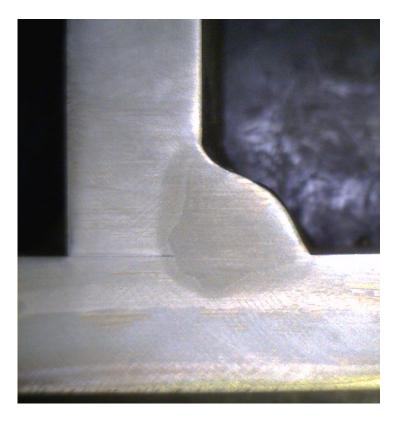


Figura 6.13. Provino 19/001 con parametri modificati

Nel primo provino, come si può evidenziare, non vi sono particolari difetti evidenti che possano influire sul risultato del test.

• pWPS /19/002

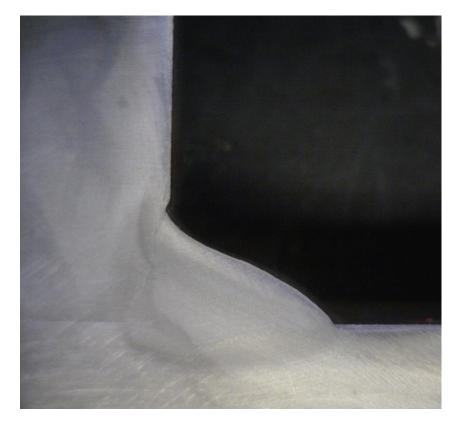


Figura 6.14. Provino 19/002 con parametri modificati

Nel secondo provino si erano evidenziati problemi con la penetrazione e per questo sono stati modificati i parametri del generatore. I risultati sono migliorati, come si può vedere nell'immagine, eliminando parte dell'incollaggio presente.

• pWPS 19/003



Figura 6.15. Provino 19/003 con parametri modificati

Come nel secondo provino, anche in questo caso avevamo ottenuto nei talloni preliminari una scarsa penetrazione e i lati incollati ma, variando i parametri, si è riusciti a garantire una migliore qualità della saldatura.

pWPS 19/004



Figura 6.16. Provino 19/004 con parametri modificati

Nel tallone del testa a testa il problema riscontrato era relativo all'altezza del cordone di saldatura ma, diminuendo la velocità di alimentazione del filo, si è riusciti a modificare la geometria del materiale depositato.

• pWPS 19/006

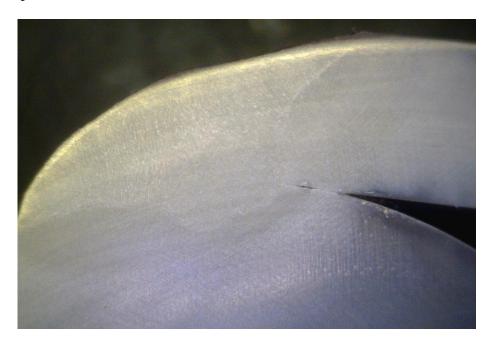


Figura 6.17. Provino 19/006 con parametri modificati

Nel sesto provino si erano evidenziati dei difetti molto pericolosi, vi era una scarsa penetrazione al vertice e l'intero lato sulla boccola incollato. Come si può notare dall'immagine, il problema è stato risolto ottenendo una saldatura di buona qualità.

La realizzazione di questi provini preliminari ha permesso di modificare i parametri dei processi di saldatura, riuscendo ad ottenere un risultato soddisfacente che garantisse di superare le prove di certificazione. Dopo le verifiche svolte dall'ente nei laboratori

dell'azienda, i provini sono stati spediti, insieme alle pWPS, ai laboratori nei quali verranno eseguite tutte le prove necessarie per la certificazione.

·

Conclusioni

La dissertazione scritta ha avuto come argomento lo studio dei giunti saldati per macchine a sollevamento telescopico.

Inizialmente è stato necessario effettuare uno studio generale sulle saldature e sulle normative necessarie per certificare il processo.

In seguito l'analisi sperimentale ha portato a confermare i risultati ottenuti da alcuni modelli matematici utilizzati per la predizione della durezza nelle saldature, mentre ne ha messo in discussione altri.

Le problematiche incontrate sono state relative sia alla parte di certificazione, poiché la quantità e la diversità di giunti prodotti nell'azienda ha portato a dover eseguire un notevole lavoro di ottimizzazione per garantire un buon rapporto tra la qualità e il costo per la certificazione; sia legate alla parte sperimentale dove è stato necessario definire un metodo per valutare il funzionamento dei modelli.

