

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Monitoraggio dei processi di saldatura  
attraverso sistemi di indagine non distruttivi

*Relatore:*

Prof.ssa Manuela De Maddis

*Correlatore:*

Prof.ssa Raffaella Sesana

Prof.ssa Francesca Maria Curà

*Tutor aziendale:*

Michele Maria Tedesco

Cesare Puro

*Candidato:*

Alessandra Martucci

Ottobre 2019

# Indice

<b>1</b>	<b>Prefazione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
2.1	La saldatura . . . . .	3
2.2	Classificazione . . . . .	4
2.3	Saldatura ad arco . . . . .	6
2.3.1	Schema generale . . . . .	7
2.3.2	Processo MIG e MAG . . . . .	9
2.3.3	Cold Metal Transfer (CMT) . . . . .	9
2.4	Difetti . . . . .	11
2.5	Metodi d'ispezione . . . . .	16
2.5.1	Ispezione visiva . . . . .	16
2.5.2	Ispezione metallografica . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>19</b>
3.1	Raggi x . . . . .	19
3.1.1	Generazione di Raggi X . . . . .	19
3.1.2	Radiazione Raggi X . . . . .	20
3.1.3	Schema di principio di un sistema per la generazione di Raggi X . . . . .	24
3.1.4	Interazione del Raggi X con la materia . . . . .	25
3.1.5	Esame radiografico . . . . .	26
3.1.6	Proprietà Raggi X e $\gamma$ . . . . .	29
3.1.7	Applicazioni Raggi X . . . . .	29
3.1.8	Limitazioni radiografia . . . . .	32
3.2	Termografia ad infrarossi . . . . .	33
3.2.1	Classificazione tecniche termografiche . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Materiali e metodi</b>	<b>38</b>
4.1	Strumentazioni utilizzate . . . . .	38
4.1.1	Processo di saldatura . . . . .	38
4.1.2	Termografia online . . . . .	40
4.1.3	Termografia attiva (Lock-in) . . . . .	41
4.1.4	Radioscopia . . . . .	44
4.2	Materiali . . . . .	47
4.3	Sistema di fissaggio . . . . .	49
4.4	Metodo di prova . . . . .	51
4.4.1	Esame radiografico . . . . .	52
4.4.2	Termografia online . . . . .	58
4.4.3	Lock in . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Realizzazione campioni conformi</b>	<b>64</b>
5.1	Risultati ispezione radioscopica per i giunti conformi . . . . .	66
5.2	Risultati termografia online per i giunti conformi . . . . .	67
5.3	Risultati termografia attiva per i giunti conformi . . . . .	71

<b>6</b>	<b>Studio completo campioni con difetti</b>	<b>78</b>
6.1	Analisi risultati . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Conclusioni e possibili sviluppi futuri</b>	<b>95</b>

## Elenco delle figure

1	Giunti per sovrapposizione ottenuti con tecnica CMT . . . . .	1
2	Sequenza operazioni eseguite . . . . .	2
3	Principali geometrie giunti saldati . . . . .	5
4	Principali posizioni di esecuzione di un giunto saldato . . . . .	5
5	Schema saldatura ad arco . . . . .	6
6	Schema di un impianto semiautomatico a filo continuo per la saldatura con protezione di gas . . . . .	7
7	Wire buffer e motore integrato nella torcia . . . . .	10
8	Andamento parametri di processo CMT . . . . .	11
9	Incavi nella saldatura [1] . . . . .	16
10	Esempio misurazione del cordone [1] . . . . .	17
11	Esempio misurazione del cordone di saldatura di giunti per sovrapposizione [1] . . . . .	18
12	Tubo di Coolidge . . . . .	19
13	Radiazione caratteristica conseguente ad una transizione fra due livelli orbitali . . . . .	21
14	Fenomeno di frenamento . . . . .	21
15	Spettro continuo della radiazione di frenamento . . . . .	21
16	Spettro della radiazione del tubo di Coolidge . . . . .	22
17	Spettro continuo al variare della tensione di alimentazione [15] . . . . .	23
18	Spettro continuo al variare dell'intensità del pennello di elettroni [15] . . . . .	23
19	Schema funzionale di un sistema radiogeno . . . . .	24
20	Schema assorbimento fotoelettrico[15] . . . . .	25
21	Schema diffusione Compton[15] . . . . .	25
22	Schema produzione di coppie[15] . . . . .	26
23	Esperimento Roentgen . . . . .	27
24	Schema esame radiografico [15] . . . . .	27
25	I.Q.I. a fili e a fori [16] . . . . .	28
26	Applicazione I.Q.I. a fili . . . . .	28
27	Radiografia componente meccanico assemblato . . . . .	30
28	Radiografia frattura del piede sinistro . . . . .	31
29	Applicazione raggi X per il controllo della qualità degli alimenti . . . . .	31
30	Spettro elettromagnetico . . . . .	33
31	Termocamera FLIR . . . . .	34
32	Stima dell'emissività . . . . .	35
33	Panoramica applicazioni termografia . . . . .	35
34	Schema termografia passiva . . . . .	36
35	Schema termografia attiva . . . . .	36
36	Robot antropomorfo di Comau . . . . .	38
37	Transpulse Synergic 4000 CMT della Fronius . . . . .	39
38	Termocamera AGEMA Thermovision 900 SW-TE (FLIR Systems) . . . . .	40
39	Termocamera FLIR X6540sc . . . . .	42
40	Sistema MultiDES System LASER . . . . .	43
41	Sistema radioscopico . . . . .	44
42	Flat Panel . . . . .	45
43	Tubo radiogeno . . . . .	45

44	Monitor TV . . . . .	46
45	Dimensioni lamiera . . . . .	47
46	Maschera di saldatura . . . . .	49
47	Sistema scorrimento basi di appoggio lamiera . . . . .	50
48	Spettro elettromagnetico . . . . .	52
49	Schema procedura radiografica . . . . .	53
50	Influenza delle caratteristiche geometriche . . . . .	54
51	Schema radiografia digitale . . . . .	55
52	Schema formazione immagine radioscopica . . . . .	56
53	Schema penombra geometrica . . . . .	56
54	Posizionamento termocamera e lamiera . . . . .	58
55	Scelta filtro . . . . .	59
56	Inserimento valori limite di temperatura . . . . .	59
57	Settaggio parametri interni . . . . .	60
58	Posizionamento lamiera saldata per la prova di termografia attiva .	61
59	Schermata sistema MultiDES R3.4.4 modulazione sorgente laser . .	62
60	Output analisi Lock-in . . . . .	63
61	Immagine fronte-retro del provino esente da difetti . . . . .	65
62	Immagine fronte-retro del provino non conforme . . . . .	66
63	Immagine radioscopica di un giunto sano . . . . .	66
64	Ripetibilità giunto esente da difetti . . . . .	67
65	Determinazione di 3 punti sul cordone di saldatura . . . . .	68
66	Andamento della temperatura media dei 3 ROI in funzione del tempo	68
67	Box intero cordone di saldatura . . . . .	70
68	Andamento della temperatura media all'interno dell'intero cordone	70
69	Confronto 5 prove andamento della temperatura media intero cordone	70
70	Impostazione del tempo di un singolo impulso e modulazione potenza	71
71	Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino esente da difetti	73
72	Confronto ritardo di fase delle tre armoniche per il provino esente da difetti . . . . .	74
73	Verifica ripetibilità prova ampiezza (prima armonica) . . . . .	76
74	Verifica ripetibilità prova fase (prima armonica) . . . . .	77
75	Provino esente da difetti realizzato a 440 mm/s . . . . .	79
76	Provino realizzato a 540 mm/s . . . . .	79
77	Provino realizzato a 400 mm/s . . . . .	79
78	Immagine radioscopica del provino realizzato a 540 mm/s . . . . .	80
79	Immagine radioscopica del provino realizzato a 400 mm/s . . . . .	80
80	Localizzazione puntatore laser per il provino realizzato a 540 mm/s	81
81	Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino 540 mm/s . .	81
82	Confronto fase delle tre armoniche per il provino 540 mm/s . . . . .	82
83	Ripetibilità lock-in nei provini realizzati a 540 mm/s . . . . .	83
84	Localizzazione puntatore laser per il provino realizzato a 400 mm/s	83
85	Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino 400 mm/s . .	84
86	Confronto risposta in fase delle tre armoniche per il provino 400 mm/s . . . . .	85
87	Ripetibilità lock-in nei provini realizzati a 400 mm/s . . . . .	85
88	Frame di termogramma giunto esente da difetti . . . . .	86
89	Frame di termogramma giunto realizzato a 400 mm/s . . . . .	86

90	Frame di termogramma giunto realizzato a 540 mm/s . . . . .	86
91	Andamento cicli termici del campione realizzato a 400 mm/s per i 3 punti individuati . . . . .	87
92	Andamento cicli termici del campione realizzato a 540 mm/s per i 3 punti individuati . . . . .	87
93	Box comprendente l'intero cordone . . . . .	88
94	Andamento box comprendente l'intero cordone per i provini realiz- zati a 400 mm/s . . . . .	88
95	Andamento box comprendente l'intero cordone per i provini realiz- zati a 540 mm/s . . . . .	89
96	Confronto ampiezza tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s	90
97	Confronto ampiezza tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s	91
98	Confronto cicli termici 3 punti tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s . . . . .	92
99	Confronto cicli termici 3 punti tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s . . . . .	92
100	Confronto ciclo termico intero cordone tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s . . . . .	93
101	Confronto ciclo termico intero cordone tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s . . . . .	93

## Elenco delle tabelle

1	Caratteristiche sistema di saldatura . . . . .	40
2	Caratteristiche della termocamera . . . . .	41
3	Caratteristiche della termocamera FLIR X6540sc . . . . .	42
4	Caratteristiche meccaniche dell'acciaio DP600 [5] . . . . .	47
5	Composizione chimica dell'acciaio DP600 [5] . . . . .	47
6	Caratteristiche meccaniche del filo G3Si1 . . . . .	48
7	Composizione chimica del filo G3Si1 . . . . .	48
8	Parametri tenuti costanti . . . . .	64
9	Parametri giunti conformi . . . . .	65
10	Parametri prova fallita . . . . .	65
11	Pendenze tratti decrescenti cordone sano . . . . .	69
12	Parametri tenuti costanti . . . . .	78

# 1 Prefazione

Questa tesi è il risultato di uno studio volto a comprendere l'applicabilità delle metodologie di ispezione non distruttive per il monitoraggio di giunzioni ottenute saldando per sovrapposizione lamierini sottili di applicazione automotive con tecnica CMT.

Questo studio è parte di un progetto che nasce dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino e il gruppo "Global Material Labs" (GML) del Centro Ricerche Fiat (CRF) di Torino, sito a Mirafiori.

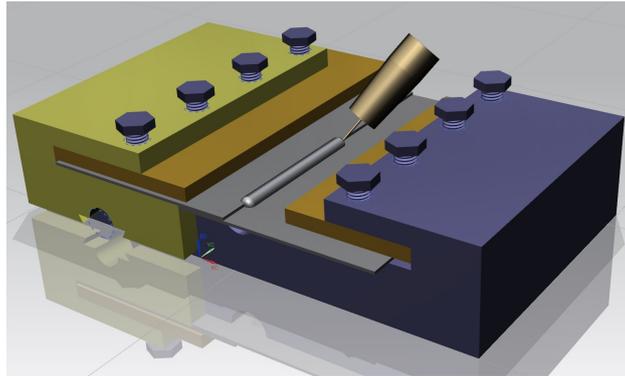


Figura 1: Giunti per sovrapposizione ottenuti con tecnica CMT

La saldatura è considerata il processo più delicato e allo stesso tempo importante per la produzione industriale.

È uno strumento fondamentale nel settore automotive per la realizzazione di componenti giuntati permanentemente o per la creazione di complessivi partendo da singoli elementi.

Nel mondo dell'industria meccanica, e in particolar modo nel settore automotive, la saldatura rappresenta uno strumento fondamentale per la realizzazione delle giunzioni e per la creazione di complessivi partendo da elementi semplici.

Si tratta di una lavorazione ampiamente studiata ma molto complessa i cui risultati possono essere imprevedibili e difficili da controllare.

Il controllo di tale processo ha come scopo l'accertamento della qualità del prodotto: nel caso specifico si tratta di accertare che le giunzioni saldate corrispondano alla qualità richiesta per l'uso a cui sono destinate e secondo le normative vigenti in azienda.

Le caratteristiche particolari del procedimento di giunzione mediante saldatura hanno suggerito un concetto di collaudo in senso molto lato, comprendente, oltre al controllo vero e proprio della saldatura finita, prove e verifiche preliminari e controlli in corso d'opera.

Prima di procedere con le prove pratiche, è stata svolta un'intensa attività di ricerca, si sono scandagliate le norme UNI per saldatura MAG, le norme inerenti ai controlli non distruttivi (CND) tra cui la radiografia e la termografia attiva e passiva. Alle ricerche delle normative è stata aggiunta la visione di manuali teorici e tecnici in merito all'attrezzatura usata e ai data sheet dei materiali utilizzati.

Successivamente si è definito un piano sperimentale che comprende la realizzazione di giunti conformi secondo normativa e giunti in cui sono stati indotti dei difetti

andando a variare la velocità di avanzamento del robot di saldatura.

Come primo passo sono stati definiti i parametri necessari alla realizzazione di giunti di buona qualità e quindi esenti da difetti interni e/o superficiali. Successivamente sono stati scelti i parametri controllabili in linea di produzione, al fine di realizzare ulteriori pezzi con difetti indotti.

Il confronto tra i giunti conformi e quelli con difetti è stato svolto attraverso tecniche non distruttive.

Tra i controlli non distruttivi, l'ispezione radiografica rappresenta da anni una metodologia efficace nell'individuazione di difetti subsuperficiali e interni. Gli alti costi di investimento per le attrezzature ne limitano però il suo utilizzo massivo in campo industriale. Altra metodologia non distruttiva è la termografia che si presta a poter essere una tecnica di ispezione implementata nel campo industriale in quanto vanta di poter ottenere analisi a distanza e senza contatto. È una tecnica a campo intero con risultato immediato, si serve di immagini che sono di facile interpretazione e non richiede radiazioni pericolose.

La termografia è stata studiata su due fronti: da un lato è stato studiato il metodo termografico passivo applicato durante il processo di saldatura e dall'altro è stato impiegato un approccio attivo utilizzando l'analisi Lock-In, eseguita eccitando puntualmente le unioni saldate e registrando la risposta dei materiali in termini di fase e ampiezza.

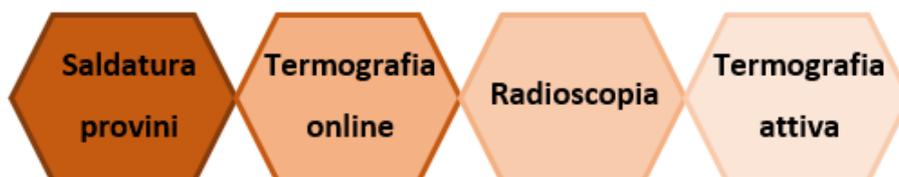


Figura 2: Sequenza operazioni eseguite

## 2 Introduzione

### 2.1 La saldatura

La saldatura è un processo che unisce in modo permanente due componenti meccanici realizzando così la continuità del materiale. Vi sono vari processi in letteratura e nella pratica questi vanno scelti sulla base di un'attenta analisi che coinvolge diversi fattori come: spessore delle parti, tipo di lega da saldare, posizione di saldatura, tipo di produzione da effettuare.

La continuità metallica di cui sono caratterizzati i giunti saldati porta ad una rigidità maggiore ma, data la possibilità per le linee di forza di distribuirsi liberamente nella struttura, una progettazione non corretta può portare a notevoli addensamenti locali delle linee stesse con possibilità di deformazioni plastiche locali, diminuzione della resistenza a fatica, rischio di rottura fragile per acciai dolci o debolmente legati ecc.

La saldabilità di un materiale è l'attitudine con cui esso si presta alla realizzazione di giunti saldati con caratteristiche ottimali. Per conoscere il range di saldabilità ottimale è buona norma far riferimento ai fini prefissati nella costruzione dell'opera saldata e in generale alle caratteristiche che il giunto deve avere per risultare conforme.

Vantaggi giunti saldati:

- Semplicità e molteplicità delle soluzioni geometriche
- Rapidità di esecuzione
- Semplicità delle lavorazioni di preparazione delle parti
- Tenuta dalla fuoriuscita di fluidi
- Basso costo complessivo

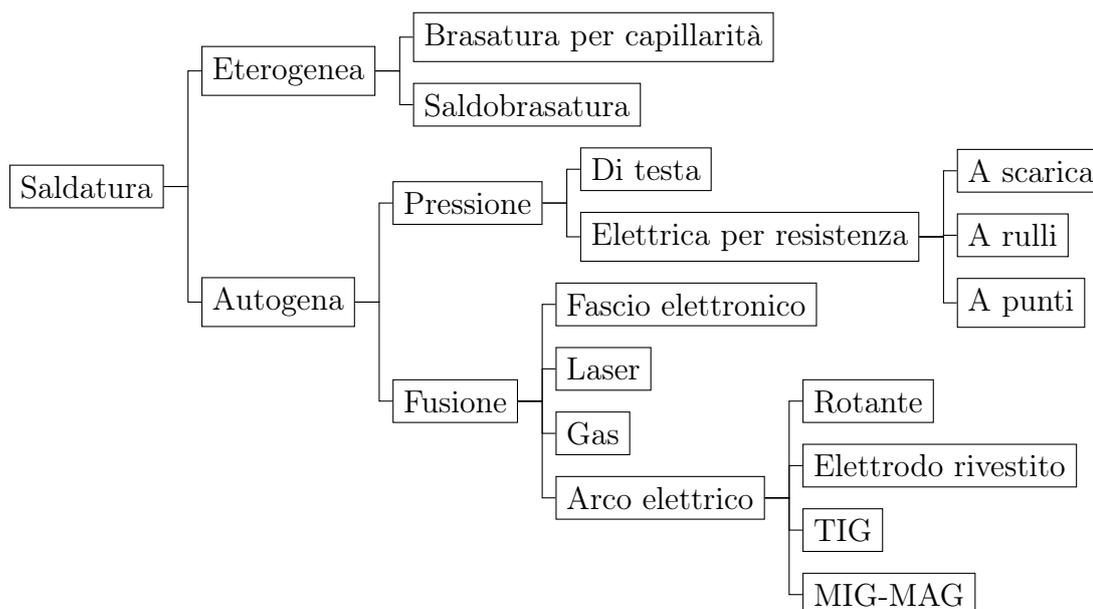
Svantaggi giunti saldati:

- Eseguibile solo su materiali saldabili
- Introduzione di distorsioni geometriche e tensioni residue
- Alterazione della struttura cristallina del materiale
- Necessità di lavorazioni meccaniche o di trattamenti termici di distensione successivi
- Calcolo approssimativo della resistenza, specie a fatica

## 2.2 Classificazione

Per eseguire una saldatura è sempre necessario disporre di una certa quantità di energia che viene in genere somministrata al giunto sotto forma di calore e che consente di raggiungere le alte temperature richieste.

La particolare sorgente termica utilizzata, con cui viene fornito detto calore, e il modo con cui si provvede alla protezione del bagno fuso contro l'azione dell'aria, caratterizzano i vari procedimenti di saldatura. Essi sono definiti dalla norma UNI 1307. [27]



Si parla di **saldatura autogena** quando il metallo base prende parte, fondendo, alla formazione del giunto. Il metallo d'apporto può esserci o meno in funzione del procedimento e dello spessore. Quando è presente esso risulta metallurgicamente simile al metallo base poiché si tende ad ottenere una continuità strutturale della giunzione e una resistenza meccanica elevata.

A seconda dello stato fisico in cui si trovano i pezzi al momento della loro unione si hanno:

- Saldature per fusione quando i pezzi vengono uniti allo stato liquido. In base a come viene prodotto il calore necessario per portare a fusione il metallo si distinguono saldature a gas o ad arco.
- Saldature a pressione quando i pezzi vengono collegati non allo stato fuso, ma quando si trovano in uno stato pastoso. Tale stato viene raggiunto, generalmente, per effetto Joule, dal passaggio di una corrente elettrica.

Quando invece il metallo base non prende parte alla formazione del giunto si parla di **saldatura eterogenea**. Il cordone di saldatura è formato, in questo caso, dal solo metallo d'apporto, sempre presente, diverso dal metallo base e con temperatura di fusione inferiore.

A seconda di come avviene la formazione del cordone di saldatura si hanno:

- Saldobrasature quando i lembi dei pezzi vengono preparati con cianfrinature. Il metallo d'apporto fondendo riempie il cianfrino costituendo il cordone di saldatura.
- Brasature quando i pezzi da saldare sono semplicemente appoggiati l'uno sull'altro e lo spazio capillare che rimane tra i due viene riempito dal metallo d'apporto fuso. In questo caso il giunto è costituito da uno strato sottilissimo di metallo d'apporto che ha formato una lega col metallo base.

La scelta di un procedimento di saldatura rispetto ad un altro dipende da molti fattori e deve effettuarsi tenendo conto del tipo di lega da saldare, dello spessore delle parti, della posizione di saldatura, dal tipo di produzione (in serie o no), delle attrezzature disponibili in officina.[27]

Variando la posizione relativa delle lamiere e la posizione del cordone di saldatura si ottengono differenti tipologie di giunti. La configurazione geometrica del giunto saldato viene anche detta geometria di dettaglio del giunto e definisce come sono disposte e orientate le parti che formano il giunto. Si distinguono queste tre geometrie fondamentali:

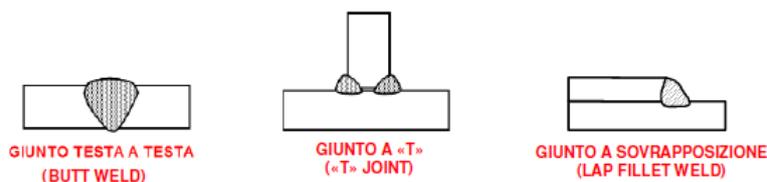


Figura 3: Principali geometrie giunti saldati

Si può inoltre effettuare una classificazione in base alla posizione di esecuzione e dividere le saldature come riportato nella norma UNI EN ISO 6947:

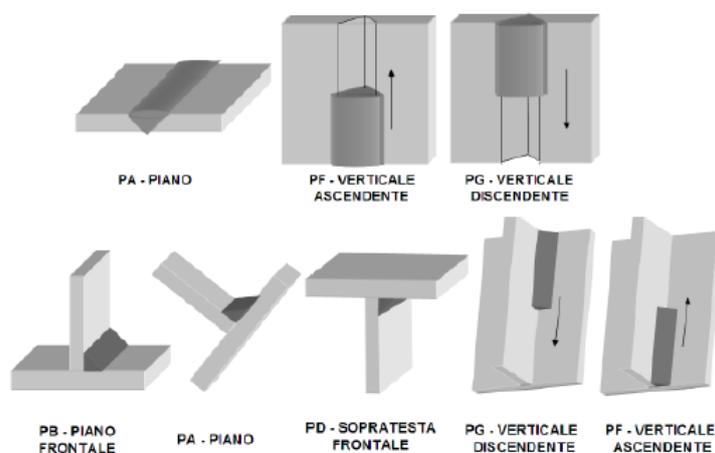


Figura 4: Principali posizioni di esecuzione di un giunto saldato

## 2.3 Saldatura ad arco

La saldatura ad arco nasce ai primi del '900 (1912 elettrodo rivestito inventato da O. Kjellberg). Tra il 1950 e il 1970 si data l'aggiunta di gas di protezione al processo a filo continuo.

E' un processo largamente diffuso nell'industria automotive, per svariate applicazioni (body, suspension, exhaust systems, road wheels).

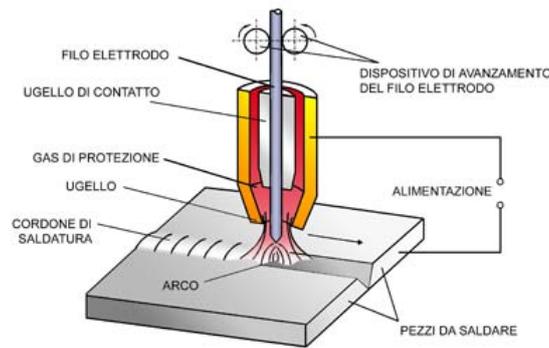


Figura 5: Schema saldatura ad arco

La saldatura con filo elettrodo in gas protettivo è una tecnica di saldatura autogena nel quale l'energia termica viene fornita da un arco che scocca tra il filo e il pezzo. Il passaggio di corrente elettrica attraverso il gas ionizzato provoca l'arco elettrico.

Il materiale d'apporto è costituito dall'elettrodo ovvero da un filo nudo che viene continuamente alimentato in concomitanza della zona di saldatura.

I limiti tecnologici del procedimento manuale con elettrodi rivestiti, come la periodica richiesta di arresti per il cambio degli elettrodi, sono stati superati dalla saldatura con filo elettrodo in gas protettivo. Tale procedimento supera inoltre i limiti della tecnica ad arco sommerso che non consentiva di saldare in posizione e non permetteva il controllo visivo del bagno.

Tutto ciò che è coinvolto nella saldatura (filo elettrodo, bagno fuso, arco elettrico e le zone adiacenti del materiale base) sono protette da un flusso di gas che fuoriesce dalla pistola per scongiurare la contaminazione atmosferica.

Il grande vantaggio di questa tecnica, rispetto alle altre, è l'elevata produttività, possibile grazie alla continua alimentazione del materiale d'apporto, alla quasi assoluta assenza di scoria che diversamente andrebbe rimossa, alla possibilità di controllare in maniera efficiente l'esecuzione della saldatura per via della miglior visibilità del bagno di fusione, e non bisogna sottovalutare le grandi velocità che è possibile raggiungere grazie alla maggior densità di corrente.

Potendo con facilità rendere i gas di protezione molto secchi e utilizzando fili pieni, è possibile con questa tecnica utilizzare anche quei materiali più incrinati alle cricche da idrogeno.

Ottimi risultati si ottengono inoltre usando fili di piccolo diametro e con l'uso di lamierini molto sottili (fino a 0.5 mm).

Le limitazioni di tale processo sono invece da ricercarsi nella complessità dell'apparecchiatura per la saldatura in gas che rende la tecnica molto costosa e non incline

al trasporto. È comune la formazione di cricche a caldo con acciai suscettibili a tale difetto se si usano fili pieni e viene quindi meno la possibilità di depurare il bagno.

È infine necessaria una discreta cautela per evitare che la zona dell'arco sia investita da correnti di aria che potrebbero inficiare l'efficacia della protezione gassosa. [27]

### 2.3.1 Schema generale

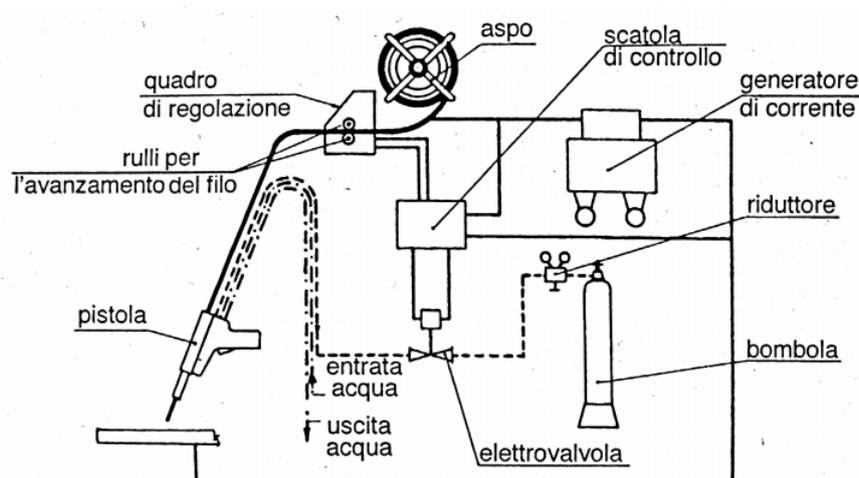


Figura 6: Schema di un impianto semiautomatico a filo continuo per la saldatura con protezione di gas

In Figura 10 si possono distinguere tre circuiti:

- Il circuito elettrico di saldatura;
- Il circuito riguardante il gas protettivo che comprende la bombola del gas, il riduttore di pressione e l'elettrovalvola che permette la fuoriuscita del gas solo durante l'operazione di saldatura;
- Possibile circuito dell'acqua di raffreddamento se si utilizza una torcia di saldatura raffreddata. Fanno eccezione le pistole che possono lavorare con correnti fino a 300A, queste sono infatti autoraffreddanti ovvero il gas protettivo provvede autonomamente ad evitare surriscaldamenti che possono risultare dannosi.

Nello schema si possono notare altri elementi di fondamentale importanza come:

- La pistola (o torcia) di saldatura;
- Il dispositivo di avanzamento filo;
- Il generatore di saldatura;
- Il quadro di regolazione;
- L'aspo porta filo;

- Una scatola di controllo.

La scatola di controllo contiene una serie di circuiti elettromeccanici o elettronici che permettono l'avviamento dei servizi ausiliari connessi all'apparecchiatura.

Il saldatore indirizza l'arco elettrico sul metallo base mediante la torcia di saldatura. Il materiale d'apporto è un filo avvolto su una bobina; esso fuoriesce a velocità controllata completamente circondato dal gas di protezione in modo tale che la zona interessata e la pistola siano isolate completamente dall'atmosfera. La velocità del filo costante è assicurata da due rulli di pressione comandati da un motore elettrico in corrente continua. Per avere un arco di lunghezza costante, la velocità di fusione del filo e quella di avanzamento dello stesso devono essere coincidenti. La torcia può essere raffreddata tramite il sistema di circolazione dell'acqua. La bombola contiene il gas protettivo che arriva tramite un apposita tubazione alla pistola di saldatura. Se la saldatura è automatica allora la pistola è fissata su un supporto e il movimento relativo tra torcia e metallo base è garantito da dispositivi automatici.

Quando elettrodo e pezzo si trovano a distanza ravvicinata, l'alta tensione e l'elevata frequenza provocano una scintilla pilota che accende l'arco. L'alta tensione viene eliminata pochi secondi dopo l'accensione dell'arco mentre la corrente di saldatura viene ridotta progressivamente fino allo spegnimento dell'arco. Si aspetta invece il tempo necessario al sufficiente raffreddamento dell'elettrodo e alla completa solidificazione del giunto per spegnere il gas di protezione.

Variando la tensione di funzionamento si ottengono diverse tecniche di trasferimento del metallo d'apporto sul materiale base. Detto trasferimento può avvenire diversamente a seconda della tensione d'arco e della corrente di transizione che a sua volta è determinata dal tipo di gas utilizzato, dal filo e dalla densità di corrente.

