



**Politecnico  
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

# Uso della termografia attiva per l'analisi di giunti saldati RSW

Relatore:  
Prof. Franco Lombardi

Candidato:  
Raffaele Zarrillo

Correlatori:  
Prof.ssa Manuela De Maddis  
Prof. Pasquale Russo Spena

Matricola  
249493

Anno accademico 2020/2021  
Sessione di Laurea Luglio 2021



# Prefazione

La termografia infrarosso rappresenta oggi una tecnica di controllo non distruttiva non a contatto. Con la scoperta degli infrarossi da parte di Sir William Herschel nel 1800, l'evoluzione scientifica e tecnologica ha reso possibile le definizioni delle più note leggi fisiche che regolano questa branca della scienza: dalla legge di Kirchhoff sulle radiazioni elettromagnetiche e corpo nero, alle leggi di Planck sull'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche e del potere emissivo radiante, passando dalla legge di Wien fino ad arrivare alla legge di Stefan-Boltzmann. Il principio fondamentale su cui si basa la IR è che ogni corpo che si trova ad una temperatura maggiore dello zero assoluto (0 K) emette radiazioni termiche. La valutazione di tali radiazioni è possibile attraverso un opportuno strumento di misura. Così come la conoscenza delle leggi fisiche, anche gli strumenti di misura si sono sempre più evoluti nel tempo: basti pensare alle dimensioni ridotte dei moderni sistemi di misura se comparate con quelle dei loro predecessori. L'elemento fondamentale dei moderni strumenti di misura è sicuramente il sensore di misura, che reagendo alle radiazioni termiche incidenti su di esso produce un opportuno segnale elettrico output. L'unità di controllo provvederà all'elaborazione di tale segnale elettrico convertendolo a seconda delle esigenze (ad esempio trasformandolo in un valore di temperatura).

Grazie soprattutto alla sua versatilità, la termografia infrarosso viene oggi adoperata in numerose applicazioni industriali: civile, edile, meccanica, medico, sicurezza, aeronautico ed altre. La termografia infrarosso si divide in due famiglie: termografia passiva e termografia attiva. Nella termografia passiva la termocamera rileva le radiazioni emesse dal corpo in esame senza l'utilizzo di fonti esterne di calore. A causa delle radiazioni emesse dall'ambiente circostante, il rilevamento termico può essere effettuato se e solo se esiste una differenza termica tra il corpo in esame e l'ambiente circostante. Inoltre, difficilmente si riesce ad effettuare un'analisi evolutiva nel tempo. Nella termografia attiva invece, si utilizza una sorgente di calore per riscaldare il target. Con tale tecnica è possibile effettuare un'analisi temporale del target. In letteratura esistono diversi metodi di eccitazione termica, tra due delle più utilizzate sono: termografia pulsata (Pulsed Thermography) e termografia modulata (Lock-in Thermography). La termografia pulsata prevede di riscaldare il target attraverso un impulso termico, che può variare da pochi millisecondi fino a qualche secondo, a seconda della conducibilità termica del materiale target. Il problema principale di questo metodo è la risoluzione in termini di profondità: per riscaldare spessori maggiori c'è bisogno di una maggiore potenza termica, e dunque di un maggior costo. Nella termografia modulata invece, l'eccitazione termica è di tipo sinusoidale. Tale tipo di eccitazione produce una variazione armonica della temperatura superficiale nel target. La presenza di difetti sotto la superficie del target produce una risposta diversa da quella che eccitante. Variando la frequenza di eccitazione è possibile ispezionare diversi livelli di profondità.

Nella presente tesi sperimentale svolta presso il laboratorio J-Tech presente al Politecnico di Torino, la termografia attiva è stata utilizzata come strumento di ispezione nel processo di saldatura per resistenza a punti. Per le prove sono stati realizzati 1245 punti di saldatura, ottenuti saldando opportunamente delle lamiere di acciaio DP 600, dello spessore di 1 mm. Come metodo di termografia attiva è stata utilizzata la termografia pulsata: le prove sono state ottenute mediante l'utilizzo dell'apparecchiatura denominata MultiDES System Laser, presente presso il laboratorio J-Tech e fornito dalla DES (*Diagnostic Engineering Solution*) di Bari, che ne detiene il brevetto. Tale sistema utilizza una sorgente laser come fonte di eccitamento termico con una potenza nominale massima di 50 W. Le prove sono state eseguite in accordo con la norma BS ISO 18434-1:2008: dopo una serie di test atti a definire i parametri di processo ottimali (potenza del laser e durata dell'impulso), per ogni target in esame è stata valutata sia la temperatura riflessa apparente sia l'emissività del target in esame. Data la discordanza dei valori ottenuti a temperatura ambiente con quelli presenti in letteratura, l'emissività è stata successivamente calcolata per temperature maggiori di 20° C rispetto alla temperatura riflessa apparente. Tutte le prove sono state realizzate mediante il supporto dei software ResearchIR e MultiDES R 3.0. I dati acquisiti dalle prove sperimentali sono stati oggetto di successive analisi, realizzate mediante i software ResearchIR e Matlab. Dopo una prima fase di preparazione dei dati, si è proseguito con la scelta dell'area di indagine, passaggio fondamentale al fine di ottenere dei risultati che descrivano al meglio il comportamento dei vari campioni: una zona di indagine troppo piccola potrebbe comportare risultati con un'elevata componente aleatoria e a carattere prettamente locale; aree mediate troppo grandi rischiano di non far apprezzare al meglio il comportamento dei singoli campioni. La scelta dell'area di indagine (che verrà descritta ampiamente all'interno dell'elaborato) è ricaduta ad un quadrato inscritto all'interno dell'impronta lasciata dall'elettrodo di saldatura sulla superficie dei campioni. Dall'estrapolazione dei dati contenuti all'interno di tale zona, sono state effettuate numerose analisi: anzitutto sono state ricavate le curve di evoluzione termica nel tempo, per passare poi allo studio di alcune caratteristiche di suddette curve, come ad esempio: i valori massimi mediati ottenuti a fine riscaldamento, i valori medi dell'intera curva, i valori di pendenza del solo tratto di raffreddamento, ed altre ancora. Per ogni tipo di analisi verrà descritta nel dettaglio la procedura adottata.

I risultati ottenuti sono molto promettenti sull'utilizzo della termografia attiva come strumento di controllo non distruttivo. Tuttavia, l'analisi realizzata necessita di maggiori approfondimenti e di ulteriori analisi sperimentali, al fine di convalidare i risultati ottenuti.

# 1 Indice Tematico

Prefazione .....	I
1 Indice Tematico.....	III
2 Indice delle Figure.....	V
3 Indice delle Tabelle .....	XI
1 Lo stato dell'arte .....	1
1.1 Termografia ad infrarossi .....	1
1.2 L'infrarosso: le sue origini .....	4
1.3 Alcune definizioni e leggi fisiche.....	5
1.4 Strumentazione di misura .....	9
1.5 Classificazione delle tecniche di termografia .....	11
1.5.1 Termografia pulsata (Pulsed thermography) .....	15
1.5.2 Termografia Modulata (Lock-in thermography) .....	20
1.5.3 Altri metodi di termografia attiva .....	22
1.6 Esempi applicativi della termografia nei processi di saldatura saldatore.....	26
1.6.1 Saldatura ad arco .....	27
1.6.2 Saldatura laser e a fascio elettronico .....	32
1.6.3 Saldatura per resistenza a punti .....	35
1.7 Usura degli elettrodi nella saldatura per resistenza a punti.....	44
2 Strumentazione, materiali e prove sperimentali .....	48
2.1 Strumentazione.....	49
2.2 Materiali e provini .....	50
2.3 Prove sperimentali .....	52
2.3.1 Temperatura riflessa apparente .....	52
2.3.2 Emissività .....	54
2.3.3 Scelta dei parametri di prova .....	58
3 Analisi dati.....	63
3.1 Preparazione dei dati .....	63
3.2 Scelta dell'aria d'indagine.....	64
3.3 Curve di evoluzione termica nel tempo .....	70
3.4 Media delle tre ripetizioni per ogni serie .....	77

3.5	Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento - $T_{max}$ .....	82
3.6	Temperatura media della prova - $T_m$ .....	85
3.7	Pendenza approssimata .....	88
3.8	Analisi per sotto-aree dell'impronta dell'elettrodo.....	96
3.9	Interpretazione dei risultati.....	99
4	Conclusioni.....	105
	Ringraziamenti .....	107
	Bibliografia .....	108

## 2 Indice delle Figure

Figura 1- Termografia Infrarossa.....	1
Figura 2 - Applicazioni industriali termografia infrarossa (dati raccolti tra il 2013 e il 2019).....	3
Figura 3 - Sir William Herschel .....	4
Figura 4 - Strumento di misura costruito da Herschel .....	4
Figura 5 - Temperature misurate nello spettro del visibile da Herschel .....	5
Figura 6 - Radiazione incidente su di una superficie .....	6
Figura 7 - Radiazione corpo nero a diverse temperature .....	7
Figura 8 - Potere emisferico radiante totale .....	8
Figura 9 - Model 650 AGA.....	9
Figura 10 - Prima immagine a colore .....	9
Figura 11 - Esempio di prime apparecchiature portatili .....	10
Figura 12 - Esempio di strumento di misura moderno .....	10
Figura 13 - Prima sistema palmare .....	10
Figura 14 - Schema sistema di termografia.....	11
Figura 15 - Spettro delle onde elettromagnetiche.....	11
Figura 16 - Termografia attiva in modalità di riflessione .....	13
Figura 17 - Termografia attiva in modalità di trasmissione.....	14
Figura 18 - Termografia Pulsata .....	15
Figura 19 - Eccitazione di un corpo di dimensioni semi-infinite.....	15
Figura 20 - Eccitazione di un corpo di dimensioni finite .....	16
Figura 21 - Evoluzione del raffreddamento per una zona priva di difetti e una zona contenente un difetto .....	17
Figura 22 - Schema del campione utilizzato in.....	17
Figura 23 - Curve di raffreddamento per i diversi difetti simulati.....	18
Figura 24 - Immagini termiche per diversi istanti di tempo .....	18
Figura 25 - Risultati delle analisi comparati con i valori reali .....	18
Figura 26 - Termografia Modulata .....	20
Figura 27 - Segnale di eccitazione (in alto) e segnale di risposta (in basso).....	20
Figura 28 - Schema del campione utilizzato in.....	22

Figura 29 - Risposta nel dominio della frequenza per i campioni 1,2 e 3 .....	23
Figura 30 - Immagini di ampiezza (a) e fase (b) a frequenza di 3.125Hz; immagine in fase per la frequenza a 15.625Hz (c).....	23
Figura 31 - Immagini termiche ottenute a: 50 ms (a), 200 ms (b) e 500 ms (c).....	23
Figura 32 - Schema (a) e foto (b) del campione utilizzato in.....	24
Figura 33 - Schemi di eccitamento utilizzati in.....	24
Figura 34 - Risultati ottenuti (destra) per le tre aree individuate (sinistra) .....	25
Figura 35 - Immagini termiche acquisite per diversi istanti di tempo: $t < 0s$ (sinistra), $t = 0.95s$ (centro) e $t = 4.867s$ (destra).....	25
Figura 36 - Classificazione dei processi di saldatura .....	26
Figura 37 - Schema saldatura ad arco con elettrodo rivestito .....	27
Figura 38 - Schema saldatura ad arco sommerso .....	28
Figura 39 - Schema saldatura TIG .....	29
Figura 40 - Schema saldatura MIG/MAG .....	30
Figura 41 - Campione utilizzato in.....	30
Figura 42 - Individuazione delle due sezioni longitudinali e trasversali al difetto.....	31
Figura 43 - Validazione interna del modello lungo le sezioni trasversali T1 (a) e T2 (b) .....	32
Figura 44 - Funzione di profondità e velocità di raffreddamento per le sezioni longitudinali L1 (a) ed L2 (b).....	32
Figura 45 - Schema processo di saldatura laser .....	33
Figura 46 - Campione utilizzato. La velocità di saldatura aumenta da sinistra verso destra.....	34
Figura 47 - Immagine termica (a); Immagine in fase (b) per $f = 0.93$ Hz.....	34
Figura 48 - Distribuzione media dell'angolo di fase (a); Metallografia del cordone ottenuto a $v = 1000$ mm/min .....	34
Figura 49 - Schema processo di saldatura per resistenza a punti .....	35
Figura 50 - Sequenza delle operazioni necessarie alla realizzazione del giunto .....	36
Figura 51 - Distribuzione della resistenza elettrica .....	36
Figura 52 - Zona di scelta dei parametri di processo .....	37
Figura 53 - Metallografia giunto saldato .....	37
Figura 54 - Provini 2, 3 e 5 .....	38
Figura 55 - Parametri di processo usati in.....	38

Figura 56 - Zona di indagine (sinistra) e corrispettive curve di evoluzione temporale di temperatura (destra) .....	38
Figura 57 - Risultati ottenuti per i quattro parametri e istante in cui si raggiunge la temperatura minima .....	40
Figura 58 - Schema utilizzato per le prove .....	41
Figura 59 - Ricerca del nocciolo di saldatura.....	41
Figura 60 - Curve di evoluzione termica temporale per le zone individuate .....	42
Figura 61 - Fase di post-processo dei dati.....	42
Figura 62 - Dimensioni in pixel del nocciolo di saldatura .....	42
Figura 63 - Risultati ottenuti dalle prove distruttive e dalla termografia.....	43
Figura 64 - Esempio di errata applicazione del codice.....	43
Figura 65 - Modi di deformazione dell'elettrodo per usura: a fungo (a) o per rifilatura (b) .....	44
Figura 66 - Combinazioni di materiali usati in .....	45
Figura 67 - Risultati ottenuti per MC01-TS01 al variare del numero di saldature .....	45
Figura 68 - Risultati ottenuti per MC02-TS01 al variare del numero di saldature .....	45
Figura 69 - Risultati ottenuti dalla termografia online (sinistra) e da quella offline (destra) .....	46
Figura 70 - Strumentazione di misura .....	48
Figura 71 - Termocamera Flir A657sx .....	49
Figura 72 - Stazione di saldatura .....	50
Figura 73 - Campione Fronte .....	50
Figura 74 - Campioni Retro .....	51
Figura 75 - Settaggio emissività e distanza sul software ResearchIR .....	52
Figura 76 - Posizionamento Target .....	53
Figura 77 - Posizionamento del materiale riflettore .....	53
Figura 78 - Misura della temperatura riflessa apparente .....	54
Figura 79 - Applicazione del nastro nero .....	54
Figura 80 - Lettura valore di temperatura del nastro nero .....	55
Figura 81 - Variazione emissività target.....	55
Figura 82 - Emissività campioni Fronte - Tamb .....	56
Figura 83 - Emissività campioni Fronte mediata sui pannelli a Tamb .....	56
Figura 84 - Emissività campioni Fronte mediata sui pannelli - T=50°C .....	57
Figura 85 - Emissività campioni Retro - Tamb.....	58

Figura 86 - Angolo di rotazione della testa .....	59
Figura 87 - Angolo di inclinazione 1 della testa.....	59
Figura 88 - Angolo di inclinazione 2 della testa.....	59
Figura 89 - Vista superiore del setup adottato .....	60
Figura 90 - Fase di centraggio dello spot del laser sul target.....	61
Figura 91 - Schema ordinamento dati in matrici.....	64
Figura 92 - Rumore di misura per aree di indagini troppo piccole.....	65
Figura 93 - Area di indagine pari al quadrato che inscrive l'importa dell'elettrodo.....	65
Figura 94 - Posizione spaziale del valore di temperatura massimo raggiunto (sinistra) alla fine del riscaldamento (destra).....	66
Figura 95 - Zona di indagine scelta.....	66
Figura 96 - Impronte lasciate dall'elettrodo superiori sul pannello 1 (a), 5 (b) e 9 (c).....	67
Figura 97 - Individuazioni delle coordinate del centro della ROI .....	67
Figura 98 - Ottenimento delle coordinate degli estremi del segmento.....	68
Figura 99 - Schema del processo per la creazione delle curve di evoluzione termica .....	70
Figura 100 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività a Tamb.....	72
Figura 101 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività a Tamb .....	72
Figura 102 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb .....	73
Figura 103 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb.....	73
Figura 104 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C.....	74
Figura 105 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C .....	74
Figura 106 - Curve di evoluzione termica per i campioni Retro con emissività a Tamb.....	75
Figura 107 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Retro con emissività a Tamb .....	75
Figura 108 – Esempio di curve di evoluzione termica normalizzate per i campioni Fronte.....	76
Figura 109 – Esempio di curve di evoluzione termica normalizzate per i campioni Retro.....	76

Figura 110 - Schema della procedura utilizzata per ottenere la media delle tre ripetizioni per ogni serie.....	77
Figura 111 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività a Tamb .....	78
Figura 112 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività a Tamb.	78
Figura 113 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb.....	79
Figura 114 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb .....	79
Figura 115 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C .....	80
Figura 116 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C.....	80
Figura 117 -Media delle 10 serie dei campioni Retro con emissività a Tamb .....	81
Figura 118 -Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Retro con emissività a Tamb ...	81
Figura 119 - Schema della procedura utilizzata per il calcolo della temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento .....	82
Figura 120 - Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività a Tamb .....	83
Figura 121- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb.....	83
Figura 122- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C .....	84
Figura 123 - Schema della procedura utilizzate per il calcolo della temperatura media della prova .....	85
Figura 124 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività a Tamb.....	86
Figura 125 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb.....	86
Figura 126 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C .....	87
Figura 127 - Curve di raffreddamento in un diagramma log-log.....	88
Figura 128 - Schema della procedura utilizzata per il calcolo della pendenza nel singolo intervallo di campionamento.....	89

Figura 129 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività a Tamb.....	90
Figura 130 - Pendenza tratto 2 campioni Fronte con emissività a Tamb.....	90
Figura 131 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività a Tamb.....	91
Figura 132 - Pendenza tratto 4 campioni Fronte con emissività a Tamb.....	91
Figura 133 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb..	92
Figura 134 - Pendenza tratto 2 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb..	92
Figura 135 - Pendenza tratto 4 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb..	93
Figura 136 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb..	93
Figura 137 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C	94
Figura 138 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C	94
Figura 139 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C	95
Figura 140 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C	95
Figura 141 - Schema di suddivisione dell'area di indagine.....	96
Figura 142 - Ingrandimento zona di indagine relativa all'approssimazione.....	96
Figura 143 - Schema della procedura per la rappresentazione dei vari risultati.....	97
Figura 144 - Risultati ottenuti dalle indagini in per le 3 aree identificate .....	98
Figura 145 - Risultati ottenuti per la serie 6 Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C .....	98
Figura 146 - Risultati ottenuti dalla media delle ripetizioni delle singole serie.....	98
Figura 148 - Metallografia del campione 3A.....	101
Figura 147 - Variazione delle dimensioni del nocciolo di saldatura in funzione nel numero di saldature effettuate .....	101
Figura 149 - Variazione della profondità del nocciolo di saldatura in funzione del numero di saldature effettuate .....	102
Figura 150 - Interpolazione dei valori di temperatura media della prova con un polinomio di terzo grado.....	103

### 3 Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Specifiche tecniche termocamera Flir A657sx.....	50
Tabella 2 - Parametri di processo della saldatura per resistenza a punti.....	50
Tabella 3 - Setup geometrici prove sperimentali .....	59
Tabella 4 - Parametri di prova termografia attiva .....	60
Tabella 5 - Parametri di acquisizione per le prove in termografia attiva .....	61
Tabella 6 - Dimensioni nocciolo di saldatura.....	101



# 1 Lo stato dell'arte

In questo capitolo sarà descritto la tecnologia principale su cui verte la presente tesi sperimentale: la **termografia infrarossa**. Verranno trattate le origini di questa tecnologia e le sue evoluzioni nel tempo, con un breve cenno alle leggi fisiche che ne descrivono il comportamento. Si passerà poi alla definizione dei vari metodi di termografia più utilizzati in campo industriale, menzionando alcuni esempi applicativi.

Inoltre, verrà dato un breve accenno ai **processi di saldatura**, prestando particolare attenzione verso saldatura per resistenza a punti e saranno infine mostrati esempi applicativi della termografia infrarossa come metodo di controllo non distruttivo per le saldature.

## 1.1 Termografia ad infrarossi

La termografia ad infrarossi è una tecnica di controllo non distruttivo senza contatto, che misura le radiazioni elettromagnetiche emesse e riflesse dalla superficie di un oggetto nello spettro dell'infrarosso. Questa tecnologia si basa sul fenomeno fisico (che sarà approfondito nel [capitolo 2.2](#)) per il quale ogni corpo che si trovi ad una temperatura maggiore dello zero assoluto ( $T > 0$  K) emette radiazione elettromagnetiche [1].



Figura 1- Termografia Infrarossa

La termografia è un ramo della scienza in continua evoluzione, soprattutto negli ultimi decenni grazie ai notevoli progressi ottenuti dalla tecnologia nel campo dell'elettronica, informatica e sensori di misura.

L'aspetto che caratterizza la termografia infrarossa e che ne ha favorito il suo utilizzo è la sua versatilità di utilizzo. Essa è utilizzata in diversi campi dell'ingegneria: si passa dal campo della meccanica all'aerospaziale, dall'elettronica fino in ambito edile/civile, con applicazioni anche in campo medico. Tra i principali vantaggi che offre la termografia possiamo menzionare:

- Possibilità di ispezione da remoto: essendo un metodo di controllo non a contatto può essere utilizzata per distanze che variano da pochi millimetri fino a diversi chilometri;

- Range di misurazioni: variando il sistema di ottica e sensoristica è possibile misurare temperature che variano tra i 20° fino ad arrivare a 1600° C, con sensibilità di lettura anche del centesimo di grado;
- Portabilità: oggi è possibile trasportare l'intera strumentazione con estrema facilità dato il suo peso e le dimensioni ridotte;
- Visibilità: è possibile effettuare misurazioni anche in presenza di fumo o nebbia, data la capacità di penetrazione delle radiazioni termiche, rispetto alla capacità di penetrazione delle radiazioni nel campo del visibile;
- Area di investigazione ampia: rispetto ad altre tecnologie la termografia consente di investigare simultaneamente più zone, anche di dimensioni maggiori, il tutto con un'alta frequenza di acquisizione;
- Manipolazione dati: i dati registrati possono essere processati anche da un comune PC con il solo ausilio di software dedicati alle analisi dati.

Come ogni tecnologia presente in un qualsiasi campo industriale, la termografia presenta anche degli svantaggi, quali ad esempio:

- Personale qualificato: al fine di una corretta analisi è necessario che il personale conosca almeno i principi fisici alla base della termografia e che abbia acquisito abbastanza esperienza con la strumentazione;
- Influenza delle condizioni climatiche: nel caso di analisi in ambiente aperto le condizioni atmosferiche possono giocare un ruolo fondamentale nei risultati ottenuti. Nel caso invece di misurazioni in ambienti chiusi, può essere necessario schermare il target dalle radiazioni dell'ambiente circostante;
- Costo: l'attrezzatura ha costi non sempre trascurabili, tra i quali anche eventuali costi per le licenze software;
- Veridicità dei risultati: difficoltà di ottenere dati precisi, soprattutto per materiali che presentano bassa emissività. In alcuni casi si può prevedere di effettuare delle misurazioni con metodi a contatto per poi andare a correggere i dati acquisiti in termografia. In alcuni casi si predilige un'analisi qualitativa piuttosto che un'analisi quantitativa.

Esempi di applicazioni della termografia in campo industriale sono riportati nella Figura 2 riportata in [1] che fanno riferimento a dati raccolti tra il 2013 e il 2019.

Industry	Sub-industry	Inspected for
Civil	Building & Masonry structure	Defect/ Degradation detection
		Energy loss/ Thermal bridging
	Bridges	Leak/ Moisture detection
		Component performance/ Defect evaluation
		Defect detection
		Defect detection
		Tunnel
Asphalt	Crack/Defect detection	
Urban	Structure/Feature/Energy loss detection	
Rail	Components defect detection/evaluation	
Composite	-	Impact defect/ Delamination detection
		Dis-bonding/Patch repair
		Impact defect characterization
		Fatigue defect characterization
Electrical	Power	Defect detection (power plants/transformers)
	Electronics	Soldering/Connection inspection
		PCB/IC/Semi-conductors inspection
		Battery inspection
Machinery	Motors	Defect/Abnormal temperature
	Bearings	Defect/Abnormal temperature
	Nuclear	Defect/Abnormal temperature
	Heat Exchangers	Defect/Leakage/Abnormal temperature
Renewable	Solar	Structural defect/ Abnormal temperature
	Wind	Structural defects
Metallic Material/ Structure	-	Metal loss defect detection/characterisation
		Crack defect detection
		Fatigue defect detection
		Weld defect/Crack detection
		Leakage detection

Figura 2 - Applicazioni industriali termografia infrarossa (dati raccolti tra il 2013 e il 2019)

## 1.2 L'infrarosso: le sue origini<sup>1</sup>

Oggi giorno sappiamo che sia la luce e l'infrarosso fanno parte della stessa famiglia delle radiazioni elettromagnetiche. Il primo a scoprire le radiazioni infrarosso fu **Sir William Herschel** mentre studiava le radiazioni dal sole, nel 1800. Herschel non era originariamente uno scienziato: immigrato in Germania, lavorò dapprima in una banda musicale militare e successivamente si trasferì a Bath per prendere la cattedra come insegnante di musica. Fu a Bath che si avvicinò alla scienza a seguito dell'acquisto del suo primo telescopio ed un libro di astronomia. La scoperta degli infrarossi fu un evento molto fortuito: egli era alla ricerca del miglior colore per le lenti del telescopio che gli consentissero di osservare in sicurezza il sole durante le sue ricerche. In una sua pubblicazione scientifica egli affermava che con alcune lenti percepiva una sensazione di calore e poca luce, mentre altre lenti gli davano una minor sensazione di calore ma lasciavano passare una maggior quantità di calore. Data l'esperienza acquisita nella costruzione dei telescopi, Herschel costruì uno strumento che gli consentì di testare le sue ipotesi, ovvero quello che oggi viene denominato spettrometro. Tale strumento era costituito da tre componenti (vedi schema Figura 4):

- un *prisma di vetro* posizionato in prossimità di una finestra rivolta verso sud in modo da catturare la luce diretta del sole e disperdere i colori su di un tavolo;
- un *pannello di cartone* con una fessura abbastanza ampia da far passare almeno un colore;
- almeno *due termometri*: uno che misura la temperatura ambiente e l'altro che misura la temperatura del fascio di luce che passa attraverso il pannello.