L'esito dei risultati è stato positivo per il modello di Suzuki sia nei test fatti sul S235JR sia sul S650MC, poiché i valori ottenuti dalle formule di predizione sono stati confermati dalle prove sperimentali considerando, comunque, una tolleranza dovuta all'utilizzo di un durometro Brinell invece che Vickers. Il modello di Terasaki 1, nel caso del S650MC, ha fornito anch'esso dei risultati prossimi ai valori teorici. Gli altri metodi hanno dato dei risultati non attendibili. In entrambi i casi comunque, anche con parametri critici, non si è mai superato il valore limite di 380 Hv imposto dalla normativa. Una delle problematiche incontrate è stata nella determinazione sperimentale del tempo di raffreddamento t_{8/5}, poiché non si è riusciti a rilevare il tempo nel ΔT desiderato; la

determinazione di questo valore sperimentale avrebbe garantito una maggiore accuratezza nei risultati. Le formule di predizione in particolare quelle di Suzuki e Terasaki possono essere utilizzate, con questi materiali, come strumento indicativo per la verifica del comportamento del processo nel caso di tempra. Per un utilizzo di questo metodo a livello produttivo sarebbe necessario uno studio più approfondito direttamente sui giunti prodotti in azienda.

La certificazione, lo studio e le prove preliminari eseguite hanno, invece, permesso di superare le verifiche, fatte dal certificatore, necessarie per procedere con i test dei laboratori. L'analisi dei giunti prodotti ha consentito all'azienda di avere maggiori informazioni per riuscire a migliorare la produzione e la progettazione delle giunzioni stesse. La certificazione, oltre a garantire dei livelli qualitativi controllati e superiori rispetto agli standard precedenti, risulterà essere un prestigio ulteriore per l'azienda nei confronti del mercato e della clientela.

Bibliografia

- [1] Larry Jeffus, "Welding: Principles and Applications", seventh edition, pg 243
- [2] "Saldatura per fusione", Volume 1, Istituto italiano della saldatura
- [3] Larry Jeffus, "Welding: Principles and Applications" seventh edition pg 247
- [4] Larry Jeffus, "Welding: Principles and Applications" seventh edition pg 253
- [5] Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari "Introduzione ai processi di saldatura", Società Editrice Esculapio.
- [6] Ivan Bunaziva*, Odd M. Akselsena,b, Xiaobo Renb, Antti Salminenc, "Hybrid welding possibilities of thick sections for arctic applications"
- [7] F. O. Olsen, "Hybrid Laser Arc Welding", CRC Press (2009), pg 109
- [8] F. O. Olsen, "Hybrid Laser Arc Welding", CRC Press (2009), pg 112
- [9] F. O. Olsen, "Hybrid Laser Arc Welding", CRC Press (2009), pg 116
- [10] Kristensen jk, "Thick plate hybrid CO2-laser/MAG hybrid welding of steels",
 International Institute of Welding 2007.
- [11] Norma UNI EN ISO 3834 "Requisiti di qualità saldatura"
- [12] Norma UNI EN ISO 15614 "Qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici",
- [13] Norma UNI EN ISO 9606-1 "Prove di qualificazione dei saldatori"
- [14] Norma UNI EN ISO 14732 "Prove di qualificazione degli operatori di saldatura e dei preparatori di saldatura"
- [15] David H. Phillips, "Welding Engineering, an introduction", Wiley, 2016, cap 10
- [16] "Saldatura per fusione, volume 2", Istituto Italiano Saldatura

- [17] Norma UNI EN 1011-2, "Raccomandazioni per la saldatura dei materiali metallici", 2005
- [18] Suzuki K, "Carbon Equivalent and Maximum Hardness", Transactions of the Japanese Welding Society, 1984
- [19] Satoh K., Terasaki T., "Estimation of HAZ Hardness", Jap. Weld. Society, 1979
- [20] Terasaki T., "Study of Predictive Equations of Thermal Factor and Hardness Related with Weld Cold Cracking", Iron and Steel Japan, 1981
- [21] Yurioka N., Ohisita S., Tanehiro H-, "Study on Carbon Equivalent to Assess Cold Cracking Tendency and Hardness in Steel Welding", March 1981.
- [22] Yurioka N., Okumura M., Kaniya T., "Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steel", 1987