Le modalità di trasferimento più usate in ambito industriale sono:

- Short-arc: si ha la formazione di grosse gocce che si prolungano verso il metallo base, creano un corto circuito e spengono l'arco temporaneamente. Le tensioni d'arco sono inferiori a 20V e la deposizione oraria risulta piuttosto bassa.
- Spray-arc: si creano numerose gocce di dimensioni molto piccole che riescono ad attraversare l'arco senza spegnerlo. La deposizione oraria risulta elevata così come la capacità di penetrazione. Le tensioni d'arco usate sono superiori a 25V.
- Pulsed-arc: può essere realizzato su particolari tipologie di macchine in cui, ad un livello inferiore a quello di transizione si sovrappongono impulsi di corrente il cui valore di picco è superiore al livello di transizione. Per ogni impulso si ha il distacco di una goccia che si deposita sul metallo base attraversando l'arco. [27]

### 2.3.2 Processo MIG e MAG

Quando fu introdotto il procedimento con filo elettrodo in gas protettivo venivano usati esclusivamente gas inerti come l'Argon e l'Elio e venivano utilizzati unicamente materiali nobili o talvolta acciai inossidabili.

A proposito del gas utilizzato e dei diversi materiali d'apporto, risulta necessario distinguere i termini MIG e MAG.

Queste tecniche differiscono principalmente per il gas di protezione e per i materiali d'apporto mentre risultano simili per quanto riguarda il procedimento e le macchine di saldatura utilizzate.

La dicitura MAG sta per "Metal Active Gas" mentre MIG per "Metal Inert Gas". Nella MIG si usa Argon al 100%, quindi inerte.

Generalmente il gas usato per il MAG è una miscela ossidante di  $CO_2$  al 20% e Argon al 80%. Con questa miscela si ottengono gocce di grandi dimensioni e notevoli spruzzi.

L'utilizzo di una miscela ossidante rende necessario l'utilizzo di fili con composizione studiata in modo tale che vi siano piccole percentuali di Si o Mn che hanno potere disossidante. [27]

### 2.3.3 Cold Metal Transfer (CMT)

L'evoluto processo CMT presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla tradizionale tecnica MAG tra cui:

- Minore apporto di calore;
- Passaggio controllato di materiale a corrente ridotta;
- Saldatura pressoché priva di spruzzi;
- Maggiore rendimento del metallo depositato;
- Migliore riempimento dei gap;
- Stacco della goccia molto preciso;
- Massima stabilità dell'arco voltaico.

Tale tecnica ha registrato una buona riuscita nel campo delle saldature di lamiera molto sottili e garantisce un risultato finale del giunto ottimale.

Nonostante le similitudini con il processo short arc, in questa nuova tecnica si sfruttano correnti più basse.

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

Poiché i livelli di corrente imposti nella tecnica CMT sono inferiori rispetto a quelli usati nel short arc, non si riuscirebbe a garantire la stessa strizione della goccia e il suo deposito nel bagno fuso con conseguente incollatura del materiale d'apporto al bagno fuso e quindi una non conforme giunzione.

Con il CMT il movimento del filo è correlato alla presenza e allo sviluppo dell'arco elettrico. Rispetto ai sistemi tradizionali si ottiene un arco elettrico più stabile

con lunghezza non correlata alla qualità superficiale delle lamiere.[26]  
Altro parametro che è importante controllare è la velocità del filo. A tale scopo sono fondamentali altri due equipaggiamenti del robot:

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



Figura 7: Wire buffer e motore integrato nella torcia

Il wire buffer permette di disaccoppiare i due sistemi di movimentazione del materiale d'apporto (VR4000 e motore su torcia), accumulando una riserva di filo. Il motore integrato alla pistola di saldatura è un meccanismo di traino a rullini del filo di materiale d'apporto che coopera con il medesimo meccanismo a valle della bobina.

Il motore in AC sulla torcia permette la rotazione dei cilindri in senso orario e antiorario, permettendo così al filo di procedere con velocità positiva o negativa. La frequenza con cui il materiale d'apporto viene ritratto è molto bassa. Questa dinamica necessita dell'utilizzo di sistemi di movimentazione molto precisi per un corretto funzionamento e per ottenere risultati ottimali.

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

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

Si riportano nella figura sottostante gli andamenti, durante un singolo ciclo, dei tre principali parametri di processo.

Osservando, in Figura8, l'andamento della velocità si nota come il filo venga ritratto nel momento in cui si realizza il corto circuito. La velocità diventa positiva quando termina il corto circuito e si ha l'apertura dell'arco.

L'intensità di corrente è quasi nulla durante l'arco elettrico e quindi durante il trasferimento di materiale d'apporto. Questo andamento di corrente è responsabile del minore apporto termico rispetto ai metodi tradizionali. Durante la fase di breakup la corrente aumenta ma è il movimento del filo a determinare l'apertura dell'arco, così da rendere il processo meglio controllato.[26]

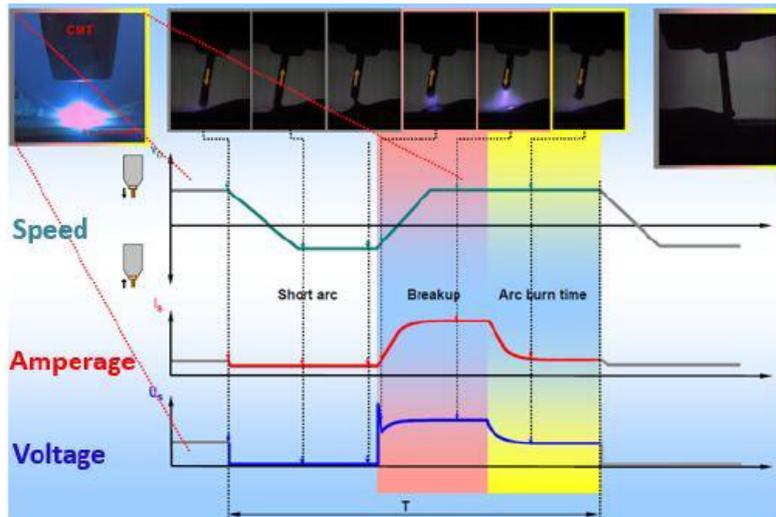


Figura 8: Andamento parametri di processo CMT

## 2.4 Difetti

Il giunto saldato ha la caratteristica di unire permanentemente due parti solide realizzando la continuità del materiale, proprio per questa ragione le costruzioni saldate sono dette monolitiche. Qualora la continuità fosse imperfetta, ci si troverebbe di fronte ad un difetto di saldatura.

Dal punto di vista più generale i difetti di saldatura sono quindi delle discontinuità e possono essere in linea di principio di due tipi:

- Discontinuità metallurgiche tra la zona fusa e/o la zona termicamente alterata ed il materiale base inalterato. Esse risultano nocive alle caratteristiche meccaniche e ad altre caratteristiche del giunto (ad esempio tempra, ingrossamento del grano, precipitazioni di carburi di cromo nella saldatura di acciai inossidabili austenitici al Cr-Ni)
- Discontinuità metalliche, nocive essenzialmente alle caratteristiche meccaniche ma che in certi casi possono comprendere cricche o inclusioni di scoria.

I difetti del primo tipo possono essere individuati con prove meccaniche, di resistenza alla corrosione, esami al microscopio metallografico ecc.

I difetti del secondo tipo vengono normalmente individuati con controlli non distruttivi come l'esame radiografico o la termografia.

Una classificazione dei principali difetti di saldatura può essere fatta con diversi criteri; la migliore dal punto di vista didattico è forse quella presente nella norma UNI EN ISO 6520-1, che si fonda essenzialmente sulla loro natura e sulla loro origine:

### 1-Cricche

Si può definire cricca un'imperfezione che può formarsi per effetto termico o a causa delle tensioni in gioco. È un difetto che viene indicato come bidimensionale poiché è più o meno lungo e profondo con andamento frastagliato mentre ha i

lombi piuttosto ravvicinati.

Le cricche sono il difetto più grave e temibile di un giunto saldato poichè, anche se di piccole dimensioni, è sempre una rottura in atto che può essere suscettibile alle condizioni di esercizio e può espandersi portando al cedimento del giunto.

Una prima classificazione delle cricche può essere fatta in base al loro orientamento rispetto al cordone di saldatura e alla forma. A tal proposito è possibile individuare cricche longitudinali, trasversali, a raggiera, a cratere o ramificate.

Un'ulteriore distinzione può essere fatta da un punto di vista termico, tra cricche a caldo e a freddo. Le prime sono così denominate poichè si manifestano nel corso della solidificazione del giunto e si formano ad alta temperatura (tra i 900°C e i 1400°C). Di solito sono localizzate al centro del cordone, dove gli stati tensionali risultano più elevati. Le cricche a freddo, invece, sono legate all'indurimento per tempra del metallo, sotto l'azione dei cicli termici di saldatura, e alla presenza di idrogeno. Si verificano negli ultimi stadi del raffreddamento (300°C-200°C) e si trovano di solito ai bordi del cordone.

Le cause della formazione di cricche possono essere:

- Effetti ritiro del materiale;
- Assenza di pre o post trattamento termico;
- Bassa velocità di avanzamento;
- Tensione/Voltaggio elevata;
- Filo qualità scadente;
- Impurità del materiale.

## **2-Cavità**

Sotto il termine cavità vengono raggruppate varie tipologie di difetti dovuti ad assenza di materiale e classificati in base alla posizione e alla forma.

A questa famiglia appartengono anche i pori che hanno una forma tondeggiante e che sono dovuti principalmente allo sviluppo di vapore acqueo nel cordone di saldatura. Dall'unione di due o più pori si originano i tarli, i quali presentano una forma più allungata.

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

Le cause possono essere:

- Arco lungo;
- Insufficienza gas inerte;
- Insufficiente purezza gas inerte;
- Impurità del materiale.

## **3-Inclusioni solide**

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

Possono essere causate da:

- Preparazione e pulizia lembi;
- Pulizia elettrodo;
- Qualità filo scadente;
- Posizionamento torcia;
- Eccessivo amperaggio della corrente;
- Impurità del materiale.

#### **4-Mancanza di fusione e di penetrazione**

I difetti per mancanza di penetrazione sono in genere discontinuità tra i due lembi del cianfrino, più o meno intermittenti, provocate dalla mancanza di fusione di uno o di entrambi i lembi.

Possono trovarsi nella zona della prima passata, al vertice o al cuore della saldatura, a seconda del tipo di preparazione oppure può manifestarsi in corrispondenza delle riprese successive, in seguito ad un'interruzione del processo. Questo difetto implica uno sviluppo incompleto del cordone lungo la direzione trasversale alla saldatura per questo sono difetti generalmente non accettabili.

Le possibili cause dei difetti dovuti alla mancanza di penetrazione sono:

- Eccessiva velocità di avanzamento
- Insufficiente distanza tra i lembi
- Eccessivo diametro dell'elettrodo
- Basso amperaggio corrente
- Filo di qualità scadente
- Posizionamento torcia errato (troppo distante)

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

Le loro principali cause sono:

- Eccessiva distanza tra i lembi
- Eccessiva velocità di avanzamento
- Posizionamento torcia (troppo inclinata o troppo distante)
- Tensione/voltaggio troppo bassa

#### **5-Difetti di forma e di dimensione**

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

Tra i difetti di questa tipologia si trovano quelli causati da un eccesso di sovravello (excessive weld metal) che si riscontra maggiormente nei giunti di testa. È

dovuto generalmente ad un errore del saldatore che non ha maneggiato bene l'elettrodo oppure non ha saputo distribuire opportunamente il numero delle passate, nel caso di saldatura manuale, oppure non ha seguito le indicazioni della tabella dei parametri della saldatura automatica.

Molti saldatori ritengono erroneamente che l'eccesso di sovrametallo non sia un difetto ma che anzi, grazie al maggiore spessore di saldatura il giunto offra una resistenza più elevata. Questo risulta assolutamente errato poichè in certe condizioni di servizio, come fatica, urti o basse temperature, un giunto così fatto è meno resistente di uno di forma regolare a causa delle discontinuità geometriche che si creano ai bordi del sovrametallo stesso.

L'eccesso del sovrametallo può essere dovuto a:

- Bassa velocità di avanzamento
- Errata posizione torcia
- Errata dimensione del filo d'apporto

Altra problematica legata alla forma sono le incisioni marginali (undercut). Queste si presentano spesso nei cordoni eseguiti manualmente o nei giunti eseguiti in posizione non piana.

Sono essenzialmente causate da:

- Eccessiva velocità di avanzamento
- Eccessivo Amperaggio della corrente
- Posizionamento torcia

### **6-Imperfezioni varie non classificate**

Nell'ultimo gruppo della UNI EN ISO 6520-1 sono stati inclusi una serie di difettologie che gravano meno sulla qualità del giunto tra cui gli spruzzi. Questi sono depositi più o meno grandi e dispersi, generalmente incollati sulla superficie del materiale base vicino al cordone.

Sono tipici delle saldature manuali ad elettrodi rivestiti e del procedimento MAG. Sono pericolosi per i giunti che lavorano in ambienti particolari perchè sono un facile innesco per attacchi corrosivi. Inoltre in corrispondenza ad essi si possono avere dei locali fenomeni di tempra eventualmente accompagnati da piccole cricche.

Sono in genere dovuti a:

- Filo di qualità scadente
- Tensione troppo alta

Sono stati quindi illustrati i difetti che possono trovarsi nella zona fusa ed in quella termicamente alterata dei giunti saldati. L'ordine che si è scelto di seguire ha rispettato in linea di massima l'importanza che tali difetti rivestono verso la qualità e la sicurezza che il giunto saldato può offrire.

Tuttavia, nel considerare la pericolosità di un difetto e quindi nel fissare un criterio di accettabilità dello stesso, non si può astrarre dal contesto in cui tale difetto si

trova. Per esempio è necessario il tipo di sollecitazione a cui il giunto è sottoposto, il tipo e l'importanza della struttura di cui il giunto fa parte, le caratteristiche del materiale base e molti altri fattori.

In genere i difetti, siano essi superficiali o interni, riducono la sezione resistente del giunto con conseguente aumento del livello di tensione medio. Ciò comporta, nel caso di sollecitazioni statiche, una certa diminuzione della capacità di carico del giunto.

Un secondo aspetto dannoso dei difetti appare quando si hanno giunti sollecitati a fatica; in questo caso l'effetto di intaglio cui dà luogo il difetto limita notevolmente la resistenza del giunto.

Se si considera infine il caso di costruzioni saldate che lavorano a bassa temperatura, appare un terzo aspetto dannoso dei difetti, quello di aumentare il grado di pluriassialità delle tensioni con conseguente limitazione dell'entità delle tensioni di taglio e possibilità di innesco e propagazione di rotture fragili.

Da quanto detto risulta evidente che i criteri di accettabilità dei difetti devono essere tanto più stringenti quanto più le condizioni di servizio sono severe.

È per questa ragione che ogni azienda decide di modificare la norma di riferimento in base alle esigenze di progettazione del singolo giunto in relazione al componente che si vuole realizzare e alle condizioni in cui esso sarà chiamato ad operare.

## 2.5 Metodi d'ispezione

### 2.5.1 Ispezione visiva

Molte saldature discrepanti possono essere individuate visivamente. Il superamento di qualsiasi limitazione massima consentita o il mancato raggiungimento dei requisiti minimi previsti dalla norma CRF [1] rappresenta motivo di rigetto della saldatura. Si analizzano in seguito i parametri da verificare attraverso un attenta analisi visiva:

- Lunghezza delle saldature  
Sono ammissibili delle difettosità nel primo tratto della saldatura e nell'ultimo tratto a patto che queste non riducano la lunghezza effettiva della saldatura al di sotto dell'80%. Inoltre le lunghezze discrepanti nel tratto restante della saldatura non devono ridurre la lunghezza totale della stessa al di sotto del valore specificato nella norma [1] pari a 13mm. Nei cordoni più lunghi di 200mm, il tratto continuo che presenta delle difettosità non deve superare i 20mm.
- Parte iniziale e finale del cordone  
Il tratto iniziale e finale del cordone non devono essere inclusi nel calcolo della lunghezza accettabile della saldatura a meno che non rispondano ai requisiti dimensionali inerenti ai lembi e alla gola del cordone stesso.
- Incavi nel cordone di saldatura  
Se sono presenti degli incavi nel cordone questi non devono essere considerati parte del tratto di saldatura accettabile.

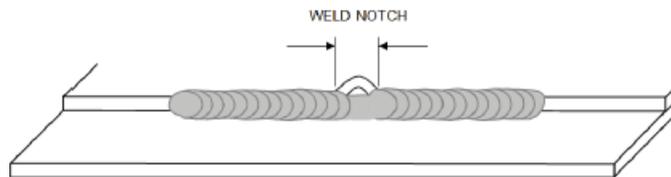


Figura 9: Incavi nella saldatura [1]

- Eccesso di penetrazione  
L'eccesso di penetrazione comporta la creazione di un foro passante che attraversa l'intera saldatura e il suo substrato. Tale fenomeno non è consentito ai fini della realizzazione di un giunto ammissibile.
- Porosità superficiali  
Sono consentite singole porosità la cui distanza non dev'essere inferiore al loro diametro. Inoltre sono ammesse anche porosità superficiali diffuse. La lunghezza totale delle porosità, calcolabile come la somma dei diametri, non deve superare i 6.4mm per ogni 25mm della saldatura.
- Intagli Il cordone di saldatura risulta da scartare se il metallo base viene intagliato per più del 10% dello spessore, per oltre il 20% della sua lunghezza.
- Interruzioni di saldatura Le interruzioni di saldatura non sono consentite.

## 2.5.2 Ispezione metallografica

L'ispezione visiva risulta efficace per scartare quei giunti che presentano delle difettosità macroscopiche riscontrabili dall'operatore semplicemente visionando il pezzo. Questo metodo può non bastare per affermare che una saldatura sia ottimale in quanto non riscontra una serie di parametri fondamentali come le porosità interne, le cricche o la profondità di penetrazione.

Nella norma usata presso il CRF [1] vengono esaminate le singole difettologie dando per ognuna di queste dei valori di soglia oltre i quali il cordone di saldatura dev'essere scartato.

- Porosità interne  
Le porosità interne non devono superare il 15% della sezione di saldatura che si sta esaminando. La somma dei pori non deve inoltre ridurre la dimensione minima richiesta della gola al di sotto del 60% dello spessore dell'elemento più sottile.
- Cricche  
Non è consentita la presenza di cricche.
- Fusione incompleta della radice  
La fusione incompleta dev'essere  $\leq$  al 10% dell'elemento più sottile e  $\leq$  al 20% della lunghezza del segmento di saldatura.

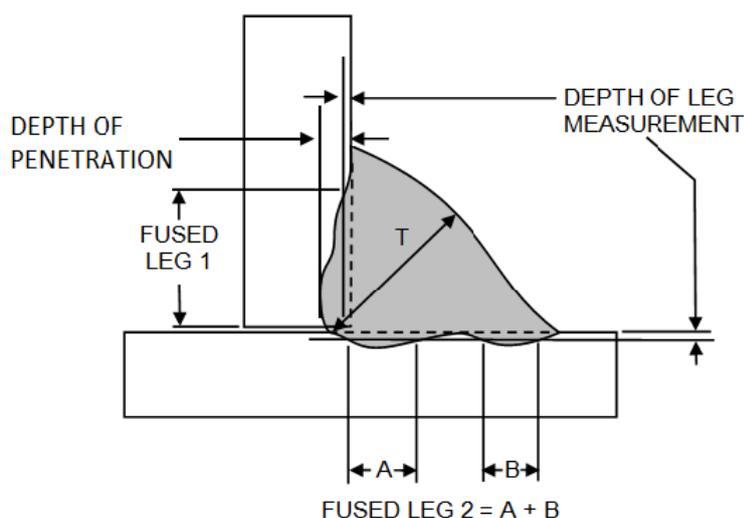


Figura 10: Esempio misurazione del cordone [1]

- Penetrazione  
Facendo riferimento alla Figura 10 si porta all'attenzione come la penetrazione minima richiesta sia pari al 15% dello spessore dell'elemento più sottile da saldare. La profondità di penetrazione è misurata dalla superficie del materiale alla profondità maggiore della fusione visibile. Non sono previsti dei requisiti di penetrazione minima ai bordi dell'elemento sovrapposto quando il bordo è stato rifuso e la fusione è stata completa. Il "melt through" è consentito, salvo diverse indicazioni nel documento di saldatura, purchè non superi il 100% dello spessore dell'elemento più sottile.

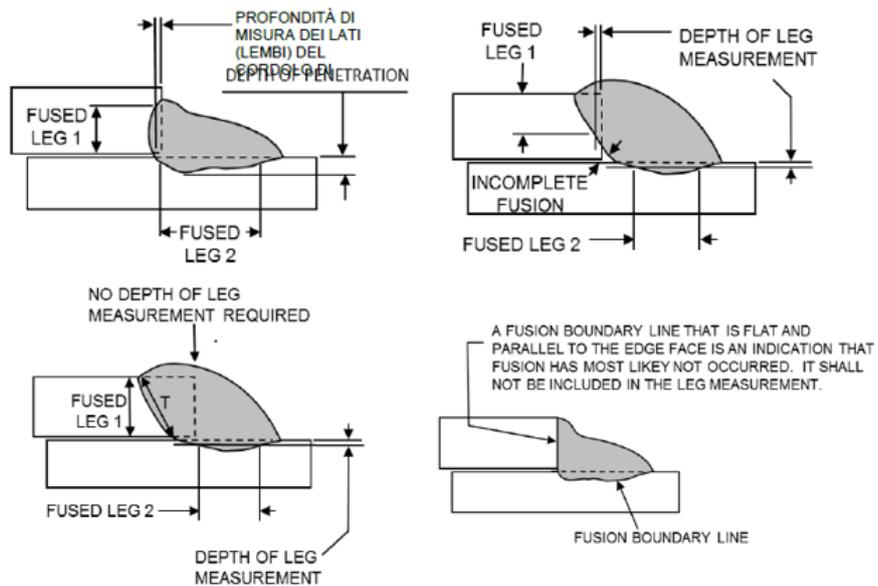


Figura 11: Esempio misurazione del cordone di saldatura di giunti per sovrapposizione [1]

## 3 Stato dell'arte

### 3.1 Raggi x

I raggi x sono radiazioni elettromagnetiche altamente penetranti ad elevata energia caratterizzati da una lunghezza d'onda minore di quella della luce visibile, compresa tra circa 1 nm e 0,001 nm. Emessi da qualunque elemento chimico colpito da un fascio di elettroni ad alta energia, i raggi X possono essere prodotti artificialmente da un tubo radiogeno e sono in grado di attraversare i tessuti organici e di impressionare una pellicola. [11]

La loro scoperta fu accidentale e risale all'anno 1895 ad opera del fisico tedesco Wilhelm Röntgen che per questo ottenne il premio Nobel per la Fisica nel 1901. Parallelamente alla messa a punto degli studi inerenti ai raggi X andavano progredendo i processi di fabbricazione delle emulsioni fotografiche sensibili ai raggi X. Erano così poste le basi da cui avrebbe tratto origine la radiografia industriale.[13]

#### 3.1.1 Generazione di Raggi X

Dalla fisica è noto che, se una carica elettrica in moto è soggetta ad una accelerazione o decelerazione, essa emette della radiazione sotto forma di onde elettromagnetiche sferiche con lunghezza d'onda funzione dell'entità dell'accelerazione, o decelerazione, stessa. Questo principio è alla base del meccanismo della generazione dei raggi X.

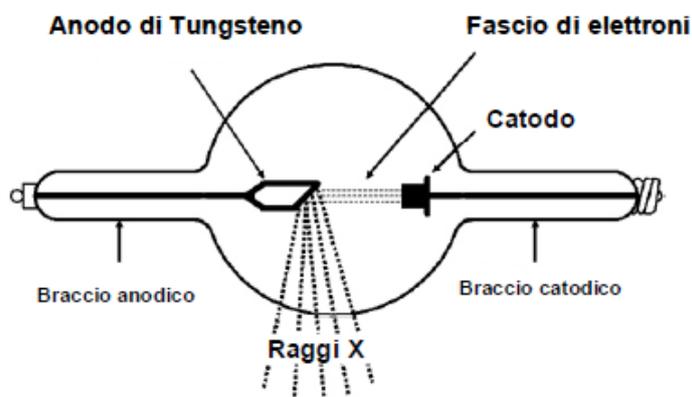


Figura 12: Tubo di Coolidge

Nella Figura12 è illustrato nelle sue parti principali il Tubo di Coolidge. In un tubo di pirex sigillato ad alto vuoto ( $10^{-6}$  Hg) gli elettroni sono generati dal catodo (elettrodo negativo), costituito da un filamento di tungsteno riscaldato con passaggi di corrente. Se si riscaldando tale filamento fino all'incandescenza, si ha emissione di elettroni (emissione per elettrostimolazione). Gli elettroni liberati dal filamento sono successivamente attratti verso il bersaglio e l'emissione dei raggi X è dovuta all'interazione tra gli elettroni (i cosiddetti raggi catodici) con gli atomi dell'anodo. Il target è realizzato in tungsteno, tale materiale è scelto per ottenere una buona efficienza di conversione dell'energia cinetica degli elettroni incidenti in Raggi X, inoltre è caratterizzato da un alto punto di fusione necessario per resistere

alla sovratemperatura raggiunta localmente nel punto di impatto degli elettroni. L'anodo è in rame, metallo con un'elevata conducibilità termica, che permette di trasmettere fuori dal tubo l'intenso calore prodotto durante il funzionamento. Il passaggio verso l'esterno del tubo è assicurato da "finestre" metalliche realizzate con sottili fogli di berillio od alluminio. [14]

### 3.1.2 Radiazione Raggi X

Trattandosi di eventi indipendenti che interessano le singole particelle elementari (elettroni) non è più applicabile la teoria classica, ma secondo i principi della meccanica quantistica si ammette che l'energia irradiata venga emessa non in modo continuo ma per eventi discreti, sotto forma di quanta di energia, in corrispondenza alle singole interazioni.

L'energia, emessa per eventi discreti, si irradia poi sotto forma di onde e quindi ad essa è attribuita lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione.

L'aspetto duale dei raggi X, per cui sono considerati ora sotto forma corpuscolare, ora ondulatoria, non viene approfondita nel presente lavoro. Senza entrare in ulteriori dettagli si fa presente che il legame tra il modello corpuscolare e il modello ondulatorio è dato dalla seguente legge:

$$h\nu = W$$

ove:

W=energia del quanto

h=costante di Planck

$\nu$ =frequenza dell'onda associata

I raggi X presentano uno spettro misto costituito da due parti:

- Uno spettro continuo, determinato dalla variazione continua di energia, dovuta alla diminuzione di velocità che gli elettroni subiscono nell'attraversare il bersaglio metallico
- Uno spettro a bande (discontinuo), detto anche spettro caratteristico, determinato dal rilascio di energia da parte degli elettroni urtati del bersaglio che ritornano sull'orbita originaria. Ad ogni riga corrisponde un preciso livello di energia associato al salto dell'orbita.

Lo spettro a righe è dovuto al fatto che gli elettroni incidenti hanno anche l'effetto di eccitare gli elettroni delle orbite più interne o addirittura di espellerli dall'atomo. A questo punto, l'elettrone dell'orbita più esterna "salta" in quella più interna per riempire il posto lasciato vuoto; l'atomo ritorna così al suo assetto stabile nella transizione ma la differenza fra le energie delle due orbite ( $W_1 - W_2$ ) coinvolte dev'essere in qualche modo compensata, ciò è soddisfatto con l'emissione di un fotone di energia pari appunto a  $W = W_1 - W_2$ .

Questo fenomeno viene detto "radiazione caratteristica" perché i picchi di raggi X prodotti sono tipici dell'elemento utilizzato per l'anodo. Lo spettro caratteristico dipende dal materiale del bersaglio ed è importante sottolineare che la sua energia è piccola se confrontata con quella dello spettro continuo.[13]

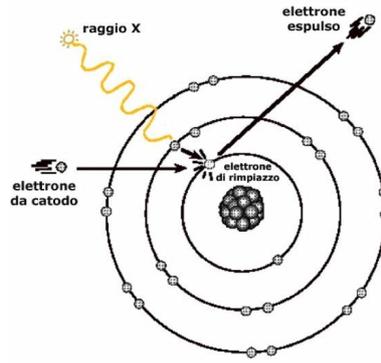


Figura 13: Radiazione caratteristica conseguente ad una transizione fra due livelli orbitali

Lo spettro continuo è dovuto al fenomeno di frenamento (bremsstrahlung) che gli elettroni subiscono: maggiore è il rallentamento tanta più sarà l'energia ceduta. L'energia cinetica dell'elettrone viene trasformata in calore e con la produzione di un raggio X.

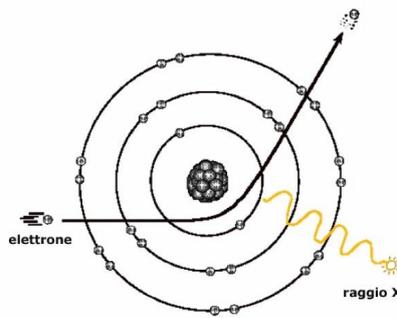


Figura 14: Fenomeno di frenamento

La radiazione di frenamento è distribuita, come detto, su uno spettro continuo, ed è pertanto rappresentabile come segue:

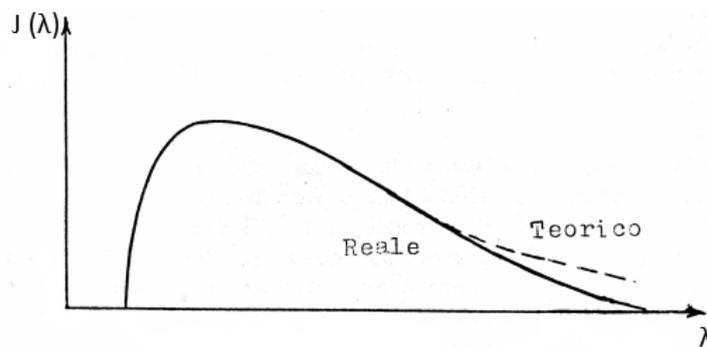


Figura 15: Spettro continuo della radiazione di frenamento

Verso sinistra lo spettro cade piuttosto rapidamente a zero in corrispondenza di un dato valore  $\lambda_{min}$  che si può dimostrare essere inversamente proporzionale ai kV applicati fra catodo e anodo.

Procedendo verso lunghezze d'onda maggiori lo spettro presenta un massimo dopo il quale va riducendosi a zero lentamente.

I raggi X corrispondenti alle  $\lambda$  minori hanno maggior capacità di penetrare attraverso la materia, viceversa alle grandi  $\lambda$  essa va riducendosi sempre più rapidamente.

In teoria lo spettro scende verso destra gradatamente fino ad arrivare ad un valore nullo per valori di  $\lambda$  molto elevati; ma le componenti caratterizzate da  $\lambda$  molto elevati vengono in gran parte assorbite dalla finestra di uscita dello stesso tubo radiogeno e quindi lo spettro emergente termina prima, secondo la curva attratto continuo nella Figura 15.

Ritornando allo spettro della radiazione emessa dal tubo di Coolidge questo presenta un aspetto "a cupola" (radiazione da frenamento) e alcuni picchi che rappresentano la radiazione caratteristica che è diversa a seconda dell'elemento utilizzato per l'anodo.