L'esperimento prevedeva la misurazione delle temperature per ogni colore appartenente allo spettro del visibile. Egli notò che la temperatura che misurava per ogni colore non era costante lungo lo spettro. In particolare, le temperature aumentavano passando da valori più bassi per la banda del viola fino ad arrivare al rosso, dove si registravano le temperature più alte. Quello che attirò maggiormente l'attenzione di Herschel fu il fatto che l'andamento di temperature suggeriva che



Figura 3 - Sir William Herschel

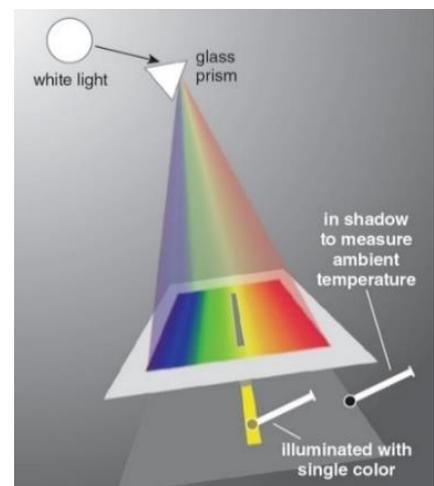


Figura 4 - Strumento di misura costruito da Herschel

<sup>1</sup> Gli argomenti proposti nel capitolo sono tratti da [2]

il valore massimo di temperatura potesse ricadere al di fuori della colorazione in rosso, come mostrato in Figura 5.

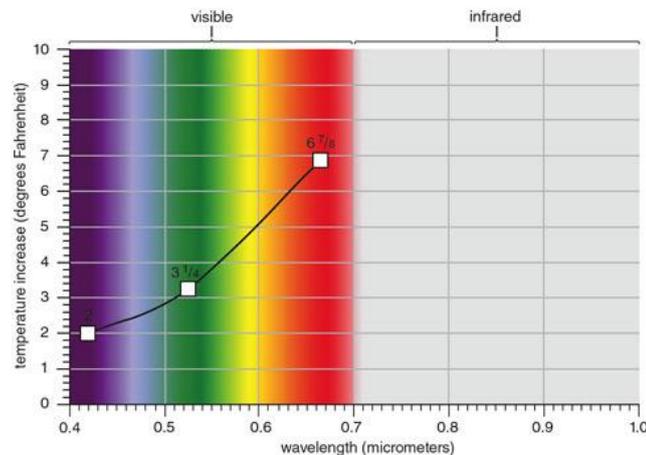


Figura 5 - Temperature misurate nello spettro del visibile da Herschel

Da qui l'intuizione di Herschel di misurare la temperatura al di fuori dello spettro del visibile. Egli notò che le temperature misurate continuavano ad aumentare oltre la banda del rosso, nella zona in oscurità dove non erano presenti colori visibile. La distribuzione di temperatura raggiungeva un valore massimo per poi iniziare la fase decrescere. Tramite questo semplice esperimento Herschel affermò che la luce e il calore utilizzano modi differenti per diffondersi e che quest'ultima predilige un altro tipo di radiazione 'invisibile', introducendo il termine di *calore radiante* (il termine infrarosso comparirà solo nel 1880). Tramite la sua conoscenza egli non riuscì a dimostrare che la luce ed il calore sono la stessa quantità. Ha inoltre eseguì la prima *misurazione radiometrica della potenza radiale spettrale*, che va dal campo del visibile fino a quello dell'infrarosso. I suoi esperimenti sono stati l'inizio di una lunga serie di successive ricerche, quali quelle di *Kirchhoff* e *Plank*.

### 1.3 Alcune definizioni e leggi fisiche

Come accennato nel [capitolo 2.1](#) ogni corpo che abbia una temperatura maggiore di 0 K (-273.15° C) emette radiazioni elettromagnetiche. Tale principio fisico può essere descritto come un'onda, che mantiene la sua forma mentre progredisce nello spazio in funzione del tempo. Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da un parametro detto *lunghezza d'onda*  $\lambda$ , che rappresenta la distanza coperta dalla radiazione in un periodo, e dalla *frequenza*  $\nu$ , che rappresenta il numero di cicli nell'unità di tempo. Si ha pertanto che la *velocità di propagazione*  $c$  è esprimibile come:

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

Già a partire dalla seconda metà del 1800 *Gustav Kirchhoff* introdusse alcuni concetti fondamentali in merito alle radiazioni elettromagnetiche. Va anzitutto menzionata la *Legge di*

**Kirchhoff**, la quale afferma che, tramite opportuni bilanci energetici, per ogni quantità di radiazione termica incidente su di una superficie reale è associabile una certa quantità di energia  $E_{tot}$ . La radiazione che incontra una superficie può subire tre diverse trasformazioni (mostrate in Figura 6): una parte verrà riflessa dalla superficie stessa ( $E_r$ ), una parte verrà assorbita dal corpo ( $E_a$ ) e l'ultima parte verrà trasmessa attraverso il corpo ( $E_t$ ):

$$E_{tot} = E_r + E_a + E_t \quad (2)$$

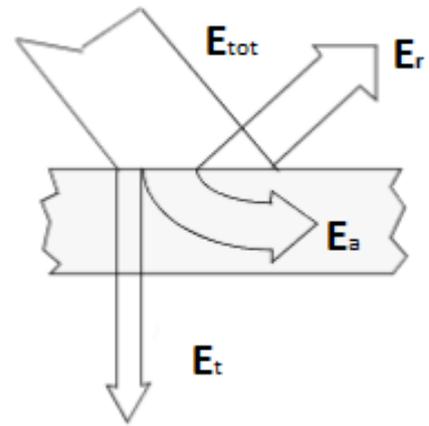


Figura 6 - Radiazione incidente su di una superficie

Dividendo l'equazione (2) per  $E_{tot}$  si ottiene:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (3)$$

Dove:

- $\rho = E_r/E_{tot}$  è il coefficiente di riflessione;
- $\alpha = E_a/E_{tot}$  è il coefficiente di assorbimento;
- $\tau = E_t/E_{tot}$  è il coefficiente di trasmissione.

Un altro concetto fondamentale introdotto da Kirchhoff è quello di **corpo nero**, che rappresenta il modello ideale di un corpo che ha le seguenti proprietà:

- Assorbe ogni radiazione incidente su di esso a prescindere dalla lunghezza d'onda e dalla direzione;
- Per una data temperatura e per una data lunghezza d'onda, nessun corpo può emettere più energia di un corpo nero.

Quando si parla di corpo nero si fa dunque riferimento ad un modello ideale che prevede una superficie che abbia un coefficiente di assorbimento  $\alpha$  unitario. Quale perfetto assorbitore ed emettitore, il modello di corpo nero viene utilizzato come standard di comparazione nelle misurazioni.

A seconda dei valori che assumono i vari coefficienti introdotti nell'equazione (3), sono stati creati modelli di superfici ideali che diversificano i possibili comportamenti delle superfici reali:

- Superfici riflettenti, per le quali  $\rho=1$  e riflettono l'intera aliquota di energia incidente;
- Superfici trasparenti, per le quali  $\tau=1$  e che si lasciano attraversare totalmente dall'intera energia che incide su di esso;
- Superfici opache, per le quali  $\tau=0$ , in cui parte dell'energia viene assorbita e parte viene riflessa. Nelle applicazioni industriali si utilizza in genere questo modello, che prende anche il nome di corpo grigio.

Un altro contributo importante alla comprensione dei fenomeni alla base delle onde elettromagnetiche è da attribuire a **Max Plank**. Verso gli inizi del 1900 egli affermò che le onde elettromagnetiche trasportano con sé energia e che questa viene trasmessa in unità discreta, denominati *quanti* o *fotoni*. Inoltre, riuscì a definire una legge del tipo:

$$E_{tot} = E_r + E_a + E_t \quad (4)$$

dove  $h$  è la **costante di Plank** pari a  $6,626 \cdot 10^{-34}$  J\*s. Essendo 'c' ed 'e' due costanti, l'energia di ogni fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda e dunque la radiazione che ha la più piccola lunghezza d'onda presenterà la maggiore energia. Inoltre, grazie all'introduzione del concetto di quanti, Plank riuscì a definire anche il concetto di **potere emisferico radiante totale monocromatico** emesso da una superficie ed esprimibile come:

$$\Phi_\lambda = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1} \quad (5)$$

dove:

- $c_0$  è la velocità del suono nel vuoto pari a  $2,998 \cdot 10^8$  m/s;
- $k$  è la costante di Boltzmann pari a  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

Nella Figura 7 sono riportate alcune soluzioni dell'equazione (5) per diversi valori di temperatura. Per il corpo nero è possibile stimare la variazione di forma della curva rappresentativa del potere emisferico radiante totale emisferico tramite la **Legge di Wien**, che si esprime come:

$$\lambda_{max} * T = 2897,8 \mu m * K \quad (6)$$

Integrando l'equazione (5) si ottiene il **potere emisferico radiante totale** (Figura 8):

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda \quad (7)$$

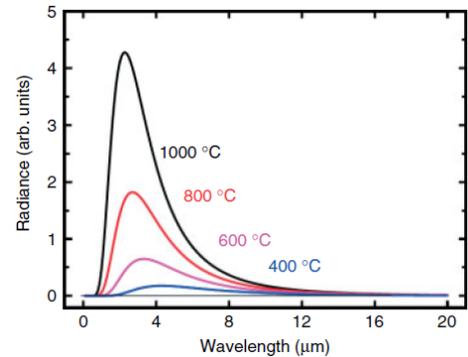


Figura 7 - Radiazione corpo nero a diverse temperature

Nelle applicazioni ingegneristiche difficilmente si risolve questo integrale. Nella pratica comune si introducono i concetti di **potere emisferico radiante totale del corpo nero** e il concetto di **emissività**. Il primo è definito attraverso la **Legge di Stefan-Boltzmann**. I due scienziati risolsero sperimentalmente l'integrale  $\int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda$  ottenendo una soluzione del tipo:

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (8)$$

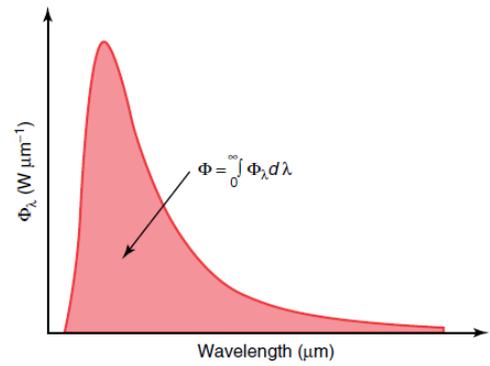


Figura 8 - Potere emisferico radiante totale

dove  $\sigma$  è la *costante di Stefan-Boltzmann* pari a  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

L'*emissività* di una superficie è definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura; viene indicata con  $0 < \epsilon < 1$  ed è una misura di quanto una superficie reale approssima un corpo nero. L'emissività può essere dedotta dalla legge di Kirchhoff, la quale afferma che la quantità di radiazione assorbita da qualsiasi oggetto è uguale alla quantità di radiazione emessa da questo oggetto.

$$\epsilon = \alpha \quad (9)$$

L'emissività gioca un ruolo fondamentale nello studio di componenti mediante l'utilizzo della termografia. Un valore errato di emissività può comportare ad avere risultati errati. È per questo motivo che l'Organizzazione Internazionale per la normazione ISO descrive la corretta procedura per la valutazione dell'emissività. Tali normative verranno trattate nel dettaglio all'interno del capitolo XXX(metodo/procedura). QUI potrei aggiungere altre info che influenzano emissività

## 1.4 Strumentazione di misura<sup>2</sup>

Il primo utilizzo di immagine termiche nella storia ha inizio verso il 1940 grazie ad alcune applicazioni in campo militare. È solo a partire dagli anni '60 che furono create le prime termocamere destinate all'uso industriale. La prima termocamera messa in commercio fu prodotta dalla AGA, un'azienda di origine svedese. Il primo modello commercializzato prese il nome di Model 650 (vedi Figura 9) e venne utilizzato come strumento di misura per la manutenzione predittiva, ma anche per monitorare l'isolamento termico delle abitazioni. La strumentazione presentava ingombri non indifferenti se confrontati con le più recenti termocamere ed inoltre consentiva l'acquisizione di immagini solo in scala di grigi.

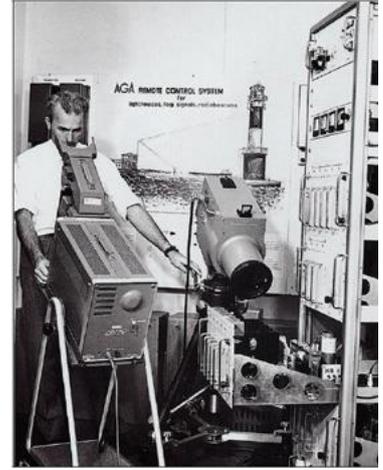


Figura 9 - Model 650 AGA

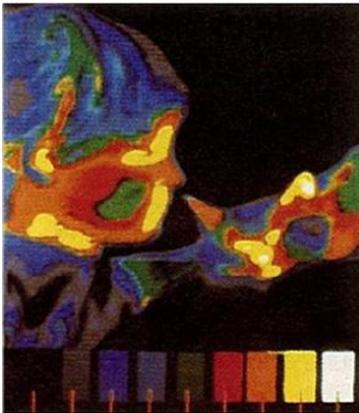


Figura 10 - Prima immagine a colore

Fu solo nel **1966** che venne introdotta la possibilità di acquisire immagini a colori, come mostrato nella Figura 10. La procedura però era molto laboriosa e le immagini a colori che si ottenevano presentavano rumori di fondo se confrontate con le immagini in scala di grigio: tale aspetto è stato migliorato solo verso gli anni '90 grazie al miglioramento della sensibilità delle termocamere.

A partire dagli anni '70 vi è stato un miglioramento in merito alle dimensioni di tutto il sistema di misura, il quale fino ad allora rappresentava un vincolo alla movimentazione del sistema stesso ed alle sue possibili applicazioni. Si iniziano a definire i concetti di portabilità e potenza degli strumenti di misura. Nel 1973 viene realizzato il primo sistema a batterie (Figura 11), le quali rappresenteranno comunque una restrizione in termini di durata delle termocamere. Solo a partire dagli anni 2000 si sono avuti miglioramenti sulle durate delle batterie.

<sup>2</sup> Gli argomenti descritti in tale capitolo sono tratti da [3]

Negli anni '80 furono realizzati i primi sistemi che lavoravano con frequenze di acquisizioni comprese tra i 7 e i 13  $\mu\text{m}$ . Tale scelta fu necessaria in quanto i primi sistemi lavoravano con frequenze di acquisizione comprese tra i 3 e i 5  $\mu\text{m}$ . I problemi erano legati principalmente per le acquisizioni effettuate durante il giorno, a causa delle radiazioni del sole.

In quegli stessi anni furono introdotti anche i primi software che consentivano di ottenere i livelli di temperatura acquisiti. Inoltre, consentivano di stampare anche i termogrammi a colori. Nel 1984 venne introdotto il primo sistema che consentiva di introdurre il livello di temperatura durante l'acquisizione. Inoltre, bisognava avere la certezza che le temperature acquisite rientrassero all'interno del range di acquisizione della termocamera.

Oggi, grazie alla notevole evoluzione in campo informatico, è possibile addirittura ottenere dei report istantanei, che descrivano le anomalie riportate durante le acquisizioni, e che sono consultabili tramite un comune smartphone.

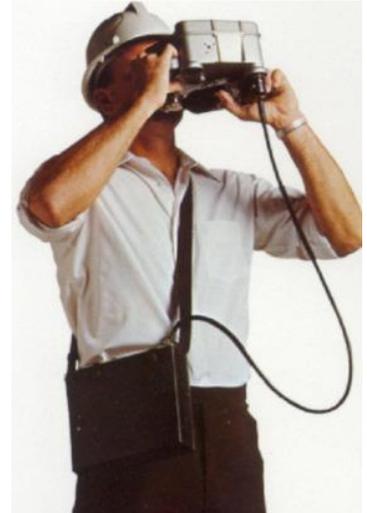


Figura 11 - Esempio di prime apparecchiature portatili



Figura 13 - Prima sistema palmare

Nel 1987, fu inventato il primo sistema palmare (Figura 13) costituito da un unico case. Ciò che prima veniva fatto da più attrezzature distinte ora viene eseguita da un solo sistema compatto. Fu inoltre introdotto il primo sistema di raffreddamento a ciclo Stirling, della Mitsubishi, che differisce dai precedenti sistemi di raffreddamento, i quali utilizzavano l'azoto liquido come mezzo raffreddante. L'introduzione di questo nuovo sistema di raffreddamento ha consentito di migliorare notevolmente delle prestazioni dei sistemi di misura ed hanno consentito ad aziende quali la AGA, Inframetrics e Flir di diventare leader del settore per gli anni a venire.

Nel 1997 Agema (ex AGA) introdusse il primo rilevatore **microbolometro** per una termocamera. Oggi, numerose termocamere basano il proprio principio di funzionamento su questa tecnologia. Il microbolometro offriva la possibilità di lavorare anche nel range di onde lunghe. Inoltre, si tratta di sistemi senza un dispositivo di raffreddamento, consentendo di avere dimensioni ridotte (Figura 12) e di durate di utilizzo più lunghe.



Figura 12 - Esempio di strumento di misura moderno

In linea generale, uno strumento di misura capace di misurare le radiazioni termiche emesse da un corpo è costituito da:

- o sistema di ottica;
- o sensore di misura;

- unità di controllo;
- sistema di riscaldamento (presente solo nel caso di termografia attiva);
- sistema di raffreddamento.

La Figura 14 riporta un possibile schema di funzionamento del sistema di misurazione adoperato dalla termografia.

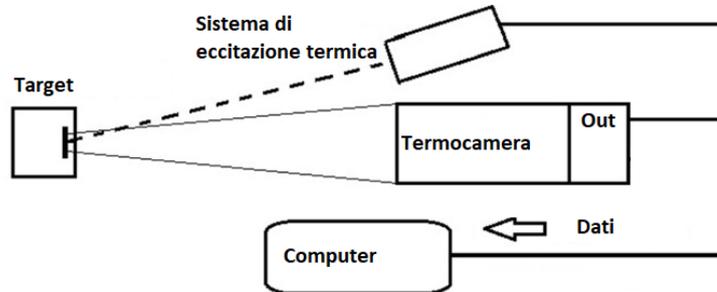


Figura 14 - Schema sistema di termografia

Il sensore di misura, presente all'interno della termocamera, rappresenta il cuore di tutta la strumentazione: attraverso il sistema di ottica le radiazioni termiche vengono focalizzate sul sensore di misura, il quale genererà in uscita un opportuno segnale elettrico che verrà poi inviato all'unità di controllo. Nota la legge fisica che lega la quantità di radiazione elettrica in ingresso con il segnale elettrico in uscita dal sensore di misura, l'unità di controllo provvederà ad elaborare il segnale elettrico e a convertirlo a seconda delle esigenze (ad esempio, trasformandolo in un valore di temperatura).

L'evoluzione e la ricerca scientifica hanno reso possibile la definizione di ciò che oggi conosciamo come **spettro delle onde elettromagnetiche** (Figura 15). L'infrarosso copre un intervallo di lunghezza d'onda compreso tra i  $0,78 \mu\text{m}$  e  $1 \text{ mm}$ . La radiazione termica copre un intervallo di lunghezza d'onda che copre sia la banda del visibile che quella dell'infrarosso IR ed in parte anche quella della banda dell'ultravioletto UV. Tipicamente le apparecchiature di termografia restringono il campo di acquisizione in tre sotto intervalli di acquisizione:

- short wave  $0,9 - 1,7 \text{ m}$ ;
- mid wave  $3 - 5 \mu\text{m}$ ;
- long wave  $7 - 17 \mu\text{m}$ ;

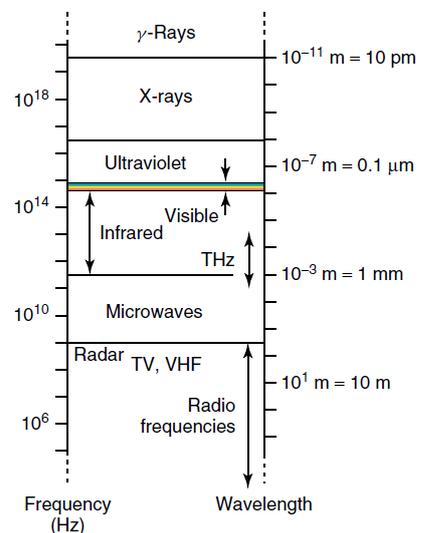


Figura 15 - Spettro delle onde elettromagnetiche

## 1.5 Classificazione delle tecniche di termografia

La termografia infrarosso si divide in due grandi categorie: **termografia passiva** e **termografia attiva**. La differenza tra i due metodi prevede o meno l'uso di un opportuno sistema di eccitamento termico.

La **termografia passiva** prevede l'acquisizione delle radiazioni emesse dal corpo senza l'utilizzo di fonti di eccitamento esterne. Ricordando il principio alla base del funzionamento della termografia, ovvero che ogni corpo a temperatura maggiore di 0 K emette radiazioni termiche, bisogna sottolineare che anche l'ambiente che circonda il corpo in esame emette a sua volta radiazioni termiche. Tali radiazioni sono anch'esse acquisite dalla termocamera e influenzano negativamente la prova soprattutto nel caso in cui la temperatura del corpo è la stessa dell'ambiente circostante, o molto prossima ad essa. Ciò rende difficile l'interpretazione dell'immagine acquisita, a causa della mancanza di contrasto (inteso come differenza di temperatura) tra ambiente e corpo ispezionato. Inoltre, difficilmente è possibile effettuare analisi termodinamiche con questo metodo.

Nella **termografia attiva** invece, la superficie del corpo in esame viene opportunamente riscaldata in modo da aumentare il contrasto termico tra il corpo stesso e l'ambiente che lo circonda. Questo metodo prende anche il nome di termografia dinamica. In realtà, come descritto in [es3?] la termografia attiva può essere effettuata anche attraverso il raffreddamento del corpo da ispezionare. Tramite suddetto riscaldamento (o raffreddamento) si crea un gradiente di temperatura non stazionario che modifica la distribuzione superficiale di temperatura osservata dalla termocamera. Inoltre, attraverso questo metodo è possibile monitorare la variazione temporale della temperatura superficiale del corpo.

Esistono diversi metodi con i quali è possibile riscaldare il corpo e che possono essere raggruppati in due categorie:

- riscaldamento ad impulsi (ad esempio con un gradino di forma rettangolare);
- riscaldamento continuo, in forma modulata (ad esempio attraverso un'armonica).

Esistono numerose tecniche di termografia che in maniera differente forniscono energia termica al corpo in esame. Tra le tecniche più importanti e le prime ad essere nate si possono menzionare la **termografia pulsata**, per il riscaldamento ad impulsi, e la **termografia modulata Lock-in**, per il riscaldamento continuo. Oggigiorno esistono numerose tecniche di termografia oltre quelle appena menzionate, come ad esempio la **Pulsed Phase Thermography**. Si rimanda la descrizione di tali tecniche di termografia ai prossimi capitoli.

A seconda della tecnica di termografia adoperata, si ha la necessità di utilizzare opportuni sistemi di riscaldamento. A titolo di esempio, quelli più utilizzati nelle applicazioni industriali sono:

- laser;
- lampade alogene;
- lampade flash;
- ad induzione;

- ultrasuoni;
- lampade ultraviolette;
- lampada al quarzo;
- pistola ad aria calda.

Ogni sistema di riscaldamento ha caratteristiche di eccitazione termica che lo differenziano dagli altri, come:

- la dimensione della superficie riscaldata;
- la potenza nominale, e dunque la quantità di energia trasferibile al corpo;
- la semplicità di utilizzo;
- la capacità di penetrazione del calore;
- il costo dell'attrezzatura;
- la sicurezza per l'uomo nel suo utilizzo;
- la portabilità.

Infine, sia per la termografia modulata che per quella pulsata è possibile effettuare le ispezioni sia in **modalità di riflessione** che in **modalità per trasmissione**. La differenza tra le due è legato al posizionamento della termocamera e del sistema di riscaldamento rispetto al corpo ispezionato: se la termocamera si trova sullo stesso lato dove è posizionato il sistema di riscaldamento, allora la prova è definita in modalità di riflessione. Se invece il corpo ispezionato è posizionato tra il sistema di riscaldamento e la termocamera, la prova viene definita in modalità di trasmissione. Nelle figure Figura 16 e Figura 17 sono riportati rispettivamente gli schemi in modalità di riflessione e trasmissione.

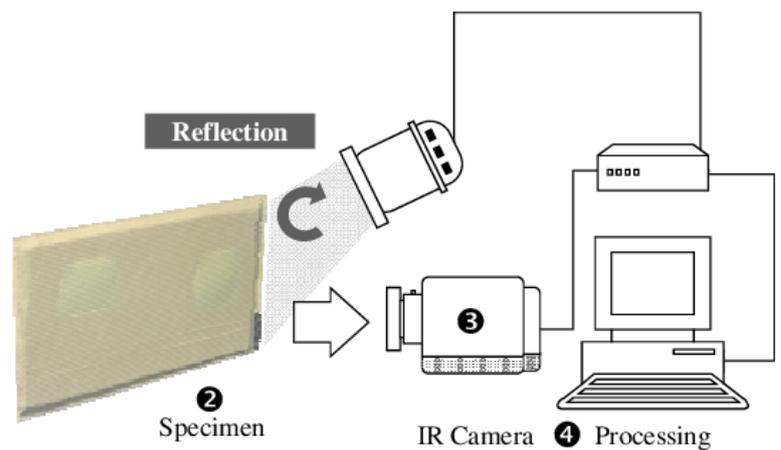
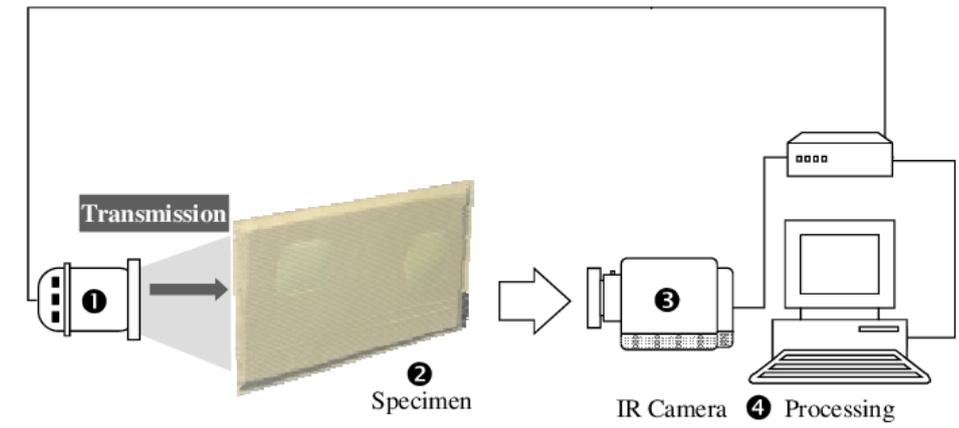


Figura 16 - Termografia attiva in modalità di riflessione



*Figura 17 - Termografia attiva in modalità di trasmissione*

Come si nota dalle figure, nella modalità in riflessione viene ispezionata la superficie riscaldata in maniera diretta dal sistema di eccitamento. Nel caso della modalità in trasmissione viene ispezionata la superficie opposta a quella riscaldata.

### 1.5.1 Termografia pulsata (Pulsed thermography)

L'idea alla base della termografia pulsata è quella di utilizzare un breve impulso di energia per riscaldare il target e di monitorare la variazione superficiale di temperatura sia durante il riscaldamento che durante il raffreddamento. In Figura 18 è riportato lo schema di funzionamento di tale tecnica. Dopodiché, il fronte di calore che investe la superficie si trasmette all'interno attraverso il noto modello di trasmissione di calore per conduzione descritto da Fourier:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\delta T}{\delta t \delta} = 0 \quad (10)$$

dove  $\alpha = k/\rho c$  è la diffusività termica del materiale ispezionato mentre  $\rho$ ,  $k$  e  $c$  sono rispettivamente la densità, la conducibilità termica e la capacità termica. Gli impulsi variano da pochi millisecondi [30] fino a qualche secondo [31]. La scelta della durata di eccitamento termico è funzione principalmente del materiale di cui è costituito il corpo in esame e dal tipo di fonte di eccitamento utilizzato per la prova. In genere, l'aumento di temperatura non deve risultare eccessivo, in modo da non danneggiare termicamente il materiale.

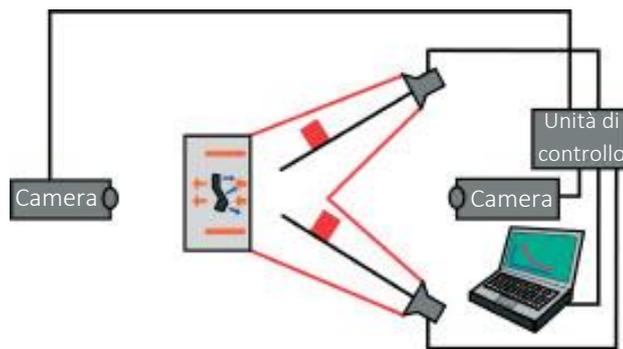


Figura 18 - Termografia Pulsata

In letteratura sono presenti numerosi modelli analitici che a partire dall'equazione di Fourier descrivono la risposta termica transitoria della superficie del corpo in esame.

Come proposto in [4] la risposta termica adiabatica superficiale per un corpo di dimensioni semi-infinite (Figura 19) sottoposto ad una eccitazione di breve durata (impulso o *delta di Dirac*) può essere espressa tramite:

$$T(0, t) = \frac{W}{e\sqrt{\pi t}} \quad (11)$$

dove:

- $W$  è la quantità di energia fornita al target;
- $e = \sqrt{k\rho c}$  è l'effusività termica del materiale.

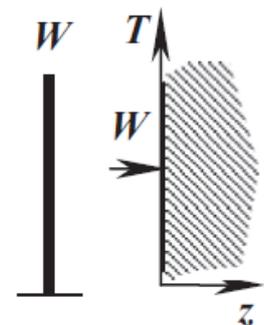


Figura 19 - Eccitazione di un corpo di dimensioni semi-infinite

Nel caso invece di una piastra di dimensioni finite (Figura 20) soggetta anch'essa ad un'eccitazione con un impulso di Dirac, vale la formula:

$$\frac{T(Fo)}{W'} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} \quad (12)$$

dove:

- $W' = \frac{W\alpha}{kL}$ ;
- $Fo = \alpha\tau/L^2$ , con  $\tau$  costante di tempo misurata sperimentalmente.

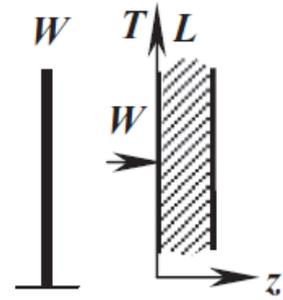


Figura 20 - Eccitazione di un corpo di dimensioni finite

La termografia pulsata trova largo impiego soprattutto come metodo di ispezione sulla possibile presenza di difetti collocati al sotto della superficie del target. In letteratura sono proposte numerose formulazioni in merito alla risposta termica transiente della superficie del target qualora siano presenti dei difetti al di sotto di esso. La presenza di un difetto sub-superficiale altera la diffusione del calore all'interno del corpo, creando una variazione di tendenza durante il raffreddamento. Sempre in [4] sono proposti numerosi modelli sulla risposta termica della superficie del target in funzione di diverse geometrie del difetto.

In [5] invece, partendo da una soluzione monodirezionale dell'equazione di Fourier del tipo:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} \quad (13)$$

valida per un solido semi-infinito eccitato tramite un impulso di Dirac. Scrivendo la soluzione per la superficie ispezionata, ovvero per  $z=0$ , si ottiene:

$$T(0, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (14)$$

Che diagrammato su un grafico doppio logaritmico equivale ad ottenere una curva con pendenza di 0,5:

$$\ln(\Delta T) = \ln \frac{Q}{e} - \frac{1}{2} \pi t \quad (15)$$

La presenza di possibili difetti altera questo valore di pendenza, a causa dell'alterazione dell'uniformità di diffusione nel corpo. In Figura 21 è riportato in maniera semplificativa tale concetto:

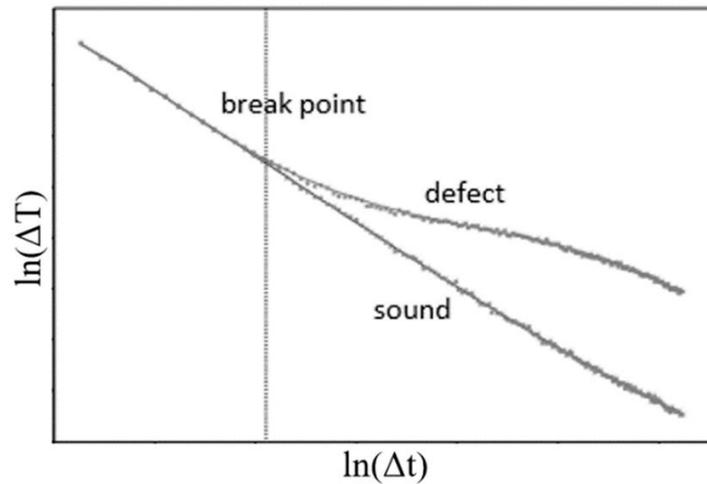


Figura 21 - Evoluzione del raffreddamento per una zona priva di difetti e una zona contenente un difetto

La curva 'sound' rappresenta il profilo termico di raffreddamento ideale per un'area priva di difetti. La curva 'defect' invece, rappresenta il profilo di raffreddamento ottenuto dall'analisi di una porzione di superficie del corpo, sotto la quale è collocato un possibile difetto.

In [6] invece, sono stati utilizzati tre differenti approcci per la predizione della profondità alla quale si trovano i difetti. I difetti sono stati opportunamente simulati attraverso una serie di sei fori ciechi praticati su un campione di composito ceramico (fibre di Sic in una matrice di SiNC). I diversi fori ciechi presentato differenti dimensioni in termini di profondità e diametro. In Figura 22 è mostrato lo schema del campione analizzato.

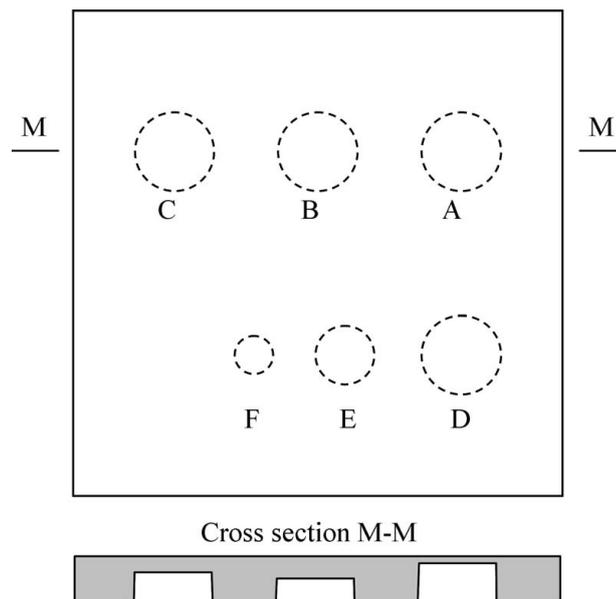


Figura 22 - Schema del campione utilizzato in

Il campione è stato analizzato sulla sua superficie frontale. Il sistema di eccitamento utilizzato è una lampada flash, mentre la termocamera Flir lavora nell'intervallo di lunghezza d'onda da 3 a 5  $\mu\text{m}$ , con una frequenza di acquisizione pari a 170 Hz. È stato registrato il solo tratto di raffreddamento della curva. In Figura 23 sono diagrammati i risultati misurati per i vari fori in un grafico doppio logaritmico.

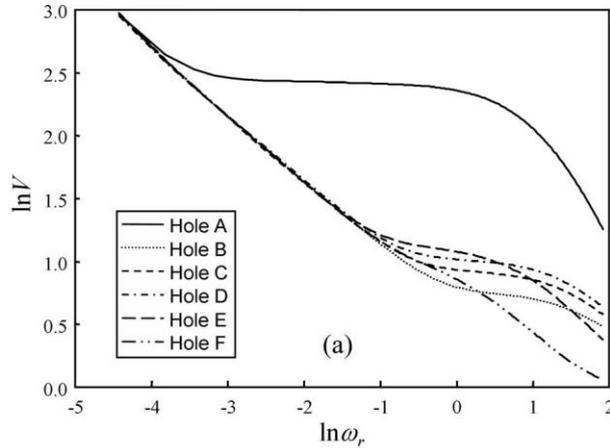


Figura 23 - Curve di raffreddamento per i diversi difetti simulati

Nella Figura 24 sono invece riportate le immagini termiche ottenute in differenti istanti di tempo. Si nota come all'aumentare del tempo, grazie al fenomeno della conduzione i difetti simulati siano messi in risalto rispetto alla zona che li circonda.

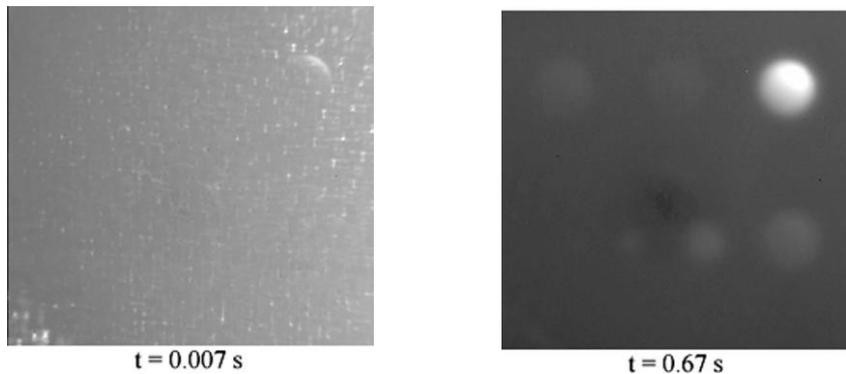


Figura 24 - Immagini termiche per diversi istanti di tempo

Senza entrare troppo nel dettaglio in merito ai tre approcci adoperati per predire la profondità dei difetti, in Figura 25 si riportano i risultati ottenuti da tali analisi.

Holes	Diameter (mm)	Depth (mm)	Predicted depth (mm)		
			Based on $t_s$	Based on $t_2$	Based on fit
A	7.5	0.25	0.203	0.218	0.232
B	7.5	1.12	1.16	1.18	1.147
C	7.5	0.97	1.01	1.00	0.973
D	7.5	0.87	0.916	0.911	0.893
E	5.0	0.78	0.798	0.773	0.79
F	2.5	0.85	0.823	0.804	0.857

Figura 25 - Risultati delle analisi comparati con i valori reali

Si nota come i risultati dalle prove in termografia pulsata siano prossimo ai valori reali misurati.

In generale, la termografia pulsata consente di ottenere risultati in tempi rapidi rispetto alle altre tecniche di termografia ed è tra le tecniche più semplici da adoperare. È inoltre possibile ispezionare aree di indagini più vaste. Per quanto riguarda gli aspetti negativi di tale metodo bisogna sicuramente menzionare la bassa risoluzione in termini di profondità indagate. Aumentare il livello di profondità vuol dire utilizzare sistemi di eccitamento con potenze elevate, il che coincide anche in un maggior costo delle attrezzature. Inoltre, vi sono anche problematiche legate al riscaldamento di materiali con bassa emissività ed elevato coefficiente di riflessione: per questi materiali si adoperano potenze elevate con impulsi di breve durata.

## 1.5.2 Termografia Modulata (Lock-in thermography)

La termografia modulata, in inglese Lock-in thermography, è anch'essa una tecnica di termografia attiva non a contatto. In Figura 26 è riportato lo schema di funzionamento di tale tecnica.

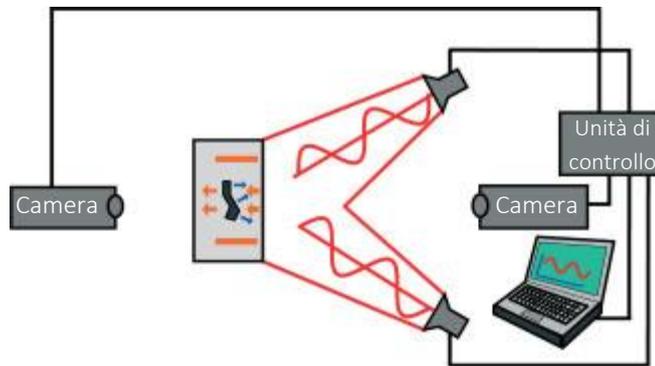


Figura 26 - Termografia Modulata

La superficie del corpo in esame viene riscaldata periodicamente attraverso un'onda termica sinusoidale, modulata in frequenza e ampiezza. Questo tipo di eccitazione provoca a sua volta una variazione armonica della temperatura superficiale del corpo. Nel caso ideale di corpo omogeneo, l'onda termica si propaga senza alcun ostacolo all'interno del corpo e ciò si traduce in una risposta termica della superficie analoga a quella eccitante ma diversa solo in fase e ampiezza (vedi Figura 27). In genere la risposta ha forma simile a quella dell'onda eccitante ma presenta un ritardo rispetto ad essa. Come menzionato in [7] invece, la presenza di difetti interni al corpo funge da barriera alla propagazione del calore, il che produce una variazione di fase e ampiezza del segnale di risposta termica.

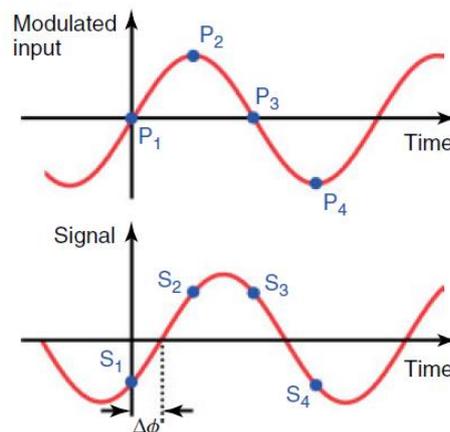


Figura 27 - Segnale di eccitazione (in alto) e segnale di risposta (in basso)

Sempre in [7] viene proposta la soluzione monodimensionale della legge di Fourier per un'onda termica sinusoidale che si propaga attraverso un corpo omogeneo di dimensioni semi-infinite:

$$T(z, t) = T_0 e^{-\frac{z}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (16)$$

dove:

- $T_0$  [°C] è la temperatura iniziale;
- $\omega=2\pi f$  [rad/s] è la pulsazione, mentre  $f$  è la frequenza;
- $\lambda=2\pi\mu$  [m] è la lunghezza d'onda, mentre  $\mu$  è la lunghezza di diffusione termica e che può essere espressa tramite:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (17)$$

L'equazione (16) afferma che l'onda termica propaga più in profondità in materiali con un elevata diffusività termica o per frequenza basse. Nella definizione dei parametri di processo della prova risulta fondamentale la scelta della frequenza di eccitazione al fine di definire il livello di profondità che si vuole ispezionare nel corpo. Trattandosi di un'onda, la risposta può dunque essere elaborata nel dominio della fase e frequenza.

Tra i vantaggi di questa c'è sicuramente la possibilità di ispezionare diversi livelli di profondità variando il valore di frequenza di eccitamento. Per grandi profondità si ha la necessità di lunghi tempi di ispezione, maggiori rispetto ad altre tecniche. Inoltre, l'energia richiesta per effettuare ispezioni risulta minore sempre rispetto alle altre tecniche, il che ne determina un aspetto fondamentale nel caso in cui vengano effettuate prove su materiali che risentono di elevati carichi termici di eccitazione input.

### 1.5.3 Altri metodi di termografia attiva

Molti metodi presenti in letteratura rappresentano l'evoluzione dei due metodi descritti nei precedenti capitoli. Alcuni basano il proprio principio di funzionamento su aspetti derivanti sia dalla termografia pulsata che quella modulata, mentre altri prevedono di processare secondo un diverso approccio i dati ottenuti da uno dei due menzionati.

Uno dei metodi più applicati è la **Pulsed Phase Thermography**, ovvero la *termografia pulsata della fase*. Tale metodo fonde alcuni dei principi alla base della termografia pulsata e di quella modulata. In pratica il processo si articola come segue:

- il target viene riscaldato attraverso un opportuno impulso termico, in analogia alla termografia pulsata;
- i dati ottenuti dalla prova vengono trasformati dal dominio del tempo al dominio delle frequenze, così come avviene nella termografia modulata Lock-in.

Tale trasformazione è resa possibile attraverso l'utilizzo della trasformata di Fourier. Infatti, come ben noto dai principi matematici, una qualsiasi funzione definita su un dominio, è scomponibile attraverso una serie di funzioni armoniche di diversa ampiezza e frequenza. Tale scomposizione rende possibile la valutazione della risposta termica della superficie per diverse frequenze di eccitazione, a differenza della termografia modulata nella quale la frequenza di eccitazione risulta essere unica. La differenza tra questa tecnica e quella modulata risiede nella quantità di calore fornito alle diverse frequenze.

A titolo di esempio delle potenzialità della Pulsed Phase Thermography si riporta l'esempio proposto in [8]. Per la prova è stato analizzato un campione in acciaio al cui interno sono stati praticati dei fori ciechi come riportato nella Figura 28. Per riscaldare il campione è stato utilizzato un sistema di eccitamento ad induzione di potenza massima di 2,4 kW, che riscalda la superficie con un impulso di durata pari a 100 ms.

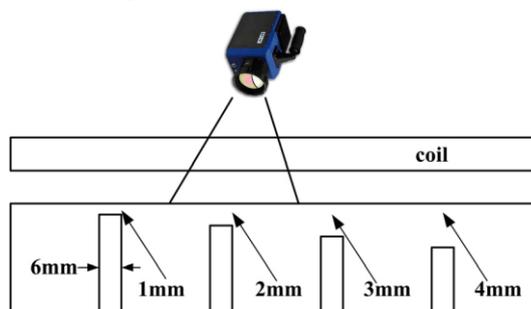


Figura 28 - Schema del campione utilizzato in

La registrazione della risposta transiente della superficie è pari a 500 ms, con una frequenza di acquisizione pari a 200 Hz.

Nelle Figura 31 e Figura 30 sono riportati rispettivamente i risultati ottenuti dalle acquisizioni termiche ottenute, per diversi istanti di tempo, e i risultati ottenuti per lo studio delle immagini in fase, per diversi valori di frequenza analizzati.

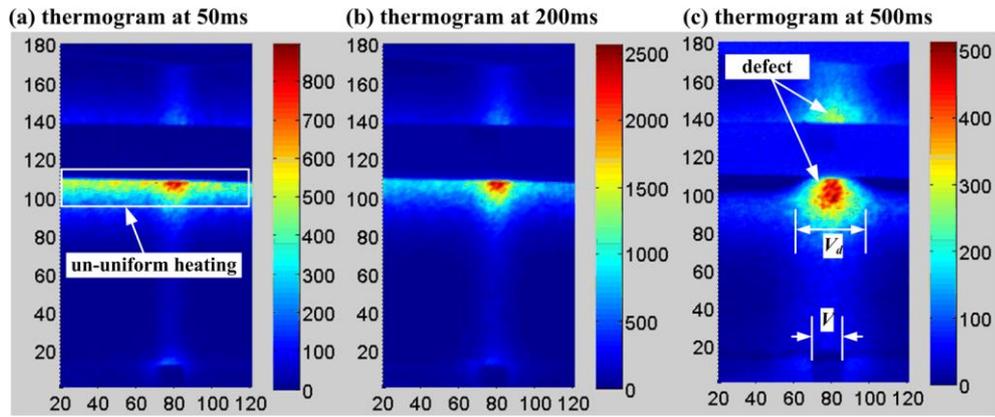


Figura 31 - Immagini termiche ottenute a: 50 ms (a), 200 ms (b) e 500 ms (c)

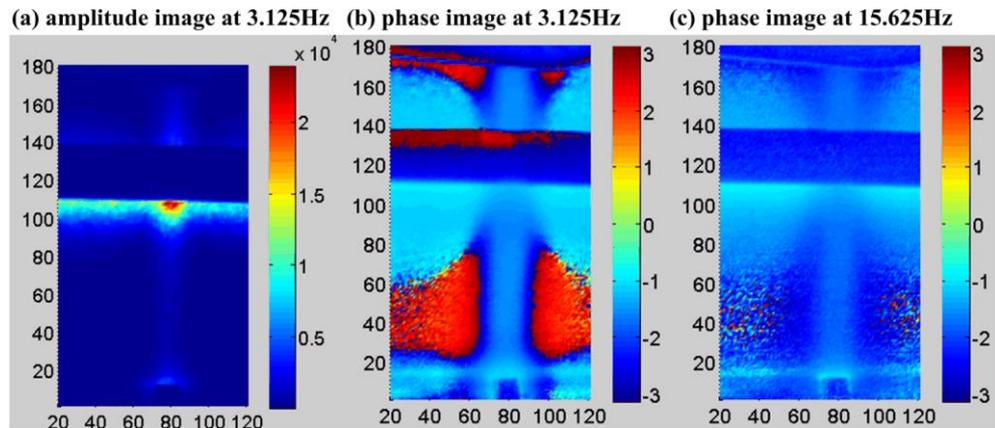


Figura 30 - Immagini di ampiezza (a) e fase (b) a frequenza di 3.125Hz; immagine in fase per la frequenza a 15.625Hz (c)

I risultati dimostrano la capacità del metodo di estrapolare ottimi risultati in termini di identificazione dei difetti presenti, una volta individuata la frequenza ottimale di analisi. Nella Figura 29 viene riportata invece la risposta nel dominio della frequenza per i difetti 1, 2 e 3 e per una zona prima di difetti.

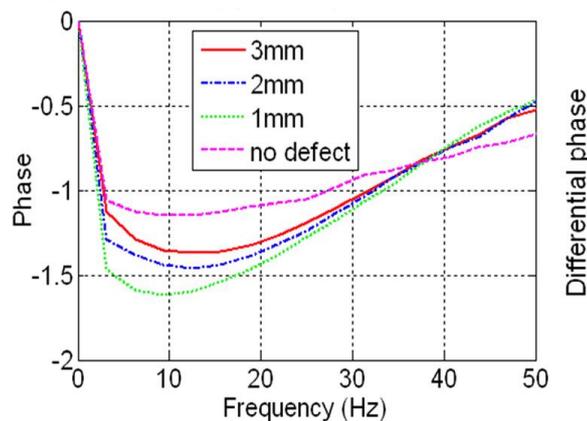


Figura 29 - Risposta nel dominio della frequenza per i campioni 1,2 e 3

Si nota come tali diagrammi mettano in risalto il diverso comportamento in termini di risposta del segnale per le varie zone individuate.