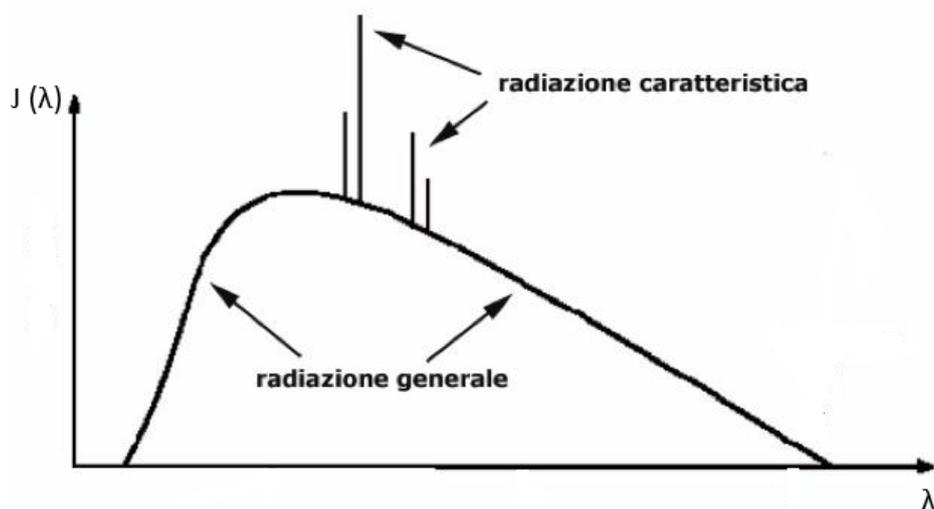


Figura 16: Spettro della radiazione del tubo di Coolidge

Entrambi concorrono a formare il fascio di raggi X, tuttavia nella radiografia industriale lo spettro a righe è sostanzialmente insignificante.

Un'ultima nota sulla radiazione caratteristica è che le lunghezze d'onda delle righe non dipendono dalla tensione acceleratrice bensì unicamente dal particolare atomo coinvolto nella transizione.

Lo spettro continuo dei raggi X può essere modificato andando a variare la corrente con la quale viene prodotto il fascio elettronico per effetto termoionico oppure la tensione di alimentazione imposta tra catodo e anodo che determina l'accelerazione degli elettroni. Se si aumenta la corrente del filamento si ottiene un aumento della emissione di elettroni dal filamento stesso e quindi un aumento di intensità della radiazione prodotta che non ha influenza sull'energia della stessa. Mentre l'aumento della tensione del tubo porta ad un aumento della differenza di potenziale esistente tra catodo e anodo. Se ne deduce che agire sul campo elettrico spinge gli elettroni sull'anodo, ciò si traduce in un aumento dell'energia della radiazione X prodotta.

Per quanto riguarda la radiografia è interessante osservare come si modifica lo spettro continuo al variare della tensione di alimentazione tra catodo e anodo, quando la corrente di emissione del catodo è mantenuta costante.

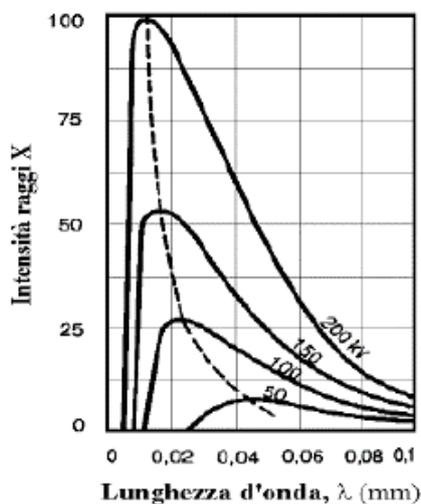


Figura 17: Spettro continuo al variare della tensione di alimentazione [15]

Come si evince dalla Figura17 per aumentare l'energia dei raggi X, e con essa la loro capacità di penetrare la materia, è necessario aumentare la tensione di alimentazione tra catodo e anodo. Passando da una tensione di 50 kV a una di 200 kV si riduce il limite inferiore di lunghezza d'onda ed anche il massimo decresce spostandosi verso valori di  $\lambda$  maggiori.

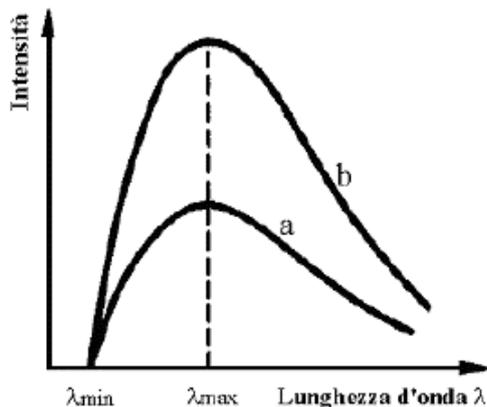


Figura 18: Spettro continuo al variare dell'intensità del pennello di elettroni [15]

Se invece si mantiene costante la tensione acceleratrice (kV) e si varia l'intensità del pennello di elettroni (mA), si nota come la distribuzione dell'energia raggianti nelle varie lunghezze d'onda rimane invariata. In Figura18 La curva (a) è stata ottenuta con bassa corrente mentre la (b) è ottenuta con una corrente più elevata. Il punto di intersezione di ciascuna curva con l'asse delle lunghezze d'onda è chiamato "limite inferiore di lunghezza d'onda" ( $\lambda_{min}$ ), ed è completamente

determinato dalla tensione di alimentazione del tubo. Si può inoltre notare come, all'aumentare della corrente, l'intensità massima dei raggi X aumenta mentre la loro energia, la quale è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, no. L'intensità massima si ha infatti per lo stesso valore della lunghezza d'onda  $\lambda_{max}$ , e il limite inferiore di lunghezza d'onda rimane invariato.

### 3.1.3 Schema di principio di un sistema per la generazione di Raggi X

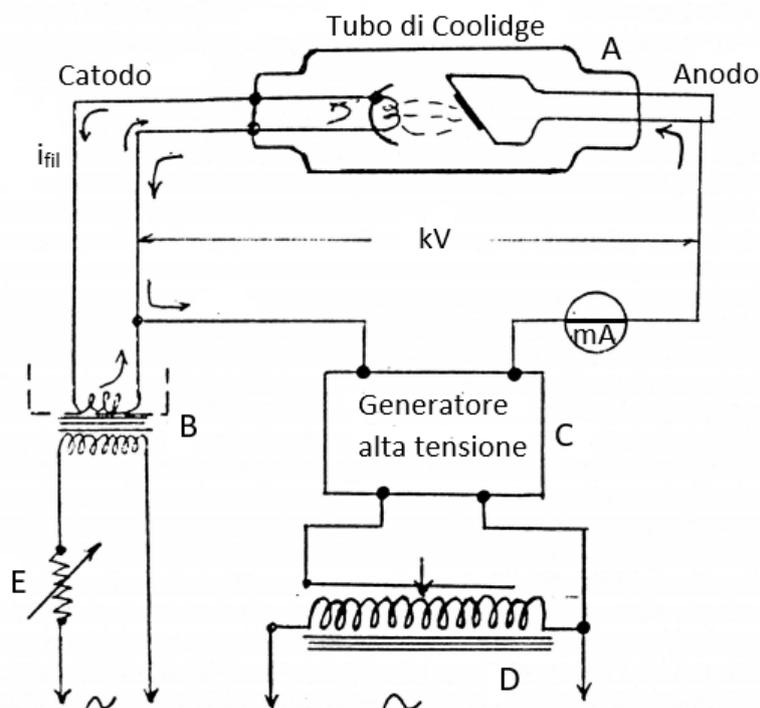


Figura 19: Schema funzionale di un sistema radiogeno

In Figura19 è illustrato un sistema radiogeno composto da:

- Tubo di Coolidge (A)
- Trasformatore (B): utilizzato per isolare l'A.T. applicata al catodo dal circuito di alimentazione a B.T.
- Generatore di A.T. (C)
- Autotrasformatore (D): serve a regolare la tensione di ingresso del generatori di A.T. Con l'autotrasformatore si regolano i kV.
- Reostato (E): serve a regolare i mA.

Si osserva che, nella realizzazione dei moderni impianti a raggi X, possono aversi circuiti elettrici ben più sofisticati ma, in ogni caso, l'alimentazione del tubo di Coolidge è sempre effettuata applicando l'A.T. fra catodo e anodo e la corrente di riscaldamento al filamento.

### 3.1.4 Interazione dei Raggi X con la materia

Come detto, i Raggi X si propagano in linea retta e sono capaci di attraversare la materia. Quello che si vuole approfondire in questo paragrafo è come essi perdano energia interagendo con gli atomi della materia.

Definendo l'intensità della radiazione come la quantità di energia trasportata nell'unità di tempo attraverso l'unità di sezione trasversale del fascio, si osserva fin da ora che l'intensità dei raggi X è soggetta a ridursi man mano che questi si propagano nella materia.

In altre parole l'intensità subisce un'attenuazione in funzione dello spessore attraversato.

Per quanto riguarda le energie interessate nel campo della radiografia industriale, i fenomeni di interazione dei Raggi X con la materia sono sostanzialmente riconducibili a:

- Assorbimento fotoelettrico: avviene quando un fotone dei raggi X di bassa energia, collidendo con un atomo, trasferisce tutta la sua energia ad un elettrone e, se tale energia raggiunge un certo livello di soglia, l'elettrone è espulso e liberato dalla forza di attrazione del nucleo. Questo fenomeno avviene per basse energie del fotone (il quale viene completamente assorbito) e per elevati livelli di numero atomico dell'atomo.[15]

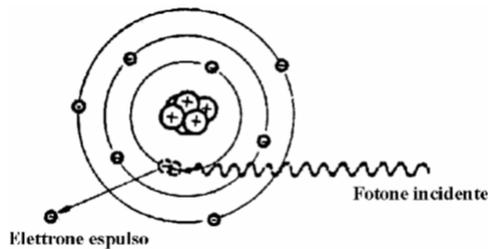


Figura 20: Schema assorbimento fotoelettrico[15]

- Diffusione Compton: avviene quando un fotone con energia superiore alla soglia necessaria alla liberazione di un elettrone, collide con un atomo; della sua energia, parte viene usata per espellere un elettrone dell'orbitale più esterno, e parte prosegue sotto forma di fotone avente però energia inferiore e direzione di propagazione diversa rispetto al fotone incidente.[15]

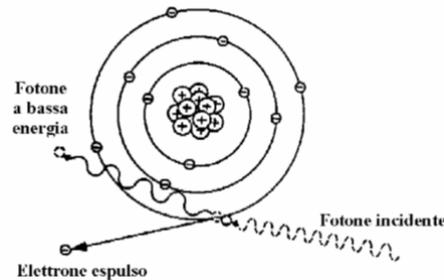


Figura 21: Schema diffusione Compton[15]

- Produzione di coppie: si verifica quando un fotone ad elevata energia, collidendo con un atomo, viene completamente assorbito e al suo posto si formano un elettrone ed un positrone. Il positrone ha una vita brevissima; esso svanisce con la formazione di due fotoni aventi energia pari a 0,5 MeV ciascuno.[15]

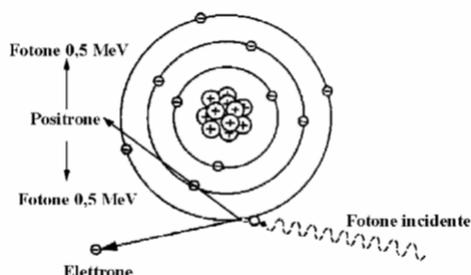


Figura 22: Schema produzione di coppie[15]

Il fenomeno della diffusione elastica, ovvero la deviazione di un fotone in seguito all'interazione con un atomo senza perdita di energia, non è quantitativamente apprezzabile.

### 3.1.5 Esame radiografico

La radiografia è la tecnica che consente di ottenere immagini del contenuto di un solido mediante impressione di un elemento sensibile (pellicola, schermo, ecc.) da parte di radiazioni ionizzanti quali raggi X o raggi  $\gamma$ .

Gli elementi principali che intervengono nell'esame radiografico, e in generale in tutti gli esami non distruttivi sono: l'oggetto esaminato, la tecnica di esame, le apparecchiature e il personale.

Il grado di conoscenza dell'oggetto esaminato (le caratteristiche geometriche, fisiche, metallurgiche nonché le condizioni di esercizio) può dare un significato più preciso e circostanziato sia dei criteri adottati nell'esecuzione del controllo che al giudizio emesso.

La tecnica di esame e le apparecchiature sono di primaria importanza nel controllo radiografico sia perché da esse dipende l'affidabilità dell'esame sia perché una loro ben precisa descrizione rende riproducibile l'esame stesso e confrontabili i relativi risultati.

Per ultima, ma non per importanza, è la necessità che l'esame RX sia effettuato da personale qualificato e certificato.

I raggi scoperti da Roentgen presentavano le seguenti caratteristiche:

- Provocavano fluorescenza in alcuni minerali contenenti sali di zinco, platino e altri metalli pesanti;
- Riuscivano ad attraversare i corpi opachi alla luce;
- Erano in grado di impressionare le lastre fotografiche.

Combinando la capacità di attraversare i corpi opachi alla luce e quella di impressionare le lastre fotografiche, Roentgen ebbe la geniale intuizione di interporre un oggetto tra la sorgente dei raggi X e una lastra fotografica.

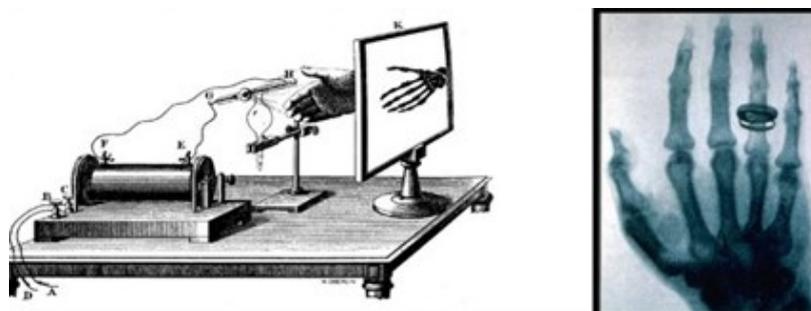


Figura 23: Esperimento Roentgen

In Figura23 é rappresentato lo schema illustrativo dell'esperimento di Roentgen effettuato nel 1895 e la radiografia eseguita alla mano della moglie Berta nel dicembre dello stesso anno.

Grazie a lui, i raggi X sono stati quasi subito impiegati per quello che poi sarebbe diventato il loro principale campo di applicazione: la diagnostica.

L'esame radiografico è oggi diffusamente impiegato per ispezionare una larga vastità di prodotti metallici e non metallici per la rivelazione della struttura interna, di discontinuità strutturali ed assemblaggi non corretti.

La radiografia è utilizzata soprattutto durante la fabbricazione dei componenti o nelle fasi intermedie della lavorazione, come la saldatura, e permette, rilevando errori, di procedere ad azioni correttive durante il ciclo di produzione.

La qualità interna delle saldature è ad oggi ispezionata usando raggi X generati da apposite apparecchiature oppure raggi  $\gamma$  emessi spontaneamente da alcune sostanze radioattive.

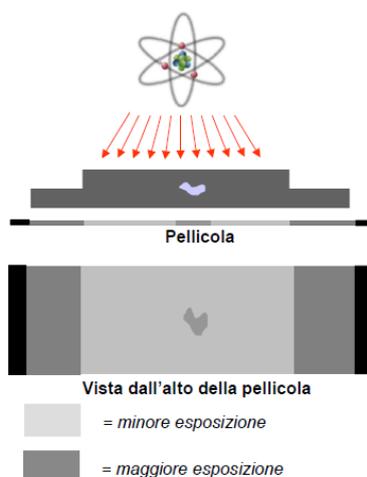


Figura 24: Schema esame radiografico [15]

La qualità della tecnica radiografica impiegata è valutabile mediante I.Q.I (identificatori di qualità dell'immagine).



Figura 25: I.Q.I. a fili e a fori [16]

La tipologia di I.Q.I. più diffusa è quella detta "a fili", che sono costituiti da una serie di sette fili (Fe-Al-Cu-Ti etc.) di diametro diverso, in funzione delle caratteristiche del test da eseguire. La sensibilità radiografica è calcolata come rapporto tra il diametro del filo più sottile visibile sulla radiografia e lo spessore del pezzo radiografato [16]. Questo tipo di penetrametro viene posto generalmente a cavallo della zona di interesse che deve essere radiografata, com'è possibile vedere nell'illustrazione seguente:

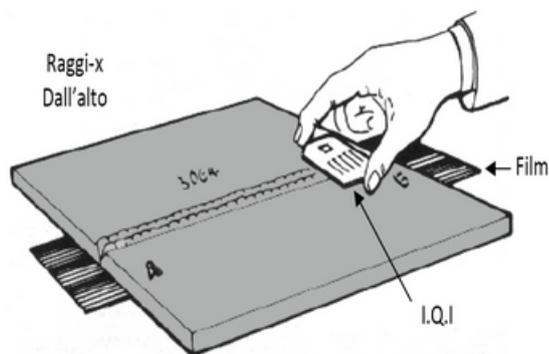


Figura 26: Applicazione I.Q.I. a fili

Un altro tipo di penetrametro molto utilizzato è quello "a fori", a destra nella Figura 25, ed è realizzato da una piastrina di spessore  $T$  (che rappresenta una certa percentuale dello spessore del pezzo da radiografare) sulla quale si eseguono tre fori di diametro  $T$ ,  $2T$ ,  $4T$ . In questo caso la sensibilità si valuta sulla base del diametro del foro che risulta più visibile sull'immagine radiografica.

È importante ricordare infine che, per la pericolosità delle radiazioni, il controllo radiografico richiede un adeguato complesso di precauzioni allo scopo di limitare i pericoli che possono derivare all'organismo umano dall'assorbimento di dosi eccessive di radiazioni.

### 3.1.6 Proprietà Raggi X e $\gamma$

I raggi X e  $\gamma$  sono onde elettromagnetiche che presentano le seguenti proprietà, utilizzabili per il controllo non distruttivo dei materiali:

- In virtù della loro elevata energia possono penetrare corpi opachi alla luce;
- Sono assorbiti in maniera differenziale;
- Si propagano in linea retta;
- Producono degli effetti fotochimici sulle emulsioni fotografiche;
- Ionizzano il gas attraversato;
- Non sono deviati da campi elettrici e magnetici;
- La loro velocità di propagazione è uguale a quella della luce;
- Possono liberare elettroni per effetto fotoelettrico;
- Provocano la fluorescenza di alcune sostanze
- L'attraversamento dei corpi avviene con un assorbimento di radiazione più o meno elevato, secondo lo spessore e la natura del materiale attraversato;
- Il grado di assorbimento aumenta all'aumentare del numero atomico del materiale attraversato
- Il potere di penetrazione delle radiazioni aumenta al diminuire della lunghezza d'onda delle radiazioni

Nel caso dei raggi X la lunghezza d'onda è tanto più piccola quanto maggiore è la tensione applicata al tubo radiogeno. Gli apparecchi per la radiografia industriale sono predisposti per il funzionamento con tensione regolabile in funzione dello spessore da radiografare.

### 3.1.7 Applicazioni Raggi X

Le più importanti applicazioni dei raggi X si trovano nel campo della ricerca scientifica, nell'industria e in medicina. Ad esempio, mediante metodi di diffrazione X, è stato possibile identificare la natura di sostanze cristalline e determinarne la struttura reticolare. Con metodi simili è possibile identificare i composti chimici e determinare le dimensioni di particelle ultramicroscopiche. Per mezzo di tecniche di spettroscopia X gli elementi chimici di un campione di cui non si conosce la composizione possono essere identificati grazie al riconoscimento delle lunghezze caratteristiche delle righe spettrali.

Una recente applicazione che sta avendo sempre maggiore importanza nella ricerca è la microradiografia che produce immagini ad alta risoluzione utilizzati per la realizzazione di particolari ingrandimenti. È inoltre possibile combinare due radiografie in un proiettore, per produrre un'immagine tridimensionale chiamata

stereoradiogramma. È inoltre possibile utilizzare la radiografia a colori per evidenziare i dettagli delle fotografie, e questa tecnica è resa possibile dal diverso grado di assorbimento di radiazione X da parte di porzioni diverse del campione. Con una microsonda elettronica è poi possibile ottenere informazioni estremamente dettagliate sulla composizione e sulla distribuzione superficiale degli elementi chimici di un campione di cui non si conosce la composizione. La microsonda consiste di un fascio di elettroni altamente collimato che induce l'emissione di raggi X da parte di un'area del campione molto ristretta, dell'ordine di 1 micrometro quadrato.

Già da diversi anni i raggi X svolgono un ruolo di fondamentale importanza nell'industria, in particolar modo nel settore della ricerca industriale e nella fase di collaudo di diversi prodotti. Nell'industria metallurgica, le immagini a raggi X raccolte su opportune piastre fotografiche permettono di individuare eventuali bolle. Poiché si tratta di una tecnica dispendiosa in termini economici, in alcuni casi, per ridurre i costi vengono impiegate sorgenti radioattive, che emettono raggi gamma molto penetranti.

L'ispezione regolare per mezzo di tecniche a raggi X viene usata per valutare la qualità o l'autenticità di vari prodotti industriali e di pietre preziose. Infine, nelle fasi preliminari dei restauri di opere d'arte e di reperti archeologici, trovano la loro applicazione raggi X a bassa energia.

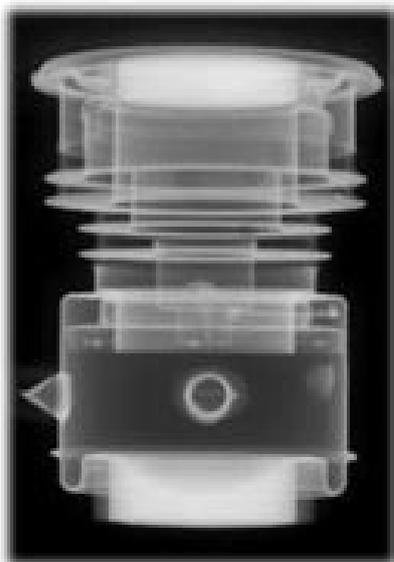


Figura 27: Radiografia componente meccanico assemblato

Una delle maggiori applicazioni dei raggi X in ambito medico è la radiologia che rappresenta un vero e proprio settore medico, caratterizzato da specifiche tecniche diagnostiche e terapeutiche. Grazie al loro potere di penetrazione i raggi X trovano largo impiego nella diagnostica. Oggi i metodi diagnostici radiologici comprendono indagini estremamente precise, come la tomografia computerizzata (TC) e la risonanza magnetica nucleare (NMR); mentre l'uso dei raggi X a scopo terapeutico rientra nei trattamenti di radioterapia.

Nella seguente immagine è possibile vedere come, da un esame radiografico non invasivo, si possa facilmente diagnosticare una frattura ad un piede:



Figura 28: Radiografia frattura del piede sinistro

L'ispezione radiografica, in base al tipo di apparecchio e alle caratteristiche del prodotto alimentare, può identificare una varietà di contaminanti fisici, tra cui metallo, vetro, gomme, pietre e alcuni tipi di plastica. Dato che fornisce immagini non invasive, l'utilizzo dell'ispezione radiografica è particolarmente diffuso per i prodotti impacchettati e per cibi elaborati, in particolare viene utilizzato per bottiglie, lattine, barattoli e sacchetti.

Grazie alla tecnologia più avanzata, i raggi X vengono utilizzati per il controllo e la verifica durante la produzione degli alimenti.

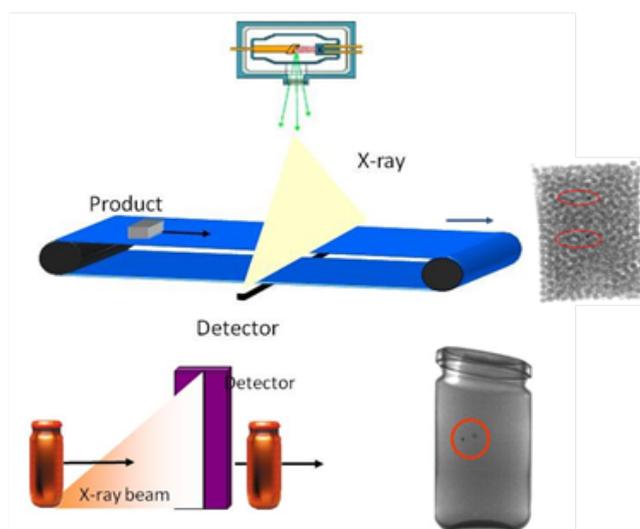


Figura 29: Applicazione raggi X per il controllo della qualità degli alimenti

### 3.1.8 Limitazioni radiografia

Ci sono delle limitazioni fisiche ed economiche all'uso industriale della radiografia:

- I requisiti della geometria di esposizione possono rendere impraticabile il metodo per prodotti aventi geometria complessa;
- I componenti o le strutture che non sono accessibili da più di un lato non possono essere radiografate;
- L'esame si basa sulla differenza di densità da parte dell'oggetto, pertanto piccole discontinuità che non siano orientate parallelamente al fascio di radiazioni non sono rilevabili;
- L'esame radiografico richiede l'osservanza dei requisiti di sicurezza imposti per la manipolazione di sorgenti di radiazioni X;
- L'esame radiografico è una delle più costose metodologie di ispezione non distruttive.

## 3.2 Termografia ad infrarossi

La termografia è una tecnica non distruttiva che permette di tracciare, mediante l'acquisizione di immagini all'infrarosso, una mappatura visibile della temperatura di un corpo. Senza contatto rileva, elabora e visualizza la distribuzione della radiazione termica che irradia da un corpo mediante l'utilizzo di una termocamera. In ambito industriale la termografia è usata principalmente per rilevare e localizzare discontinuità come cricche, distacchi e inclusioni.

Il corpo analizzato, sottoposto ad un campo tensionale, rilascia energia. In questa tecnica infatti è il corpo stesso a rilasciare energia e non è indotta da una sorgente esterna, come si verifica, invece, nella maggior parte dei controlli non distruttivi come, ad esempio, gli ultrasuoni, i raggi X, la magnetoscopia, ecc. La quantità di energia rilevata è fornita principalmente dalla crescita di fratture e dalla deformazione plastica.

Dal punto di vista termografico si può affermare che ogni evento danneggiante che si verifica nel materiale può essere rilevato come una variazione della temperatura superficiale. Ed è quindi rilevabile sotto forma d'incremento di temperatura da un sensore all'infrarosso. È inoltre possibile, acquisendo immagini in continuo, localizzare i fenomeni puntuali di plasticizzazione.

La fonte principale dell'infrarosso è rappresentata dal calore: qualsiasi corpo ad una temperatura superiore allo 0 Kelvin emette delle radiazioni con una lunghezza d'onda compresa tra  $10^{-2}$  e  $10^{-5}$  m.

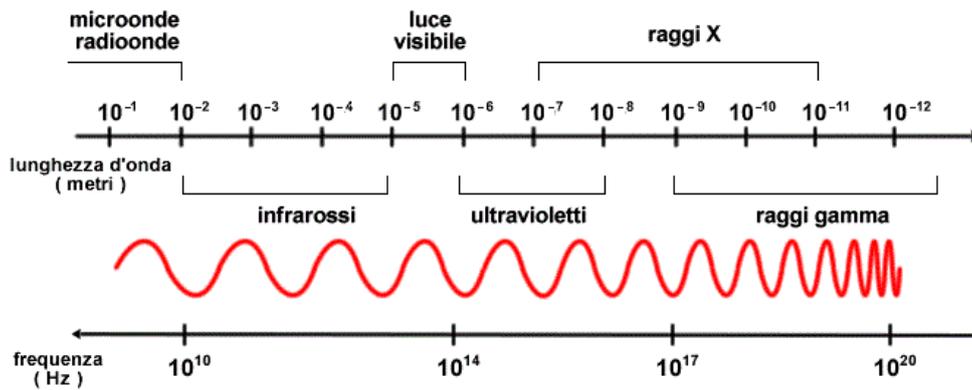


Figura 30: Spettro elettromagnetico

I vantaggi dell'utilizzo della termografia possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

- Facilità di indagine poiché consiste in un'analisi a distanza del componente e maggiore sicurezza per gli operatori in caso di ambienti di lavoro critici;
- Meno costoso rispetto ad altre indagini non distruttive con i raggi X;
- I in alta risoluzione di facile interpretazione anche in tempo reale.

I test termografici possono essere utilizzati per indagini qualitative, comparative o quantitative.

Si parla di termografia qualitativa se la densità di radiazione o della distribuzione di temperatura apparente sull'oggetto è adeguata a una valutazione del risultato della prova. Si provi a pensare al controllo della variazione nel riscaldamento a pavimento o alla localizzazione di perdite nelle tubazioni.

La termografia comparativa si avvale invece di differenze di temperatura apparenti o e differenze di fase per mezzo di confronti.

Nella termografia quantitativa le temperature o i parametri secondari come angolo di fase sono determinati e valutati dai valori di radiazione misurati e per una corretta misurazione della temperatura è necessario conoscere i parametri del materiale, la dipendenza dalla temperatura, i parametri ambientali e relativi intervallo di lunghezze d'onda.



Figura 31: Termocamera FLIR

Lo strumento cardine di questa tecnica è la termocamera (Figura31), strumento in grado di rilevare l'intensità della radiazione all'infrarosso di un corpo. L'elettronica della macchina elabora la radiazione e produce un'immagine radiometrica digitale visibile in cui è possibile visualizzare la temperatura dell'oggetto rappresentata in falsi colori. In commercio se ne trovano di due tipologie, quelle raffreddate e quelle non raffreddate. Le prime hanno precisioni più alte e spesso costi più elevati rispetto le seconde che risultano le più utilizzate ad esempio in campo edile.

Le termocamere possono essere semplici visori o dispositivi a taratura radiometrica. I visori a infrarossi sono sufficienti per attività qualitative come la rivelazione di punti caldi o analisi di distribuzioni delle radiazioni. Le termocamere a taratura radiometrica consentono le misurazioni di radianza, differenze di temperatura o temperature assolute a condizione che siano noti i parametri dell'oggetto, come l'emissività e la temperatura riflessa apparente.[23, 24]

Bisogna prestare attenzione alla scelta dei seguenti parametri di prova: emissività, temperatura ambiente, temperatura riflessa e umidità. Se temperatura ambiente e umidità non necessitano di particolari approfondimenti, lo stesso non vale per i restanti due parametri. L'emissività  $\varepsilon$  può essere definita come il grado di efficienza nell'emissione di radiazione infrarossa da parte di un oggetto. Dipende dalle condizioni della superficie del pezzo che si sta ispezionando (sporco, olio lubrificante), dalla rugosità e per alcuni materiali anche dalla temperatura. Un vero corpo nero avrebbe  $\varepsilon = 1$  mentre qualunque oggetto reale ha  $0 < \varepsilon < 1$ .