Un altro metodo di termografia attiva è la **Termografia ad Ultrasuoni**. Tale metodo prevede di stimolare possibili difetti interni al corpo non attraverso l'uso delle onde elettromagnetiche ma

tramite onde acustiche. Nello specifico vengono adoperati gli ultrasuoni a frequenza comprese tra i 20 kHz e i 1MHz e dunque non udibili dall'orecchio umano (20 Hz e 20 kHz). A differenza delle onde elettromagnetiche, le onde acustiche non possono diffondersi nel vuoto ma necessitano di un opportuno mezzo per viaggiare da un punto all'altro dello spazio.

A titolo di esempio riportiamo il lavoro svolto in [9]. Il campione utilizzato per la prova è costituito in alluminio e realizzato attraverso il processo di saldatura allo stato solido (Friction Stir Welding). Durante il processo di saldatura sono stati realizzati due difetti come riportati nello schema di Figura 32.

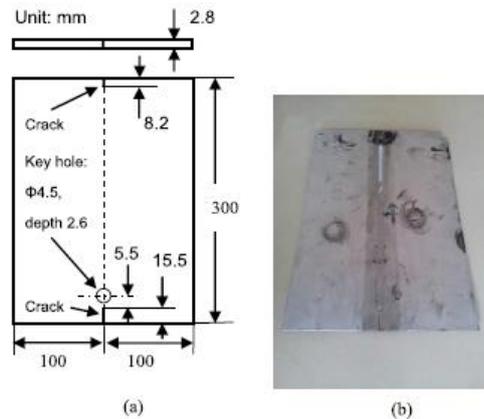


Figura 32 - Schema (a) e foto (b) del campione utilizzato in

Il sistema di eccitamento prevede l'utilizzo di un dispositivo ad ultrasuoni che lavora ad una frequenza fissa di 20 Hz e potenza pari a 1,5 kW. Il campione è stato inoltre verniciato in nero al fine di uniformare e aumentare l'emissività superficiale.

In Figura 33 sono riportati in sequenza i tre schemi di eccitamento adottati.

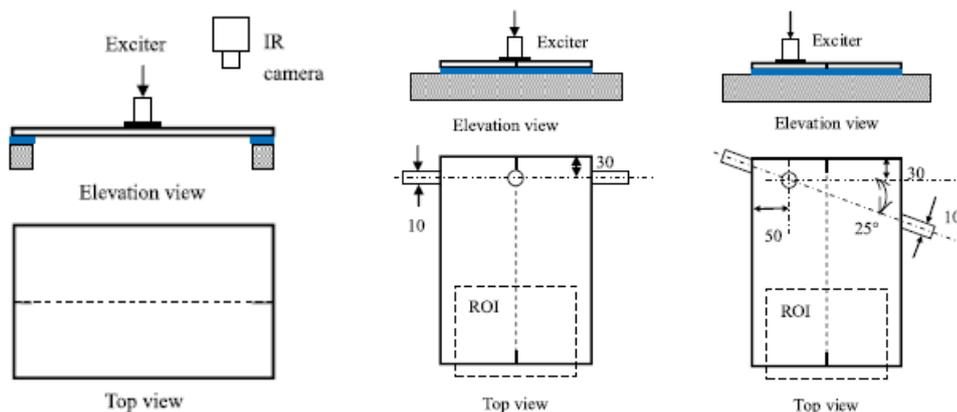


Figura 33 - Schemi di eccitamento utilizzati in

Data la natura simmetrica dei primi due schemi (sinistra e centro) è stato impossibile rilevare i difetti in quanto non sono stati riscaldati a sufficienza. È stato dunque utilizzato un terzo schema non simmetrico.

In Figura 35 sono riportate le immagini acquisite dalla termocamera prima dell'applicazione dell'eccitazione e per vari istanti temporali. Come si nota, tramite lo schema (c) di Figura 35 il difetto è ben visibile già dopo un tempo  $t=0,95s$ .

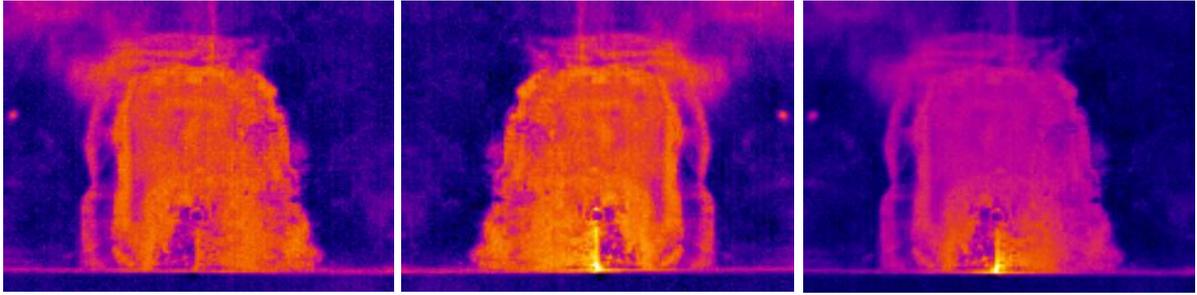


Figura 35 - Immagini termiche acquisite per diversi istanti di tempo:  $t < 0s$  (sinistra),  $t = 0.95s$  (centro) e  $t = 4.867s$  (destra)

Infine, nelle Figura 34 sono riportati i risultati ottenuti nel dominio del tempo, in analogia con quanto avviene nella termografia pulsata.

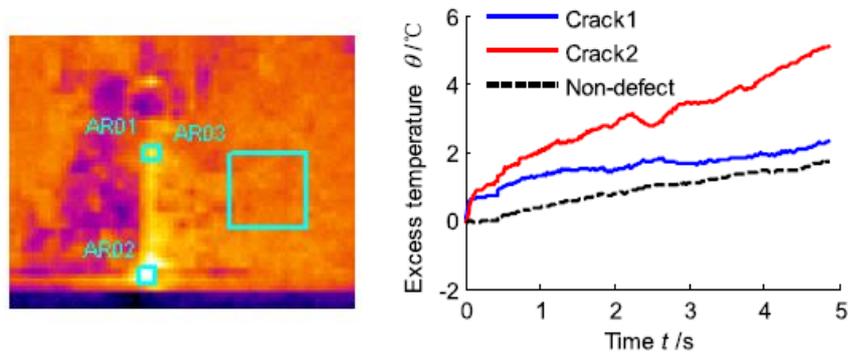


Figura 34 - Risultati ottenuti (destra) per le tre aree individuate (sinistra)

I dati analizzati mostrano chiaramente la presenza dei difetti ed è possibile definirne anche le caratteristiche termiche. Tale approccio prevede che vengano effettuate a priori una serie di analisi per individuare il giusto setup.

## 1.6 Esempi applicativi della termografia nei processi di saldatura saldatore<sup>3</sup>

Come sarà descritto nel [capitolo 2.2](#), i campioni utilizzati nella presente tesi sono stati ottenuti mediante il processo di saldatura per punti. Nei prossimi capitoli sarà data una breve descrizione dei processi di saldatura più comunemente utilizzati in ambito industriale, dando maggiore enfasi al processo di saldatura per resistenza a punti ([capitolo 1.6.3](#)). Inoltre, saranno proposti esempi di applicazioni di termografia attiva per i vari processi di saldatura.

La *saldatura* è una tecnica di giunzione permanente che realizza l'unione continua di pezzi, con o senza l'interposizione di materiale d'apporto, che viene distribuito allo stato fuso tra i lembi opportunamente preparati dei due pezzi da collegare, chiamati *materiale base*. I processi di saldatura oggi più diffusi possono essere classificati come in figura Figura 36.

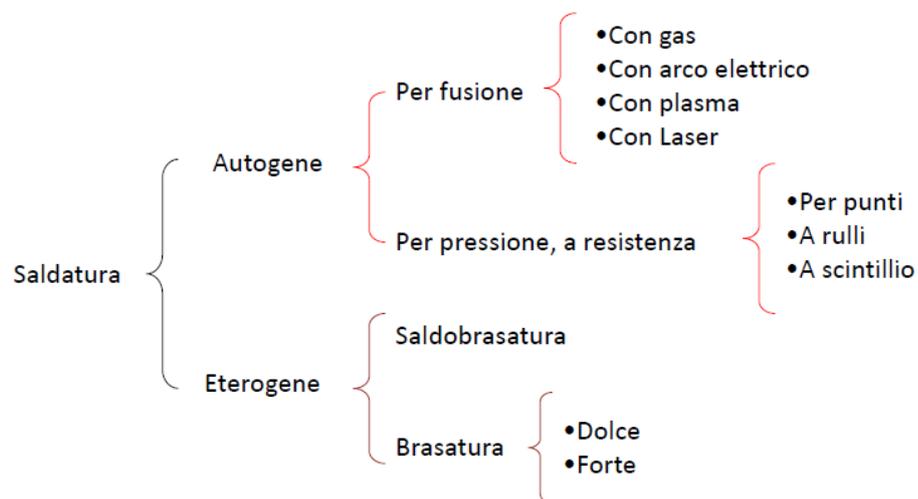


Figura 36 - Classificazione dei processi di saldatura

La saldatura viene detta **autogena** quando comporta la fusione del materiale base, mentre se si realizza tramite la sola fusione del materiale d'apporto viene detta **eterogena**.

La *saldatura autogena* può avvenire:

- per **fusione**: quando i lembi raggiungono la fusione senza che venga esercitata alcuna pressione fra le parti da unire; il giunto è realizzato mediante fusione dei materiali base e d'apporto che concorrono a formare il **bagno di fusione** che, solidificandosi, produce il cosiddetto *cordone di saldatura*;
- per **pressione**: quando si applica una mutua pressione fra i lembi, portati preventivamente alla temperatura di forgiatura o fusione.

La *saldatura eterogena* (o *brasatura*) può avvenire secondo due distinte tecniche:

<sup>3</sup> La descrizione dei processi di saldatura (fino al capitolo 1.6.3) è avvenuta con riferimento a [10]

- **saldobrasatura**: quando il materiale d'apporto viene depositato fra i lembi opportunamente preparati con smussatura;
- **brasatura capillare**: quando il materiale di apporto si insinua per capillarità in un sottile meato fra i lembi combacianti senza smussatura. La brasatura si divide ulteriormente in *dolce e forte*, a seconda che la temperatura di fusione del metallo d'apporto sia inferiore o superiore i 400° C.

### 1.6.1 Saldatura ad arco

Il calore che permette di fondere il metallo è fornito dall'**arco elettrico** (Figura 37), fenomeno fisico di passaggio di corrente elettrica in un gas ionizzato, nel quale si raggiungono temperature di circa 5000 °C. L'arco elettrico scocca tra il metallo base e un **elettrodo metallico**. L'**elettrodo rivestito** è l'elemento caratterizzante il processo; il rivestimento ai seguenti scopi:

- favorisce l'adesione dell'arco;
- consente la saldatura in posizione verticale e sopra testa;
- libera fumi inerti che avvolgono l'arco e il bagno fuso riducendo il rischio di ossidazione;
- forma una scoria che protegge il bagno fuso dall'ossidazione e ne rallenta il raffreddamento;
- può trasferire elementi di lega al bagno.

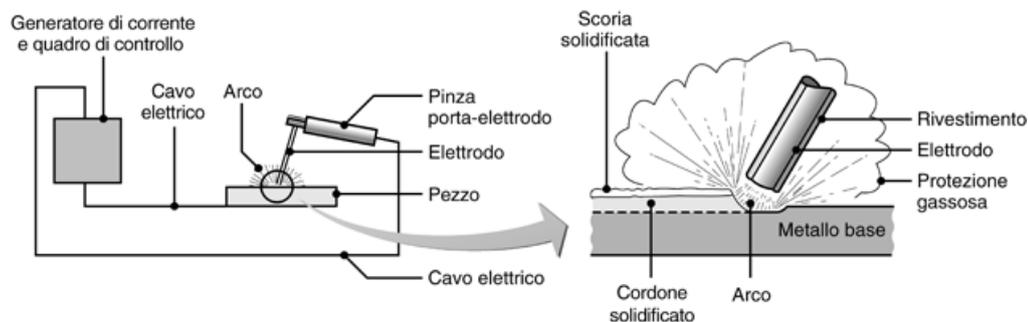


Figura 37 - Schema saldatura ad arco con elettrodo rivestito

Questo tipo di saldatura è adatta per acciai non legati o basso legati, acciai inossidabili, leghe leggere, ghise, rame, nichel e sue leghe. I lembi dei pezzi da saldare devono essere opportunamente preparati in modo da assicurare la giusta penetrazione e facilità di saldatura. Non si presta molto bene alla saldatura di spessori molto sottili (minori di 2-3 mm).

Un altro processo che fa parte della famiglia delle saldature ad arco è quella ad **arco sommerso** (Figura 38). L'elettrodo è costituito da una bobina di filo nudo. L'arco elettrico, che scocca tra il filo e il metallo base, è ricoperto dal **flusso** ovvero una sostanza granulare che ha il compito di:

- proteggere il bagno di fusione dal contatto con l'atmosfera in modo da limitare possibili fenomeni di ossidazione e nitrurazione;

- limitare la velocità di raffreddamento del cordone: in questo modo si ottengono strutture micrografiche grossolane con vantaggi metallurgici;
- reagire chimicamente con le impurezze presenti nel metallo base in modo da creare opportune scorie.

In termini prestazionali, questo processo consente di ottenere cordoni di saldatura di ottima qualità e di forma regolare.

Il flusso viene depositato attraverso una tramoggia in modo continuo durante l'avanzamento del filo.

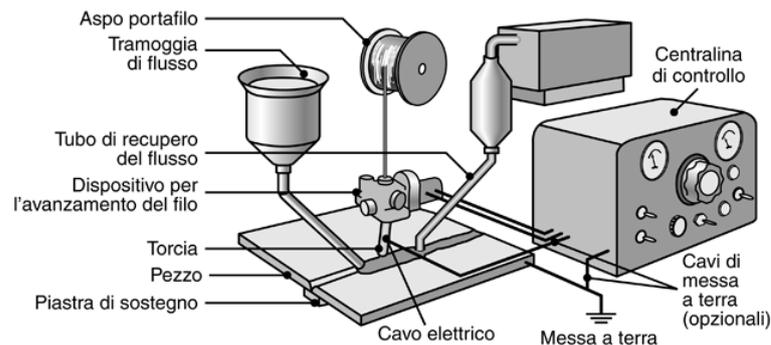


Figura 38 - Schema saldatura ad arco sommerso

Esistono altri processi di saldatura ad arco che fanno parte della famiglia delle *saldature in gas protettivo* che hanno trovato largo impiego nelle applicazioni industriali: **TIG**, **MIG** e **MAG**.

La saldatura **TIG** (*Tungsten Inert Gas welding*) è una saldatura ad arco con elettrodo in fusibile in un'atmosfera di gas inerte. L'arco elettrico scocca fra un elettrodo infusibile di tungsteno e il metallo base (Figura 39). L'elettrodo è al centro di un tubetto refrattario dal quale esce il gas inerte, generalmente argon. Il metallo d'apporto viene introdotto a parte sotto forma di bacchette. Si può lavorare sia in corrente alternata che in corrente continua, ma in genere si lavora in corrente continua a polarità diretta in quanto non sia interesse a scaldare l'elettrodo. Tra i vantaggi possiamo menzionare:

- cordone di saldatura pulito;
- saldatura possibile in ogni posizione;
- assenza di scorie potenzialmente incluse nel cordone;
- ottima qualità del cordone (la migliore ottenibile con la saldatura d'arco);
- possibilità di saldare qualunque metallo.

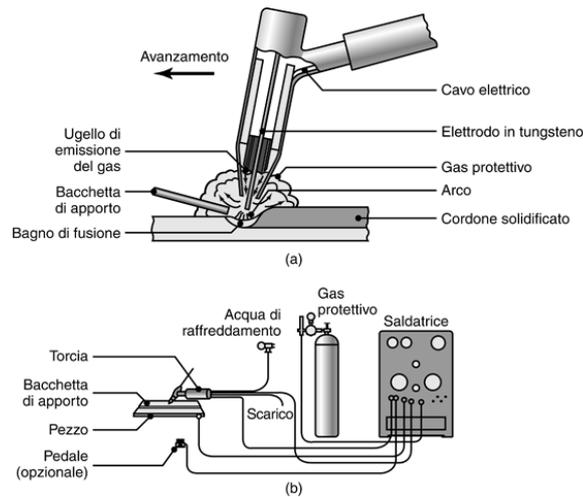


Figura 39 - Schema saldatura TIG

È un processo che si presta bene alla saldatura di spessori sottili. Nel caso di spessori medi o grossi è comunque possibile il suo utilizzo, ma i suoi costi risultano essere maggiori se comparati altri processi di saldatura. Il costo del processo in generale è molto elevato, sia per il costo della singola attrezzatura, sia per il costo dell'elettrodo e sia per il costo del gas protettivo.

Le saldature a filo continuo in un'atmosfera di gas (MIG e MAG) sono procedimenti nei quali il metallo d'apporto, sotto forma di bobina, esce automaticamente dalla pistola, spinto o trascinato da un motorino (Figura 40). Se il gas protettivo è inerte (argon, Elio, miscele Ar-He) il processo è detto **MIG** (*Metal Inert Gas welding*). Se il gas protettivo contiene ossigeno il processo prende il nome di **MAG** (*Metal Active Gas welding*).

Grazie all'evoluzione tecnologica degli ultimi anni, oggi esistono numerose versioni di questi due processi, quali:

- a spruzzo (spray-arc);
- a corto circuito (short-arc);
- ad arco pulsato (pulsed-arc);
- globulare (globular).

Tramite la saldatura MIG è possibile saldare tutte le leghe di importanza commerciale: acciai, acciai inossidabili, leghe leggera, leghe da rame. La saldatura MAG è invece utilizzata per la saldatura di acciai dolci, ma il suo utilizzo è dovuto principalmente all'economicità del gas utilizzato.

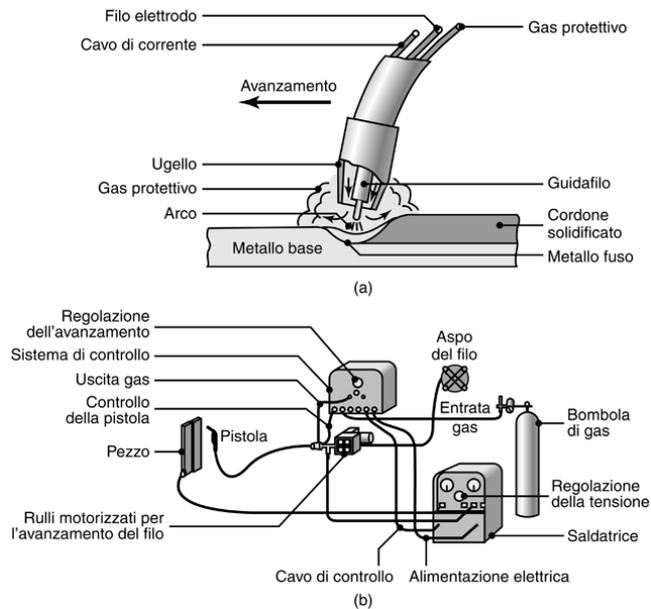


Figura 40 - Schema saldatura MIG/MAG

In letteratura sono presenti molti articoli sull'utilizzo della termografia come strumento di controllo online del processo di saldatura. Le applicazioni e gli utilizzi sono molteplici, ad esempio: come aiuto nella la verifica della simulazione del processo [11], oppure come monitoraggio del bagno fuso e di possibili difetti superficiali lungo il cordone di saldature [12], o ancora come strumento di supporto nella simulazione dello studio degli stress termici residui durante la saldatura multistrato [13].

Presenti, ma sicuramente in numero minore, articoli che utilizzano la termografia attivo come metodo di ispezione dei giunti saldati con un processo di saldatura ad arco. In [14] ad esempio, la termografia attiva gioca un ruolo fondamentale nella creazione di un modello predittivo sulla profondità dei difetti superficiali. Infatti, tramite opportune elaborazioni dati, tramite la termografia si ottiene una ricostruzione 3D del difetto. Il campione utilizzato per la prova (Figura 41) è stato ottenuto mediante saldatura TIG, di due placche costituite in acciaio a basso tenore di carbonio. È presente un difetto superficiale orientato parallelamente all'asse longitudinale della saldatura, come mostrato in Figura 41.

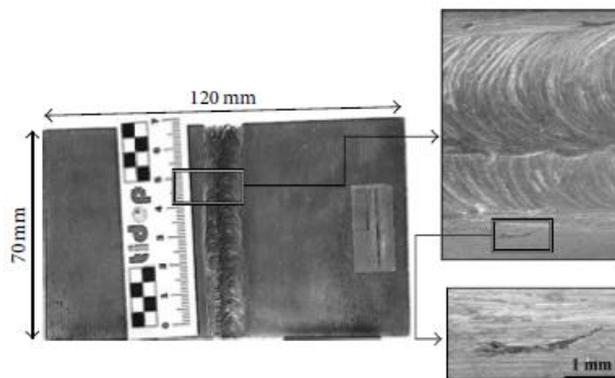


Figura 41 - Campione utilizzato in

Per l'analisi in termografia attiva sono stati utilizzati riscaldatori ad effetto Joule e una termocamera Uncooled Focal Plane Array Detector opportunamente calibrata. La procedura seguita durante la prova è la seguente:

1. riscaldamento del campione a 40° per effetto Joule. Inoltre, viene utilizzato un termometro a contatto al fine di ottenere un valore di riferimento necessario per le successive fasi di processamento;
2. acquisizione di 50 frame (1 ogni 5 sec) al fine di ottenere l'evoluzione termica temporale per ogni pixel acquisito dalla termocamera;
3. correzione dei valori di temperatura ottenuti, sulla base del valore misurato dal termometro a contatto. Calcolo del coefficiente  $\epsilon$  di emissività tramite la legge di Stefan-Boltzmann;
4. applicazione dell'algorithm *Pixelwise Algorithm for Time Derivative of Temperature* (PATDT) al fine di calcolare la derivate temporale della temperatura e dunque il profilo di raffreddamento;
5. correlazione tra legge di raffreddamento e profondità del difetto (quest'ultima ottenuta attraverso un processo di fotogrammetria) e definizione del modello di predizione del difetto;
6. validazione esterna del modello su ulteriori campioni.

Nella Figura 42 è riportato l'ingrandimento del difetto individuato. Inoltre, sono state evidenziate due sezioni longitudinali e due trasversali al difetto. Per le sezioni longitudinali L1 e L2 sarà applicato il modello predittivo, mentre le sezioni trasversali T1 e T2 saranno utilizzate per la validazione interna del modello.

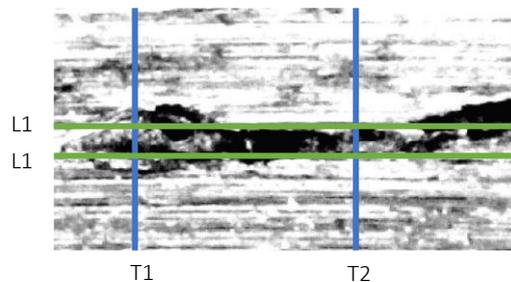


Figura 42 - Individuazione delle due sezioni longitudinali e trasversali al difetto

In Figura 44 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione del modello predittivo per le due sezioni longitudinali L1 e L2, sia in termini di profondità del difetto (ottenuto tramite la macrofotogrammetria), sia in termini di profilo di raffreddamento (ottenuto tramite la termografia attiva).

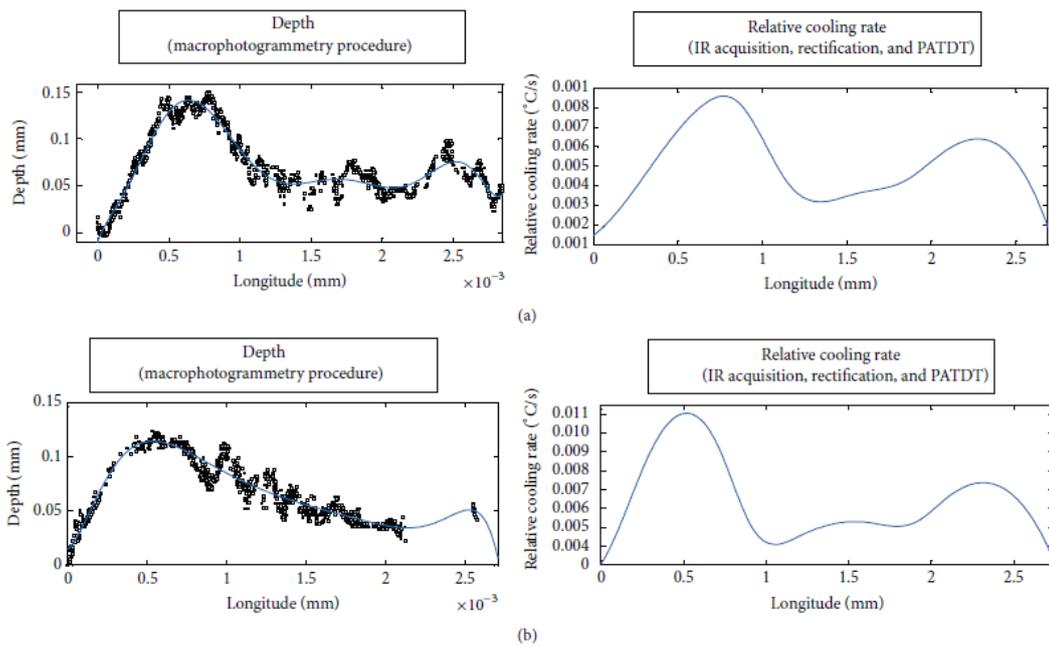


Figura 44 - Funzione di profondità e velocità di raffreddamento per le sezioni longitudinali L1 (a) ed L2 (b)

In Figura 43 invece, sono riportati i risultati ottenuti dalla validazione interna del modello effettuato per le sezioni trasversali T1 e T2.