Una rugosità elevata e senza direzioni preferenziali aumenta l'emissività e la rende meno sensibile alle variazioni di angolo di emissione. Ne consegue che non è sempre possibile stabilire univocamente l'emissività di un corpo: nel caso ci siano forti variazioni risulta più corretto parlare di emittanza in un dato punto, in una certa direzione, a una certa temperatura e a una data lunghezza d'onda. Come mostrano le figure seguenti, impostando dei valori di emissività errata è possibile sottostimare o sovrastimare il valore reale della temperatura. [20]



Figura 32: Stima dell'emissività

### 3.2.1 Classificazione tecniche termografiche

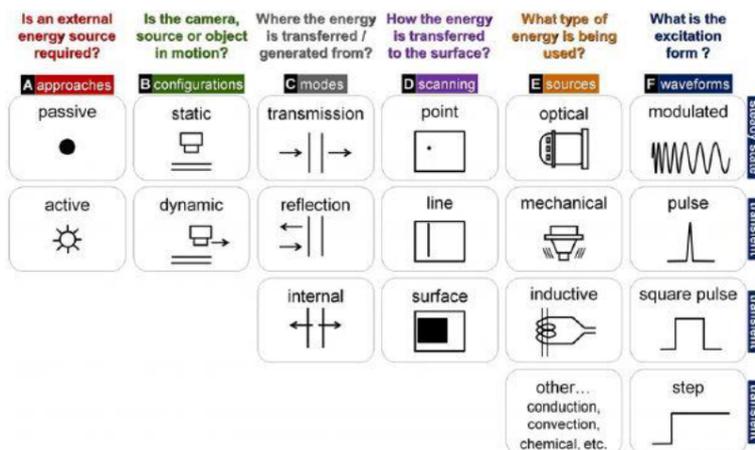


Figura 33: Panoramica applicazioni termografia

Lo schema in Figura33 offre una panoramica completa della termografia e delle sue possibili applicazioni. Si tratta di uno schema a blocchi attraverso cui è possibile selezionare una configurazione completa di tale tecnica di controllo non distruttivo. La prima scelta è relativa alla tipologia di approccio: termografia passiva o attiva. In entrambi i casi è possibile poi individuare la configurazione della prova, avendo la possibilità di scegliere tra una simulazione statica o dinamica, in base alle collocazioni nel tempo della termocamera, della sorgente e dell'oggetto di analisi. Un altro aspetto di cui bisogna tener conto è la modalità con cui avviene il trasferimento di energia e la successiva rilevazione del segnale termico. È possibile definire uno studio di tipo puntuale, lungo una linea o su di una superficie. La termografia può essere classificata anche in base al tipo di sorgente impiegata. Infine, è possibile scegliere tra differenti forme d'onda di eccitazione: modulata, pulsata, onda quadra e con sollecitazione a gradino.

Come detto è possibile effettuare una prima classificazione delle tecniche di termografia ad infrarosso in funzione della sorgente di calore utilizzata. Si possono così distinguere due tipologie di analisi: attiva(offline) e passiva(online). La termografia passiva permette di studiare dei materiali che si trovano naturalmente ad una temperatura superiore rispetto all'ambiente, mentre con il metodo di tipo attivo è necessario sollecitare termicamente il materiale dall'esterno con l'ausilio di specifiche sorgenti. Per questo secondo metodo, a seconda della tipologia di eccitazione esterna adottata, si definiscono le seguenti tecniche: pulsata, a gradini, lock-in e a raffica di impulsi. [20]

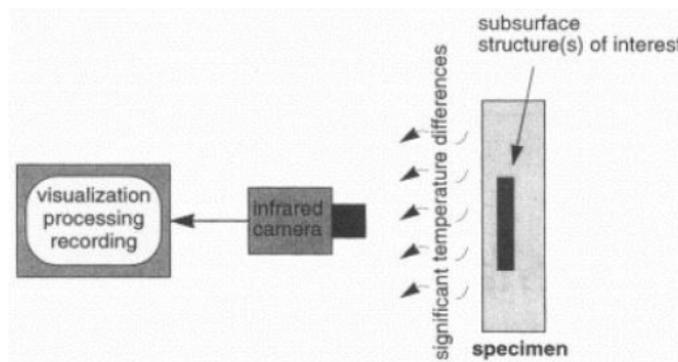


Figura 34: Schema termografia passiva

Nella Figura34 è riportato uno schema qualitativo della configurazione tipica della termografia passiva. In questo caso la termocamera viene posizionata frontalmente al componente da analizzare e acquisisce i risultati termici superficiali. I valori rilevati sono registrati e processati tramite apposito software. Le registrazioni vengono mostrate tramite una successione continua di frame di temperature espresse tramite andamenti in falsi colori. I risultati possono fare riferimento a temperature reali o apparenti, in base all'esattezza con cui sono note le caratteristiche del materiale e le condizioni di lavoro.

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

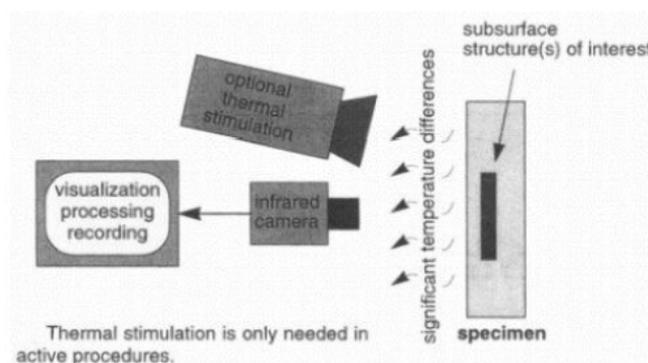


Figura 35: Schema termografia attiva

La termografia attiva di tipo lock-in esamina la risposta termica del componente in regime stazionario durante la deposizione di calore. Sfrutta onde termiche per eccitare il materiale da esaminare mediante l'utilizzo di una sorgente di calore esterna, tipicamente un laser. Con il termine lock-in ci si riferisce alla dipendenza del segnale di eccitazione di uscita da quello di ingresso. È necessario scegliere i parametri di prova del segnale di input sulla base del componente da esaminare: tipologia e numero di impulsi, periodo del singolo impulso e potenza di eccitazione laser. [19]

Nella lock-in il riscaldamento del campione avviene con delle onde termiche modulate. Gli output della prova per analizzare il campione e valutare la presenza o assenza del difetto sono la fase e l'ampiezza. Con la Lock-in conoscendo la fase e la frequenza di eccitazione è possibile determinare la profondità del difetto ma per avere una corretta visualizzazione del difetto devo usare una frequenza adatta, che dia un buon contrasto di fase. Il contrasto di fase è la differenza tra la fase di un campione non sano e di uno sano.[28][29]

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

Da formule reperibili in letteratura è possibile concludere che frequenze elevate consentono uno studio in prossimità dello strato superficiale, mentre basse frequenze permettono uno studio a profondità maggiori.

La selezione di una frequenza di modulazione non adatta potrebbe impedire la rilevazione di un difetto, è quindi buona prassi quella di procedere ad ispezioni, operando inizialmente con bassi periodi di eccitazione termica, aumentando gradualmente la durata in modo da avere uno studio completo lungo tutto lo spessore del materiale in esame. Il valore di potenza con cui stimolare il campione dipende dal tipo di materiale. Materiali come i metalli con bassa emissività e che presentano caratteristiche termiche di elevata conduzione del calore, e quindi alta diffusività termica, necessitano di potenze più elevate ed è buona pratica condurre le prove che riguardano tali materiali combinando alti valori di potenza e brevi periodi di eccitazione. La tecnica lock-in, tramite un software di post processing, fornisce delle informazioni di ampiezza e fase del segnale termico di risposta del materiale.

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

Un ulteriore vantaggio dell'algoritmo di lock-in è l'intrinseca capacità di filtrare disturbi derivati da rumore ad alta frequenza presenti nel segnale misurato. Ciò grazie ai filtri passa basso dell'algoritmo di correlazioni lock-in, in grado di agire selettivamente solo su una data armonica del segnale.[25]

## 4 Materiali e metodi

Nella trattazione che segue sono stati descritti i materiali utilizzati, la strumentazione con cui sono state condotte le prove sperimentali e quelle con cui si è effettuato il controllo online e offline dei cordoni ottenuti. Si sono voluti infine analizzare tutti gli step che hanno portato alla realizzazione dei giunti saldati e al monitoraggio degli stessi. Vengono perciò discusse le procedure con cui sono stati saldati i giunti, i protocolli e gli strumenti adoperati per i test di termografia attiva e passiva e le analisi radiografiche.

### 4.1 Strumentazioni utilizzate

#### 4.1.1 Processo di saldatura

Le prove realizzate consistono nella realizzazioni di giunti per sovrapposizione ottenuti tramite processo di saldatura ad arco pulsato di tipo MAG utilizzando la tecnica CMT. A tale scopo si è impiegato l'impianto robotizzato di saldatura ad arco, costituito dal generatore di saldatura del tipo Transpulse Synergic 4000 CMT della Fronius, Figura37, e il robot antropomorfo fornito dalla COMAU, Figura36.



Figura 36: Robot antropomorfo di Comau

Il robot antropomorfo trova applicazione in diversi comparti produttivi, dal settore automobilistico all'industria elettronica, dove è responsabile di una lunga serie di operazioni – di taglio, saldatura, verniciatura, montaggio di materiali – che porta a termine con velocità e precisione. Un robot sicuro, con un margine di errore praticamente nullo, che sta spingendo all'estremo il processo di automazione industriale. I robot antropomorfi hanno una struttura cinematica aperta, presentano 6 gradi di libertà ed un involuppo di lavoro sferico. Il termine “antropomorfi” evoca proprio la riproduzione della sembianza e del movimento di un braccio umano.

Il robot usato è un robot antropomorfo a 6 assi più due gradi di libertà riservati

all'arm su cui vengono poggiate le lamiere da saldare.

Il robot è equipaggiato con il sistema di saldatura digitale "Fronius CMT" costituito da due motori:

- Generatore per saldatura TransPuls Synergic 4000CMT con unità di controllo remoto RCU5000i;
- Sistema di avanzamento del filo a rullini contro-rotanti VR4000.



Figura 37: Transpuls Synergic 4000 CMT della Fronius

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

- Saldatura Synergic ad impulsi;
- Saldatura Synergic di tipo standard;
- Cold Metal Transfer.

Il generatore CMT 4000 Advanced supporta perciò anche l'evoluto processo CMT. Le particolarità di questo processo, come si è visto nei capitoli precedenti, consistono in minore apporto di calore, passaggio di materiale controllato a corrente ridotta per una saldatura pressoché priva di spruzzi, maggiore rendimento di metallo depositato, migliore riempimento dei gap, stacco della goccia preciso e massima stabilità dell'arco voltaico.

Il generatore permette di controllare due velocità:

- Velocità inserimento filo
- Velocità avanzamento filo

Nell'equipaggiamento sono compresi anche: l'unità di comando a distanza robot, il gruppo di raffreddamento ad acqua, la bombola di gas e la torcia di saldatura. Raccolto sul generatore troviamo il materiale d'apporto su di una bobina da cui viene trainato attraverso il VR4000.

Questa attrezzatura è la più adatta a funzionare in modalità semiautomatica. L'operatore, agendo sull'unità di controllo, configura da remoto i parametri di saldatura. È sempre all'operatore che spetta, attraverso la manopola dell'unità di comando, definire il percorso del robot.

Il sistema RCU5000i memorizza inoltre le curve sinergiche ovvero le relazioni empiriche individuate in fase di progettazione che legano le variabili di processo tra loro.

Tutti i parametri di saldatura risultano tra loro dipendenti e questo consente di realizzare una configurazione di processo ottimale in funzione del materiale, della geometria, del gas di protezione e del materiale d'apporto.

#### **Generatore di corrente (tps 5000)**

Parametri	Valori
Efficienza	89%
Intervallo corrente di saldatura	3-500A
Tensione al minimo	70V
Tensione di esercizio	14.2-390V

#### **Scheda sbobinatrice (VR4000)**

Diametro filo	0.8-1.6 mm
---------------	------------

#### **Scheda robot**

Stick-out	15mm
Flusso di gas attivo	15 l/min

Tabella 1: Caratteristiche sistema di saldatura

### **4.1.2 Termografia online**

Per acquisire il segnale termografico del processo di saldatura ad arco è stata utilizzata una termocamera FLIR System del modello AGEMA Thermovision 900 equipaggiata di un detector SPRITE raffreddato termoelettricamente, avente una risoluzione termica NETD pari a  $0.1^\circ$  e adatta al range spettrale da 2 a  $5,4 \mu\text{m}$ .



Figura 38: Termocamera AGEMA Thermovision 900 SW-TE (FLIR Systems)

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche specifiche della termocamera.

Detector	2 x SPRITE raffreddamento termoelettrico a $-70^{\circ}\text{C}$ , serial scanning
Campo spettrale	Da 2 a $5,4 \mu\text{m}$ (Short Wave lenght)
Sensibilità termica	da $0.1^{\circ}\text{C}$ a $30^{\circ}\text{C}$
Campo di vista (FOV)	$20^{\circ}\text{C} \times 12.5^{\circ}\text{C}$
Risoluzione geometrica	$2,5 \text{ mrad}$
Numero di range di temperature	4
Filtri disponibili	5 (Flame, Sun reflex, $\text{CO}_2$ , Atmospheric, Glass High Temperature)
Accuratezza	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ (nel range 1), $\pm 1\%$ (nei range 2-4)
Ripetibilità	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (nel range 1), $\pm 0.5\%$ (range 2-4)
Frequenza acquisizione immagine	20/30 Hz (senza filtri)
Intervallo di misura della temperatura	da $-10^{\circ}\text{C}$ a $500^{\circ}\text{C}$ ( $2000^{\circ}\text{C}$ con uso filtri)
Risoluzione spaziale	140 elementi per linea (modulazione 50%)
Risoluzione delle immagini	$204 \times 128$ pixel ( $204 \times 86$ a 30 Hz)
Numero di linee per frame	128 (86 a 30 Hz)
Pixel per linea	204
Numero di pixel	25728 ( $17286$ a 30 Hz)
Frequenza IR di linea	$3,5 \text{ kHz}$
Digitalizzazione immagini	12bit

Tabella 2: Caratteristiche della termocamera

### 4.1.3 Termografia attiva (Lock-in)

Le prove di indagine con termografia attiva con tecnica Lock-in sono state condotte utilizzando il sistema fornito dalla DES, denominato MultiDES System Laser. Questo strumento è stato brevettato per l'analisi di integrità strutturale e il controllo non distruttivo di componenti e strutture. Basato sulla Termografia attiva è costituito da una centralina elettronica che consente l'utilizzo di eccitatori termici multipli (lampade alogene, lampade flash, laser, ultrasuoni, microonde). E' uno strumento modulare, corredato di apposito software di analisi, capace di identificare una ampia varietà di difetti esistenti per differenti tipologie di materiali. E' dotato di sensori per il monitoraggio continuo dei livelli di emissione delle sorgenti termiche che possono essere utilizzati per il controllo in retroazione, al fine di garantire la sicurezza degli operatori in tutte le fasi del controllo e dell'analisi. Questa configurazione laser, che trova la sua principale applicazione nell'ispezione di metalli e per l'analisi delle saldature, assicura elevata duttilità, grazie alla possibilità di modulare la potenza e la dimensione del fascio, garantendo ottima risoluzione geometrica.



Figura 39: Termocamera FLIR X6540sc

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche specifiche della termocamera FLIR X6540sc (FLIR System):

Detector	FPA Indium Antimode (InSb) raffreddamento a ciclo chiuso Stirling a 77K
Campo spettrale	Da 1.5 a 5,1 $\mu\text{m}$ (Short Wave lenght)
Pitch	15 $\mu\text{m}$
Sensibilità termica NETD	< 25mK
Campo di vista (FOV)	11x8.8
Range di temperatura	Da 5°C a 300°C (senza filtri)
Filtri disponibili	3 (CO <sub>2</sub> , Through Glass, Through Flame)
Accuratezza	
$\pm 1^\circ\text{C}, \pm 1\%$ della lettura	
Frequenza acquisizione immagine	125 Hz (Full frame)
Massima image frequency	4011 Hz
Risoluzione delle immagini	640x512 pixel (Full frame)
Numero di linee per frame	512
Pixel per linea	640
Numero di pixel	327680
Windowing	320x256/160x128
Digitalizzazione immagini	14bit
Tipologia	Pulsed Itterbium Fiber Laser
Potenza massima	30 W
Forma d'onda	Impulso singolo/treni di impulsi
Ripetizioni	1-65025
Durata impulso	5 ms – 10000 s (step 1 ms)
Dimensione spot laser	6-9 mm

Tabella 3: Caratteristiche della termocamera FLIR X6540sc

Il sistema è così composto:

- Centralina elettronica di controllo DES
- Modulo Laser (YLP-V2 Series 1mJ energy Pulsed Itterbium Fiber Laser), Laser Control Unit (LCU) composto da Laser in fibra da 30W di potenza massima e testa di scansione e Beam expander 2-8x
- PC
- Termocamera FLIR X6540sc con sensore di tipo raffreddato ad alte prestazioni

- Software ResearchIR Max 4.40 (proprietario FLIR) per gestione e settaggio parametri termocamera
- Software di gestione della centralina elettronica MultiDES R3.0 (proprietario DES) per il settaggio parametri di prova
- Software di analisi dati termografici IRTA 1.6.13 (proprietario DES) con moduli di indagine Lock-In, Transient e analisi termoelastica delle sollecitazioni TSA
- Cabina di sicurezza per Laser



Figura 40: Sistema MultiDES System LASER

#### 4.1.4 Radioscopia

La radioscopia si differenzia dalle tecniche radiografiche convenzionali che utilizzavano le pellicole in quanto l'immagine prodotta dai raggi X può essere visualizzata in tempo reale, ed è visionabile anche durante il suo movimento per mezzo di manipolatore meccanico interno alla cabina.

La capacità di visualizzare delle immagini mediante un computer dedicato rappresenta il maggior vantaggio di un sistema di radioscopia digitale.

In Figura 41 è rappresentato l'equipaggiamento per la radioscopia ad eccezione della postazione di monitoraggio e post produzione dell'immagine radioscopica. Si possono distinguere:

- Flan planner;
- Tubo radiogeno;
- Piattaforma rotante;
- Generatore.



Figura 41: Sistema radioscopico

Da pochi anni i sistemi IB (Intensificatori di Brillanza) sono stati superati da una nuova tipologia di rilevatori, i Flat Panel ad alta risoluzione. Con questa tecnologia le immagini possono essere viste e analizzate direttamente su un monitor PC.

Con i Flat panel di ultima generazione è inoltre possibile ottenere immagini dettagliate in real time con un'alta risoluzione, eliminando il gap presente tra la lastra tradizionale e l'immagine digitale insiti nei sistemi con IB.



Figura 42: Flat Panel

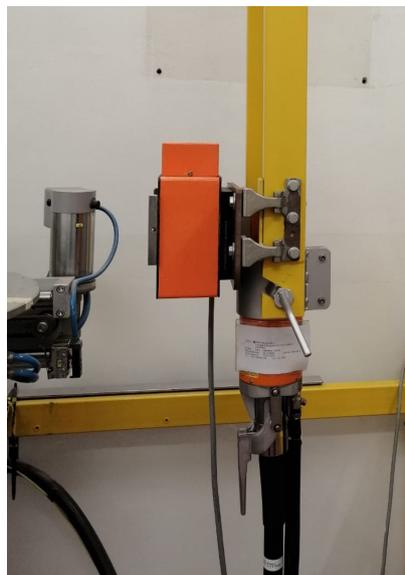


Figura 43: Tubo radiogeno

Per la produzione dei Raggi X viene utilizzato il tubo radiogeno illustrato il Figura43 e descritto nel Capitolo 2.1.3.



Figura 44: Monitor TV

Ogni immagine può essere memorizzare su opportune periferiche (memorie di massa), e rivedere l'immagine o il video su un qualsiasi monitor PC anche distante dalla cabina radioscopica, inoltre possono essere inviate al server centrale per la loro archiviazione o al cliente tramite internet. Il monitor TV e il software che permette il post processamento dell'immagine ottenuta dall'ispezione radioscopica è illustrata in Figura44.

Questa tecnica elimina i materiali di consumo utilizzati in radiografia per le quali sono richieste pellicole opportunamente sensibilizzate e intercambiabili, liquidi chimici e tempi di attesa per lo sviluppo.

## 4.2 Materiali

Il materiale base impiegato per realizzare le unioni saldate è un acciaio dual phase con designazione commerciale DP600 zincato, le cui proprietà meccaniche e composizione chimica sono fornite nelle Tabella4 e Tabella5 . E' caratterizzato da una buona formabilità e saldabilità, tali caratteristiche fanno sì che sia largamente utilizzato per applicazioni automobilistiche. Questo acciaio subisce un trattamento termico speciale in una linea di ricottura continua, producendo una struttura bifasica. Si tratta di un acciaio bifasico bassolegato, alto resistenziale, che viene realizzato per laminazione a freddo e presenta una microstruttura costituita per il 20% da una fase martensitica dura dispersa in matrice ferritica duttile. La ferrite, che impartisce proprietà di formatura uniche, rappresenta una fase e la martensite, che dona la forza, rappresenta l'altra fase. Quando questi acciai subiscono una lavorazione la deformazione si concentra nella ferrite, causando un elevato incrudimento per deformazione e tale meccanismo si combina alle ottime caratteristiche di allungamento per conferire un carico di rottura più alto rispetto ad acciai convenzionali caratterizzati da analogo limite di snervamento.

Rp0.2	Rm	A <sub>8</sub> 0%	A <sub>5</sub> 0%
330-430 MPa	600MPa	20	21

Tabella 4: Caratteristiche meccaniche dell'acciaio DP600 [5]

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Al(%)	Cr+Mo(%)	Nb+Ti(%)	V(%)	B(%)
0.17	0.8	2.2	0.08	0.015	2	1	0.15	0.2	0.005

Tabella 5: Composizione chimica dell'acciaio DP600 [5]

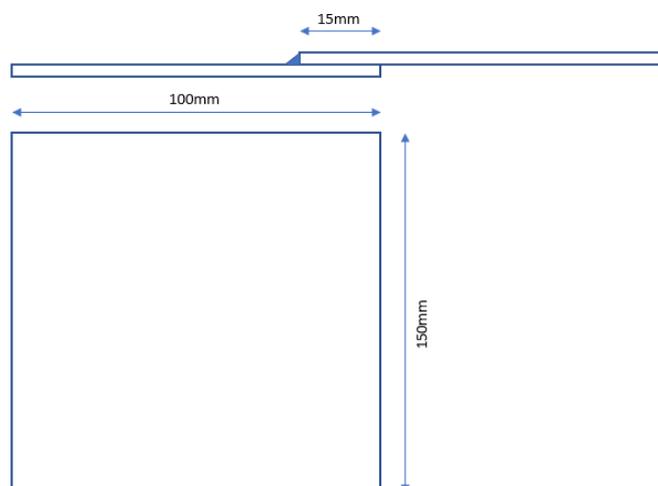


Figura 45: Dimensioni lamiera

Per la realizzazione dei giunti si sono usate lamiere di DP600, ricavate per tranciatura in officina meccanica, di dimensioni 100x150 mm e 1.5mm di spessore al fine di ottenere una lunghezza totale del cordone di almeno 100 mm.

La miscela di gas attivo utilizzata per la protezione del bagno di saldatura è composta per l'82% da Argon e per il 18% da  $CO_2$ , ed è normalmente impiegata per acciai al carbonio e bassolegati.

Il materiale d'apporto utilizzato noto con la denominazione commerciale G3Si1 è un filo pieno ramato per la saldatura di acciai al carbonio basso legati. Garantisce un'ottima stabilità dell'arco, bassa produzione di spruzzi e ottimo scorrimento in guaina che migliora le performance anche con saldatura robotizzata. Le sue proprietà meccaniche e la composizione chimica sono illustrate in Tabella6 e Tabella7.

Rp0.2	Rm	A%
420MPa	540MPa	26

Tabella 6: Caratteristiche meccaniche del filo G3Si1

C%	Mn%	Si%
0.9	1.4	0.85

Tabella 7: Composizione chimica del filo G3Si1

### 4.3 Sistema di fissaggio

Si è deciso in un futuro di completare lo studio effettuando prove di saldatura variando altri parametri tra cui il gap tra i lamierini.

Si è deciso quindi di progettare e realizzare una maschera di saldatura che bloccasse il pezzo in maniera ottimale dal punto di vista di deformazioni e tensioni che si sviluppano durante il processo e che potesse permettere una precisa regolazione del gap.

La configurazione finale della maschera di saldatura è la seguente:

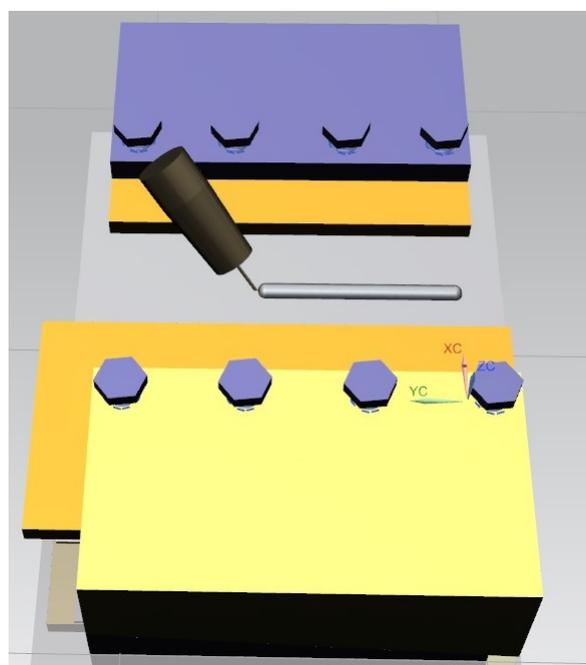
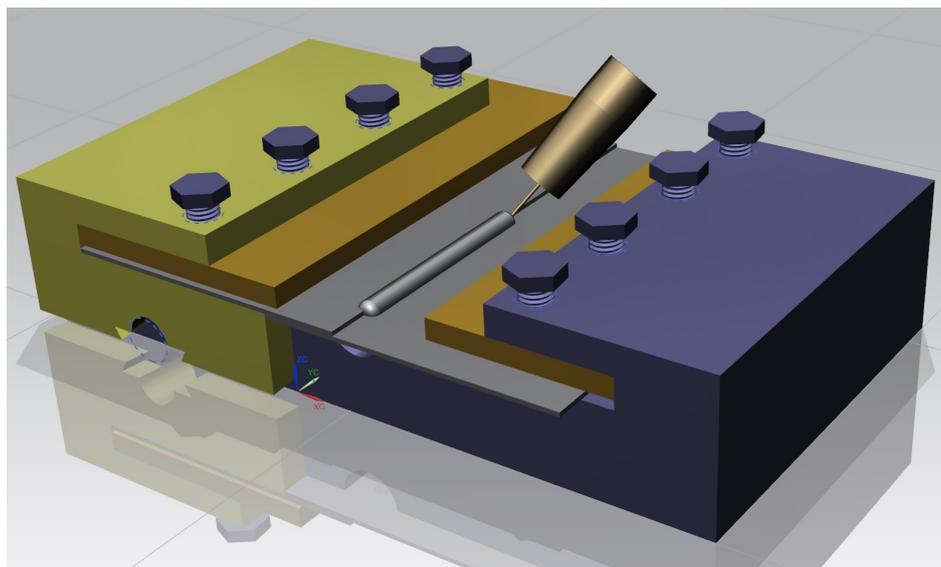


Figura 46: Maschera di saldatura

Per regolare il gap tra le lamiere e quindi posizionarle correttamente su altezze differenti si è scelto di realizzare una coda di rondine con un foro per metà filettato in cui scorre una vite senza fine. Con una chiave si mette in rotazione la vite senza

fine che, scorrendo nelle due guide (di cui una sola filettata) permette la traslazione di una delle due tavole.

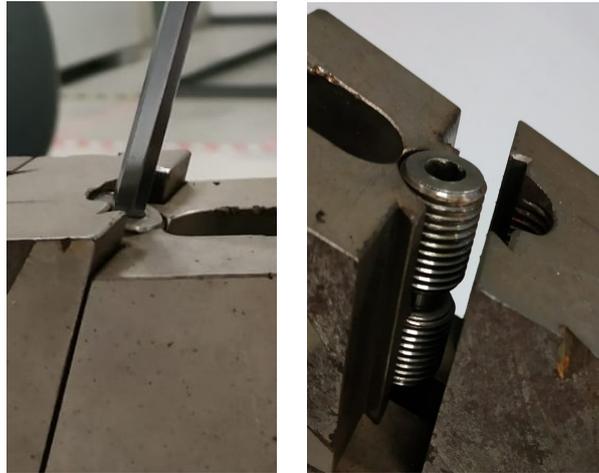


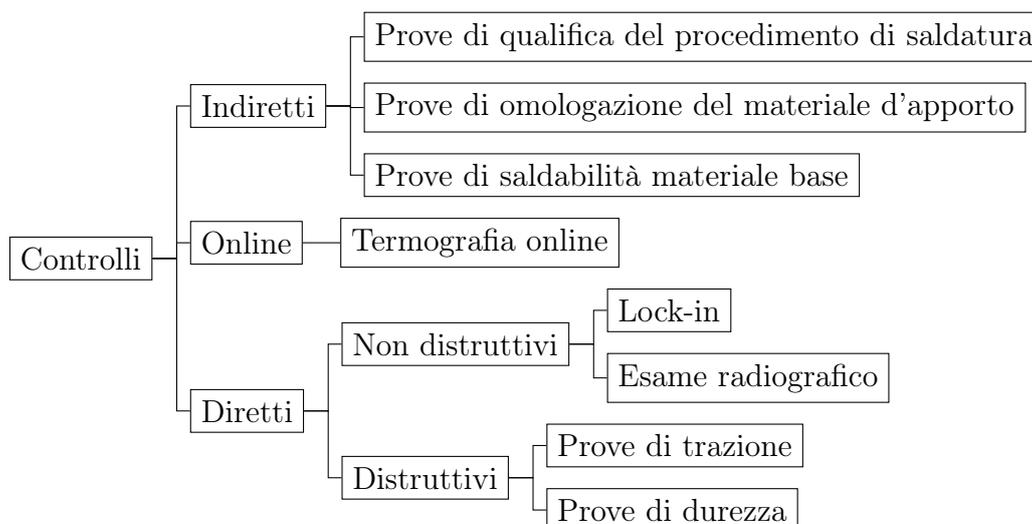
Figura 47: Sistema scorrimento basi di appoggio lamiera

Il sistema prevede inoltre due premilamiera regolati attraverso delle viti che permettono un perfetto bloccaggio degli elementi da saldare. E' stato poi progettato un intaglio semicilindrico trasversale in corrispondenza del cordone di saldatura per evitare l'incollaggio delle lamiera alla maschera di saldatura .

## 4.4 Metodo di prova

Il controllo delle saldature ha come scopo l'accertamento della qualità del prodotto: nel caso specifico si tratta di accertare che le giunzioni saldate corrispondano alla qualità richiesta per l'uso a cui sono destinate e secondo le normative vigenti in azienda.

Le caratteristiche particolari del procedimento di giunzione mediante saldatura hanno suggerito un concetto di collaudo in senso molto lato, comprendente, oltre al controllo vero e proprio della saldatura finita, prove e verifiche preliminari e controlli in corso d'opera. Risulta infatti evidente la convenienza di prevenire iniziali condizioni errate e di correggerle tempestivamente in fase di progetto e nel corso della costruzione.



I controlli indiretti hanno lo scopo di controllare l'adeguatezza della preparazione dei lembi e degli altri parametri di saldatura, l'eventuale necessità di trattamenti termici, la corretta scelta del materiale d'apporto, l'effettiva possibilità di realizzare le saldature e i controlli sulle stesse in relazione all'accessibilità del giunti, ecc. Tra i controlli preliminari è buona norma eseguire un controllo sulla qualifica dei saldatori al fine di accertare che la mano d'opera impiegata posseda la necessaria abilità operatoria.

Per i controlli in corso d'opera è stata utilizzata la termografia applicata direttamente durante il processo di saldatura. La termografia online ha dimostrato di avere grandi potenzialità nel rilevare differenze di comportamento tra diversi processi realizzati e tramite i risultati conseguiti in termini di andamenti termici risulta possibile controllare e distinguere come avviene il processo in base a come variano i suoi parametri. La modifica di alcuni parametri di saldatura è causa infatti di giunti non conformi alle richieste o con presenza di difetti. La saldatura realizzata con parametri nominali, con cui si ottiene il giunto ottimale, può essere caratterizzata da un andamento termografico tipico e quindi in fase di processo è possibile rilevare quando ci si discosta dall'andamento nominale e quindi riconoscere un giunto non realizzato secondo le richieste.

I controlli diretti vengono utilizzati per il controllo finale dei giunti saldati e si distinguono in controlli distruttivi e controlli non distruttivi. Il fine è quello di accertare la natura e la distribuzione di difettosità interne o esterne, a tale scopo vengono in genere usati solo controlli di tipo non distruttivo come, ad esempio,

esami magnetoscopici o con liquidi penetranti che danno indicazioni sull'eventuale presenza di difetti superficiali, oppure esami radiografici ed ultrasuoni che consentono di rilevare eventuali difetti interni.

#### 4.4.1 Esame radiografico

Il meccanismo di formazione dell'immagine è legato al differente assorbimento delle radiazioni nel pezzo in funzione della variazione di spessore, dei diversi costituenti chimici, di disuniformità nella densità, della presenza di difetti o di eventuali fenomeni di scattering. L'informazione che è possibile ottenere da un singolo controllo radiografico è bidimensionale perciò, per avere una completa caratterizzazione della discontinuità, deve essere integrata con altre radiografie o con altri metodi volumetrici.

I raggi X fanno parte delle radiazioni elettromagnetiche, le quali presentano le seguenti proprietà:

- Sono costituite da fotoni
- Non sono dotate di massa e viaggiano in linea retta alla velocità della luce
- Non subiscono l'influenza dei campi elettro-magnetici
- La presenza di materia ne può alterare l'energia o modificarne la direzione

Tutti i tipi di radiazione, nel loro insieme, costituiscono il cosiddetto spettro elettromagnetico, del quale la luce visibile rappresenta solo una piccola porzione.

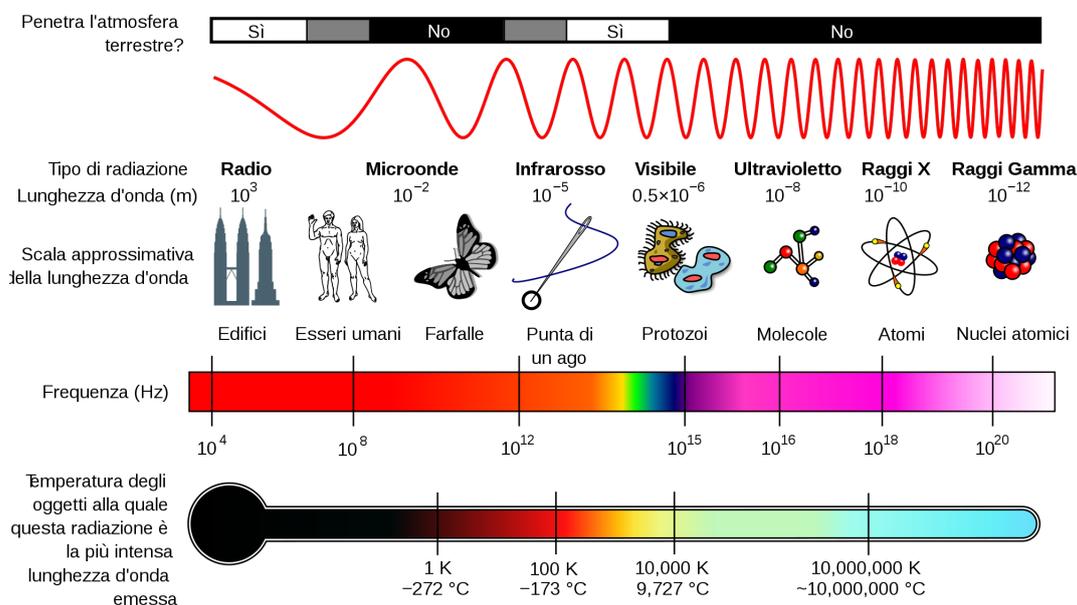


Figura 48: Spettro elettromagnetico

Al ridursi della lunghezza d'onda  $\lambda$  e, di conseguenza, all'aumentare della frequenza  $\nu$ , si verifica un aumento dell'energia delle radiazioni elettromagnetiche  $E$ , secondo la legge:

$$E=h\nu$$

Dalla sorgente si origina un fascio divergente di radiazione che attraversa il provino, venendone differientemente assorbito in funzione delle caratteristiche fisico-chimiche. Ciò che non viene assorbito dall'oggetto finisce per impressionare una pellicola sensibile. Si ottiene così un immagine in scala di grigi che necessita di essere successivamente interpretata per la valutazione della presenza di discontinuità che producono, in funzione delle loro caratteristiche, livelli diversi di densità dell'immagine.

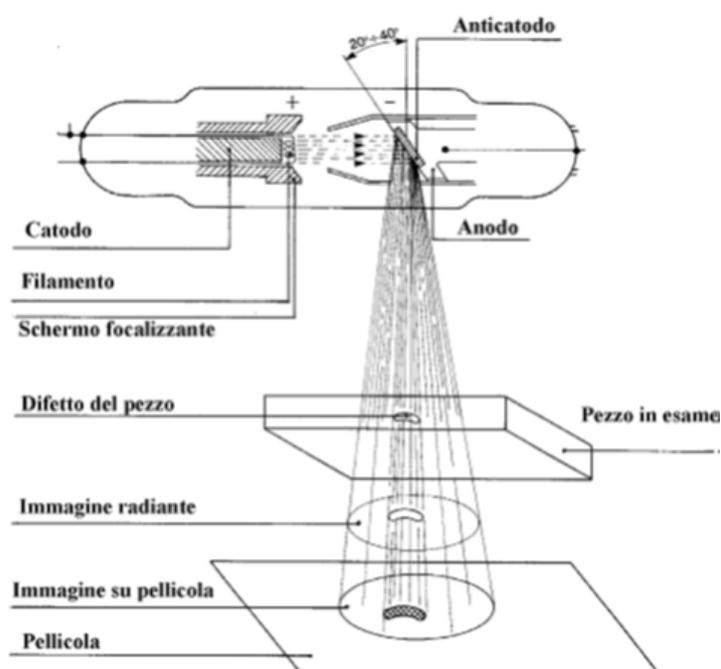


Figura 49: Schema procedura radiografica

Risulta di particolare importanza analizzare la relazione che esiste tra la direzione del fascio incidente e le caratteristiche geometriche delle difettologie che si vogliono analizzare rappresenta un fattore estremamente. Tale rapporto risulta infatti critico ai fini della caratterizzazione radiografica di un componente. È possibile osservare nell'immagine che segue come, discontinuità apparentemente molto simili portano ad immagini estremamente diverse tra loro. Si porta qui l'esempio di una discontinuità orientata parallelamente rispetto alla direzione di propagazione del fascio e si vede come questa risulti decisamente più distinguibile rispetto a discontinuità orientate perpendicolarmente.

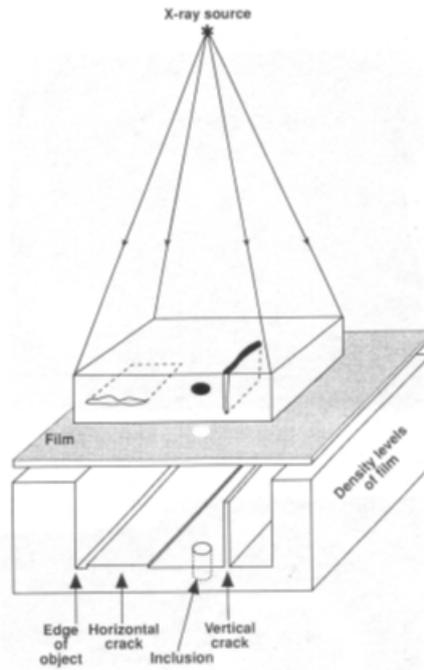


Figura 50: Influenza delle caratteristiche geometriche

Grazie al fenomeno dell'attenuazione i raggi X producono un'immagine differenzialmente contrastata.

Le pellicole per radiografie a raggi X sono costituite da una base di materiale trasparente, generalmente si tratta di acetato di cellulosa. È poi rivestita sui due lati con un'emulsione gelatinosa di bromuro d'argento. Questo è disposto in modo uniforme all'interno della gelatina e si trova sotto forma di piccoli cristalli. Durante l'esame i raggi X colpiscono l'emulsione dando luogo ad una reazione chimica nei cristalli del bromuro d'argento con una energia tanto maggiore quanto aumenta l'intensità della radiazione incidente e in funzione al tempo di esposizione.

Affinchè tali modificazioni chimiche possano essere osservate è necessario trattare la pellicola con una soluzione chimica chiamata rivelatore. Questo preleva il bromuro dai cristalli esposti del bromuro d'argento, e deposita atomi di argento nero sulla gelatina. La concentrazione dell'argento metallico nero determina la densità della pellicola.

Al posto della tradizionale pellicola, nella Radiografia Computerizzata (Computed Radiography) viene utilizzata una speciale lastra sensibile, composta da uno strato di fosfori, riutilizzabile che viene esposta seguendo esattamente la medesima procedura del film tradizionale.

La lastra che si ottiene può essere visionata da una stazione dotata di PC e apposito scanner.

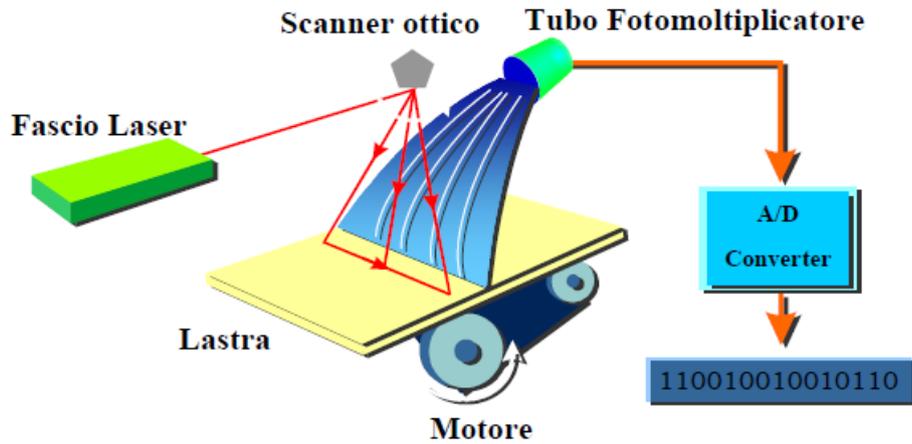


Figura 51: Schema radiografia digitale

Quando la lastra viene scansionata dal laser, si dà luogo ad un'emissione luminosa dalle zone colpite dai raggi X che risulta essere proporzionale all'energia che viene accumulata durante la fase di esposizione.

È poi un fotomoltiplicatore ad avere il compito di leggere tale radiazione luminosa e convertirla in informazione binaria con l'utilizzo di un converter AD. Il fotomoltiplicatore non è altro che un rivelatore elettronico di luce estremamente sensibile nell'ultravioletto, in luce visibile e nel vicino infrarosso.

Le immagini ottenute vengono inviate ad una workstation per essere editate, analizzate e archiviate.

La tecnologia usata in CRF per i provini di giunzioni saldate con CMT è la radioscopia.

Con l'esame radioscopico è possibile effettuare in tempo reale il controllo interno delle saldature; inoltre l'immagine interna dell'oggetto è riprodotta all'istante.

Per l'esecuzione dell'ispezione radioscopica viene impiegato un fascio di radiazione penetrante (Raggi X) capace di attraversare la materia per fornire su un opportuno mezzo di rivelazione l'immagine della conformazione interna di un oggetto.

L'ispezione radioscopica mediante schermo fluorescente consente una sensibilità alquanto limitata dell'ordine del 5-10% dello spessore dell'oggetto in esame. Una versione moderna è costituita dalla radioscopia mediante sistema integrato di flat panel, telecamera, elaboratore elettronico del segnale e monitor TV.

In questo caso l'operatore osserva l'immagine radioscopica davanti al monitor il quale può essere ubicato anche all'esterno della camera in cui avviene la prova.

Come si è spiegato la procedura utilizzata è la medesima della radiografia digitale con il vantaggio ulteriore che la radioscopia fornisce informazioni immediate su natura, dimensione, localizzazione e distribuzione delle imperfezioni sia interne che esterne. Attraverso la manipolazione dell'oggetto in esame mediante opportune tavole rotanti o manipolatori tale tecnica permette di fornire informazioni tridimensionali.

In radioscopia le definizioni relative alla radioopacità e alla radiotrasparenza sono le stesse che per la Radiografia, l'unica differenza è che i livelli di grigio sono invertiti. Si avrà infatti per una maggiore attenuazione del fascio di raggi X aree scure e per una minore attenuazione aree chiare.

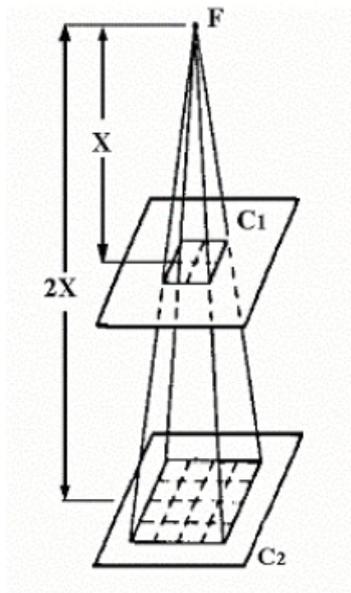


Figura 52: Schema formazione immagine radioscopica

L'intensità dei raggi X è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Il fascio divergente emesso attraversa i differenti piani perpendicolare che intercetta secondo aree di dimensione via via maggiori nelle quali l'intensità rilevata in un singolo punto diminuisce.

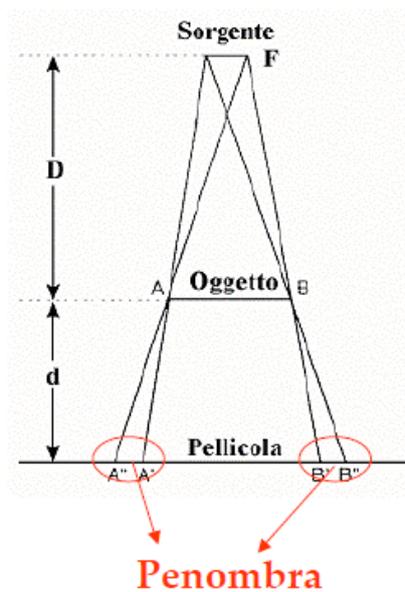


Figura 53: Schema penombra geometrica

La penombra è definita come l'incapacità di riprodurre con esattezza i bordi dell'oggetto in esame. Tale termine può essere anche usato per esprimere la distanza minima che un dato sistema radiografico può risolvere.

$$U = F \cdot \frac{d}{D}$$

Il valore della penombra (U) dipende dalle dimensioni della macchia focale (F) ed è inversamente proporzionale alla distanza sorgente-oggetto (D) e direttamente proporzionale alla distanza oggetto-pellicola (d).

Analizzando la formula precedente quello che verrebbe immediatamente da pensare è che la configurazione ottimale sia quella che prevede una distanza sorgente-oggetto il più grande possibile. Questo è errato poiché l'energia da fornire è proporzionale al quadrato della distanza perciò aumentando di molto quest'ultima si raggiungerebbero dei livelli di energia elevati.

Aumentare in modo significativo l'energia, oltre a causare un non corretto funzione del tubo catodico e quindi accorciare la sua vita di utilizzo, non sempre è permesso dalle norme poiché esse dicono di minimizzare l'energia fornita per aumentare il contrasto radiografico.

Quello che si cerca di fare è trovare un compromesso, normalmente in linea di produzione la distanza oggetto-sorgente che viene usata è di 700mm mentre, essendo il CRF un centro di ricerca, ci si è spinti ad utilizzare nelle prove effettuate una distanza di 1200mm.

I parametri fondamentali per questa prova sono:

- **Contrasto:** è la differenza di densità che si registra nella pellicola o sul flat panel, in seguito ad una variazione di spessore o di densità del pezzo radiografato. Poiché l'individuazione del difetto dipende principalmente dal contrasto tra la densità della sua immagine e la densità del materiale circostante, questo parametro risulta essere particolarmente critico per garantire la bontà del controllo radiografico.
- **Definizione:** con questo termine si esprime la rapidità con cui avviene il passaggio tra le differenti densità di due zone contigue. Più è grande la definizione maggiore sarà la nitidezza con cui si distinguono i bordi del pezzo o i contorni di eventuali difettosità
- **Sensibilità:** esprime la differenza minima di spessore che è possibile rilevare sull'immagine finale. Tale parametro determina la nitidezza e viene valutato mediante i IQI (Indicatori Qualità Immagine). La sensibilità radiografica è valutata come il rapporto tra il diametro del filo più sottile visibile sulla radiografia e lo spessore del pezzo radiografato.



#### 4.4.2 Termografia online

La termocamera AGEMA Thermovision 900 SW-TE, usata per il controllo online del processo di saldatura, è stata posta all'interno della cella di saldatura prestando attenzione che l'inquadratura fosse sempre focalizzata sul cordone in tutta la sua lunghezza e in ogni istante del processo.

La posizione della termocamera è stata scelta in modo tale da non interferire con i movimenti del braccio robotico e cercando di ottenere la minima interferenza possibile della torcia di saldatura all'interno delle immagini. Seguendo le disposizioni della Norma UNI EN 16714-2 [6], si è rispettata la distanza minima di sicurezza per assicurarsi che la termocamera sia al riparo da possibili lapilli di saldatura che possono danneggiare la lente al germanio. Si è prestata inoltre attenzione ad altri fattori che influiscono sulla misurazione termografica come l'angolo di vista rispetto al corpo osservato, si è infatti cercato un posizionamento il più ortogonale possibile rispetto alla superficie del giunto, con un'angolazione relativa inferiore ai  $25^\circ\text{C}$ , così da non influenzare il valore di emissività.

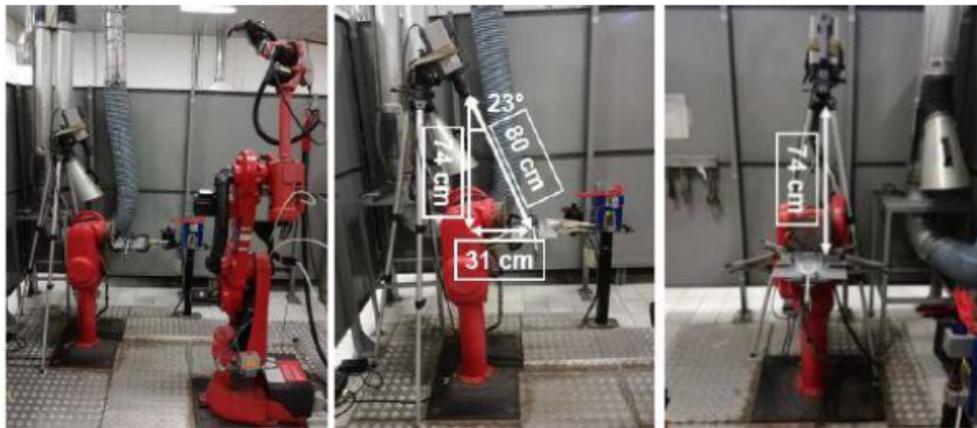


Figura 54: Posizionamento termocamera e lamiera

Per visionare l'intera lunghezza del cordone si è deciso di effettuare una ripresa dall'alto focalizzando l'inquadratura su tutta la zona di interesse.

In questo modo si possono ottenere i risultati termici superficiali per ogni istante del processo, riuscendo anche ad analizzare le fasi di riscaldamento e di raffreddamento.

La termocamera acquisisce la sequenza di immagini, o termogramma, mediante il software specifico del costruttore, ThermaCAM Researcher™ Pro 2.8 che consente di generare file di acquisizione in formato SEQ, filmati termografici che possono essere visualizzati a schermo per estrarre informazioni qualitative sulla distribuzione delle temperature e anche essere elaborati posteriormente con gli strumenti interni al programma.

Per la registrazione è stato utilizzato il filtro Glass High Temperature che sopprime la radiazione a onda corta al di sotto dei  $4.8 \mu\text{m}$  e risulta particolarmente adatto per misurazioni ad elevate temperature fino a  $2500^\circ\text{C}$ .

L'intervallo di temperatura selezionato è da  $500^\circ\text{C}$  a  $2500^\circ\text{C}$  perciò non è possibile controllare il processo nella fase di riscaldamento e raffreddamento al di sotto dei  $500^\circ\text{C}$ .

L'uso di questo filtro non permette registrazioni a massimo frame rate di 30 Hz, infatti il sensore scansiona le temperature durante la saldatura acquisendo 208x86 pixel, in modalità di finestra ridotta che permette di avere il massimo frame rate possibile di circa 7 Hz.

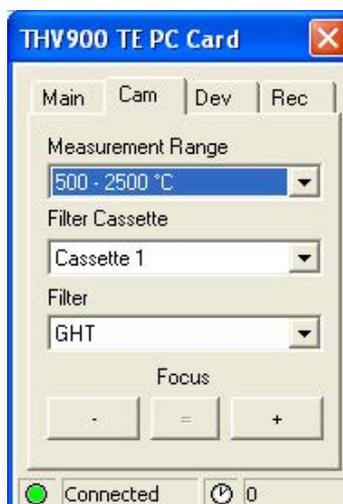


Figura 55: Scelta filtro

Si procede ora con il settare i limiti di temperatura dalla sezione Setting e sottosezione Scale:

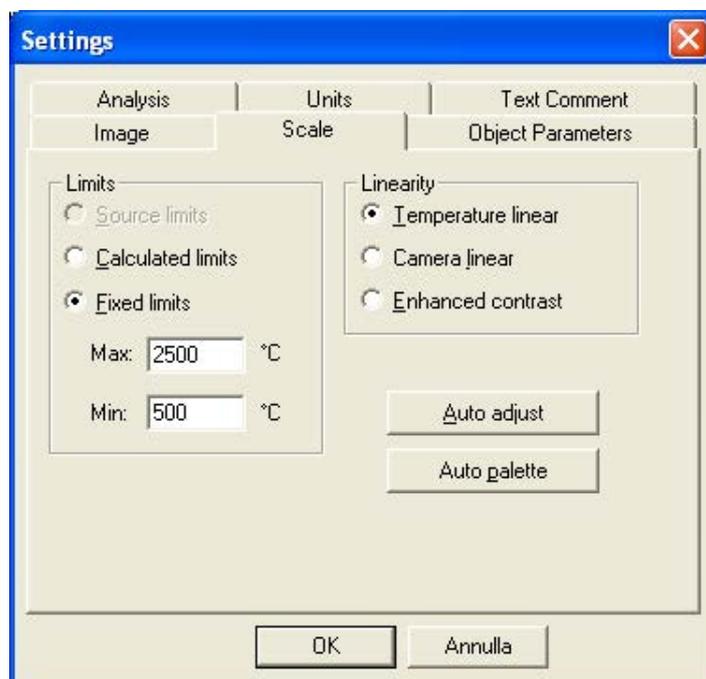


Figura 56: Inserimento valori limite di temperatura

Si sono quindi inseriti i parametri interni del software della termocamera affinché la temperatura superficiale misurata risulti quanto più accurata e indisturbata da fattori derivanti dall'ambiente e dalla struttura esaminata.

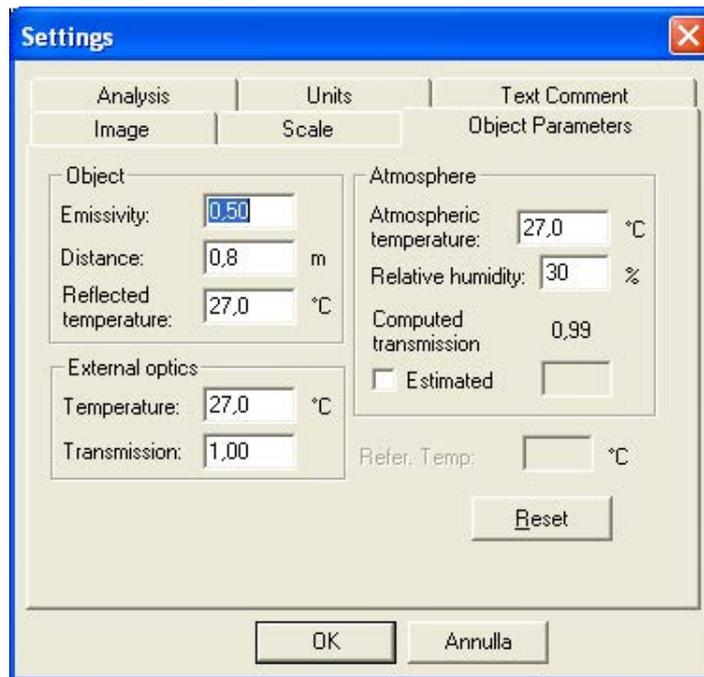


Figura 57: Settaggio parametri interni

Poichè risultava complesso stabilire con esattezza il valore assoluto reale di emissività durante la fase di saldatura, si sono fatte delle ipotesi semplificative. La saldatura ad arco di acciai infatti è un processo dinamico che prevede la fusione dei materiali base e metallo di apporto con conseguente cambiamenti di fasi e di microstrutture interne ed inoltre le temperature possono raggiungere i 2500°C. Durante il processo di saldatura il range di temperatura rilevato è molto ampio, si passa infatti dalla temperatura ambiente a quella di fusione dell'acciaio DP600. In queste condizioni operative risulta assai complesso poter definire un valore costante dell'emissività ed inoltre il software non permette una variazione continua del coefficiente al variare della temperatura e della microstruttura durante l'intero processo. Non è inoltre possibile valutare il reale valore del coefficiente a causa delle limitazioni imposte dagli strumenti elettronici (termocoppie). Tenuto conto di queste difficoltà è stato stimato un valore di emissività che permette di visualizzare a video un valore di temperatura massima consono alla fusione dell'acciaio ( $T_f = 1500^\circ\text{C}$ ). Questo metodo consente però di giungere a una valutazione piuttosto qualitativa degli andamenti termici superficiali, con temperature che si prefigurano maggiormente come apparenti nel momento in cui ci si discosta dai valori più elevati.

È possibile effettuare sulle registrazioni ottenute i seguenti studi:

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

### 4.4.3 Lock in

Le prove di termografia attiva sono state svolte posizionando la fonte di stimolazione termica e la termocamera dalla stessa parte ed inducendo l'eccitazione localmente in un punto del cordone di saldatura.

Il campione viene posizionato accuratamente all'interno della cabina assicurandosi di avere la parte frontale del cordone in direzione orizzontale e frontalmente alla termocamera ad una distanza nota come è possibile vedere nella figura che segue.

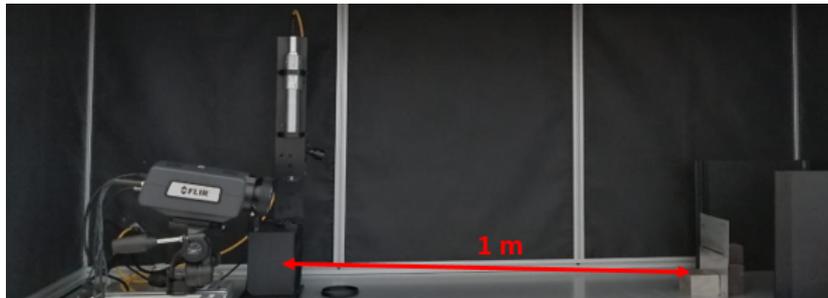


Figura 58: Posizionamento lamiera saldata per la prova di termografia attiva

A questo punto si centra il puntatore rosso sul punto preciso dove si vuole sollecitare il provino e, dopo aver chiuso la tenda protettiva, si è pronti ad agire in condizioni di sicurezza e armare il laser.

Prima di armare il laser si procede con la configurazione dei parametri di prova per il controllo del sensore termico tramite il software ResearchIR Max. In questa prima fase è possibile impostare la finestra di visualizzazione, scegliendo tra le tre diverse risoluzioni disponibili.

Per scegliere il numero dei pixel da visualizzare è bene tenere a mente che esso è legato alla frequenza di acquisizione infatti minore è la dimensione della finestra di visualizzazione, maggiore sarà il valore massimo della frequenza di acquisizione disponibile.

I parametri da settare devono soddisfare il requisito minimo che è rappresentato da 100 frame per impulso di eccitazione laser durante la prova.

È inoltre possibile definire l'intervallo di temperatura, selezionandolo tra i range disponibili sul software. Tale scelta è fondamentale e va fatta in modo da scongiurare il fenomeno della saturazione che, qualora si verificasse, impedirebbe la registrazione di risultati termici corretti.

Attraverso un algoritmo interno, alla scelta della frequenza di acquisizione e del range di temperatura è associato un valore di integration time, ovvero il tempo necessario al sensore per l'acquisizione dei dati.

Aumentando l'intervallo di temperatura e riducendo la frequenza di acquisizione si ottiene un tempo di integrazione minore e quindi una maggiore velocità di acquisizione.

Si potrebbero impostare a questo punto anche gli altri parametri di prova tra cui:

- Emissività
- Temperatura riflessa
- Umidità

- Temperatura ambiente

Tali parametri possono essere però inseriti anche al termine dell'acquisizione.

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

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

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

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

Si può scegliere tra sorgente di tipo onda quadra a singolo impulso o nella modalità di treno d'impulsi Figura 59.

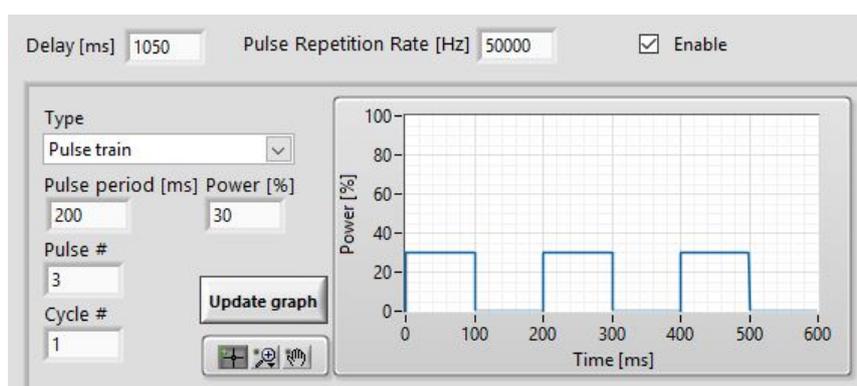


Figura 59: Schermata sistema MultiDES R3.4.4 modulazione sorgente laser

Se si decide di eccitare il pezzo con un treno d'impulsi si deve inserire il numero di impulsi e il numero di cicli.

Il numero di cicli (o numero di impulsi per treno di impulsi) e frame rate devono essere scelti in maniera da massimizzare il rapporto segnale-rumore SNR: maggiori sono il numero di cicli e valore di frame rate, maggiore è il rapporto segnale-rumore.