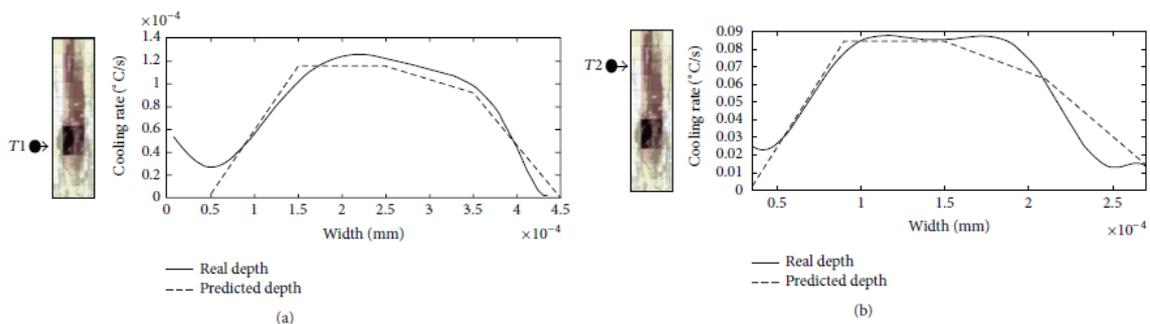


Figura 43 - Validazione interna del modello lungo le sezioni trasversali T1 (a) e T2 (b)

I risultati di predizione del modello sono risultati consistenti con i valori di profondità rilevati, anche se con scostamenti massimi del 18%. Tale deviazione è dovuta principalmente agli algoritmi utilizzati. Il modello potrà essere migliorato estendendo l'analisi anche ad altri tipi di materiali.

## 1.6.2 Saldatura laser e a fascio elettronico

Sono processi automatici o, più frequentemente, completamente automatizzati, che effettuano la saldatura portando a fusione i lembi retti accostati del metallo base e pertanto generalmente senza materiale d'apporto. La fusione dei lembi è causata da un fascio di energia concentrato in una zona molto ristretta.

Nel caso della **saldatura laser** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) il fascio è costituito da radiazioni elettromagnetiche *monocromatiche* (cioè aventi tutte la stessa lunghezza d'onda) e *coerenti* (cioè aventi tutte la stessa fase), che permettono pertanto un'accurata focalizzazione sulla zona di saldatura. La protezione è realizzata con gas inerte: data la formazione di gas ionizzati che schermano il raggio laser, l'applicazione di questo processo è limitato a spessori non elevati. Le saldature laser (Figura 45) sono caratterizzate da una forma particolare della zona fusa, molto stretta, che limita le deformazioni e i ritiri dei pezzi.

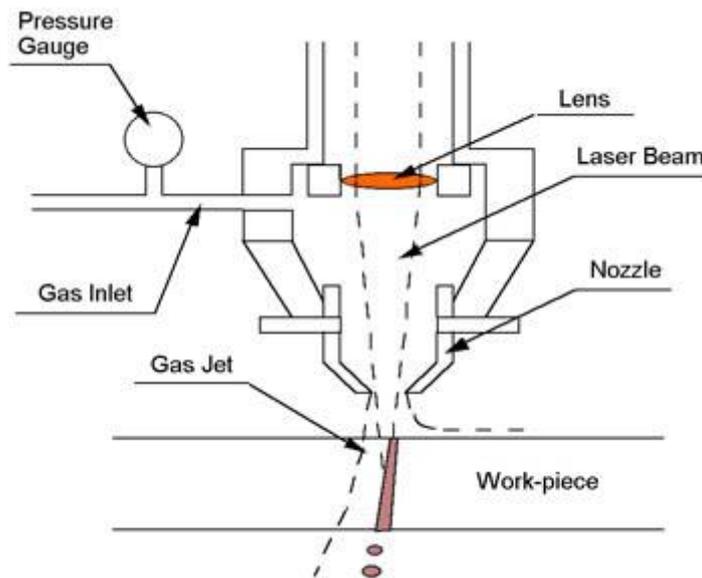


Figura 45 - Schema processo di saldatura laser

Così come per la saldatura ad arco, anche per la saldatura laser sono presenti in letteratura [15][16] articoli che descrivono l'utilizzo della termografia come strumento di controllo online durante il processo.

Per quanto riguarda le applicazioni della termografia attiva, in [17] essa viene utilizzata come strumento per la caratterizzazione dei giunti saldati al variare della velocità di avanzamento della testa laser. Il campione è stato prodotto tramite saldatura laser CO<sub>2</sub> con giunto di sovrapposizione. Sono state saldate due piastre: una di AISI 304 di 1 mm di spessore e l'altra di AISI 430 di 2 mm di spessore. Sono stati eseguiti più cordoni di saldatura per velocità di avanzamento del fascio laser variabili tra i 700 e i 1300 mm/min (in Figura 46 la velocità di avanzamento aumenta da sinistra verso destra). Inoltre, la superficie del campione è stata verniciata in nero in modo da uniformare il valore di emissività superficiale e diminuire i fenomeni di riflessioni.

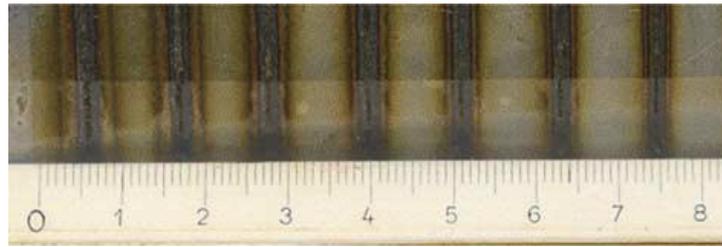


Figura 46 - Campione utilizzato. La velocità di saldatura aumenta da sinistra verso destra

Le prove non distruttive in termografia attiva sono state realizzate con il metodo Lock-in. Come sistema di riscaldamento è stata utilizzata una lampada al quarzo ( $P=1$  kW). La termocamera può funzionare per frequenze di acquisizione variabili tra 3,75 Hz e 0,0037 Hz. Inoltre, è stata eseguita una calibrazione della lampada con le frequenze della termocamera. È stato adottato un metodo di acquisizione per riflessione.

Dall'elaborazione dei dati ottenuti durante le prove, sono state ricavate sia le immagini termiche che quelle in fase, riportate rispettivamente nella Figura 47. Si nota che i cordoni di saldatura sono ben visibili in entrambe le immagini e che sono più marcati man mano che la velocità di avanzamento aumenta. In [17] si suppone che questo comportamento sia attribuito a un effetto combinato di spostamento e miscelazione del materiale fuso.

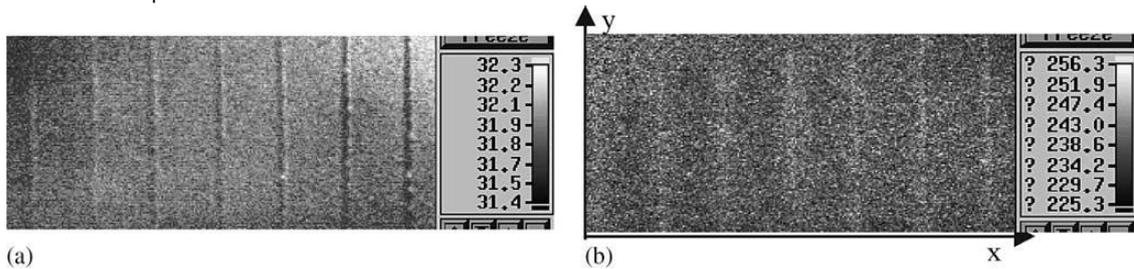


Figura 47 - Immagine termica (a); Immagine in fase (b) per  $f=0.93$  Hz

Come parametro qualitativo dei cordoni di saldatura è stata valutata l'estensione della zona termicamente alterata. Tale misurazione è avvenuta studiando l'immagine in fase del segnale, come mostrato nel diagramma riportato in Figura 48.

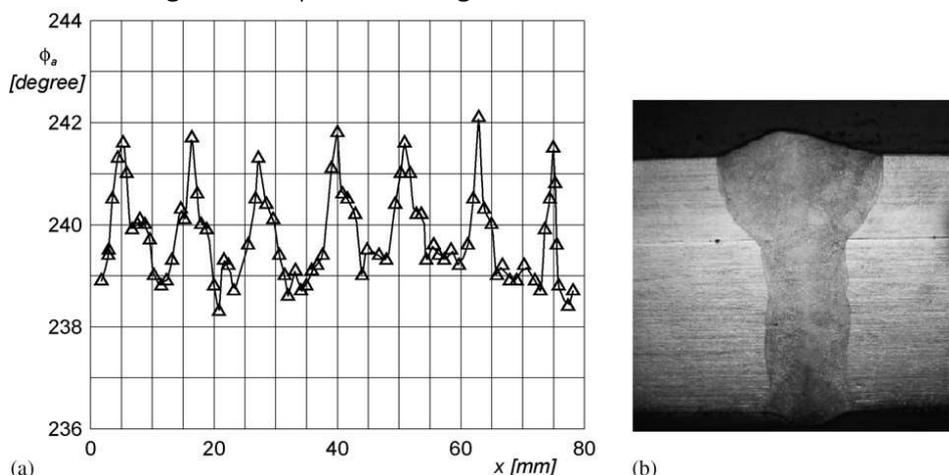


Figura 48 - Distribuzione media dell'angolo di fase (a); Metallografia del cordone ottenuto a  $v=1000$  mm/min

I valori dell'angolo di fase diagrammati sono una media dei valori lungo la direzione y del campione. I valori massimi ottenuti si trovano in corrispondenza dei cordoni di saldatura. Questa caratteristica può essere attribuita alla variazione delle proprietà locali del materiale; infatti, come riportato anche in [18] le variazioni dell'angolo di fase sono legate a variazioni di durezza del materiale e dunque delle sue caratteristiche meccaniche. Come si evince dal diagramma, per velocità via via crescenti le zone termicamente alterate tendono sempre più a ridursi. Ciò potrebbe significare che velocità di avanzamento elevate riducono lo spostamento e miscelazione del materiale fuso.

In definitiva, in [17] si afferma che la termografia attiva risultati validi per i vari casi esaminati.

### 1.6.3 Saldatura per resistenza a punti

La **saldatura per resistenza punti** (Figura 49) è un processo di saldatura autogena per pressione, che si applica a lamiere con spessore fino a circa 3 mm, le quali vengono sovrapposte tra loro e serrate tra due *elettrodi* cilindrici. Il calore necessario alla fusione è fornito dal passaggio della corrente elettrica e si instaura per effetto Joule secondo la nota legge:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (18)$$

dove:

- Q rappresenta la quantità di calore;
- R è la resistenza elettrica;
- I è l'intensità di corrente elettrica;
- t è la durata dell'applicazione della corrente.

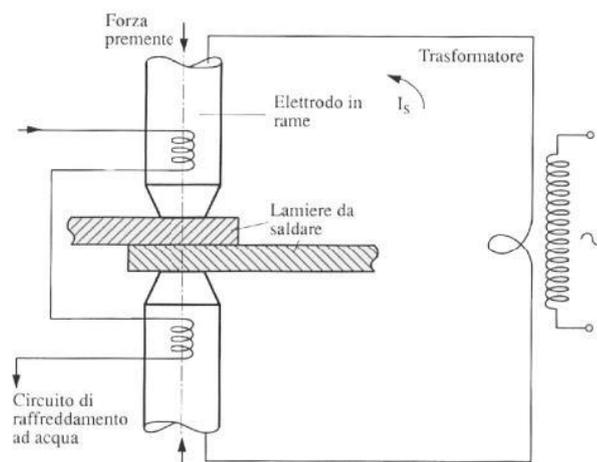


Figura 49 - Schema processo di saldatura per resistenza a punti

Viene denominata a pressione perché si raggiungono temperature prossime a quella di fusione completa del metallo (il materiale si presenta grosso modo in uno stato pastoso) ed è sempre applicata una pressione tra i due componenti. Non viene realizzato un cordone di saldatura come nelle precedenti saldature in quanto la zona saldata è presente solo all'interfaccia tra le

superfici in contatto delle lamiere. Visivamente si notano solo le depressioni causate dagli elettrodi.

Le caratteristiche meccaniche del giunto sono inferiori rispetto a quelle ottenute con le saldature per fusione, ma i tempi di processo sono molto ridotti (tempi inferiori al secondo). La minor resistenza viene compensata aumentando il numero di punti di saldatura. Si presta tantissimo all'automazione.

Nella Figura 50 viene riportata la sequenza di operazioni necessarie ad ottenere la saldatura.

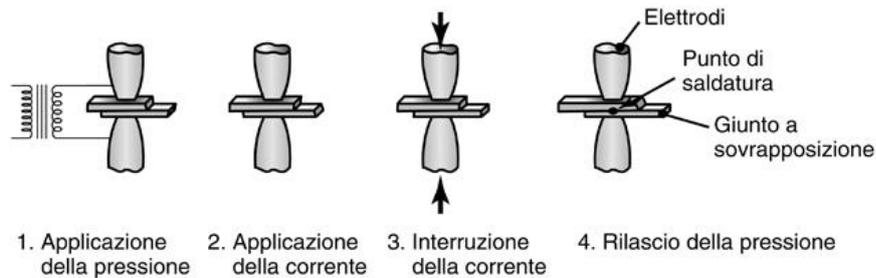


Figura 50 - Sequenza delle operazioni necessarie alla realizzazione del giunto

Il valore di pressione che esercitano i due elettrodi viene effettuato in modo da avere opportuni valori di resistenza elettrica nella zona di contatto tra le lamiere. Come si nota nello schema di Figura 51, il valore di resistenza elettrica varia a seconda della zona che stiamo andando ad analizzare. In particolare, si osserva che la resistenza massima sarà nella zona di contatto delle lamiere: è proprio in quella zona che verranno raggiunte le temperature massime, ed in cui si formerà il cosiddetto **nocciolo di saldatura**. Si cerca dunque di minimizzare i valori di resistenza altrove. Il valore di pressione non può essere però troppo elevato in quanto si aumenterebbe il rischio di deformare localmente le lamiere e dunque diminuirne lo spessore. La scelta della pressione viene eseguito in funzione del materiale base che costituisce le lamiere. La scelta degli altri parametri di processo, quali l'intensità di corrente e la durata dell'applicazione della corrente, vengono ottenuti attraverso l'utilizzo dei diagrammi mostrati in Figura 52.

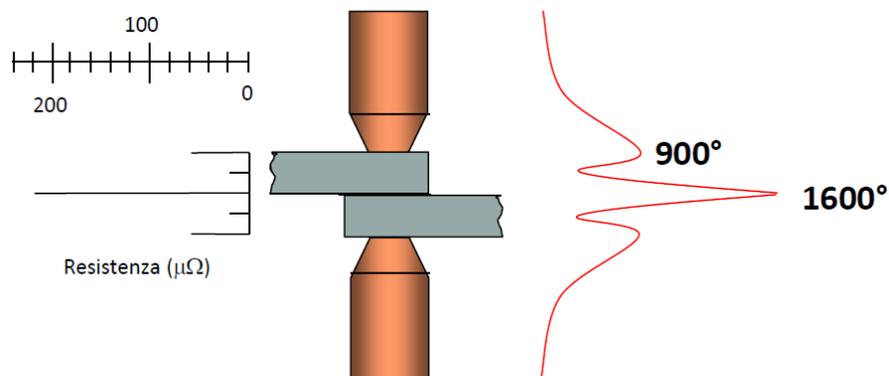


Figura 51 - Distribuzione della resistenza elettrica

Come si nota dal diagramma in questione, si individua una finestra di combinazione di parametri di processo (zona delimitata in rosso). Nello specifico si preferisce lavorare nella zona in alto a sinistra in modo da limitare il tempo di saldatura a discapito di attrezzature più potenti.

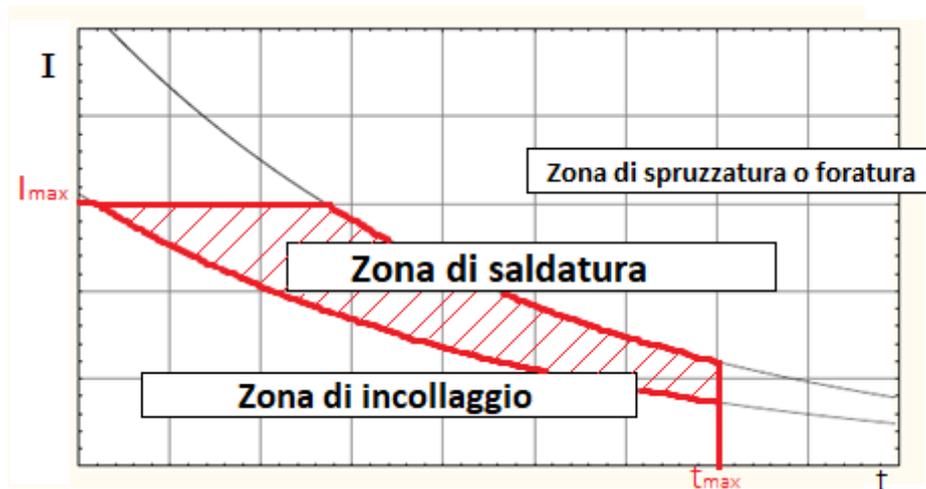


Figura 52 - Zona di scelta dei parametri di processo

Come mostrato nella Figura 53, si possono individuare tre zone caratteristiche del punto di saldatura:

- la zona centrale denominata **nocciolo di saldatura** (*nugget*), ovvero la zona in cui sono state raggiunte le temperature massime. Presenta una struttura a grani orientati nella direzione del flusso termico di conduzione, in genere con dimensioni del grano minori rispetto a quelli del materiale base;
- una zona intermedia denominata **zona termicamente alterata** (*HAZ – Heated Altered Zone*), dove il metallo base ha subito trasformazioni strutturali allo stato solido a causa del ciclo termico subito;
- la zona più esterna caratteristica del **materiale base**, nel quale i cicli termici sono stati tali da non alterare significativamente la struttura cristallina originaria.

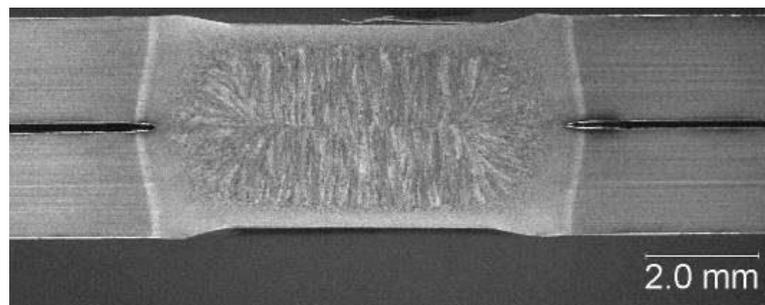


Figura 53 - Metallografia giunto saldato

Anche per il processo di saldatura per resistenza a punti sono presenti in letteratura numerosi esempi soprattutto sull'utilizzo della termografia attiva come controllo non distruttivo dei giunti.

In [19] la termografia attiva è utilizzata per caratterizzare le proprietà dei giunti ottenuti mediante diversi parametri di processo. Sono stati realizzati cinque campioni dalla saldatura di lamine di acciaio dello spessore di 0,8 mm. I campioni sono stati ottenuti applicando la stessa pressione ma variando il valore di corrente e tempo. Nella Figura 55 sono riportati i valori dei parametri di processo utilizzati per i 5 campioni.

Specimen	Current (I) [kA]	Time (tc) [s]	Electrode Force [kg]
1	8,9	12	270
2	7	6	270
3	15	15	270
4	8,9	9	270
5	9,7	15	270

Figura 55 - Parametri di processo usati in

Per la prova sono stati analizzati nel dettaglio solo il campione numero 2, 3 e 5. Il campione 5 è quello che più si avvicina ad un componente ottenuto con parametri di processo ottimali; il campione 3 presenta un tipico difetto da espulsione di materiale; il campione 2 presenta un punto di saldatura non ben definito. Nella figura Figura 54 sono riportate la vista frontale e la vista in sezione di tali provini.

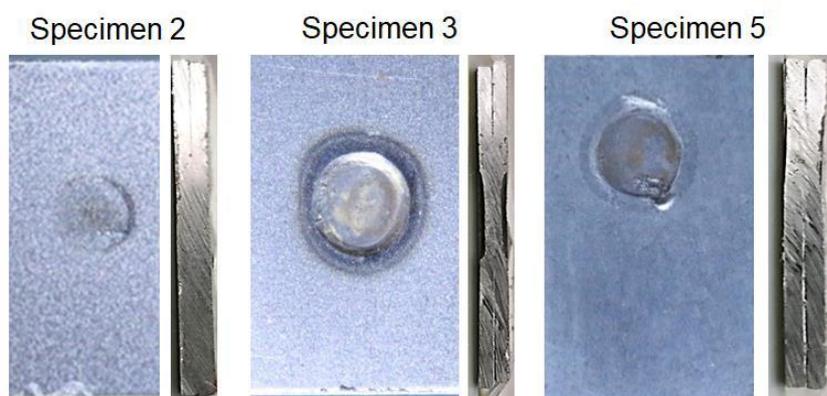


Figura 54 - Provini 2, 3 e 5

Il processo di termografia attivo utilizza il metodo Pulsed. La fonte di calore utilizzata è una lampada flash con un'energia emessa di 3 kJ di durata pari a 5 ms. È stata utilizzata una termocamera Flir che acquisisce ad una frequenza di 64 Hz per un intervallo di acquisizione 30 secondi.

Nella figura Figura 56 sono riportate le curve di evoluzione temporale ottenute per i tre campioni in esame.

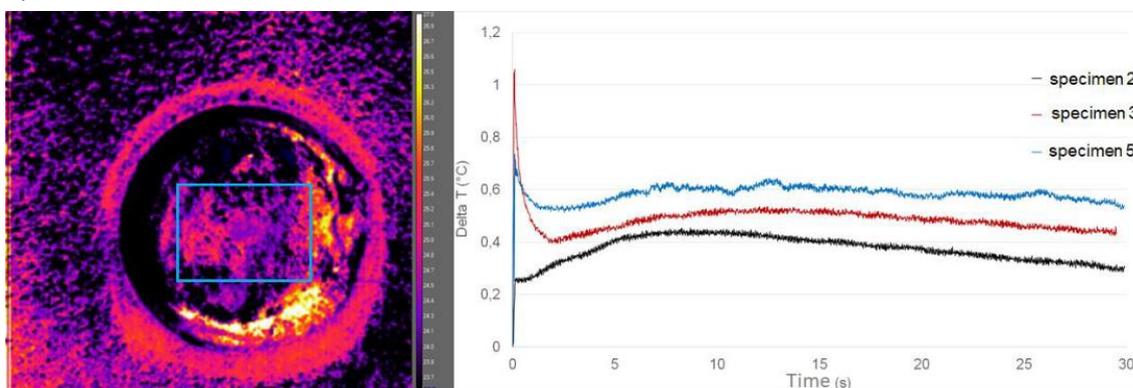


Figura 56 - Zona di indagine (sinistra) e corrispettive curve di evoluzione temporale di temperatura (destra)

Si può notare che il valore massimo viene raggiunto in un tempo molto breve. Successivamente vi è una prima fase tende a diminuire a causa dei fenomeni di trasmissione per condizione

interna del calore, ed in seguito si nota un lieve aumento di temperatura. Tale aumento finale di temperatura è causato dalla lampada flash, che continua a scambiare calore con i campioni nonostante sia lontano da queste. Il profilo del campione 5 può essere considerato come un profilo di riferimento. Il profilo del campione 3 presenta il valore massimo di temperatura raggiunta in quanto l'espulsione di materiale ha fatto sì da diminuire il valore di resistenza termica del campione stesso (nonché lo spessore del giunto saldato). Per il campione 2 invece, accade l'esatto opposto in quanto un punto di saldatura non perfettamente definito aumenta il valore di resistenza termica superficiale.

Al fine di descrivere il comportamento termico dei vari campioni è stato adottato un modello matematico, funzione del tempo e di quattro parametri:

$$T(t) = (at^2 + bt + c)e^{-\frac{d}{t}} \quad (19)$$

Dove i quattro parametri possono essere ottenuti attraverso l'applicazione di un algoritmo ai minimi quadrati.

La Figura 57 riporta i risultati ottenuti per i quattro coefficienti, in una rappresentazione 2D nell'istante in cui viene raggiunto il valore minimo di temperatura. Le tre colonne rappresentano in sequenza i risultati ottenuti per il campione 2, 5 e 3. Come si può notare dai risultati in questione, per il campione 2 la traccia del punto di saldatura non è ben definito, a differenza del campione di riferimento 5. Discorso diverso per il campione 3, nel quale si nota la zona di espulsione del materiale oltre la zona dell'impronta dell'elettrodo.

In definitiva, il comportamento termico dei vari campioni è legato ai parametri di processo utilizzati ed i quattro parametri di controllo definiti nell'analisi sembrano adatti a caratterizzare il tipo di giunto. Si prestano dunque ad essere utilizzati come indici di controllo qualità per i giunti saldati.