Dall'esperienza si è osservato che 3 cicli e 100 frame per ciclo (per impulso nel presente caso di studio) rappresenta una situazione ideale perché combina un efficiente valore di SNR associato a un non eccessivo ammontare di dati in acquisizione.

L'incremento di numero cicli oltre questo valore fornisce, con quanto si è potuto sperimentare in precedenti attività condotte da parte della DES, un minimo miglioramento del segnale di 1-2%.

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

Per l'elaborazione dei dati è sufficiente fornire in input il valore del periodo di acquisizione e l'intervallo di frame da analizzare tra quelli acquisiti.

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

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

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



Figura 60: Output analisi Lock-in

Questi dati possono essere analizzati sotto forma di matrici.

Esistono diversi metodi di studio ma quello che è stato utilizzato in fase progettuale è stato quello relativo all'identificazione del massimo valore di ampiezza.

Con l'ausilio di Matlab si possono estrapolare delle sottomatrici dalle immagini di ampiezza e fase.

Dopodiché si procede all'elaborazione di grafici 2D in cui si riportano:

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

## 5 Realizzazione campioni conformi

Con lo scopo di realizzare 5 giunti saldati esenti di qualsiasi tipologia di difetto, sono state eseguite diverse prove variando i parametri di processo.

In questa prima fase la valutazione fatta è stata solo di tipo macroscopico e quindi visivo, si sono infatti scartati i giunti che presentavano difettologie visibili ad occhio nudo.

Basandosi sull'esperienza dell'operatore e sulle informazioni riportate all'interno delle normative del CRF [1] si sono mantenuti costanti i valori riportati nella tabella seguente in quanto ritenuti ottimali per il processo in studio.

Parametri	Valori
Arc start potenza macchina	100%
Distanza tra i lembi (Gap)	0 mm
Voltaggio	15.2 V
Amperaggio	124 A
Lunghezza arco	0 mm
Preapertura gas	1 s
Ritardo chiusura gas	1 s

Tabella 8: Parametri tenuti costanti

I parametri su cui si è giocato per ottimizzare il processo sono stati:

- Velocità di avanzamento del filo [m/min];
- Velocità di movimentazione del braccio robotico [mm/min].

Questo è stato fatto considerando che una velocità di avanzamento robot elevata porta ad avere scarso materiale di apporto, con conseguente formazione di fori, e mancanza di fusione per una temperatura raggiunta inferiore a quella di fusione del materiale base. Una velocità ridotta invece si è visto che crea un cordone con eccessivo materiale di apporto e con sfondamenti.

Particolare attenzione si è posta anche alla velocità di avanzamento del filo che, se elevata, comporta un eccessivo apporto di materiale, mentre se eccessivamente ridotta può essere causa di sfondamenti, mancanza di fusione e di penetrazione.

Questo studio ha portato alla definizione di un set di parametri che garantisce un risultato ottimale del giunto saldato.

La qualità di tale giunto, dapprima verificata con una semplice ispezione visiva, è stata poi verificata mediante indagine radioscopica.

Tale indagine è stata svolta su tutti e 5 i provini realizzati con i parametri ottimali in modo da garantire la ripetibilità della prova.

Si riportano in tabella i parametri del processo di saldatura relativi ai giunti conformi:

Parametri	Valori
Velocità avanzamento filo	3.2 m/min
Velocità avanzamento torcia	440 mm/min
Flusso di gas	18 l/min

Tabella 9: Parametri giunti conformi

In Figura 61 sono riportate le immagini riferite ad uno dei cinque giunti saldati privi di difettologie:



Figura 61: Immagine fronte-retro del provino esente da difetti

A titolo di esempio si riportano anche una delle innumerevoli prove fatte con vari parametri prima di arrivare alla definizione del setup ottimale. La prova fallita corrisponde alla prova effettuata con i seguenti parametri di saldatura:

Parametri	Valori
Velocità avanzamento filo	3.2 m/min
Velocità avanzamento torcia	380 mm/min
Flusso di gas	18 l/min

Tabella 10: Parametri prova fallita

La scelta di questi parametri ha portato ad un giunto saldato non conforme per via delle visibili variazioni di geometria del cordone lungo tutta la sua lunghezza, i numerosi schizzi prodotti e le porosità superficiali visibili già ad occhi nudo.

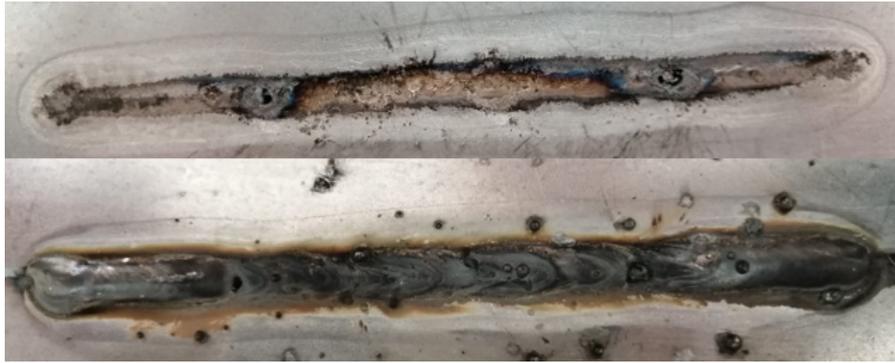


Figura 62: Immagine fronte-retro del provino non conforme

## 5.1 Risultati ispezione radioscopica per i giunti conformi

La radioscopia è un mezzo non distruttivo versatile utilizzato in larga scala per analizzare giunti saldati.

Essa fornisce informazioni immediate sulla natura, dimensione, localizzazione e distribuzione delle imperfezioni sia interne che esterne.

È per i vantaggi che questo mezzo dispone, dopo aver terminato la procedura di saldatura con i parametri ottimali e aver lasciato raffreddare il provino, si è effettuata un'ispezione radioscopica per garantire che i giunti prodotti fossero effettivamente sani.

Con il termine sano si indica un giunto che non presenta alcuna difettosità né a livello interno né a livello superficiale.

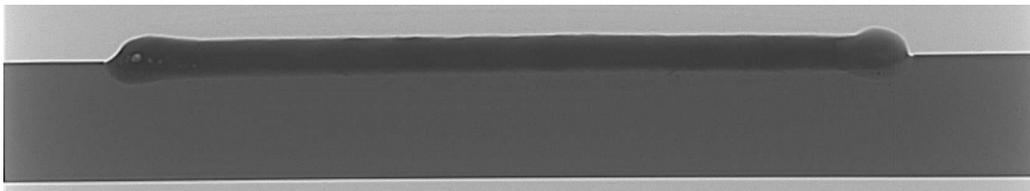


Figura 63: Immagine radioscopica di un giunto sano

In radioscopia le definizioni relative alla radioopacità e alla radiotrasparenza sono le medesime della radiografia, l'unica differenza è l'inversione dei livelli di grigio.

Le zone caratterizzate da una maggiore attenuazione del fascio di raggi X vengono mostrate come aree scure mentre quelle a minore attenuazione del fascio di raggi X sono rappresentate come aree chiare.

Come definito dalla normativa interna FCA PS.50001/01, su di un cordone saldato è possibile trascurare il primo e l'ultimo tratto del cordone. La lunghezza di saldatura rimanente deve di norma essere priva al 90% di lunghezze discrepanti [1].

Riferendosi alla norma interna FCA [1] il provino di Figura 63 realizzato con i parametri di Tabella 9 risulta essere conforme ed esente da difetti interni o super-

ficiali.

Per assicurarsi che vi fosse la ripetibilità della prova si sono analizzati, sempre mediante analisi radioscopica, i restanti 4 provini realizzati con i medesimi parametri di prova.

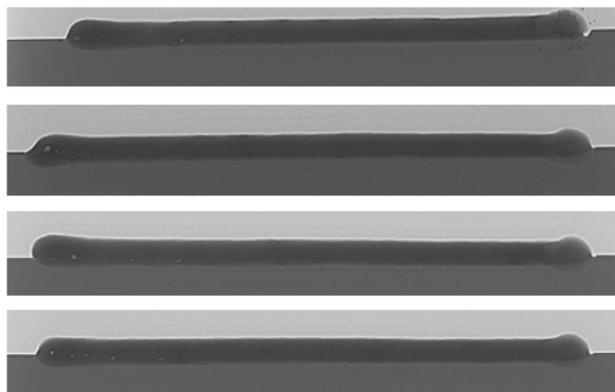


Figura 64: Ripetibilità giunto esente da difetti

Le immagini come riportate sono immagini che sono state migliorate elettronicamente, digitalizzate e processate in altri modi per un'analisi visiva ottimizzata. Si può notare con facilità come, eccetto delle difettosità presenti in un primissimo tratto del cordone che è però da escludersi dall'analisi per la bontà dello stesso, il giunto può dirsi esente da ogni tipo di difettosità interna e/o superficiale.

## 5.2 Risultati termografia online per i giunti conformi

Durante il processo di saldatura, posizionando la termocamera frontalmente al componente da analizzare, si sono acquisiti i risultati termici superficiali.

Per la visualizzazione delle immagini termografiche e la successiva elaborazione degli stessi, si è usato il software ResearchIR Max 4.40 della FLIR Systems.

Per l'elaborazione dei dati acquisiti e per estrapolare dai video stessi degli elementi di confronto tra le diverse classi di giunti analizzati si è osservato:

- Andamento del ciclo termico di 3 punti sul singolo cordone;
- Andamento della temperatura media lungo tutto il cordone in funzione del tempo.

Come prima tecnica si sono individuati tre punti per ogni cordone:

- 1) A 18mm dall'inizio della saldatura;
- 2) Nella mezzeria del cordone;
- 3) A 18mm dalla fine del cordone.

Tale strategia è stata utilizzata al fine di individuare il minimo numero di punti per ogni cordone che potesse essere sufficiente a descrivere il comportamento complessivo della saldatura.

Le posizioni del primo e terzo punto sono state volutamente imposte conformemente ad un capitolato interno Fiat che stabilisce che siano trascurati il primo e

l'ultimo tratto del cordone di saldatura per la caratterizzazione e valutazione della qualità del giunto saldato.

Il punto preso nella mezzeria del cordone rappresenta invece la posizione standard in cui vengono eseguiti i controlli metallurgici per discriminare la conformità del giunto saldato.

I tre punti vengono contrassegnati nelle immagini termografiche da un cursore ROI (Region of Interest) di 3x3 pixel grazie al quale si ottengono le curve che descrivono l'andamento della temperatura per ciascuno dei 3 punti in funzione del tempo. Ovviamente i dati acquisiti per ogni ROI saranno il risultato di una media di temperature apparenti in ogni istante di tempo in un'area di 9 pixel in totale.

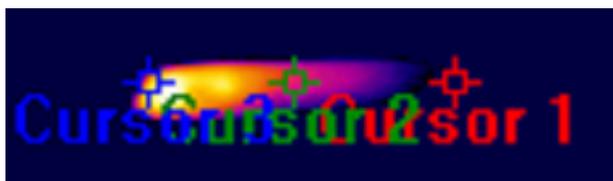


Figura 65: Determinazione di 3 punti sul cordone di saldatura

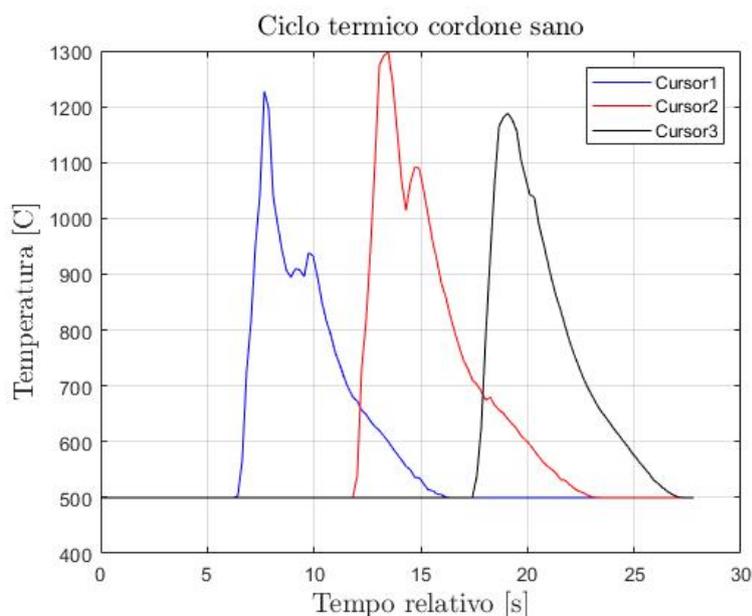


Figura 66: Andamento della temperatura media dei 3 ROI in funzione del tempo

I dati registrati possono essere salvati in formato CSV per poi essere importati in Excel e generare con Matlab dei grafici come quelli mostrati in Figura 66. L'andamento che si può osservare, non esattamente a campana come ci si aspetterebbe, in corrispondenza dei picchi è dovuto principalmente a due fattori:

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

Gli andamenti in Figura 66 evidenziano una curva di riscaldamento estremamente ripida, quasi verticale. Le curve di raffreddamento giungono invece allo zero con velocità diverse per i 3 punti analizzati. Si sono perciò calcolate le pendenze delle curve di raffreddamento approssimandole con delle polinomiali di primo grado e i valori di pendenza determinati per ogni singolo punto sono riportati nella seguente tabella:

<b>Curva in esame</b>	<b>Pendenza tratto decrescente</b>
Cursor1	-46.22
Cursor2	-43.23
Cursor3	-87.39

Tabella 11: Pendenze tratti decrescenti cordone sano

Da questi risultati è evidente come il tempo di raffreddamento sia maggiore nel punto centrale rispetto agli altri due punti e questo risulta ragionevole se si pensa che questa zona è anche quella che subisce una sollecitazione termica maggiore. Il punto centrale si trova in una posizione tale per cui, diversamente dal tratto iniziale e finale, è sottoposto ad un preriscaldamento quando la torcia deve ancora sopraggiungere e un successivo post riscaldamento quando invece la torcia si allontana.

Il tempo di raffreddamento che si registra nel terzo punto risulta inferiore a quello valutato all'inizio del cordone o nella mezzeria. Presumibilmente è dovuto al fatto che poco dopo vi sia il completamento del processo con conseguente allontanamento della torcia

Identiche analisi sono state svolte sui 5 giunti conformi e questi hanno tutti mostrato un comportamento simile non soltanto come andamento della temperatura nel tempo ma anche come valori assoluti massimi di temperatura raggiunta. Questo ha avvalorato la ripetibilità della prova fatta.

Un'altra valutazione che è possibile fare è inerente alla velocità di raffreddamento, questa risulta nettamente inferiore rispetto a quella di riscaldamento, pur rimanendo comunque elevata.

Si nota inoltre come, dopo un determinato lasso di tempo, le velocità di raffreddamento si eguagliano, con curve piatte e parallele.

La velocità di raffreddamento è influenzata da:

- Apporto termico specifico;
- Spessore lamiera;
- Temperatura iniziale del materiale base.

La seconda metodologia adottata si avvale invece dell'extrapolazione di una curva di temperatura nel tempo di un'area individuata tramite il posizionamento di una ROI Box, cioè di un'area selezionata che comprende tutti i punti del cordone tra gli stessi estremi considerati nel primo metodo.



Figura 67: Box intero cordone di saldatura

La temperatura è quindi una media delle temperature dei punti presenti nell'area del cordone in ogni istante di tempo. Nelle prove dei giunti non conformi realizzati variando un parametro di processo rispetto al setup dei giunti ottimali si è avuta una sensibile variazione in termini di spessore e sezione del cordone, quindi l'influenza di questo effetto si presume possa manifestarsi nell'andamento medio su tutta l'area del cordone.

Si riportano nelle figure seguenti l'andamento della temperatura media lungo tutto il cordone per ogni istante di tempo nel caso del giunto esente da difetti.

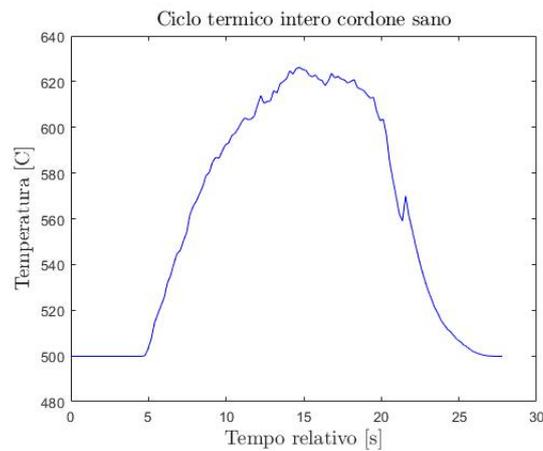


Figura 68: Andamento della temperatura media all'interno dell'intero cordone

Anche questo approccio è stato applicato a tutti i 5 giunti saldati con il setup dei parametri ottimali e si è visto come il comportamento della media risulti molto simile al singolo campione, sia come massimo raggiunto sia come distribuzione nel tempo.

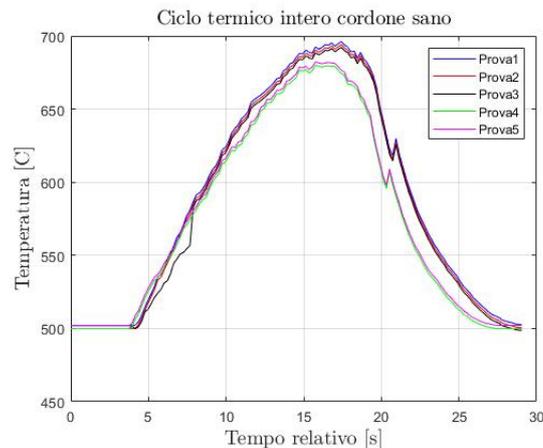


Figura 69: Confronto 5 prove andamento della temperatura media intero cordone

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

### 5.3 Risultati termografia attiva per i giunti conformi

In questo paragrafo si vogliono descrivere le prove effettuate sui campioni esenti da difettosità realizzati con il setup di parametri ottimali Tabella 9. Le prove svolte sono state di tipo puntuale ovvero l'eccitazione è stata indotta localmente in un punto del cordone di saldatura che, nel caso di questi provini, è stato scelto casualmente poiché l'intero cordone risulta privo di difetti interni e superficiali.

La procedura di prova consiste dapprima nel posizionamento accurato del campione da esaminare all'interno della cabina di protezione in maniera tale da avere la parte frontale del cordone in direzione orizzontale e frontalmente alla termocamera ad una distanza di 1 m.

È stata fissata una finestra di acquisizione sul software Flir di dimensioni intermedie (320x256 pixel) ed è stato scelto un range di temperatura:  $10^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$  a cui con la configurazione di 100 frame per ciclo corrisponde un tempo di integrazione pari a 1.160 ms.

La scelta del range di temperatura è stata fatta al fine di evitare che il segnale complessivo di risposta del materiale all'eccitazione esterna andasse in saturazione.

Si è perciò imposta una temperatura minima del range minore alla temperatura ambiente del componente e la temperatura massima del range maggiore o al più uguale alla massima raggiunta dal componente in fase di riscaldamento. Diversamente non si sarebbe acquisito un segnale reale ma un segnale smorzato e saturato.

Per le prove sono stati adottati treni di impulsi di eccitazione in forma d'onda quadra.

A caratterizzare la prova ci sono due parametri fondamentali:

- La modulazione della potenza del laser: nelle prove trattate è stato scelto di utilizzare una percentuale di potenza pari al 30%;
- Il tempo di riscaldamento per singolo impulso: scelto pari a 200ms.

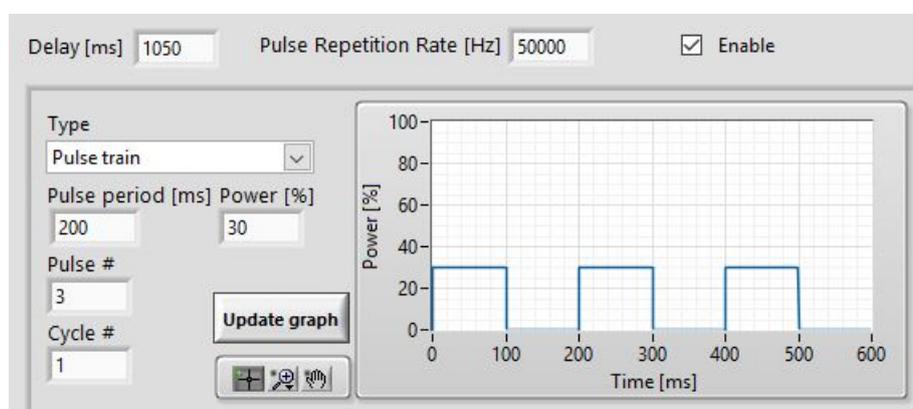


Figura 70: Impostazione del tempo di un singolo impulso e modulazione potenza

Il campione è stato così eccitato con un treno di impulsi laser di breve durata e sia il riscaldamento che il successivo raffreddamento sono stati registrati dalla FLIR X6540sc, equipaggiata con detector FPA InSB.

Le prove sono state condotte sfruttando la modalità “trigger”, ovvero azionando la registrazione con la termocamera un secondo prima dell’avvio della stimolazione termica della lamiera.

La termocamera avvia quindi l’acquisizione grazie ad un controllo trigger con il laser con cui è sincronizzata ed è direttamente collegata al pc e gestita con software ResearchIR Max 4.40, che permette la registrazione delle sequenze di immagini in file formato PTW che possono essere direttamente visualizzate a video per estrarre informazioni qualitative sulle temperature.

La scelta del periodo di eccitazione termica, o frequenza di eccitazione, è principalmente funzione dello spessore del campione e della posizione dei difetti su cui è incentrato lo studio.

In generale si è visto che in letteratura per difetti superficiali si impostano periodi brevi di impulso mentre si adottano in genere periodi maggiori per lo studio di componenti in profondità, in relazione anche alla dipendenza della massima profondità ispezionabile dalla frequenza di eccitazione.

L’impostazione di una frequenza di modulazione non adeguata potrebbe rendere il difetto non visibile, è quindi prassi consolidata quella di procedere ad ispezioni operando inizialmente con bassi valori di frequenza.

Poichè in questa prima parte dello studio non si sono avute le tempistiche per poter effettuare varie prove per differenti valori di frequenza ci si è affidati all’esperienza dei tecnici DES e si è imposto un valore pari a 100Hz.[28][29]

I valori di potenza ottimali dipendono dal tipo di materiale. Ad esempio i metalli con bassa emissività, con elevate capacità conduttive e quindi alta diffusività termica, risultano più difficoltosi da analizzare e necessitano di potenze più elevate. Il numero di cicli (o numero di impulsi per treno di impulsi) e frame rate devono essere scelti in maniera da massimizzare il rapporto segnale-rumore SNR.

Il segnale termico acquisito dalla termocamera durante la prova viene successivamente elaborato mediante programma di post processamento dati termografici, IRTA (InfraRed Thermography Analysis), in cui è possibile importare direttamente sequenze in formato SEQ, FCF e PTW.

Le sequenze importate vengono convertite in formato IRT in cui ogni pixel delle immagini assume valore in unità di segnale ed è possibile eseguire la procedura di analisi Lock-In fornendo in input la frequenza di eccitazione a cui è stata condotta la prova, il frame iniziale (quello antecedente al primo bagliore) e il frame finale dell’intervallo da analizzare. L’intervallo da analizzare inizia quindi con il primo frame in cui appare il primo riscaldamento e si conclude con il frame in cui si esaurisce l’ultimo dei 3 impulsi del treno di impulsi.

L’output dell’analisi lock-in è costituito da 6 immagini in falsi colori: 3 figure rappresentanti l’ampiezza della risposta del materiale rispetto all’eccitazione termica e 3 riferite al ritardo di fase.

Queste immagini rappresentano dei set di dati forniti in forma matriciale e possono per questo essere analizzate.

Esistono diversi metodi di studio, ma quello che si è deciso di adottare in fase progettuale è quello relativo all'identificazione del massimo valore di ampiezza. Centrando tutto sul pixel su cui si è registrato il massimo valore di ampiezza si sono considerate una linea orizzontale disposta lungo la stessa direzione del cordone di saldatura e una linea verticale che risulta ortogonale al cordone. Con l'ausilio di Matlab si procede all'elaborazione di grafici 2D in cui si riportano sull'asse y i valori del segnale lungo la riga o la colonna, centrate sul valore massimo e sull'asse x il corrispettivo pixel.

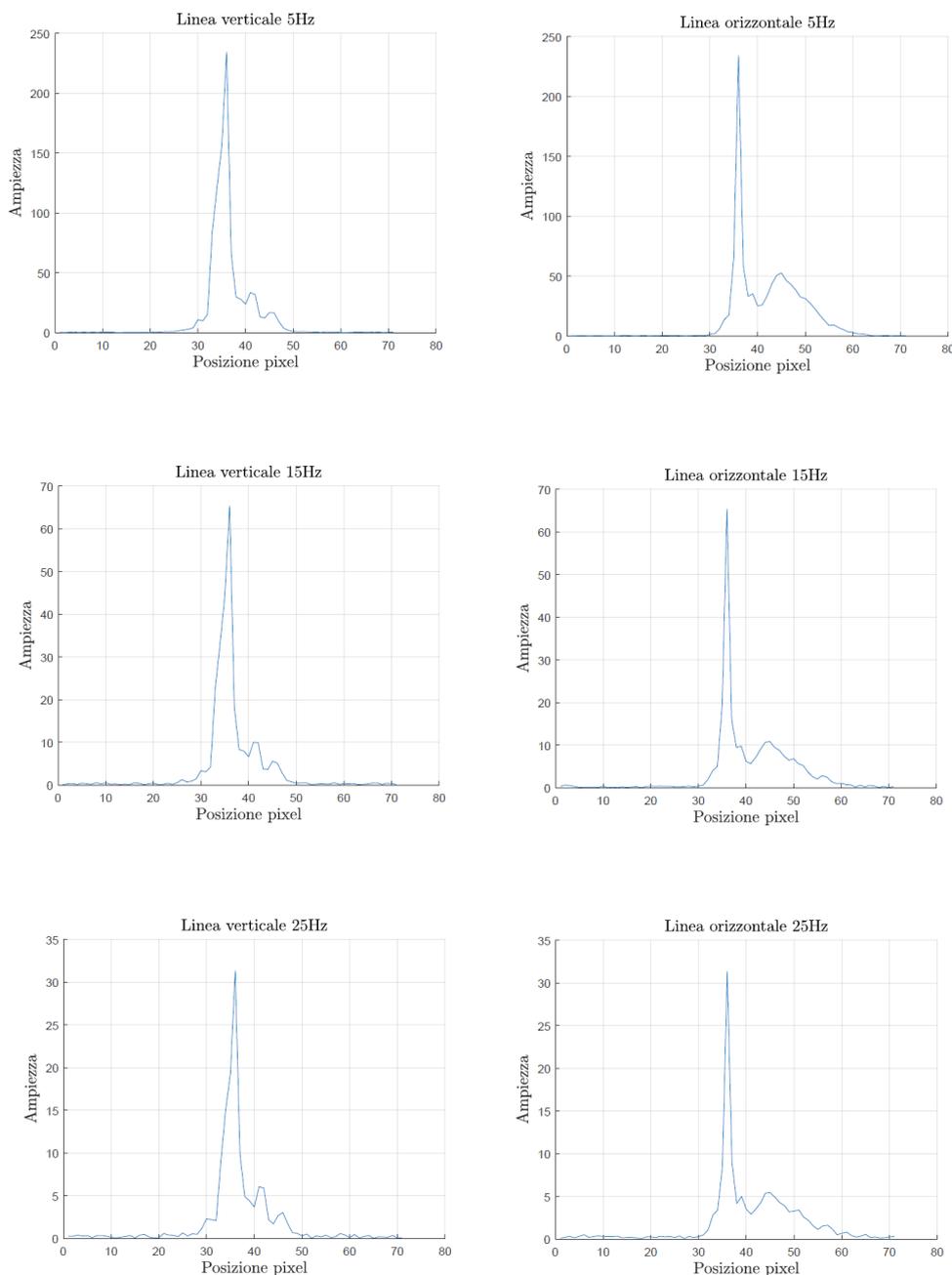


Figura 71: Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino esente da difetti

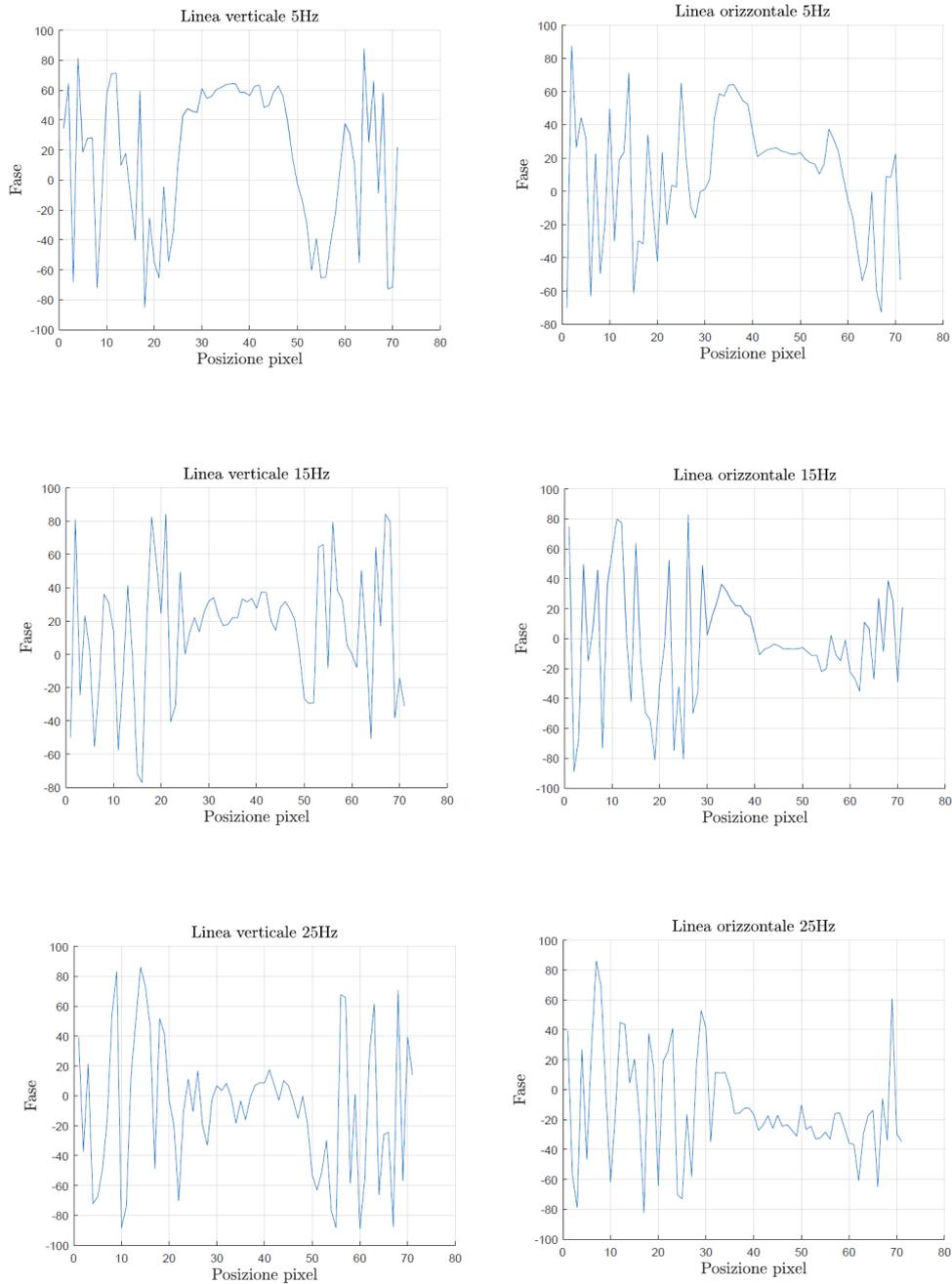
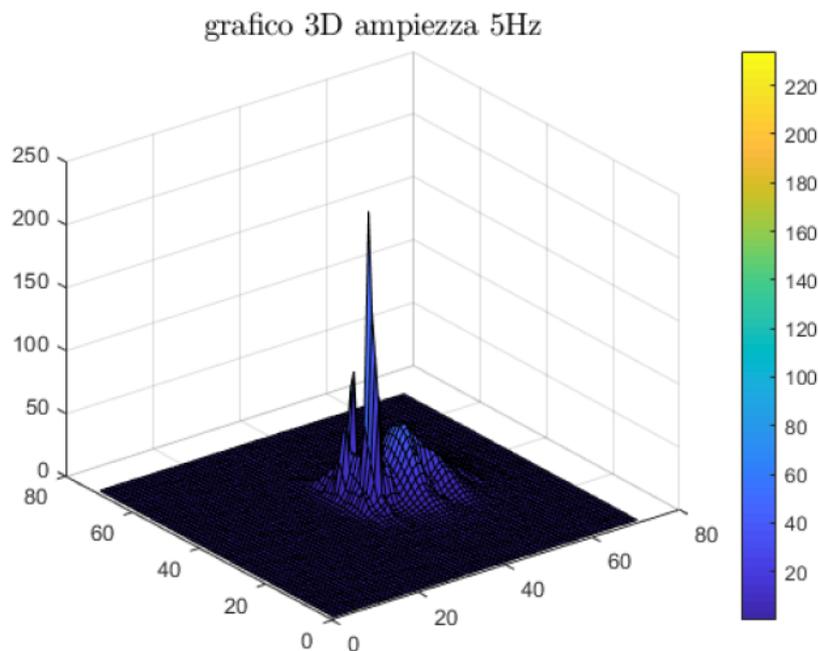


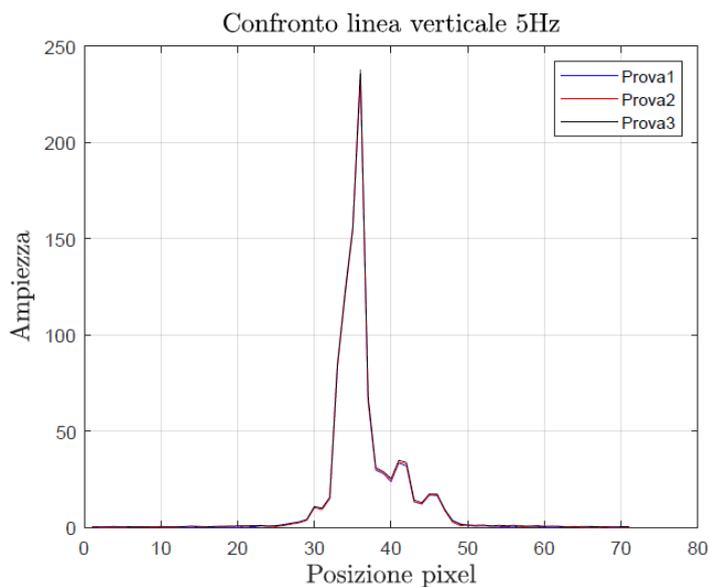
Figura 72: Confronto ritardo di fase delle tre armoniche per il provino esente da difetti

Per le prove si è imposto un valore di emissività pari a 0.8, tale valore è stato stimato all'interno del laboratorio mediante l'ausilio di termocoppie. Il valore imposto è riferito ad una determinata temperatura e non rimane costante durante la prova perciò quello che si può estrapolare dalle analisi è solo un andamento qualitativo. Le temperature in gioco sono infatti solo dei valori apparenti.