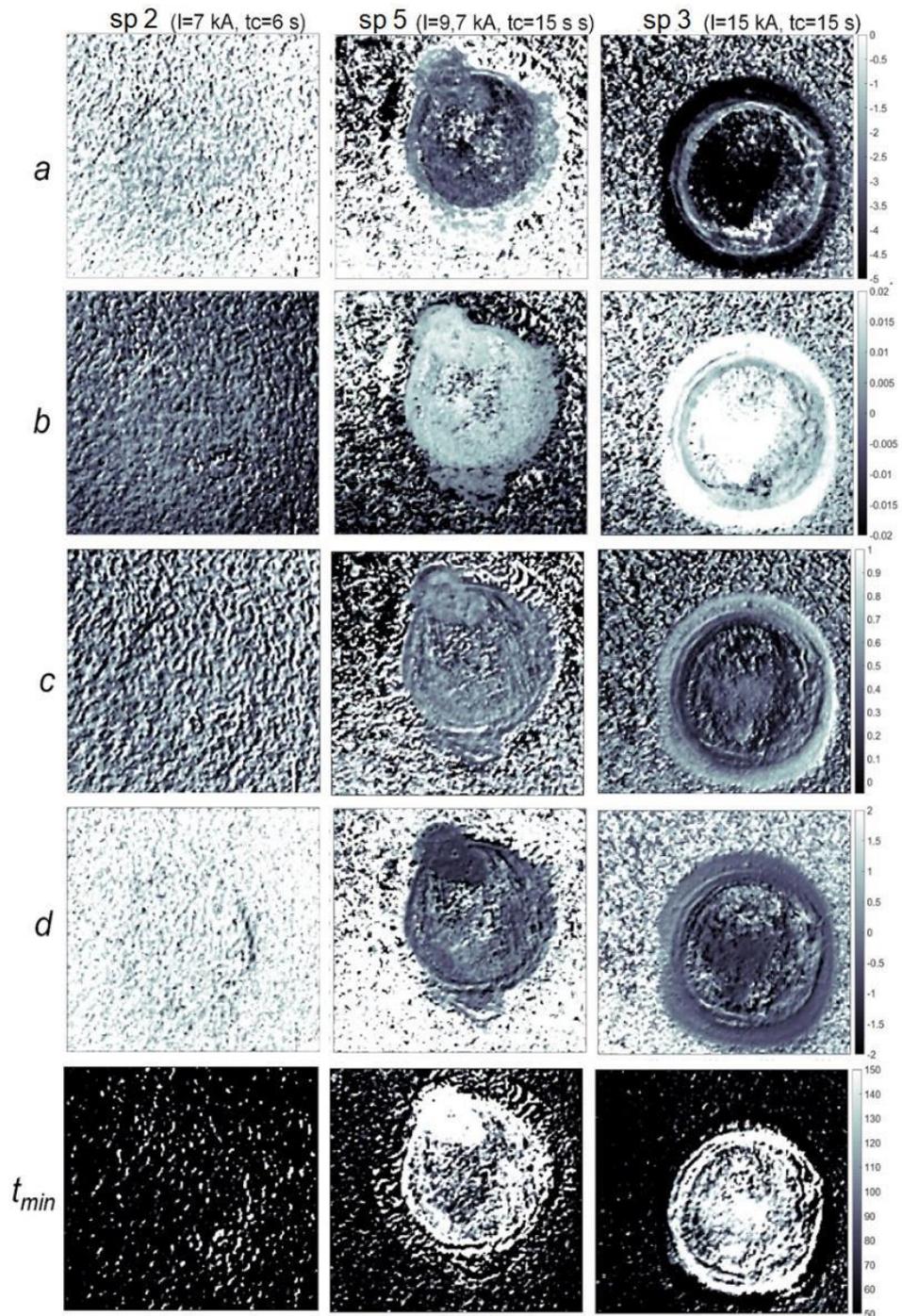


Figura 57 - Risultati ottenuti per i quattro parametri e istante in cui si raggiunge la temperatura minima

In [20] invece, la termografia attiva viene utilizzata come parte di una strumentazione che consente di ispezionare in modo automatico i giunti saldati per resistenza a punti. In particolare, tale ispezione automatica prevede la misurazione del nocciolo di saldatura.

Sono stati ispezionati due diversi tipi di campioni:

- Il primo ottenuto dalla saldatura di due piastre di Bore Steel;
- Il secondo ottenuto dalla saldatura di una piastra di acciaio zincato con una piastra Bore Steel.

Sono stati prodotti 5 campioni per entrambi i tipi di campioni realizzati.

È stata utilizzata una termocamera Flir con rilevatore InSb, per una banda di acquisizione tra 2,5-5,1  $\mu\text{m}$  e capace di acquisire 100 frames al secondo. La termocamera ha acquisito valori per un intervallo di due secondi. Come sistema di riscaldamento invece, è stata utilizzata una lampada flash, che fornisce energia pari a 6 kJ in un intervallo di 0,04s. La prova è avvenuta in modalità di riflessione. Entrambi i sistemi sono stati inclinati di un certo angolo rispetto alla normale della superficie (come mostrato nello schema di Figura 58), al fine di diminuire il disturbo dovuto alla riflessione del materiale. La prova è stata ripetuta su entrambi i lati del campione.

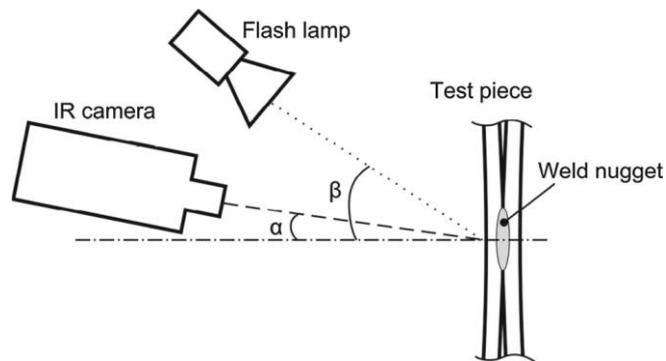


Figura 58 - Schema utilizzato per le prove

L'algoritmo creato per l'ispezione automatica, si articola in sei fasi:

1. individuazione dell'istante temporale del flash;
2. normalizzazione dell'immagine;
3. ricerca della posizione del nocciolo di saldatura;
4. selezione di un'immagine di riferimento;
5. estrazione della forma del nocciolo di saldatura;
6. post processo.

La Figura 59 mostra la ricerca del nocciolo di saldatura prima dell'applicazione del flash. Nell'immagine in questione vengono individuate varie indagini, per le quali saranno ottenuti gli opportuni risultati. Nel rettangolo in verde sarà ricercato il nocciolo di saldatura, di cui ne sarà evidenziato il contorno in rosso. Inoltre, sono indagati anche quanti punti al di fuori del rettangolo in verde.

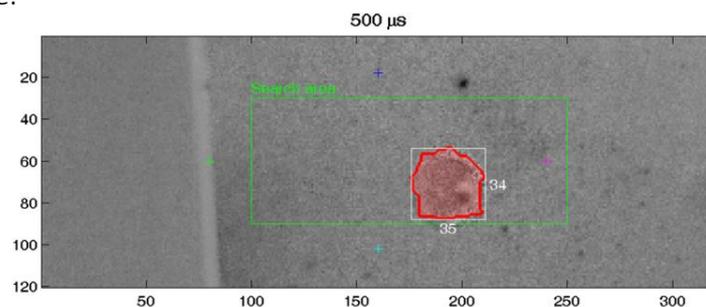


Figura 59 - Ricerca del nocciolo di saldatura

Il rettangolo dai contorni in bianco invece, definisce le dimensioni del nocciolo di saldatura. Tale dimensione verrà stabilita sulla base della relazione che intercorre tra la dimensione dei pixel e la dimensione reale. Nella Figura 60 sono riportate le curve di raffreddamento normalizzate per le varie aree precedentemente descritte

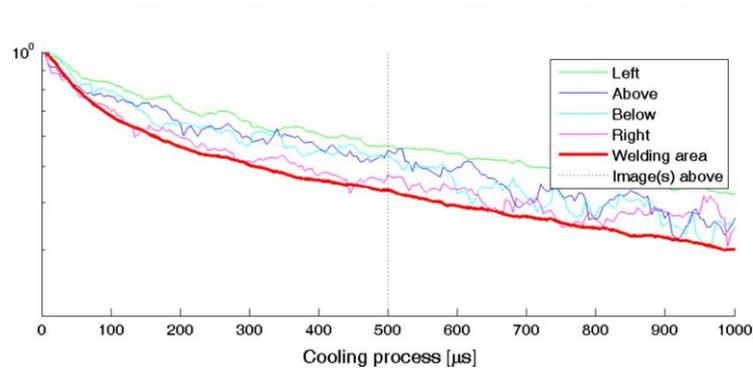


Figura 60 - Curve di evoluzione termica temporale per le zone individuate

La Figura 61 invece, mostra la fase finale di post processamento dell'immagine, in cui si passa da una forma del nocciolo di saldatura più grezza ad una che ne rispecchi la vera forma.



Figura 61 - Fase di post-processo dei dati

Nella Figura 62 sono invece riportati esempi di risultati finali ottenuti dall'applicazione dell'algoritmo.

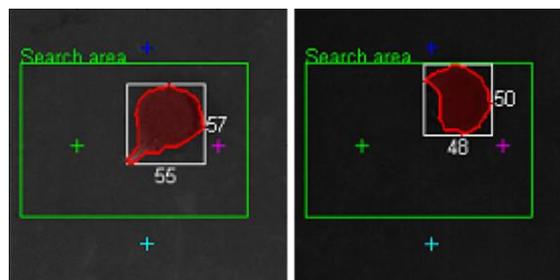


Figura 62 - Dimensioni in pixel del nocciolo di saldatura

Per valutare l'efficacia di tale algoritmo è stato eseguito una prova distruttiva di peel test in modo da comparare i risultati ottenuti dalle due prove. In Figura 63 sono riportati i risultati ottenuti sia dalle prove distruttive che da quelle non distruttive in termografia attiva. Per il primo tipo di campioni i risultati ottenuti su entrambi i lati si trovano in accordanza con i risultati ottenuti dal peel test, anche se leggermente maggiori. Questa analisi merita dunque un approfondimento al fine di poter compensare eventuali errori.

Per quanto riguarda invece il secondo tipo di campione invece, la maggior parte delle prove sono risultati inadeguate a causa del fenomeno di riflessione che influenzava la misurazione. Si prevede dunque di effettuare ulteriori prove variando angoli di posizionamento della fonte di

eccitamento e termocamera, oppure coprire l'aria da misurare con materiale con minor riflessività.

Test plate number	Diameter measured by		Comment
	Peel test (mm)	Thermography (mm)	
I.1a	6,3	5,6	
I.1b		5,5	
I.2a	6,0	6,4	
I.2b		4,7	
I.3a	5,6	5,4	
I.3b		5,2	
I.4a	6,1	5,1	
I.4b		4,8	
I.5a	6,3	5,1	
I.5b		5,0	
II.1a	0,0	0,0	Stick weld
II.1b		0,0	
II.2a	5,8	N/A	Disturbed thermography measurement
II.2b		3,6	
II.3a	5,8	N/A	Disturbed thermography measurement
II.3b		4,5	
II.4a	6,1	N/A	Disturbed thermography measurement
II.4b		4,8	
II.5a	0,0	0,0	Stick weld
II.5b		0,0	

Figura 63 - Risultati ottenuti dalle prove distruttive e dalla termografia

Inoltre, per valutare l'efficacia dell'algorithmo sono state seguite prove anche su giunti saldati con cordone e su giunti soldati tramite resistenza punti in cui è presente un difetto da espulsione di materiale. Nel primo caso l'algorithmo ha lavorato bene e non ha individuato alcun nocciolo di saldatura. Nel secondo caso invece, il sistema non riesce a distinguere con esattezza il contorno del nocciolo di saldatura (come mostrato nella Figura 64). Da qui la necessità di effettuare ulteriori test e irrobustire l'algorithmo.

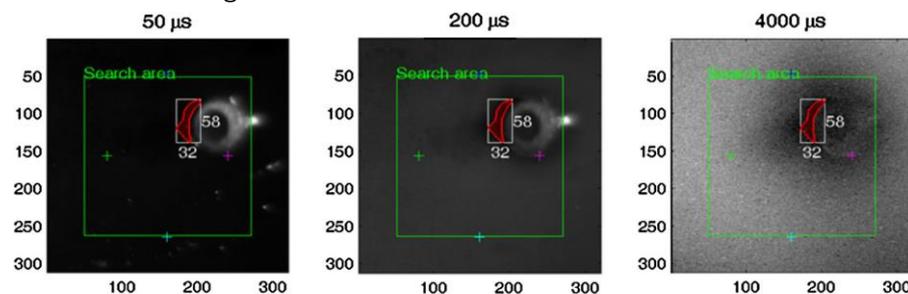


Figura 64 - Esempio di errata applicazione del codice

## 1.7 Usura degli elettrodi nella saldatura per resistenza a punti

L'**usura** degli elettrodi rappresenta una delle maggiori criticità nel processo di saldatura per resistenza a punti. Come ben noto, la saldatura per resistenza a punti è molto diffusa soprattutto in campo automotive, basti pensare che in una vettura sono presenti circa 5000-6000 punti di saldatura. Si ha dunque la necessità di avere elettrodi che abbiano una vita lunga e che permettano di ottenere punti di saldatura con caratteristiche resistenziali simili tra loro. Come menzionato in [26], ci sono numerosi fattori che influenzano la qualità della saldatura, come ad esempio la fluttuazione della tensione, il disallineamento degli elettrodi ed altri fattori che possono essere opportunamente controllati e migliorati durante il processo. Questi tipi di fattori rappresentano un errore sistematico durante il processo di saldatura, rimanendo costanti all'aumentare del numero di saldature realizzate. L'usura invece, gioca un ruolo importante in termini di qualità del giunto saldato, compromettendo le caratteristiche resistenziali del giunto stesso all'aumentare del numero di saldature effettuate. Essa costituisce una modifica delle caratteristiche di condizioni di contatto elettriche, termiche e meccaniche all'interfaccia tra elettrodo e lamiera.

In [27] viene descritto che l'usura nella saldatura per resistenza a punti si presenta in due modi prevalentemente: **deformazione plastica** e **pitting**. Il primo aspetto è legato ai valori di pressione e temperatura che si generano all'interfaccia elettrodo-lamiera. Tale aspetto comporta una variazione del diametro di punta dell'elettrodo. In [28] sono mostrati due possibili modi di deformazione della punta dell'elettrodo, riportati nella Figura 65.

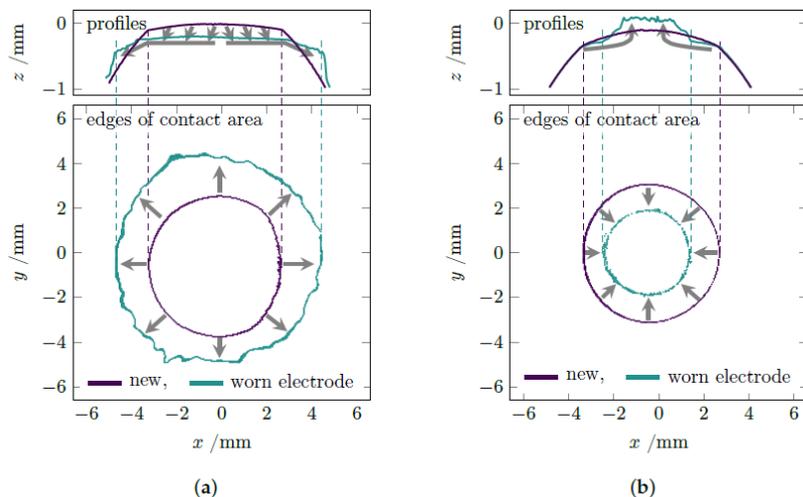


Figura 65 - Modi di deformazione dell'elettrodo per usura: a fungo (a) o per rifilatura (b)

La Figura 65 (a) viene definita una deformazione di tipo '**mushroomin**' (a fungo), mentre la Figura 65 (b) definisce una deformazione di tipo '**trimming**' (rifilatura). Nel primo caso, a causa delle tensioni termomeccaniche che si generano durante il processo di saldatura, il materiale presente sulla punta dell'elettrodo fluisce verso i lati, diminuendo la lunghezza utile dell'elettrodo stesso e aumentando la superficie di contatto con la lamiera. Questo caso è quello che avviene più frequentemente nella pratica della saldatura per resistenza a punti. Nel secondo

caso invece, si ha un aumento della temperatura al centro della superficie di contatto dell'elettrodo, che diminuisce la resistenza locale del materiale dell'elettrodo. Il materiale circostante invece mantiene le sue caratteristiche resistenziali. Ciò comporta uno spostamento del materiale ammorbidito verso la zona di formazione del nocciolo di saldatura, provocando così un aumento della lunghezza dell'elettrodo. A titolo di esempio riportiamo i risultati ottenuti in [28] che mostrano la variazione di forma della punta dell'elettrodo nelle due modalità di deformazione appena descritte. Per la prova sono stati utilizzati due combinazioni di materiali, MC01 e MC02 come riportato in Figura 66:

Description	MC01	MC02
Upper sheet, Anode ( $t_u$ )	HX340LAD + Z100 (2.0 mm)	22MnB5 + AS150 (1.0 mm)
Lower sheet, Cathode ( $t_l$ )	HX340LAD + Z100 (2.0 mm)	22MnB5 + AS150 (1.0 mm)
Coating	zinc, $100 \text{ g m}^{-2}$	AlSi $150 \text{ g m}^{-2}$

Figura 66 - Combinazioni di materiali usati in

L'elettrodo di saldatura utilizzato è fatto in CuCr1Zr, con geometrie definite dalla norma DIN EN ISO 5821 F1-16-20-40-6. Prima e durante ogni prova, l'elettrodo è stato misurato attraverso una topografia 3D. Per ogni combinazione di materiale sono stati eseguiti due differenti test, TS01 e TS02: per la combinazione MC01 sia il test TS01 che il test TS02 prevede la realizzazione di 1200 punti di saldatura; per la combinazione MC02 invece, per il test TS01 sono stati realizzati 1092 punti di saldatura, mentre per il test TS02 ne sono stati realizzati 822. I parametri di processo utilizzati sono presenti in [28]. Per l'acquisizione dei dati necessari all'analisi, sono stati effettuati campionamenti per le saldature numero: 0, 8, 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 per i test MC01; 0, 12, 38, 64, 90, 102, 192, 282, 372, 732 e 1092 per i test MC02. Nella Figura 67 e Figura 68 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente per i campioni MC01 e MC02.

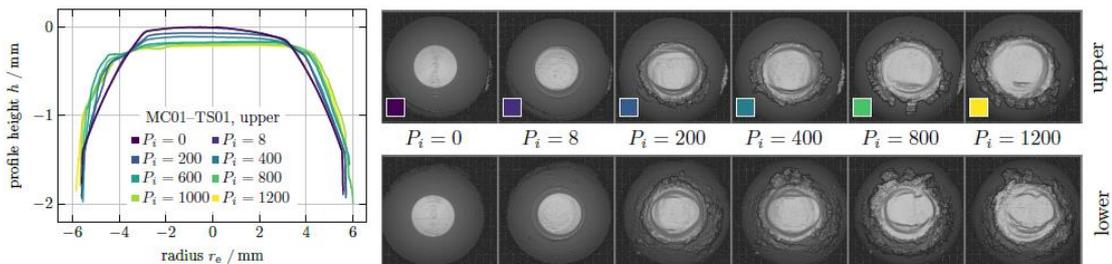


Figura 67 - Risultati ottenuti per MC01-TS01 al variare del numero di saldature

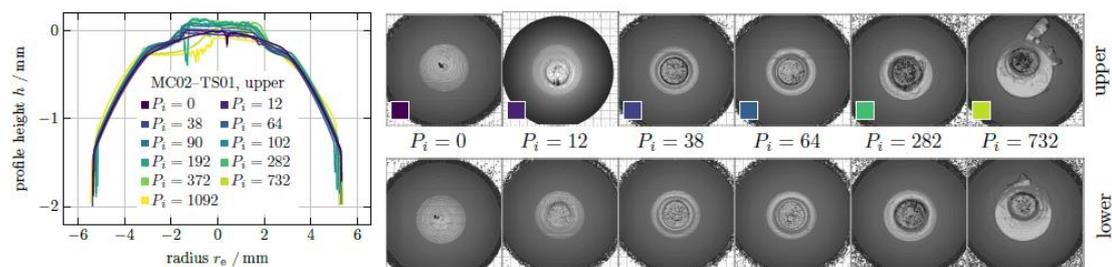


Figura 68 - Risultati ottenuti per MC02-TS01 al variare del numero di saldature

Come ben visibile dai risultati ottenuti, all'aumentare del numero di saldature effettuate gli elettrodi vedono modificata la propria geometria, secondo uno dei due metodi di deformazione menzionati precedentemente.

Sempre in [28] si precisa che indipendentemente dalla modalità di usura, le sollecitazioni termiche e meccaniche portano a processi di diffusione e deformazioni della superficie di contatto dell'elettrodo. Tali fenomeni possono comportare una maggiore usura degli elettrodi e dunque una riduzione della ripetibilità del processo. Per ripristinare le caratteristiche delle originali, l'elettrodo è soggetto all'operazione di **ravvivatura**: l'elettrodo è soggetto a lavorazioni per asportazione di truciolo che ripristinano la geometria iniziale della punta. In questo modo la lunghezza dell'elettrodo diminuirà e sarà necessario compensare gli opportuni parametri di processo.

Per quanto esposto finora, risulta evidente la necessità di monitorare lo stato di usura dell'elettrodo all'aumentare del numero di saldature effettuate, al fine di garantire le prestazioni resistenziali richieste per i giunti saldati. Così come descritto negli articoli citati finora [26][27][28], in letteratura sono presenti numerosi esempi che valutano lo stato dell'usura degli elettrodi. Purtroppo per quanto riguarda l'utilizzo della termografia attiva come strumento di valutazione dello stato di usura dell'elettrodo è carente di applicazioni scientifiche e non è stato possibile reperire alcun esempio di particolare rilevanza. Piuttosto che la termografia attiva, in genere viene adoperata la termografia passiva come metodo di controllo non distruttivo online. Anche in questo caso non vi sono esempi che trattano nello specifico la valutazione dell'usura dell'elettrodo. Vi sono però esempi in cui la termografia passiva è utilizzata per estrapolare informazioni in merito alle dimensioni del nocciolo di saldatura, con la quale è possibile avere una stima della qualità del giunto di saldatura. In [29], ad esempio, sono state eseguite prove di termografia passiva online, prove in termografia attiva post-processo e prove distruttive post-processo.

Nella Figura 69 sono riportati i valori delle dimensioni del nocciolo di saldatura misurati per le prove in termografia online (sinistra) e per le prove in termografia offline (destra).

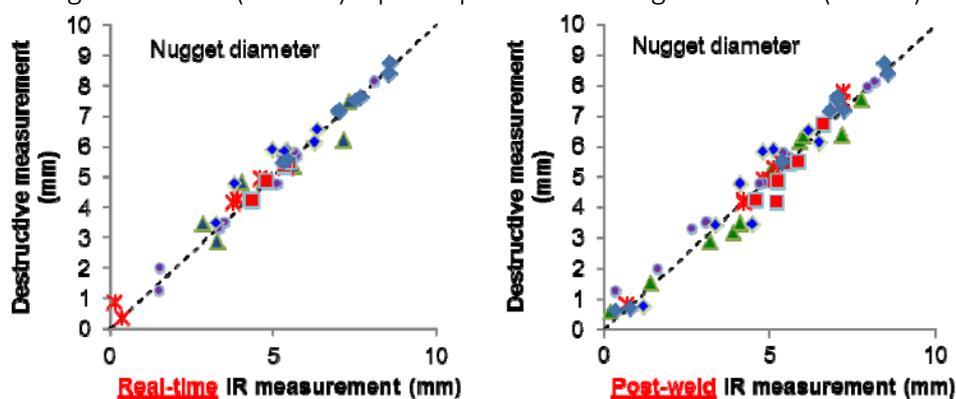


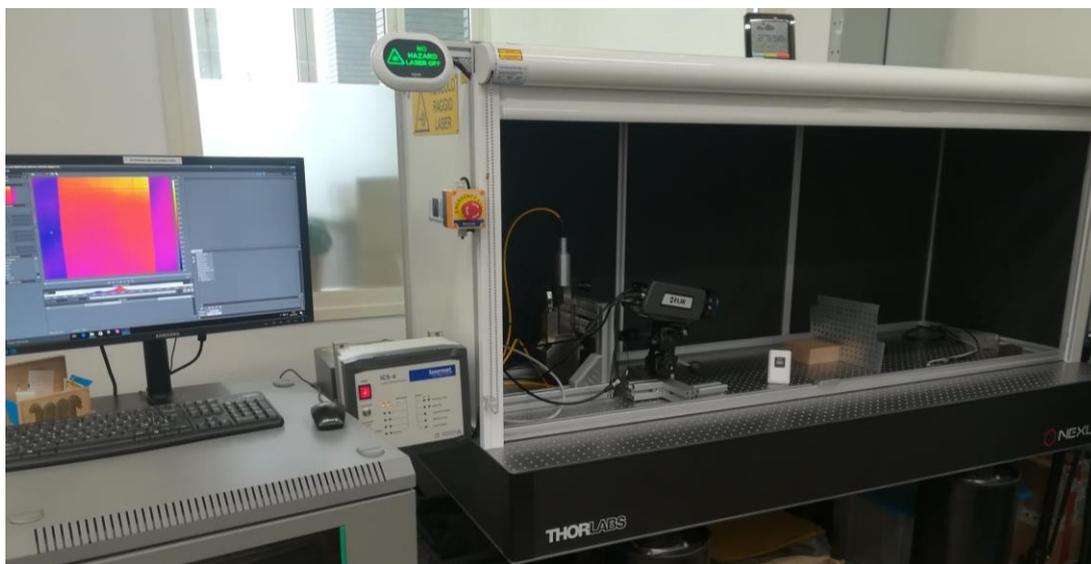
Figura 69 - Risultati ottenuti dalla termografia online (sinistra) e da quella offline (destra)

I risultati ottenuti dalle due prove sono in accordanza tra loro e con i valori misurati attraverso le prove distruttive.