Si possono anche elaborare dei grafici 3D che forniscono sull'asse z i valori del segnale per ogni pixel identificato sul piano xy, si riporta a titolo di esempio il grafico 3D dell'ampiezza riferita alla prima armonica.



Si è proceduto con il valutare la ripetibilità della prova per escludere errori umani e errori di prova non legati al materiale, valutando la variabilità dei risultati nell'acquisizione della termocamera e nell'utilizzo del sistema laser conducendo 3 prove su singolo punto a pari condizioni di parametri.



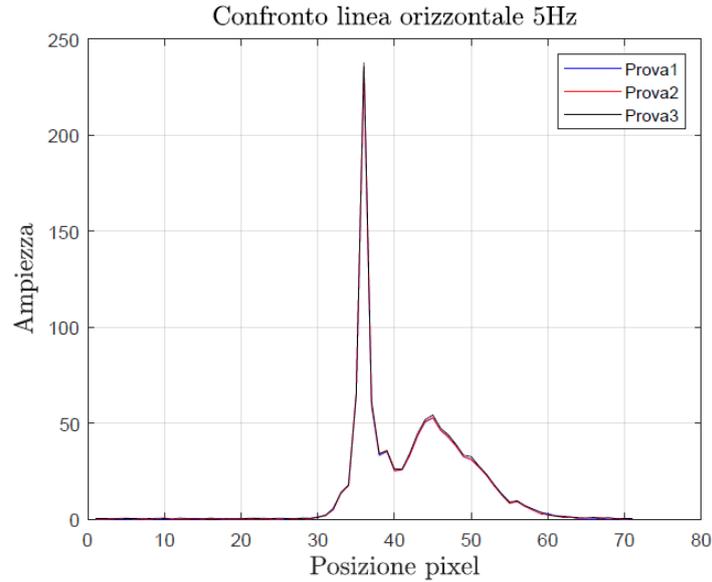
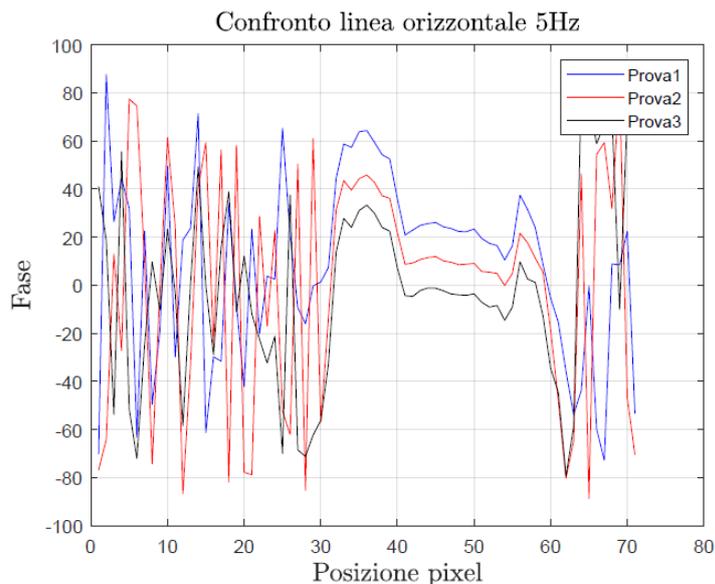


Figura 73: Verifica ripetibilità prova ampiezza (prima armonica)

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

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



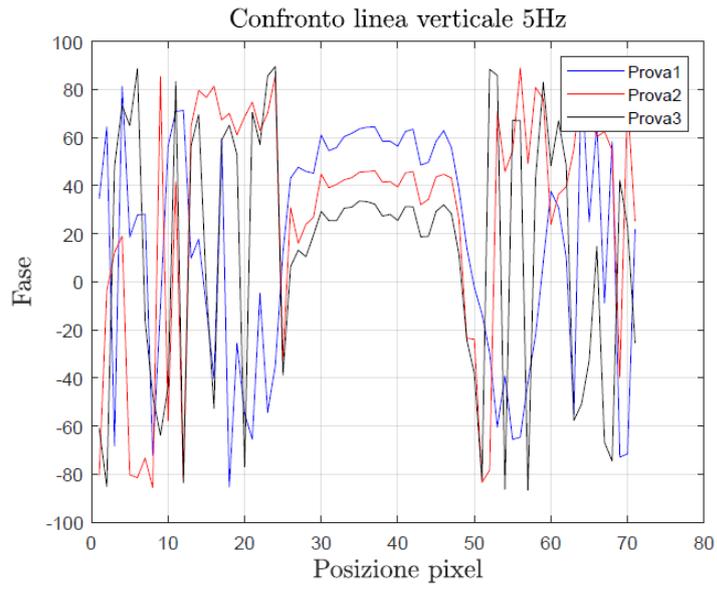


Figura 74: Verifica ripetibilità prova fase (prima armonica)

Ciò che bisogna valutare è il tratto centrale delle curve di fase, parte iniziale e finale costituiscono infatti del semplice rumore che non ha alcuna utilità di analisi.

## 6 Studio completo campioni con difetti

I campioni con difetti indotti sono stati ottenuti variando la velocità di avanzamento robot, dapprima diminuendola e in seguito aumentandola rispetto al valore pari a 440 mm/s che ha condotto ai provini privi di difettosità interne e superficiali.

Per ognuna delle due classi di giunzioni l'iter seguito è stato quello di variare il parametro di riferimento sino ad individuare un limite tale per cui i provini risultassero macroscopicamente sani ma, dopo l'esame radioscopico, si sono rivelati essere non conformi alla normativa interna [1]. Ci si è fermati quindi poco prima che il giunto saldato mostrasse una non conformità macroscopica, per la quale non sarebbero stati richiesti ulteriori approfondimenti con tecniche distruttive e non distruttive.

Di seguito il setup dei parametri che non è stato variato:

Parametri	Valori
Arc start potenza macchina	100%
Distanza tra i lembi (Gap)	0 mm
Voltaggio	15.2 V
Amperaggio	124 A
Lunghezza arco	0 mm
Preapertura gas	1 s
Ritardo chiusura gas	1 s
Velocità avanzamento filo	3.2 m/min
Flusso di gas	18 l/min

Tabella 12: Parametri tenuti costanti

Le tre prove analizzate hanno come unico parametro differente la velocità di movimentazione del robot:

- 1) 440 mm/s: giunto privo di difetti;
- 2) 540 mm/s
- 3) 400 mm/s

Per ogni setup di parametri si sono effettuate 5 prove per garantire la ripetitività della prova e la mancanza di errori legati all'operatore o ad altre condizioni di circostanza.

Da letteratura ci si aspetterebbe per una ridotta velocità della torcia la presenza di cricche, porosità e difetti di forma e dimensione del cordone. Mentre per un elevato valore di movimentazione del braccio robotico dovrebbe presentarsi da teoria una mancanza di fusione e penetrazione.

Dalle prove sperimentali si è notato come diminuendo la velocità di avanzamento della torcia la profondità di penetrazione aumenta, la dimensione del cordone ne risulta aumentata in larghezza e la densità di porosità aumenta. Mentre aumentando a poco a poco la velocità del braccio di saldatura prima di arrivare a mancanze di penetrazioni così evidenti da far sì che il campione risultasse non conforme già da una semplice analisi visiva si è visto un aumento della densità di piccolissime porosità.

Di seguito vengono mostrate una foto per ogni categoria di giunto analizzato:



Figura 75: Provino esente da difetti realizzato a 440 mm/s



Figura 76: Provino realizzato a 540 mm/s



Figura 77: Provino realizzato a 400 mm/s

Come primo step si sono eseguite le analisi radioscopiche che hanno rivelato ogni difettosità interna e/o superficiale e rivelandosi essenziali per determinare i valori ottimali della velocità di movimentazione del braccio di saldatura per rappresentare al meglio le categorie dei giunti scelte.

Si ricorda che in radioscopia le definizioni relative alla radioopacità e alla radiotrasparenza sono le stesse che per la Radiografia, l'unica differenza è che i livelli di grigio sono invertiti. Si avrà infatti per una maggiore attenuazione del fascio di raggi X aree scure e per una minore attenuazione aree chiare.

Si riporta di seguito l'immagine di uno dei cinque giunti saldati ottenuti aumentando la velocità della torcia fino ad un valore pari a 540 mm/s.

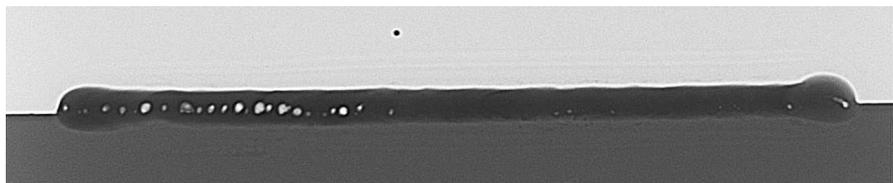


Figura 78: Immagine radioscopica del provino realizzato a 540 mm/s

È facile dedurre, guardando l'immagine radioscopica, che il provino non è conforme e deve essere scartato pur risultando esternamente apparentemente esente da difetti.

Si notano delle grandi porosità interne e una densità elevata concentrata nella prima metà del cordone.

Si passa ora ad analizzare l'immagine di uno dei cinque giunti saldati ottenuti scalando la velocità della torcia fino ad arrivare a 400 mm/s.

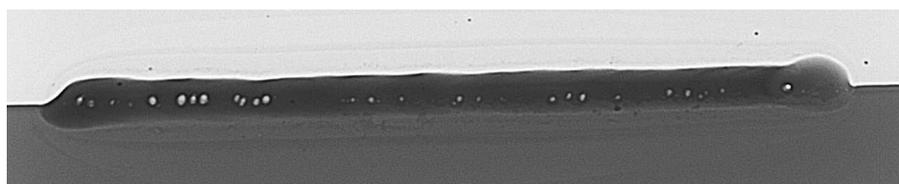


Figura 79: Immagine radioscopica del provino realizzato a 400 mm/s

Osservando l'immagine ottenuta dall'ispezione radioscopica si notano numerose piccole porosità diffuse lungo tutto il cordone, queste rendono la giunzione saldata non utilizzabile perché non conforme.

Le radioscopie si sono rivelate molto utili per l'individuazione del punto in cui svolgere l'analisi di Lock-in sfruttando la termografia attiva. Il campione è stato eccitato localmente nella zona di interesse (dov'era presente il difetto) con un treno di impulsi laser di breve durata e sia il riscaldamento che il successivo raffreddamento sono stati ripresi dalla FLIR X654sc.

È stata seguita la stessa procedura di prova utilizzata per i giunti privi di difetti al fine di poterne confrontare le risposte in ampiezza e fase e constatare l'applicabilità della termografia attiva per il monitoraggio di giunzioni saldate. A caratterizzare la prova ci sono due parametri fondamentali:

- La modulazione della potenza del laser: nelle prove trattate è stato scelto di utilizzare una percentuale di potenza pari al 30%;
- Il tempo di riscaldamento per singolo impulso: scelto pari a 200ms.

Nella figura che segue viene indicata la zona su cui è stato puntato il laser per i provini realizzati a 540 mm/s.

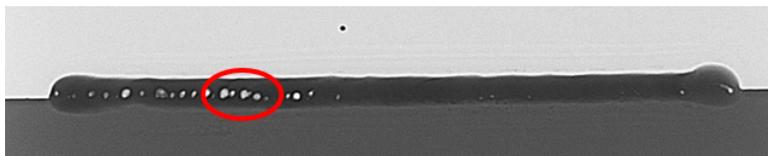


Figura 80: Localizzazione puntatore laser per il provino realizzato a 540 mm/s

Ripercorrendo quanto fatto nel capitolo precedente con i giunti sani si confrontano ora le ampiezze le fasi per le 3 armoniche sia per la linea presa verticalmente che per quella orizzontale (entrambe centrate nel pixel in cui si è registrato il valore massimo di ampiezza).

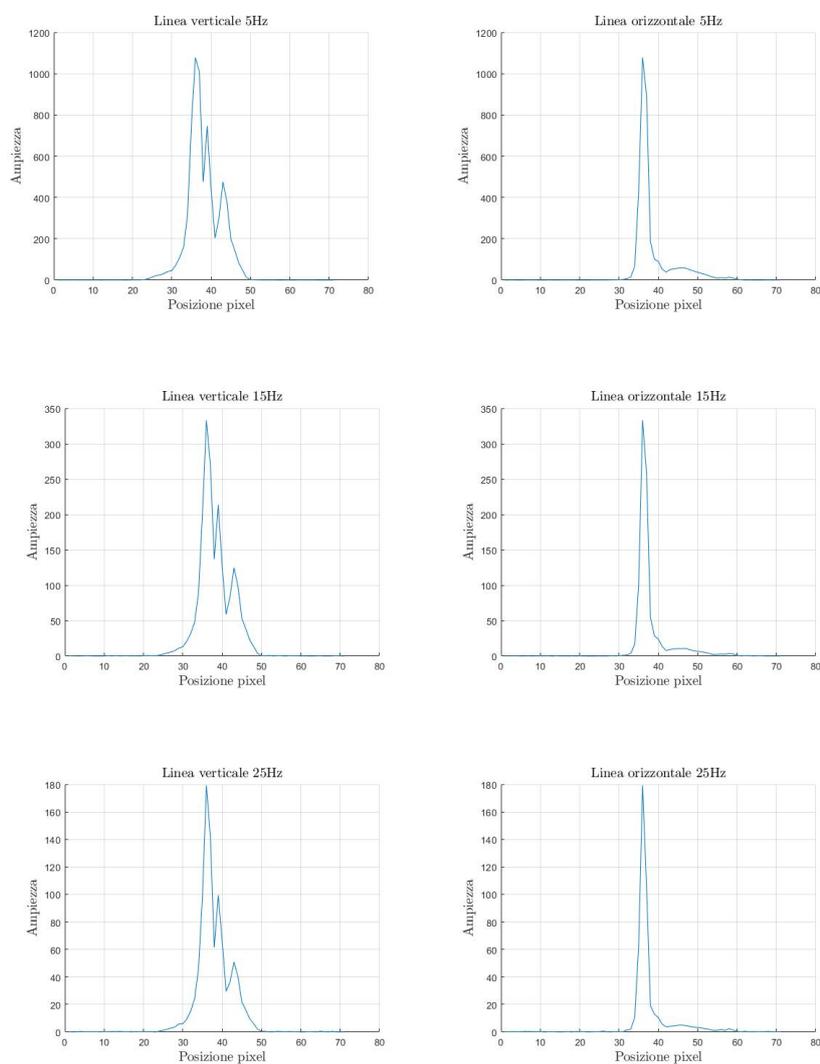


Figura 81: Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino 540 mm/s

Nello stesso modo vengono mostrati gli andamenti del ritardo di fase registrato per i provini realizzati a 540 mm/s per le tre frequenze e confrontando quanto avviene nella linea orizzontale e in quella verticale.

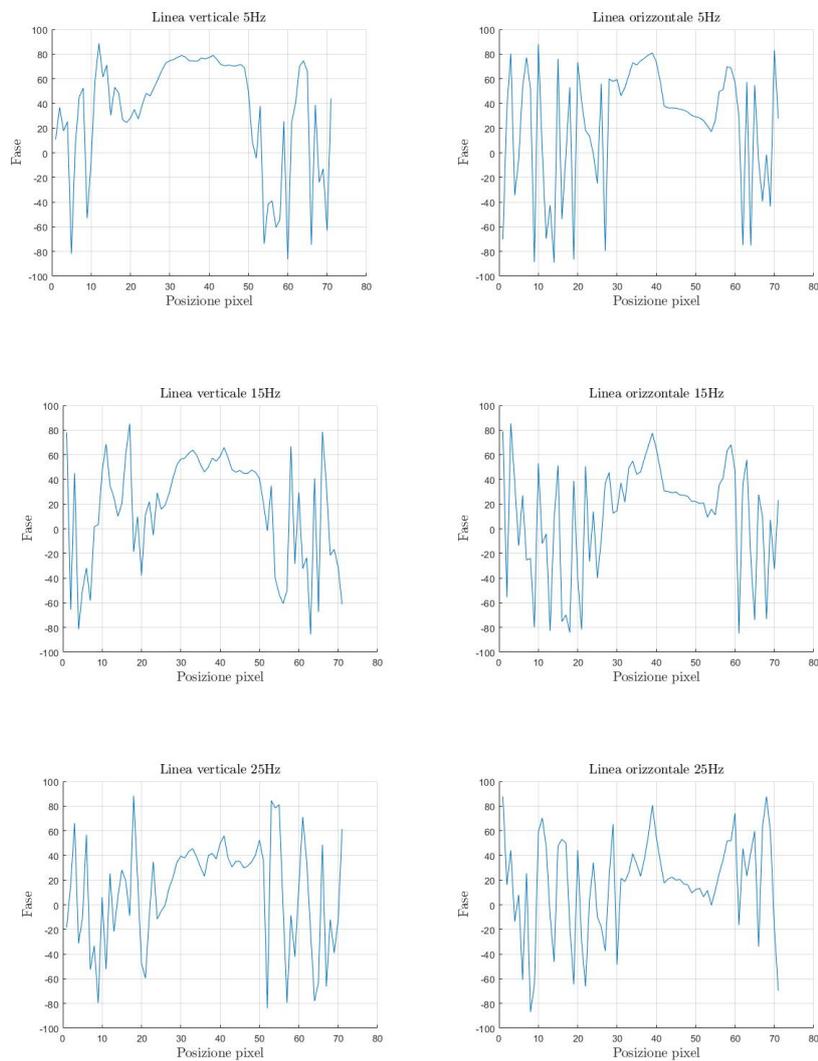
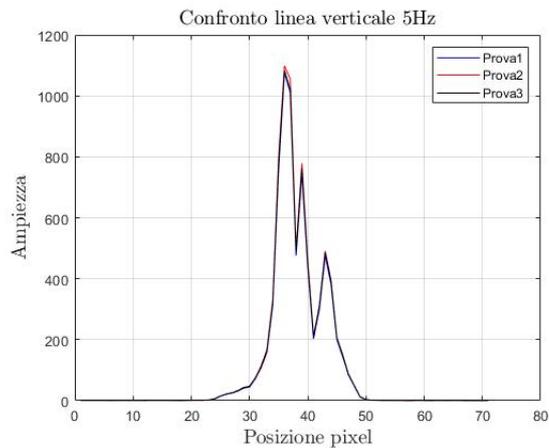


Figura 82: Confronto fase delle tre armoniche per il provino 540 mm/s



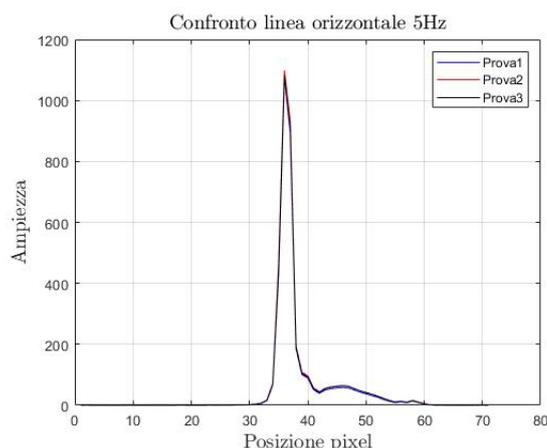


Figura 83: Ripetibilità lock-in nei provini realizzati a 540 mm/s

Si è anche qui voluta verificare la ripetibilità della prova lock-in scongiurando errori umani o del sistema DES. Nelle due figure precedenti si è visto a titolo di esempio l'andamento dell'ampiezza per le 3 prove effettuate per la prima armonica. Osservando le immagini si nota come la ripetibilità della prova è sicuramente verificata in quanto ai tre diversi test corrispondono stessi valori di massimi e stessi andamenti delle curve. Commento analogo può essere fatto per le fasi che manifestano stesso andamento con piccolissime traslazioni delle intere curve.

Stesso iter si segue per i provini ottenuti decrementando la velocità di avanzamento della torcia di saldatura fino a 400 mm/s. Di seguito si evidenzia in rosso la zona dove si è scelto di localizzare l'analisi lock-in.

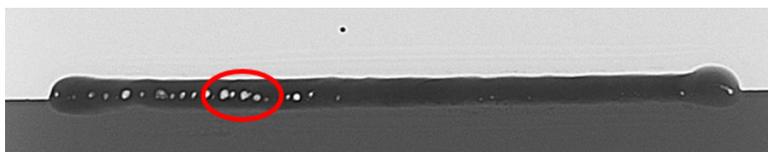
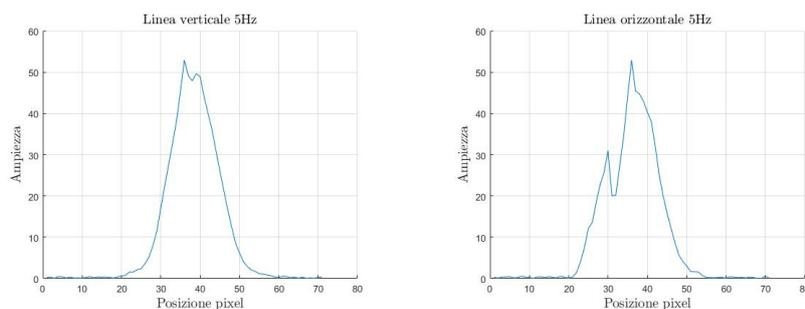


Figura 84: Localizzazione puntatore laser per il provino realizzato a 400 mm/s

Di seguito si confrontano le ampiezze per le 3 armoniche sia per la linea verticale che per quella orizzontale, se ne riportano i risultati registrati e si lasciano i commenti al seguito.



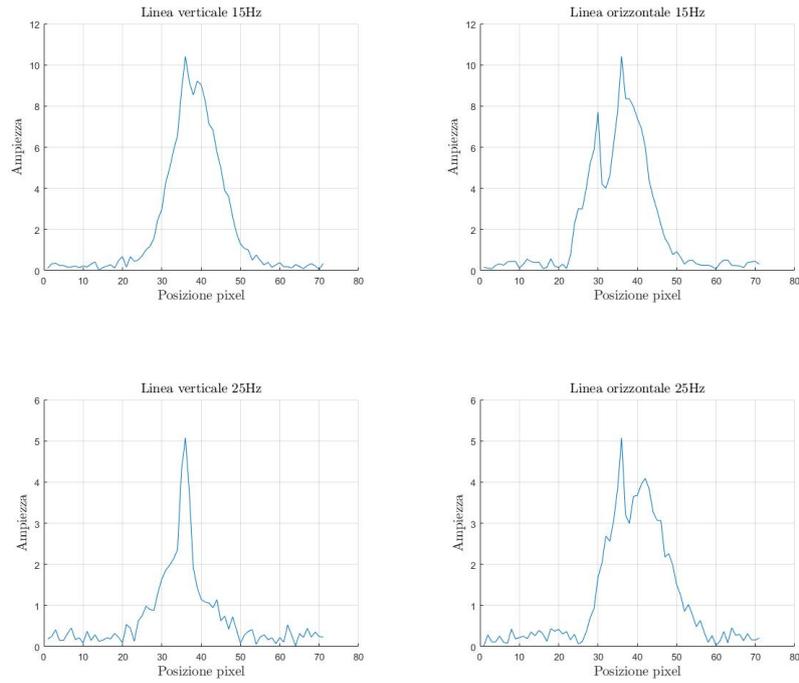
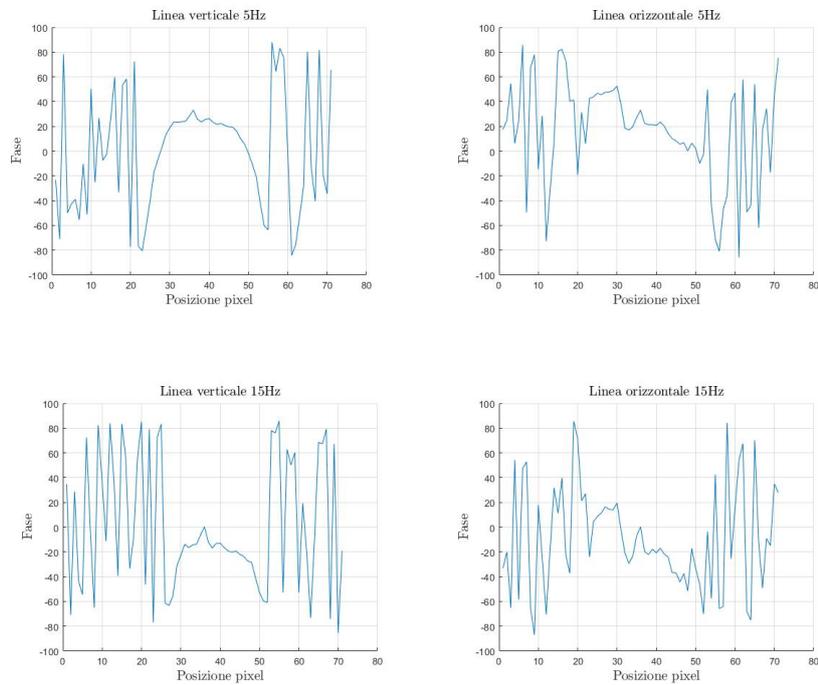


Figura 85: Confronto ampiezze delle tre armoniche per il provino 400 mm/s

Nello stesso modo vengono mostrati gli andamenti del ritardo di fase registrato per i provini realizzati a 400 mm/s per le tre frequenze e confrontando quanto avviene nella linea orizzontale e in quella verticale.



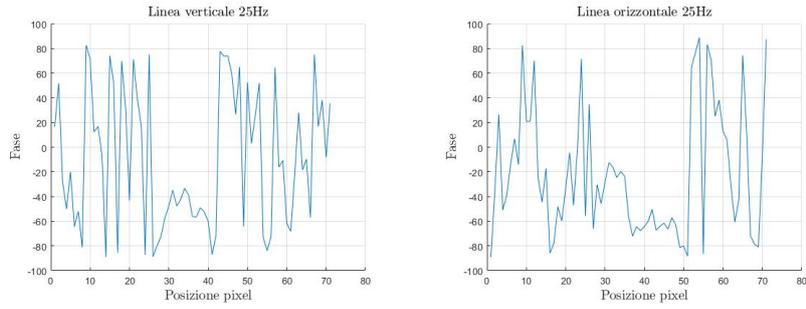


Figura 86: Confronto risposta in fase delle tre armoniche per il provino 400 mm/s

Si vede ora a titolo di esempio l'andamento dell'ampiezza per le 3 prove effettuate per la prima armonica. Osservando le immagini si nota come la ripetibilità della prova, anche in questo caso, è sicuramente verificata.

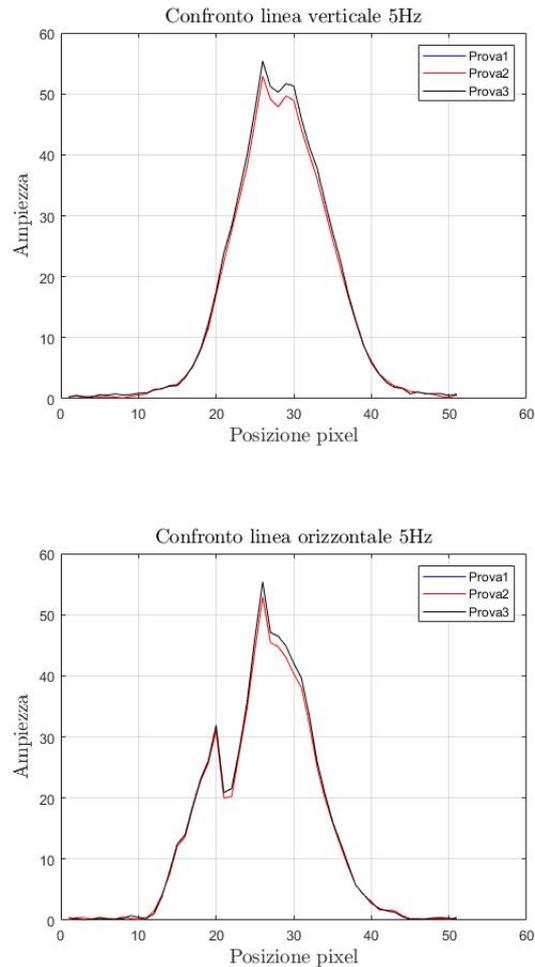


Figura 87: Ripetibilità lock-in nei provini realizzati a 400 mm/s

La trattazione delle prove di termografia online, realizzate durante il processo di saldatura, vuole cominciare con un commento qualitativo dell'analisi visiva delle sequenze termografiche.

A titolo di esempio vengono di seguito illustrati i frame significativi per ogni categoria di giunto in esame.

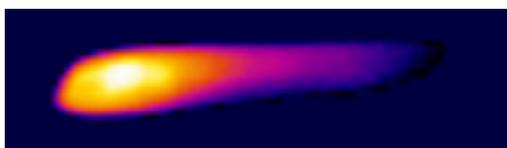


Figura 88: Frame di termogramma giunto esente da difetti

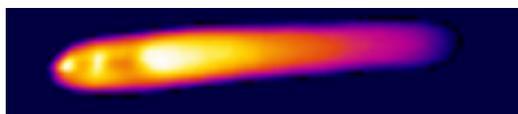


Figura 89: Frame di termogramma giunto realizzato a 400 mm/s

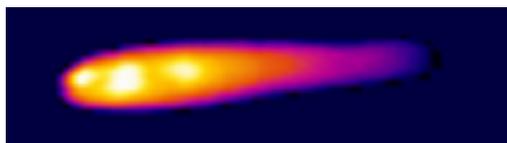


Figura 90: Frame di termogramma giunto realizzato a 540 mm/s

Dopo una prima analisi visiva si può notare una leggerissima differenza nella forma della distribuzione delle temperature tra giunti realizzati in condizioni ottimali, con assenza di difetti, e giunti realizzati con diverse velocità di avanzamento della torcia di saldatura che presentano porosità interne.

Le differenze si sono rivelate molto più evidenti in quei giunti che presentavano sfondamenti o fori macroscopici ma su questi provini si è deciso di non approfondire l'analisi perchè frutto di condizioni di processo che si verificano molto raramente in linea di produzione.

Si vuole ora continuare illustrando gli andamenti dei cicli termici ottenuti in corrispondenza del box iniziale, centrale e finale del cordone come descritto per le prove effettuate sul giunto saldato esente da difetti.

A seguire vengono mostrate a titolo di esempio le curve di un giunto per ogni categoria analizzata e per semplicità espositiva i commenti vengono lasciati al seguito degli stessi.

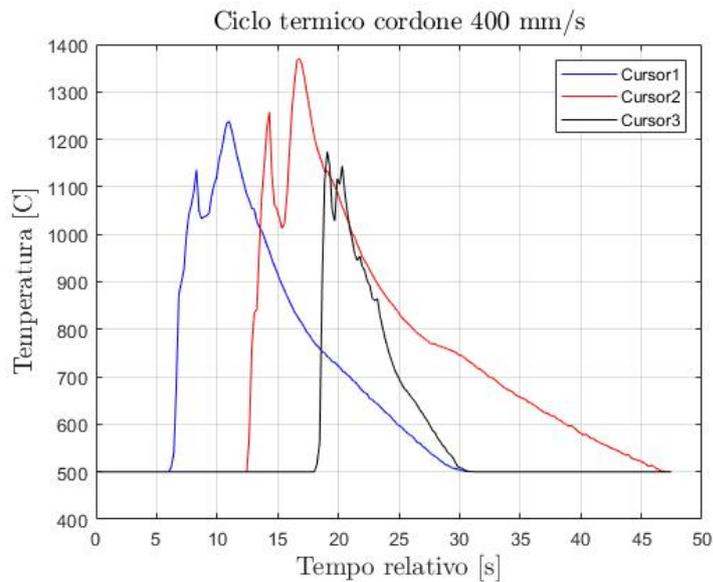


Figura 91: Andamento cicli termici del campione realizzato a 400 mm/s per i 3 punti individuati

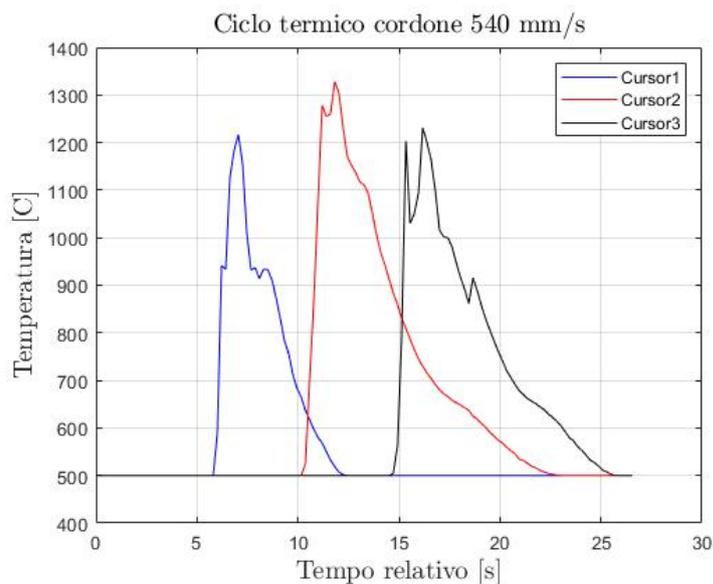


Figura 92: Andamento cicli termici del campione realizzato a 540 mm/s per i 3 punti individuati

Dall'osservazione dei grafici si nota come il tratto della curva durante la fase di riscaldamento mantiene un andamento circa verticale come accadeva per i giunti privi di difetti mentre per il raffreddamento si ha un andamento simile alla discesa esponenziale.

In generale si osserva che il tempo di raffreddamento dell'ultima curva, relativa al tratto di fine giunto, è di molto inferiore rispetto a quello riferito al punto più vicino all'arc-start questo perchè al di là di esso c'è poco materiale che si scalda e da lì a poco si ha la fine del processo con allontanamento della torcia .

Questo comportamento può essere spiegato perché la parte iniziale del giunto, contraddistinto dall'andamento della prima curva, risente di un effetto termico maggiore dovuto a tutto il materiale che a valle di sé si sta ancora scaldando. Osservando i picchi massimi raggiunti si nota un andamento decrescente di questi. Le velocità di raffreddamento nel caso di difetto indotto da una velocità della torcia 540 mm/s risulta inferiore rispetto a quello realizzato a 400 mm/s. Si nota inoltre come in prossimità dell'arc-end si mantengono dei tempi di raffreddamento minori rispetto al punto più vicino all'arc-start.

È stato poi studiato, come nel caso dei giunti sani, l'andamento della temperatura nel tempo mediata all'interno di un'area. Per realizzare questi confronti è stato disegnato un box sul software Flir avente una larghezza di 13 pixel, con una lunghezza definita in base alla geometria del cordone, come nella seguente immagine.



Figura 93: Box comprendente l'intero cordone

Osservando l'andamento medio della distribuzione delle temperature lungo tutta la lunghezza del cordone di saldatura è possibile osservare se vi sono influenze significative all'interno dell'area analizzata dovute a eventuali effetti puntuali e locali.

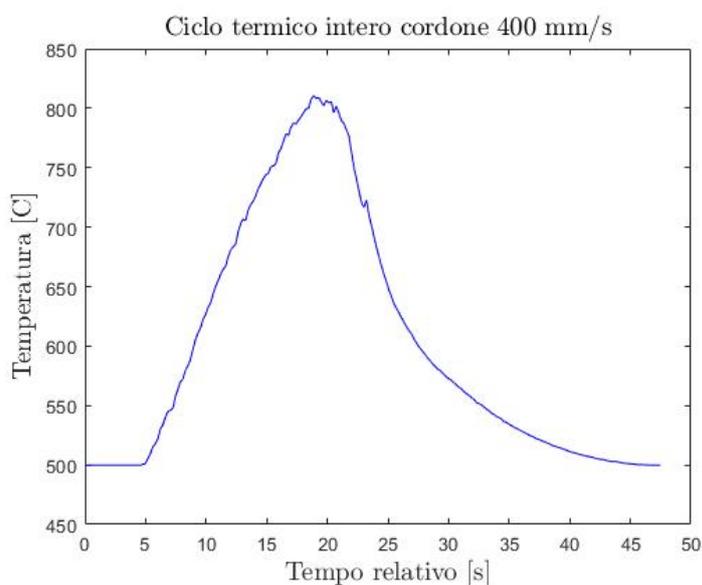


Figura 94: Andamento box comprendente l'intero cordone per i provini realizzati a 400 mm/s

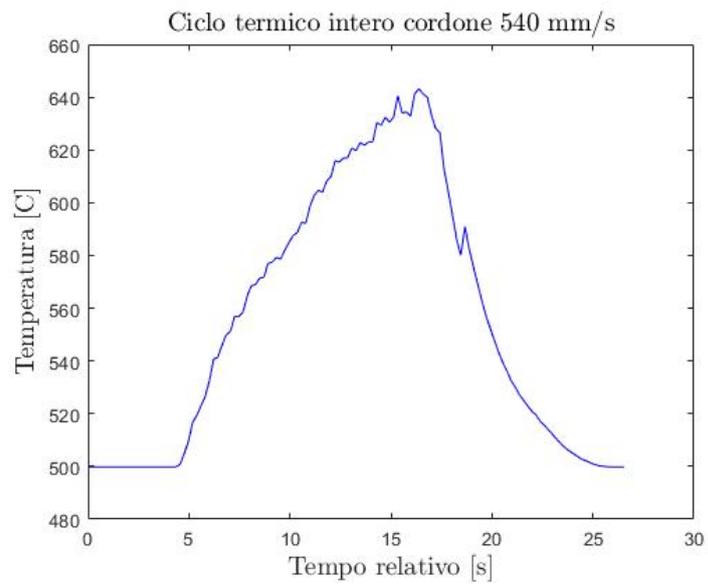


Figura 95: Andamento box comprendente l'intero cordone per i provini realizzati a 540 mm/s

## 6.1 Analisi risultati

Lo scopo di questo progetto è quello di verificare l'applicabilità della termografia attiva e passiva per il monitoraggio dei processi di saldatura per giunti sovrapposti al fine di poter sostituire un giorno altre ispezioni non distruttive come la radioscopia che risulta molto dispendiosa in termini economici.

Per capire se attraverso la termografia si possono distinguere cordoni di saldatura sani da quelli con difettosità interne e/o superficiali si è voluto rappresentare su un unico grafico gli andamenti di ampiezza e fase.

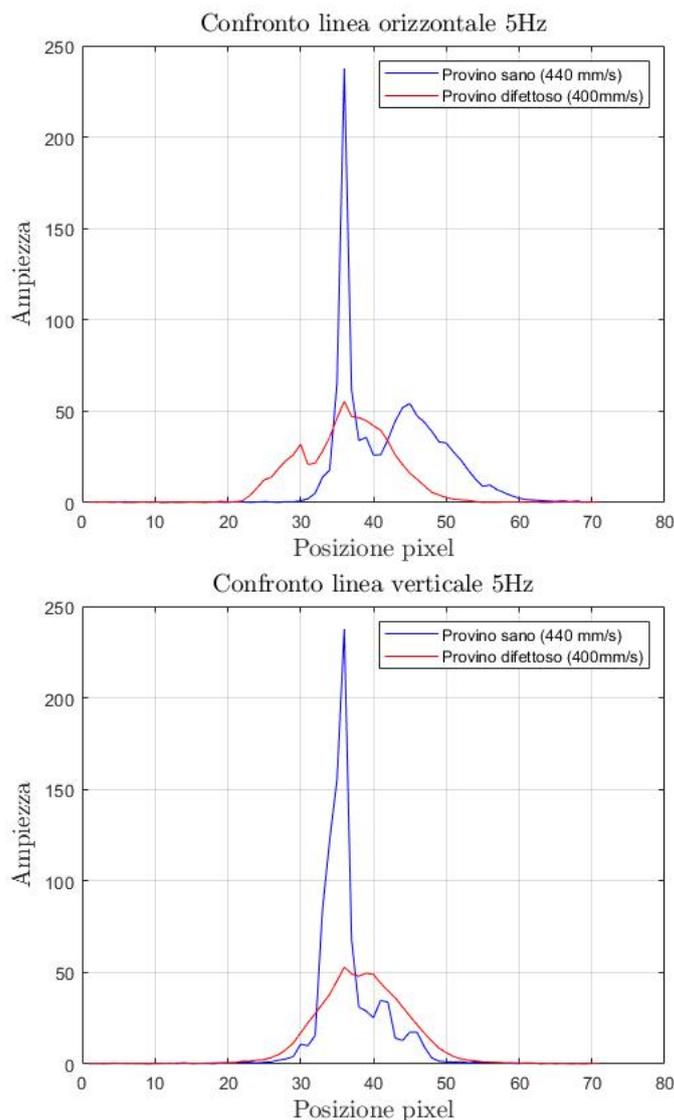


Figura 96: Confronto ampiezza tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s

Dopo un primo sguardo ai grafici riportati sopra si nota come l'andamento del giunto realizzato decelerando la movimentazione della torcia di saldatura è diverso da quello che ci si aspetterebbe. Oltre a discostarsi per i valori di picco (fenomeno atteso), il provino difettoso mostra anche un insolito andamento piatto con un "pre-picco", nel caso della linea orizzontale, antecedente al massimo assoluto mentre per il giunto sano tale picco è successivo al massimo assoluto.

Non si può dire a priori a cosa questo sia dovuto ma tale fenomeno andrà approfondito successivamente provando a variare il range di temperatura della prova e la frequenza con la quale si è scelto di eccitare il provino.

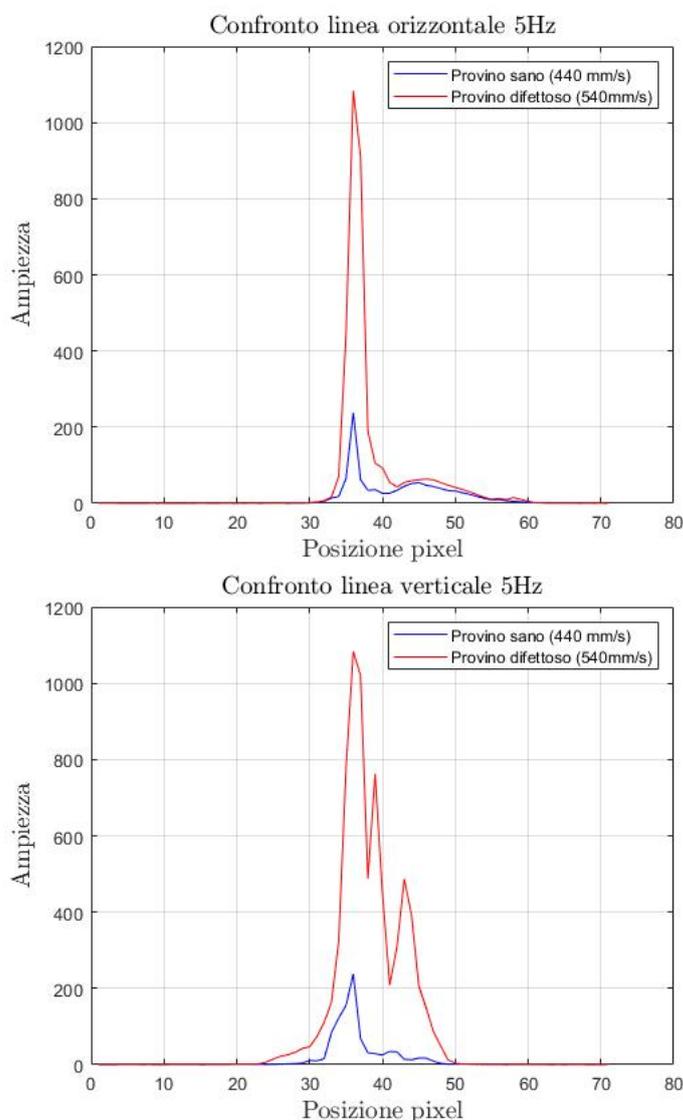


Figura 97: Confronto ampiezza tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s

Per quanto riguarda il confronto tra i giunti privi di difetti e quelli invece realizzati andando ad accelerare il braccio robotico di saldatura, si osserva come l'andamento seguito dalle due curve sia il medesimo mentre il valore di picco è influenzato dalla presenza o meno del difetto.

Si vede quindi come l'analisi lock-in, comparando con gli andamenti registrati per il provino sano, riesce a distinguere un cordone conforme da uno con difettosità interne e/o esterne ma per correlare la risposta di questa analisi con la caratteristica e la dimensione del difetto si rimanda a studi successivi.

Si passa ora a comparare quanto registrato nella termografia online per i giunti esenti da difetti e quelli con difetti indotti realizzati diversificando la velocità di avanzamento del braccio robotico.

Per rendere l'analisi più intuitiva si è deciso di rappresentare in un unico grafico i cicli termici dei tre punti identificati nel cordone sano una volta con quelli realizzati a 400 mm/s e una volta con quelli prodotti a 540 mm/s.

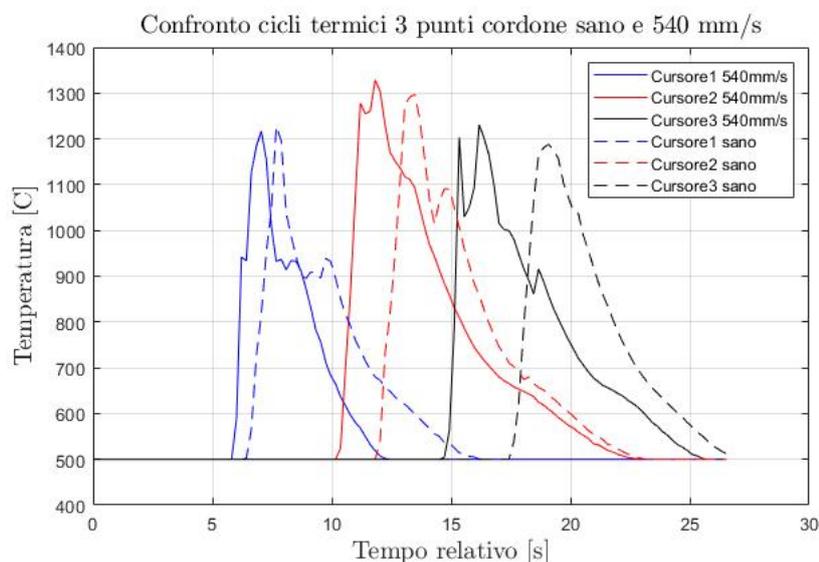


Figura 98: Confronto cicli termici 3 punti tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s

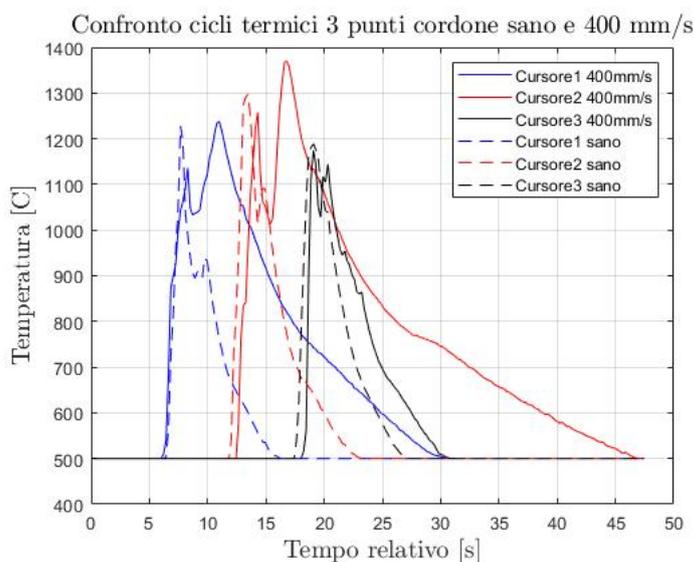


Figura 99: Confronto cicli termici 3 punti tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s

Confrontando il cordone esente da difetti con quello realizzato a 540 mm/s emerge una differenza nei valori massimi raggiunti, con riduzione nei picchi non significativa rispetto ai campioni sani. Commento simile può essere fatto per i provini realizzati a 400 mm/s ad eccezione del punto centrale che registra un picco superiore di circa 100°C rispetto quello registrato dallo stesso punto del cordone esente da difetti

Le tre curve non risultano omogenee nella loro distribuzione rispetto alla posizione lungo il cordone di saldatura.

Il tratto della curva durante la fase di riscaldamento mantiene un andamento circa verticale.

Le velocità di raffreddamento nel caso di difetto indotto da un aumento di velocità di avanzamento della torcia di saldatura sono maggiori.

Si riportano di seguito i grafici ottenuti diagrammando l'andamento medio della temperatura all'interno del box comprendente l'intero cordone per i giunti esenti da difetti e quelli con difetti indotti.

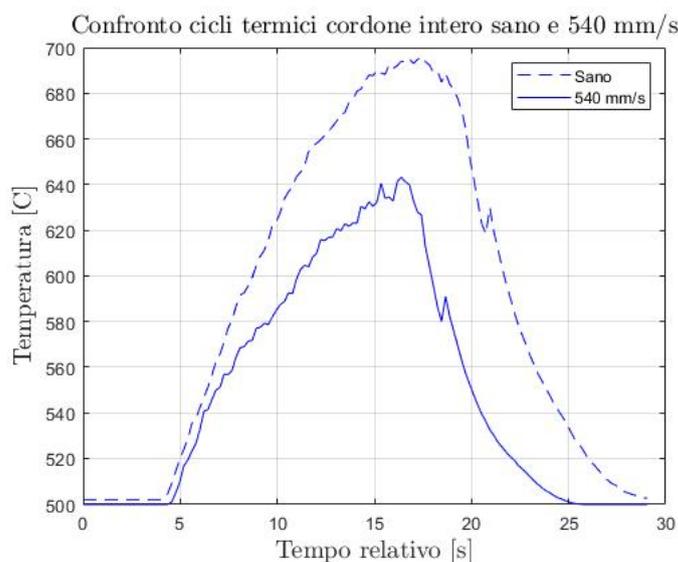


Figura 100: Confronto ciclo termico intero cordone tra il provino sano e quello realizzato a 540 mm/s

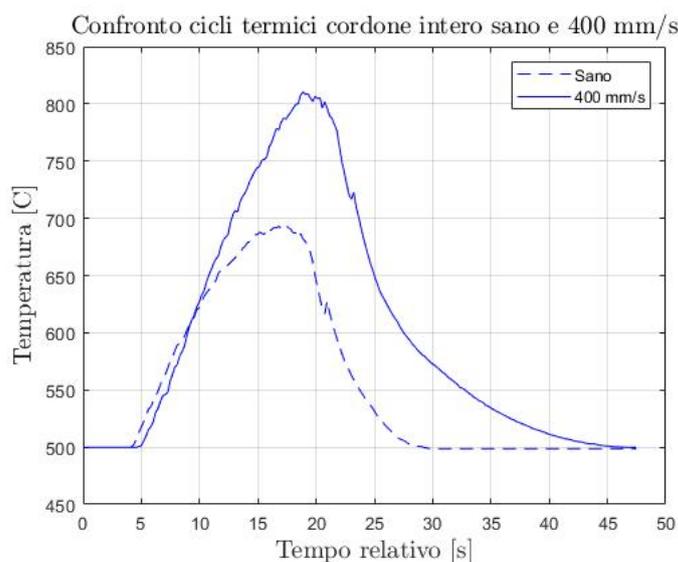


Figura 101: Confronto ciclo termico intero cordone tra il provino sano e quello realizzato a 400 mm/s

La maggiore velocità della torcia di saldatura ha come conseguenza una curva di valore medio con massimo più basso di circa  $60^{\circ}\text{C}$ .

L'abbassamento della curva conferma che effettivamente la sollecitazione termica interessa una zona del materiale base più ristretta con anche dei valori di temperatura minori.

Per il provino realizzato a velocità ridotta del braccio di saldatura si registra un valore massimo maggiore di circa  $60^{\circ}\text{C}$  rispetto quello registrato per il cordone sano.

Questo è dovuto al fatto che, rallentando la movimentazione della torcia, la sollecitazione termica ha interessato una zona più vasta con delle temperature raggiunte superiori.

## 7 Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Nel seguente capitolo sono state raccolte le valutazioni conclusive delle analisi svolte sui giunti saldati nelle prove sperimentali.

Lo scopo del progetto è stato quello di studiare l'applicabilità della termografia ad infrarossi attiva e passiva per il monitoraggio della qualità di giunti saldati. Quello che si è voluto fare è mettere le basi a un possibile utilizzo futuro esclusivo di questa tecnica sostituendo completamente le ispezioni radioscopiche che risultano dispendiose sotto un profilo economico.

La termografia passiva, ormai largamente diffusa nel settore industriale, ha mostrato delle ottime potenzialità. È stata infatti in grado di individuare delle variazioni dei parametri di processo che hanno portato a una non conformità dei giunti saldati, anche laddove i cordoni risultavano sani da una prima analisi visiva e non presentavano quindi delle difettosità macroscopiche visibili all'occhio umano. Si è quindi visto come questa tecnica sia perfettamente in grado di sostituire il controllo visivo dell'operatore e di provvedere in tempi brevi all'individuazione di giunti non conformi.

Un altro vantaggio che rende questa metodologia di analisi competitiva è relativo ai costi, decisamente inferiori rispetto ai raggi x. Rispetto a questi ultimi possiede anche il vantaggio della minor pericolosità, visto che non ricorre a nessuna forma di radiazioni ionizzanti.

L'implementazione su linea di produzione consentirebbe un controllo su ogni prodotto e non più su soli alcuni campioni all'interno di interi lotti di produzione, con evidenti vantaggi di costi e di affidabilità. Ma prima di dire se ciò è rappresenta una possibilità futura concreta ci si propone di continuare lo studio al fine di poter garantire l'efficacia anche sulle più piccole variazioni di parametri.

Un discorso diverso va invece fatto sull'analisi lock-in, questo metodo di studio assai più recente necessita di ulteriori approfondimenti e dell'esecuzione di un maggior numero di prove.

Con le poche prove effettuate non si è infatti riuscito a correlare la risposta in ampiezza e fase con la tipologia di difetto e con le dimensioni dello stesso.

Inoltre se le informazioni estrapolate dalle risposte del materiale in termini di ampiezza sono risultate più o meno significative non si può dire altrettanto per i risultati in merito alla risposta come ritardo di fase.

Le considerazioni fatte sulla tecnologia lock-in sono quindi da intendersi come risultati di uno studio preliminare, in futuro si vorrebbe infatti:

- Variare l'inclinazione del profilo rispetto alla termocamera per vederne l'influenza sulla risposta di ampiezza e fase;
- Variare il tempo di integrazione;
- Variare la frequenza di eccitazione partendo da valori molto bassi;
- Estendere l'analisi puntuale ad una su tutto il cordone movimentando la testa laser.

Questo lavoro di tesi ha riguardato esclusivamente l'analisi di giunti saldati in sovrapposizione realizzati con tecnica MAG/CMT. Per un futuro sviluppo del progetto si potrebbe:

- Aumentare il gap tra le lamiere;
- Variare il flusso di gas;
- Variare la velocità del filo;
- Provare con altre tecniche come la saldatura a punti.

Si potrebbe inoltre ampliare lo studio anche ad altre tipologie di materiali e ad altri tipi di difetti. Per quanto riguarda lo studio mediante termografia passiva si potrebbe progettare un sistema che consenta la movimentazione della termocamera insieme alla torcia.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Norma generale FCA(2018), *Saldatura ad arco*,PS.50001/01<S>.
- [2] <http://pdf.directindustry.it/pdf/diagnostic-engineering-solutions-srl-159140.html> *Cataloghi DES*
- [3] Alexandros Charogiannis, Ivan Zadrazil, Christos N.Markides(2016), *Thermographic particle velocimetry (TPV) for simultaneous interfacial temperature and velocity measurements*, International Journal of Heat and Mass Transfer.
- [4] <http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND088/RND088IT.pdf>, *Scheda tecnica termocamera FLIR X6540sc*.
- [5] [http://www.sidermed.it/catalogo/acciai-particolari/acciai-dual-phase\\_accdualpar.htm](http://www.sidermed.it/catalogo/acciai-particolari/acciai-dual-phase_accdualpar.htm), *Data Sheet DP600*.
- [6] Norma UNI EN 16714-2, (2008).
- [7] <https://www.affri.it/index.php/vickers-hardness-tester-wiki-200-js> *Scheda durezza WIKI200*.
- [8] Associazione italiana metallurgia (1973) *Le prove non distruttive*
- [9] Master R.C. (1959) *Non destructive testing Handbook*
- [10] American welding society (1968) *Welding inspection*
- [11] S.L. Wellington H.J. Vinegar(1987) *X-Ray Computerized Tomography*
- [12] Mark Joachim, MildnerKurt Holm (2008) *Modular X-ray tube and method of production thereof*
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray> *X ray*
- [14] Marcio Luis FerreiraNascimento (2014) *Brief history of X-ray tube patents*
- [15] UNICA *Il metodo radiografico*
- [16] Istituto Italiano della Saldatura (2009) *Controllo Radiografico*
- [17] X. Maldague (2003) *Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing*
- [18] C. Ibarra-Castanedo (2009) *Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures*
- [19] U. Galietti(2016) *Uso avanzato della termografia nell'analisi dei giunti saldati*
- [20] FLIR *Manuale di termografia ad infrarossi per applicazioni industriali*
- [21] Norma UNI EN 16714 *Prove non distruttive - Prove termografiche*
- [22] Meola, C., Carlomagno, G. M. (2004) *Recent advances in the use of infrared thermography*

- [23] D. Lanzoni (2014) *Termografia - Le applicazioni sugli impianti elettrici ed industriali*
- [24] Norma UNI EN 16714-2, (2008)
- [25] G. Pitarresia, A. Licaria (2011) *Implementazione di tecniche di termografia attiva IRNDT su compositi GRP mediante la deposizione di impulsi termici di lunga durata*
- [26] Fronius (2009) *Il processo di saldatura CMT*
- [27] Hoepli (1995) *Saldatura per fusione Vol.1*
- [28] P. Daryabor and M.S. Safizadeh (2016) *Investigation of defect characteristics and heat transfer in step heating thermography of metal plates repaired with composite patches*
- [29] Simon Pickering and Darryl Almond (2008) *Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography nde techniques*