## 2 Strumentazione, materiali e prove sperimentali

Nel presente capitolo verranno descritte le attrezzature e i materiali impiegati per le prove sperimentali. Tali prove sono state svolte dal sottoscritto durante un tirocinio curriculare, svolto presso il laboratorio J-Tech sito al Politecnico di Torino, in corso Castelfidardo 54. Il J-Tech è un centro di ricerca per tecniche di giunzione avanzate, fondato dal Politecnico di Torino in collaborazione con la regione Piemonte. Il laboratorio svolge il ruolo di fornire competenze avanzate e trasferimento tecnologico su materiali e processi di giunzione, modellazione di giunti, test e monitoraggio di componenti uniti.



*Figura 70 - Strumentazione di misura*

## 2.1 Strumentazione

Le prove sono state effettuate mediante l'apparecchiatura denominata **MultiDES**, presente presso il laboratorio del J-Tech, e fornito dalla **DES (Diagnostic Engineering Solution)** di Bari che ne detiene il brevetto. Si tratta di un sistema che basa il proprio funzionamento sull'utilizzo della termografia attiva come strumento di controllo non distruttivo ed analisi di integrità delle strutture. Il sistema MultiDES consente inoltre l'utilizzo di diverse fonti di eccitamento termico, quali lampade alogene, lampade flash, laser, ultrasuoni e microonde. L'apparecchiatura presente in laboratorio è denominato **MultiDES System LASER** (Figura 70), ed è costituita da:

- modulo Laser IPG 50W, di potenza nominale pari a 50W, movimentata da un opportuno sistema di movimentazione;
- termocamera FLIR A6751sc (Figura 71) che monta un rilevatore FLIR Indium Antimonide (InSb) raffreddato che opera nella banda d'onda da 3 a 5  $\mu\text{m}$ . Nella Tabella 1 sono riportate le specifiche della termocamera di maggior interesse;
- unità di governo costituito da un PC di controllo;
- centralina 'Laser Control Unit', che consente di gestire le caratteristiche di eccitazione termica;
- software FLIR ReserchIR che consente di impostare gli opportuni parametri del sensore di misura e consente la registrazione delle prove ed esportazione dei dati acquisiti;
- software MiltiDES R 3.0 per la configurazione dei parametri di processo;
- software di analisi dati termografici IRTA 1.6.13 (di cui non se ne è fatto utilizzo durante il tirocinio);
- cabina di protezione.



Figura 71 - Termocamera Flir A675sx

Rilevatore	FPA Indium Antimode (InSb) con raffreddamento a ciclo chiuso Stirling a 77K
Campo spettrale	3-5 $\mu\text{m}$ o 1-5 $\mu\text{m}$
Risoluzione massima	640x512 pixel
Passo	15 $\mu\text{m}$
Sensibilità termica – NETD	<20mK (in genere 18mK)
Sensore di raffreddamento	FLIR Closed Cycle Rotary

Frame rate massimo	4,175 Hz
Range di temperatura standard	5°C a 300°C
Precisione di lettura	±2° o ±2% del valore letto

Tabella 1 - Specifiche tecniche termocamera Flir A657sx

## 2.2 Materiali e provini

I campioni utilizzati sono costituiti in *Acciaio DP590* ed ottenuti mediante saldatura a punti di lamiere di **spessore di 1mm**. La saldatura è stata ottenuta mediante la stazione di saldatura *Advance Resistance Welding Systems and Balancers 6125N* della *Tecna* (Figura 72) presente nel laboratorio J-Tech, ma che non è stata utilizzata durante il tirocinio.



Figura 72 - Stazione di saldatura

Per la saldatura è stato utilizzato un elettrodo in rame di diametro  $\phi=6$  mm. I parametri di processo utilizzati per la produzione dei provini sono riportati nella Tabella 2:

Tempo salita corrente	100 ms
Tempo di saldatura	300 ms
Tempo discesa corrente	100 ms
Corrente a regime	8 kA
Pressione elettrodi	1,5 bar (pari ad una forza di circa 3,5 kN sugli elettrodi)

Tabella 2 - Parametri di processo della saldatura per resistenza a punti

I vari campioni sono stati ottenuti secondo il seguente schema:

1. realizzazione di 10 serie (da 0 a 9) costituite da 3 ripetizioni ciascuna (A, B e C) che denominati campioni **'FRONTE'** (Figura 73). Tali provini sono stati ottenuti da due lamierini di dimensioni 100x30 mm, sovrapposti per una lunghezza di 30 mm come mostrato nella figura sottostante:



Figura 73 - Campione Fronte

I campioni della serie 0 (0A, 0B e 0C) sono in assoluto i primi 3 punti di saldatura realizzati, mentre i campioni della serie 9 (9A, 9B e 9C) sono gli ultimi 3 punti di saldatura realizzati. Tali campioni sono stati successivamente sottoposti a prove distruttive di shear stress, analisi però non pertinenti a tale lavoro di tesi. Le analisi sono state ottenute sul fronte, ovvero quella su cui agisce l'elettrodo mobile della macchina di saldature (da qui la denominazione 'campioni Fronte');

2. tra una serie Fronte e la successiva sono stati realizzati 9 pannelli (da 1 a 9) ottenuti dalla sovrapposizione di due lastre, su cui è stata realizzata una matrice 15x9 di punti di saldatura, che denomineremo 'campioni **RETRO**' (Figura 74):

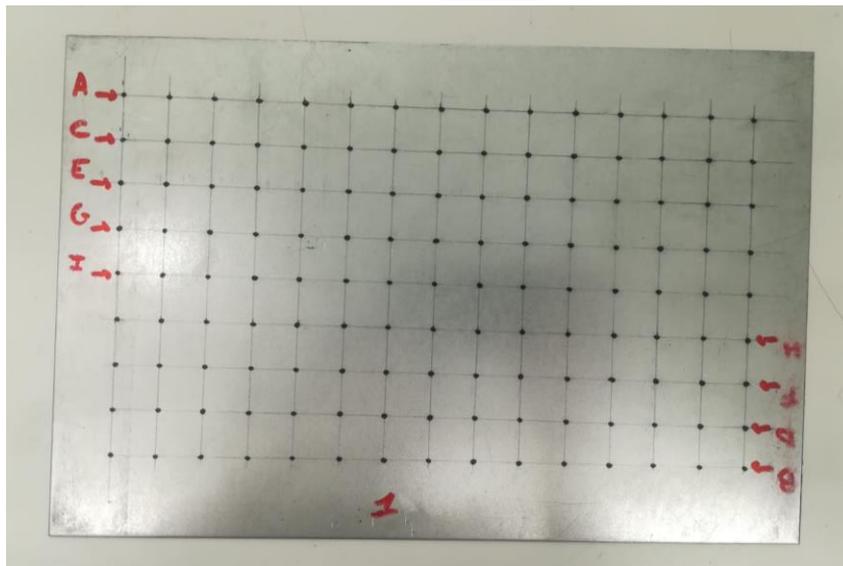


Figura 74 - Campioni Retro

I punti di saldatura sono stati ottenuti seguendo la normativa AWS D8.9M: partendo dalla riga A si passa poi alla riga B e così via fino ad arrivare alla fila I. I punti di saldatura sono distanziati tra loro di 20 mm tra ogni riga e colonna. Questi pannelli sono stati successivamente analizzati sul retro, ovvero ispezionando la superficie che è stata appoggiata sull'elettrodo fisso della macchina di saldatura (da cui la denominazione 'campioni Retro').

In definitiva sono stati realizzati  $1245 (= 3 \cdot 10 + 9 \cdot 15 \cdot 9)$  punti di saldatura. Tra un campione Fronte e l'altro sono stati dunque realizzati 135 punti di saldatura con lo scopo di far usurare l'elettrodo di saldatura.

## 2.3 Prove sperimentali

Come descritto nella Prefazione, per le prove sperimentali è stato deciso di utilizzare il metodo di termografia attiva denominata *Pulsed Thermography* (descritta nel [capitolo 1.5.1](#)).

La procedura generale per l'applicazione della termografia attiva come strumento di controllo non distruttivo è specificata nella norma **BS ISO 18434-1:2008**. La norma indica una serie di operazioni preliminari per la misurazione della *temperatura riflessa apparente* e il calcolo dell'*emissività* del materiale in esame. Nei prossimi capitoli saranno descritte nel dettaglio le procedure adottate durante le prove.

### 2.3.1 Temperatura riflessa apparente

La norma definisce due tipi di metodi per il calcolo della temperatura riflessa:

- Metodo del riflettore;
- Metodo diretto.

Per quest'analisi sperimentale è stato scelto di utilizzare il primo metodo, che prevede l'utilizzo di un foglio di alluminio stropicciato per calcolare la temperatura riflessa. Di seguito verranno riportati brevemente i vari passaggi effettuati durante le prove, definiti anche nella normativa e realizzati mediante l'utilizzo combinato della termocamera e del software ResearchIR:

1. All'interno del software ResearchIR è stato impostato un valore di emissività unitario e distanza nulla, come mostrato nella Figura 75;

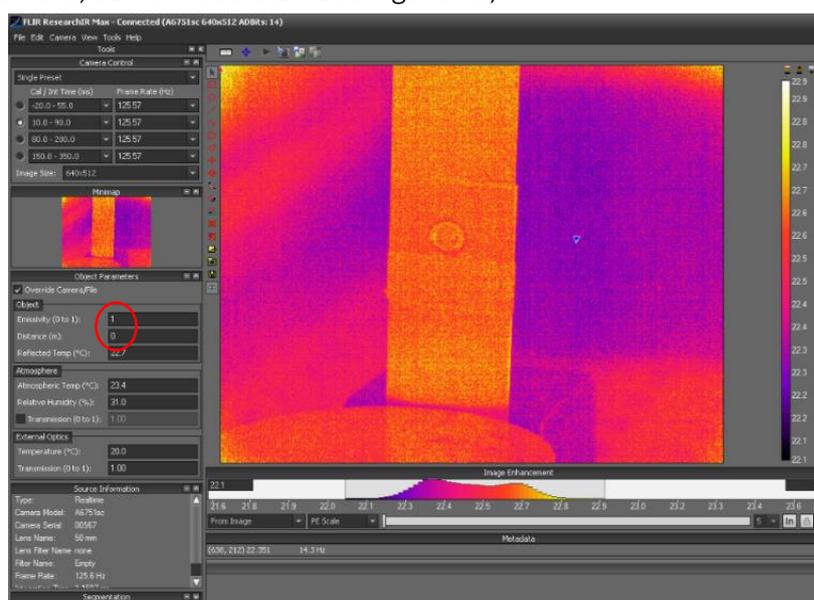
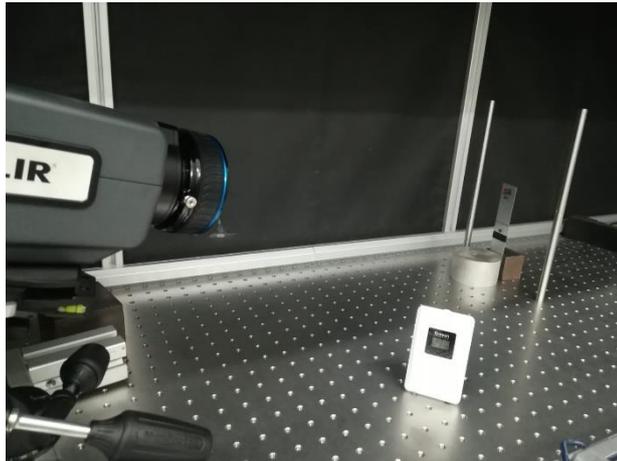


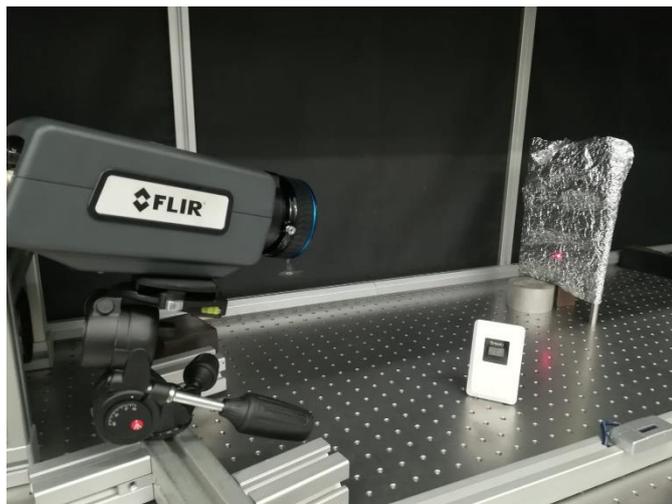
Figura 75 - Settaggio emissività e distanza sul software ResearchIR

2. È stata posizionata la termocamera Flir alla distanza desiderata dal target da misurare e successivamente è stata messa a fuoco la zona di indagine (Figura 76);



*Figura 76 - Posizionamento Target*

3. È stato posizionato il foglio di alluminio nel campo di acquisizione della termocamera. In particolare, il riflettore è stato posizionato di fronte il target e in un piano parallelo ad esso, come mostrato nella Figura 77;



*Figura 77 - Posizionamento del materiale riflettore*

4. Senza muovere la termocamera, è stata misurata la temperatura superficiale apparente con la termocamera (Figura 78). Il valore di temperatura così ottenuto rappresenta la temperatura riflessa apparente del target;
5. Ripetizione dei passaggi da 1 a 4 per un minimo di tre volte;
6. Compensazione della temperatura riflessa apparente inserendo il valore ottenuto all'interno del software ResearchIR, nell'apposita casella.

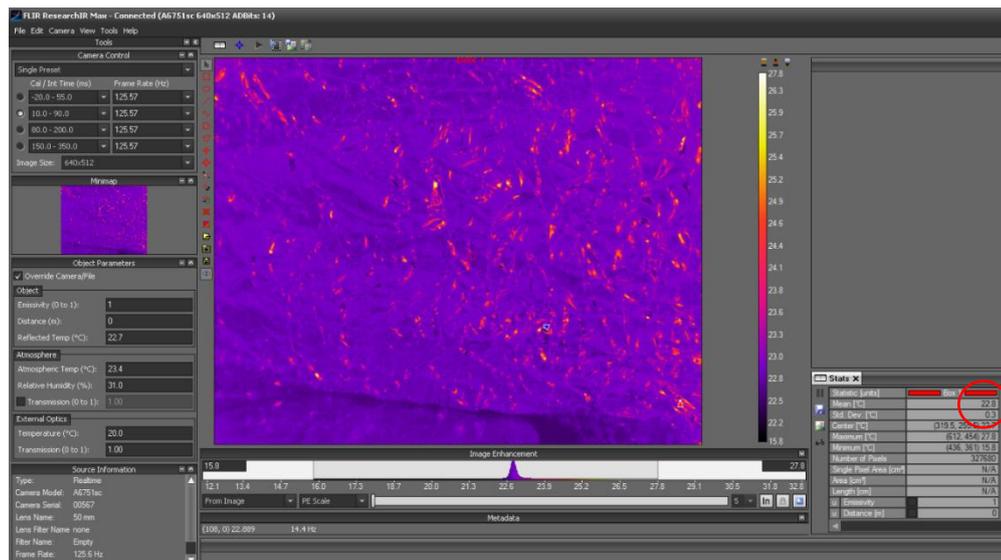


Figura 78 - Misura della temperatura riflessa apparente

## 2.3.2 Emissività

Anche per il calcolo dell'emissività la norma definisce due tipi di metodi:

- Metodo a contatto;
- Metodo del materiale con emissività di riferimento.

È stato scelto di utilizzare il secondo metodo utilizzando come materiale di emissività di riferimento del *nastro adesivo nero* con  $\epsilon=0.92$ . I passaggi necessari per definire tale procedura sono stati:

1. Posizionamento della termocamera e messa a fuoco del target da misurare;
2. Misurazione e compensazione per la temperatura riflessa apparente;
3. Applicazione del nastro adesivo nero in prossimità della zona di indagine (Figura 79);



Figura 79 - Applicazione del nastro nero

4. Inserimento del valore di emissività noto all'interno del software;

- Messa a fuoco della termocamera sul materiale con emissività nota. Stabilizzazione della temperatura tra nastro nero e target e congelamento l'immagine acquisita dalla termocamera. Misurata la temperatura indicata (Figura 80);

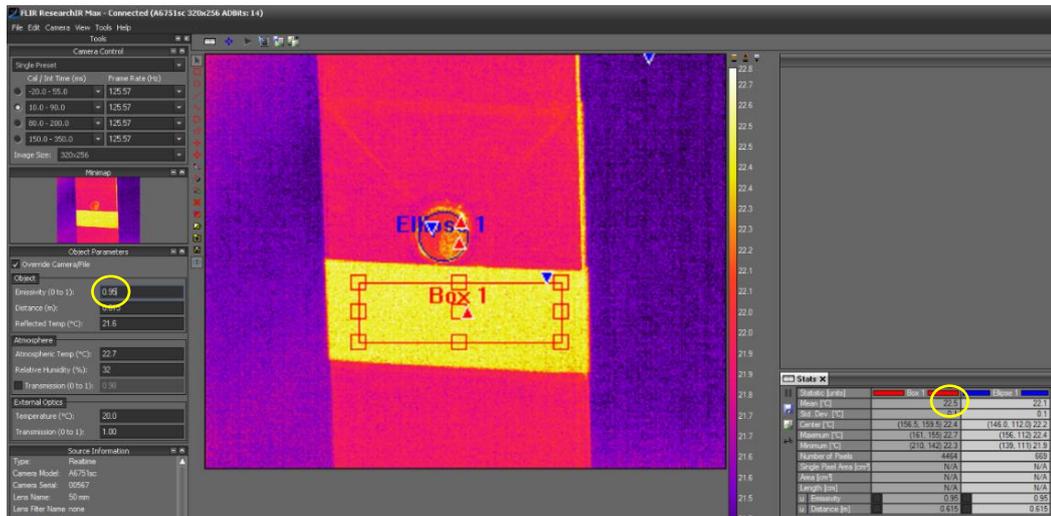


Figura 80 - Lettura valore di temperatura del nastro nero

- Messa a fuoco della termocamera sul target e congelamento dell'immagine acquisita dalla termocamera;
- Variazione del valore di emissività all'interno del software in modo che quest'ultimo valore di temperatura sia uguale a quello registrato per il nastro adesivo nero (Figura 81);

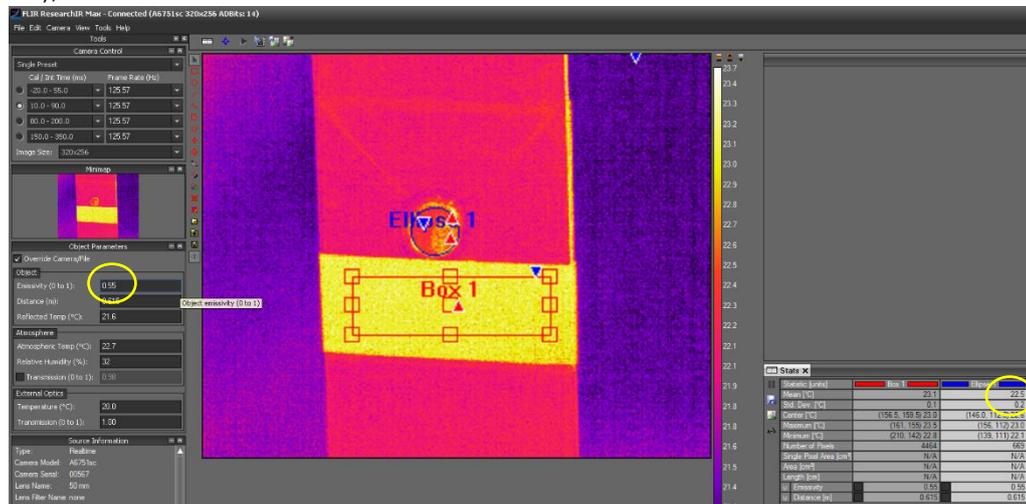


Figura 81 - Variazione emissività target

- Per una migliore accuratezza della misura, ripetere i passaggi da 3 a 7 almeno 3 volte;
- Compensare il valore di emissività all'interno del software prima di effettuare le prove.

IN Figura 82 sono riportati i valori di emissività ottenuti a temperatura ambiente per i campioni Fronte.

La valutazione dell'emissività risulta essere la parte cruciale dell'intera analisi sperimentale. Se, in un'analisi di tipo qualitativa la conoscenza del valore esatto di emissività non gioca un ruolo fondamentale nei risultati ottenuti, in un'analisi di tipo quantitativo, quale è la presente tesi,

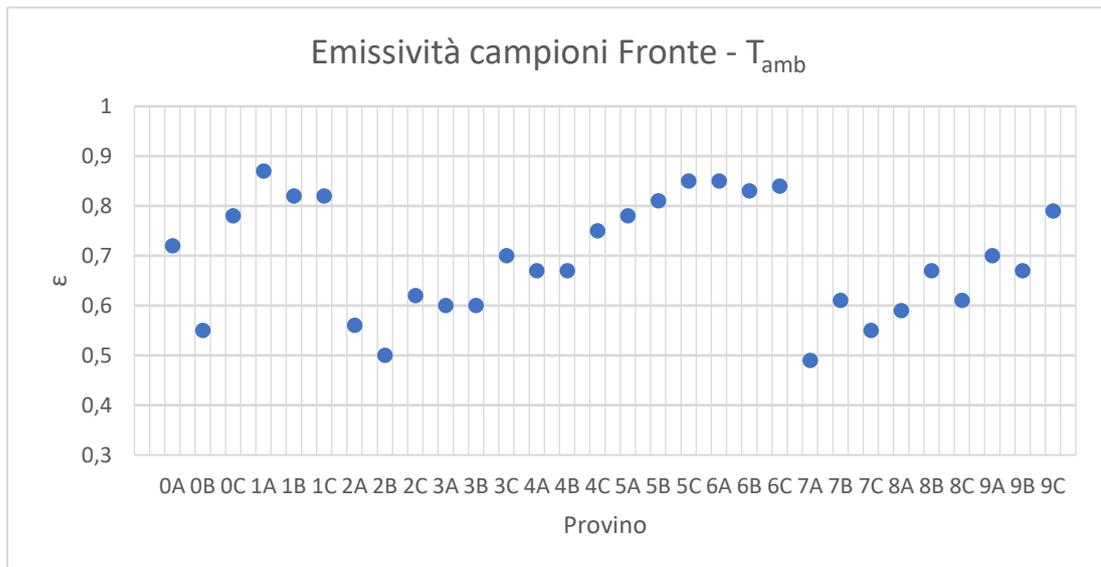


Figura 82 - Emissività campioni Fronte - T<sub>amb</sub>

una sua errata valutazione comporta l'ottenimento di risultati errati. A tal proposito, durante le prove si è notato che a temperatura ambiente i valori ottenuti risultavano essere relativamente alti rispetto a valori di emissività trovati in letteratura per lo stesso materiale [22][23][24][25]. Inoltre, dalla Figura 82 si notano oscillazioni anche significative nei valori ottenuti, dettati dall'inesperienza del sottoscritto nell'effettuare le prove. In prima battuta è stato deciso di effettuare nuovamente la misurazione dell'emissività sui primi tre punti di saldatura effettuati su ciascun pannello, in modo da ottenere dei valori mediati di emissività. La scelta di effettuare tali analisi sui pannelli e non sui provini della serie Fronte è stata necessaria in quanto questi ultimi provini erano stati sottoposti alle prove di shear stress, ed era dunque impraticabile effettuare nuove prove su di essi. Nella Figura 83 sono riportati i valori ottenuti secondo questo nuovo approccio.

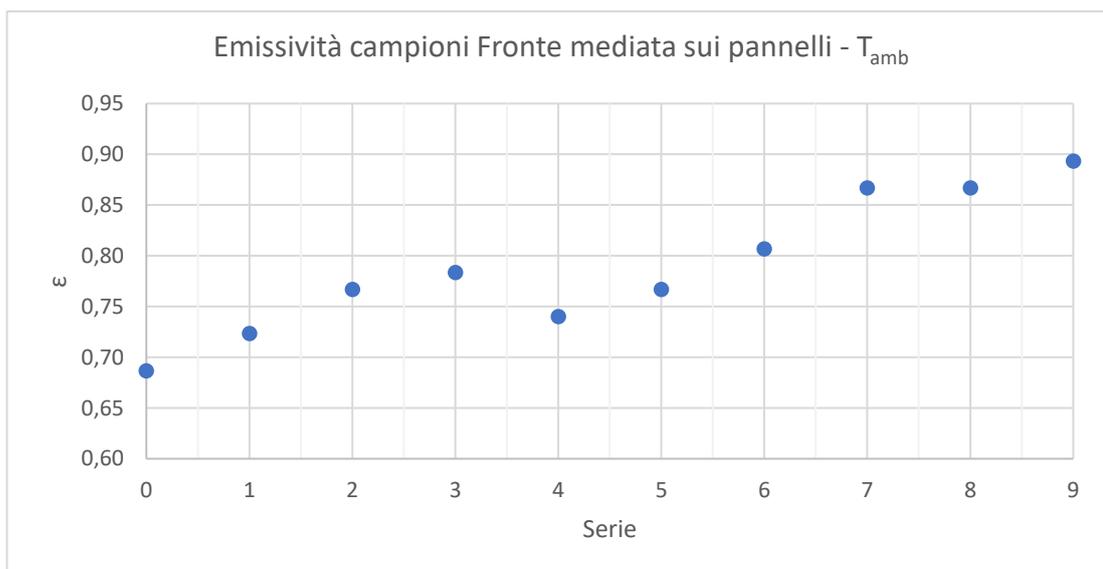


Figura 83 - Emissività campioni Fronte mediata sui pannelli a T<sub>amb</sub>

Con questo approccio si nota come i valori mediati sui pannelli abbiano valori di emissività meno dispersi rispetto a quelli precedentemente ottenuti, ma quantitativamente risultano essere ancora maggiori dei valori presenti in letteratura.

Per tale motivo è stato deciso di effettuare una nuova campagna di prove sperimentali atte a valutare l'emissività per temperature maggiori di quella ambiente. Tale scelta è stata resa possibile dopo una successiva rilettura della norma, la quale afferma che:

*“a natural or induced means of heating or cooling the target at least 20 °C above or below the reflected apparent temperature such that the target temperature is stable and close to the temperature of the target(s) to be measured.”*

Ovvero che è possibile valutare l'emissività del target dopo averlo precedentemente riscaldato (o raffreddato) di almeno 20°C al di sopra (o al di sotto) della temperatura riflessa apparente. A tale scopo la zona di indagine è stata precedentemente riscaldata tramite un comune asciugacapelli per un paio di minuti in modo da portare la temperatura locale del target a temperature prossime i 70°C. Dopo aver accertato con una termocoppia che la temperatura del target e quella del nastro nero fossero uguali, è stata calcolata l'emissività attraverso il software ResearchIR. La temperatura alla quale è stata effettuata la prova è stata 50°C, univoca per tutti i provini analizzati. Questa procedura ha dato valori di emissività inferiori rispetto a quelli ottenuti a temperatura ambiente (Figura 84) e prossimi a quelli trovati in letteratura.

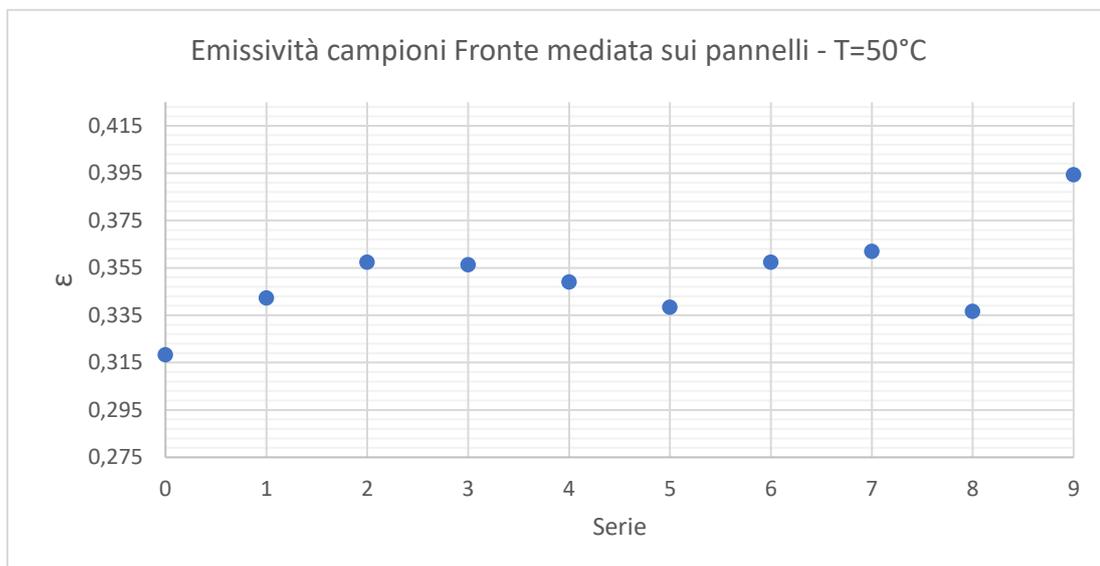


Figura 84 - Emissività campioni Fronte mediata sui pannelli - T=50°C

Nella Figura 85 sono riportati i valori di emissività ottenuti per la serie Retro a temperatura ambiente. Per questa serie non sono state effettuate ulteriori valutazioni di emissività, poiché i primi risultati ottenuti non erano incoraggianti, decidendo di interrompere le analisi per la suddetta serie. Maggiori spiegazioni in merito verranno fornite all'interno del [capitolo 3.4](#).

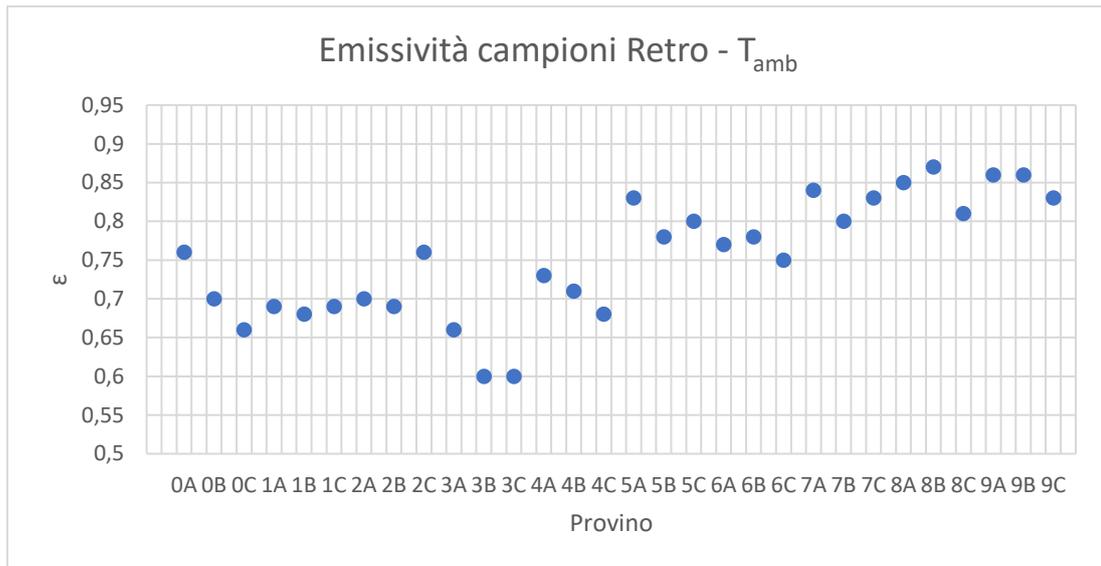


Figura 85 - Emissività campioni Retro - T<sub>amb</sub>

### 2.3.3 Scelta dei parametri di prova

La scelta del posizionamento dei provini rispetto alla termocamera e al laser è stata effettuata senza alcuna direttiva specifica. Le uniche accortezze che è possibile menzionare, sono:

- il target ripreso dalla termocamera fosse posizionato ad una distanza inferiore di 1 m dalla termocamera e che questa riuscisse a mettere correttamente a fuoco l'immagine acquisita;
- l'angolo  $\beta$ , proiezione sul piano orizzontale dell'angolo formato dalla normale uscente dal campione e dalla normale uscente dell'obiettivo della termocamera, fosse maggiore di  $0^\circ$ , in modo da minimizzare l'acquisizione diretta delle radiazioni termiche dovute al fascio laser. Questa scelta viene suggerita dagli numerosi articoli scientifici [39][40][41].

Per quanto riguarda la scelta tra la modalità in riflessione e la modalità in trasmissione è stato seguito il seguente ragionamento. Sono state eseguite due prove con gli stessi parametri di prova (potenza termica del laser pari al 100% e durata dell'impulso termico pari a 500 ms), una in modalità di riflessione e l'altra in modalità per trasmissione. Le due prove sono state effettuate sullo stesso campione e sono stati analizzati i risultati acquisiti, attraverso il software ResearchIR. Come ci si aspettava, nella modalità in riflessione si registrano temperature superficiali ben maggiori rispetto a quelle ottenute nella modalità in trasmissione. Per i parametri di prova scelti si raggiungevano temperature anche maggiori di  $90^\circ\text{C}$  nella modalità di riflessione, mentre in quella di trasmissione si raggiungevano temperature prossime ai  $30^\circ\text{C}$ . Raggiungere temperature più alte si traduce nell' avere un tratto di raffreddamento transiente meglio definito, il che consente di effettuare analisi più accurate.

Le prove sono state eseguite in *modalità in riflessione*, tenendo fisso sia il sistema laser che la termocamera e sostituendo di per ogni prova i vari campioni delle serie Fronte e Retro. Gli angoli registrati sulla termocamera per la serie Fronte sono riportati nelle Figura 86, Figura 87 e Figura 88.



Figura 87 - Angolo di inclinazione 1 della testa



Figura 88 - Angolo di inclinazione 2 della testa



Figura 86 - Angolo di rotazione della testa

I parametri geometrici di configurazione per le prove delle due serie sono risultati essere:

Campioni	Fronte	Retro
Distanza normale obiettivo-target – d	61.5 mm	48.5 mm
Proiezione angolo tra le normali - $\beta$	26°	23°

Tabella 3 - Setup geometrici prove sperimentali

Nella Figura 89 viene riportata lo schema della vista dall'alto della configurazione utilizzata per i campioni Fronte.

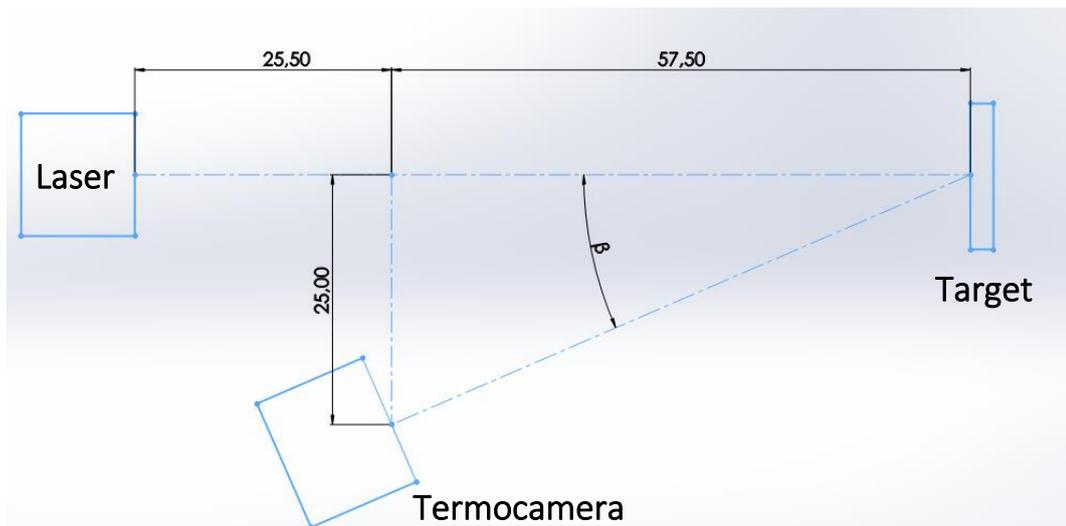


Figura 89 - Vista superiore del setup adottato

La scelta delle diverse configurazioni tra i campioni Fronte e Retro e da imputarsi al fatto che in principio non era stata vagliata l'ipotesi di analizzare i provini anche dal retro. Data la diversa dimensione dei campioni Fronte e Retro, non è stato possibile ricostruire lo stesso setup.

I parametri del laser sono stati scelti a seguito di una serie di prove nelle quali è stata variata la potenza del laser mantenendo costante la durata dell'impulso, pari a 500 ms. Tali prove si sono rese necessarie per due aspetti fondamentali:

- per potenze troppo basse il punto di saldatura non viene riscaldato a sufficienza e dunque non è possibile apprezzare al meglio il tratto di raffreddamento dei termogrammi;
- per potenze troppo elevate il punto di saldatura viene riscaldato eccessivamente con temperature massime che superano l'intervallo di acquisizione impostato per la termocamera (10°-90°C).

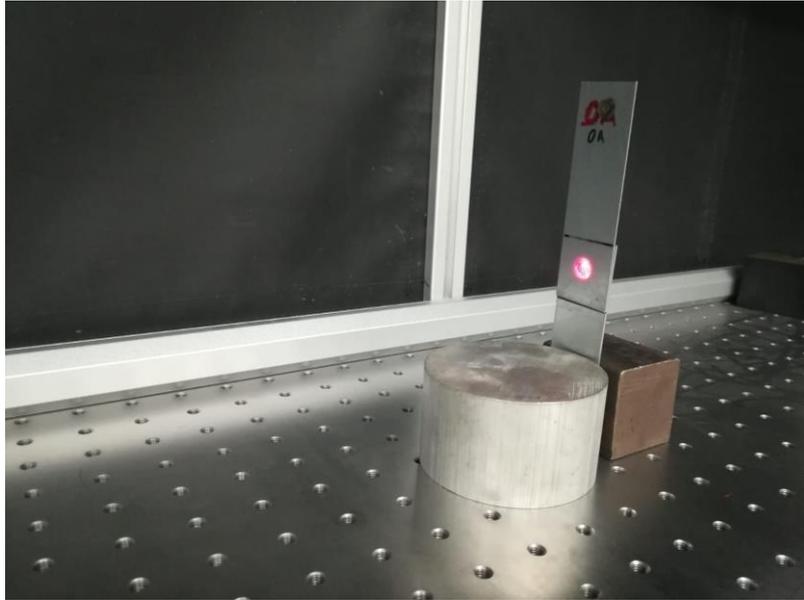
I parametri di processo utilizzati sono risultati essere:

Campioni	Fronte	Retro
Durata dell'impulso	500 ms	500 ms
Potenza del laser (% della potenza nominale)	80%	100%

Tabella 4 - Parametri di prova termografia attiva

I parametri di prova del laser sono stati inseriti all'interno del software **MultiDES R 3.0**, seguendo la procedura dettagliatamente descritta dal manuale fornito dalla DES. In particolare:

- nella sezione **Head** sono stati inseriti i parametri di prova definiti nella tabellaAD;
- nella sezione **Laser** è stata effettuata la procedura manuale per la movimentazione della testa laser e salvataggio delle coordinate ottenute, in modo da centrare lo spot del laser sul punto di saldatura (vedi Figura 90). Tale procedura è stata eseguita per tutti i provini, cercando di posizionare gli stessi nella medesima configurazione: l'obiettivo è quello di ottenere la miglior *ripetibilità* possibile per l'intero processo.



*Figura 90 - Fase di centraggio dello spot del laser sul target*

Per ogni campione sono state effettuate delle registrazioni tramite il software ReserchIR aventi le caratteristiche riportate nella Tabella 5. Tramite queste registrazioni è stato dunque possibile estrapolare l'evoluzione temporale della temperatura per ogni pixel acquisito dalla termocamera.

<b>Durata registrazioni</b>	5 s
<b>Frequenza di acquisizione</b>	125.57 Hz
<b>Risoluzione termocamera</b>	320x256 pixel
<b>Range acquisizioni temperatura</b>	10° C ÷ 90° C

*Tabella 5 - Parametri di acquisizione per le prove in termografia attiva*



## 3 Analisi dati

In questo capitolo sarà descritta la procedura relativa all'analisi dei dati.

In letteratura, si nota come l'utilizzo della Pulsed Thermography sia seguito dallo studio della risposta del target nel dominio della fase e della frequenza. Questo tipo di approccio prende il nome di Pulsed Phase Thermography, come descritto all'interno del [capitolo 1.5.3](#). La presente analisi dati invece, differisce da questo tipo di approccio. In particolare, si vuole indagare sulle possibili potenzialità che offre la semplice Pulsed Thermography, come strumento di analisi dell'usura dell'elettrodo della saldatura per resistenza a punti. Tale approccio ricerca possibili caratteristiche e/o parametri che caratterizzano i termogrammi (quali ad esempio le temperature massime raggiunte o la pendenza del tratto di raffreddamento) senza dover effettuare delle analisi nel dominio della frequenza.

I dati ottenuti dalle prove sperimentali, descritte nel precedente [capitolo 2.3](#), sono stati trattati mediante l'utilizzo dei software *ResearchIR* e *Matlab*.

Definita la parte preparatoria dei dati e l'individuazione della zona di indagine, sono state effettuate le seguenti analisi:

- Curve di evoluzione termica nel tempo;
- Curve normalizzate di evoluzione termica nel tempo;
- Andamento della temperatura ottenuto dalla media delle tre ripetizioni di ogni serie (denominate 'Medie dei tre');
- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento, che denomineremo  $T_{max}$ ;
- Temperatura media della prova,  $T_m$ ;
- Pendenza approssimata per quattro intervalli di tempo, del solo tratto di raffreddamento;
- Indagini per sotto-aree dell'impronta.

Si vuole precisare che le analisi per i campioni Retro sono state interrotte alla 'Media dei tre'. Le curve ottenute con le prime tre analisi non hanno dato dei risultati promettenti come quelli della serie Fronte.

### 3.1 Preparazione dei dati

Tramite l'utilizzo del software ResearchIR sono state esportate le registrazioni ottenute per i vari provini in un nuovo formato di tipo *'csv'* (*Comma Separated Value*). Tale formato consente una miglior manipolazione dei dati per le analisi a seguire. È un formato di tipo testo e si presenta come una tabella (grande 320x256 elementi, pari cioè alla risoluzione di acquisizione della termocamera) al cui interno sono salvati i valori di temperatura registrati per ogni singolo

pixel acquisito dalla termocamera, per ogni *frame* acquisito. Sebbene la durata di acquisizione della prova (5 sec) e la frequenza di acquisizione (125.75 Hz) sono rimaste invariate per tutti i provini, il software ha acquisito un numero di frame compresi tra i 626 e i 629, variabile tra una prova e l'altra. Per questo motivo il numero totale di file .csv ottenuti durante il processo di esportazione dati variava in accordo col numero di frame acquisito per la singola prova.

Lo step successivo è stato quello di importare i valori contenuti all'interno dei file .csv in ambiente Matlab, attraverso il quale sono state eseguite le varie analisi. Attraverso la scrittura di un ciclo *for* e l'utilizzo del comando *filename*, è stato possibile riordinare i dati relativi alla singola prova in una matrice tridimensionale di dimensioni 256x320x626 (vedi schema Figura 91), dove:

- 256x320 è la risoluzione della termocamera di 320x256: i valori sono invertiti tra loro a causa dell'indicizzazione righe-colonne utilizzata da Matlab nel definire una matrice;
- 626 sono il numero di frame minimo acquisiti durante le prove di termografia attiva. Tale scelta è stata necessaria per due scopi:
  1. Rendere unico lo script per tutte le prove;
  2. Poter confrontare i risultati ottenuti in termini di dimensioni dei vettori creati.

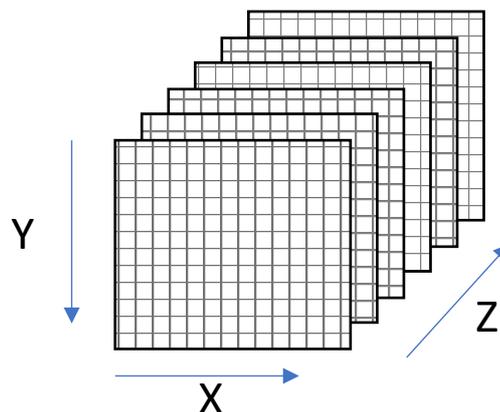


Figura 91 - Schema ordinamento dati in matrici

In definitiva, le prime due dimensioni rappresentano le coordinate spaziali dei pixel acquisiti dalla termocamera, mentre la terza dimensione rappresenta l'evoluzione temporale dei valori di temperatura registrati per ogni pixel.

## 3.2 Scelta dell'aria d'indagine

Come si evince dalla Figura 90, la zona che viene eccitata termicamente dal laser è leggermente maggiore dell'impronta lasciata dall'elettrodo sul campione. La dimensione di tale zona risulta essere di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla risoluzione della termocamera: come sarà descritto a breve, si tratta di un'area grande mediamente 30x30 pixel. Poiché la matrice

importata precedentemente presenta dimensioni ben più grandi di quelle appena menzionate, vi sono dunque un numero di elementi che non sono di interesse per le analisi. Risulta necessario ridurre la zona di ispezione in modo da alleggerire i calcoli che dovrà effettuare il software, riducendo altresì i tempi computazionali di calcolo.

La scelta dell'area di indagine svolge un ruolo fondamentale per tutta la fase di analisi. Essa influenza fortemente i risultati finali: una zona di indagine troppo piccola potrebbe comportare risultati con un'elevata componente aleatoria, e a carattere prettamente locale; aree mediate troppo grandi rischiano di non far apprezzare al meglio il comportamento dei singoli campioni. La scelta di tale area è stata effettuata con lo scopo di creare un codice che possa essere utilizzato per tutti le prove effettuate.

Come mostrato nella Figura 92, si evidenzia la variabilità del segnale di misura, nel caso in cui venga indagato il solo pixel in cui si registrava il valore massimo di temperatura.

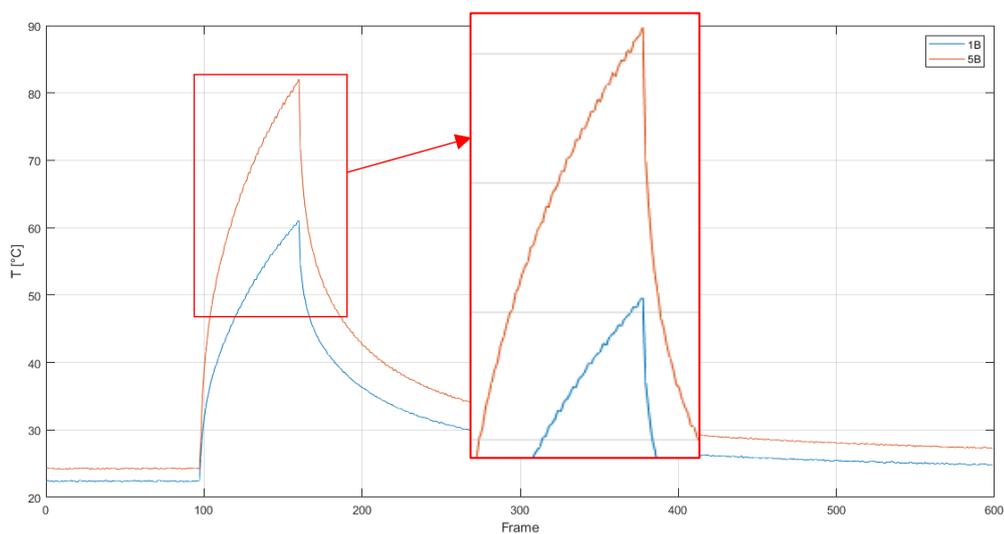


Figura 92 - Rumore di misura per aree di indagine troppo piccole

In prima battuta, è stata vagliata l'ipotesi di considerare un'area di indagine individuata dal quadrato che circoscrive l'impronta dell'elettrodo, come mostrato schematicamente nella

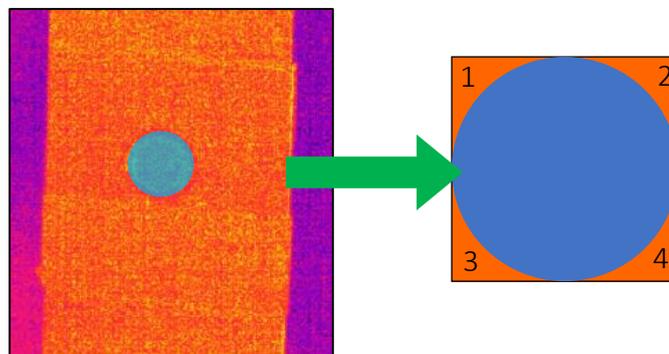


Figura 93 - Area di indagine pari al quadrato che inscrive l'impronta dell'elettrodo

Figura 93. Anche questa scelta è stata scartata in quanto per le quattro aree evidenziate in arancione non ne è stato calcolato il valore di emissività.

Infatti, come descritto all'interno del [capitolo 2.3.2](#) e mostrato nell'immagine Figura 81, la **ROI** (*Region Of Interest*) per la quale è stata calcolata l'emissività è la sola impronta lasciata dell'elettrodo (zona circolare evidenziata in blu nella Figura 93).

Con lo scopo di creare un codice universale utilizzabile per tutti i provini, ne è stato costruito uno che consentisse di:

1. individuare le coordinate del pixel in cui si raggiunge il valore massimo di temperatura e salvarle;
2. creare un'area di indagine quadrata, di dimensioni note, che ha per centro le coordinate precedentemente salvate.

Tale tipo di analisi è stata scartata, in quanto si nota che per alcuni campioni il pixel, in cui si registrata la temperatura massima, si localizza in prossimità del bordo dell'impronta dell'elettrodo (triangolo rosso mostrato in Figura 94). Nel caso in cui si voglia creare un quadrato centrato nel punto in questione e al fine di rimanere all'interno della zona di cui si è stata valutata l'emissività, le dimensioni di tale quadrato risultano ristrette a pochi pixel. Per il discorso fatto in precedenza, con zone di indagine ristrette si ottengono risultati dal carattere prettamente locale. Per tale ragione anche questo tipo di analisi è stata scartata.

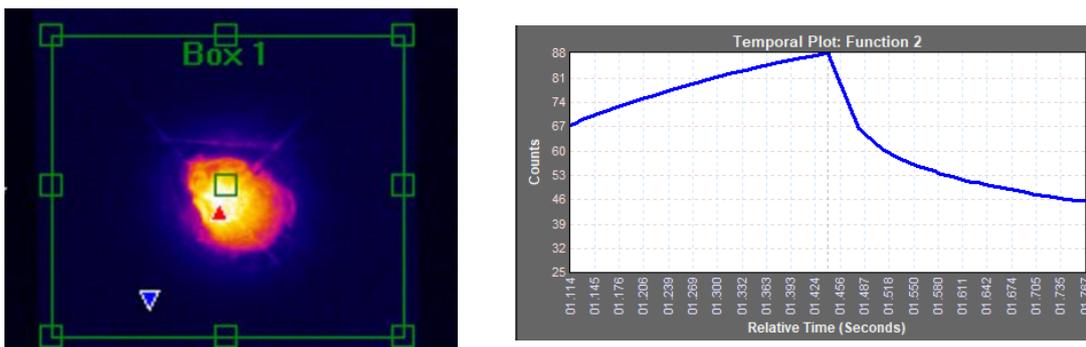


Figura 94 - Posizione spaziale del valore di temperatura massimo raggiunto (sinistra) alla fine del riscaldamento (destra)

Col fine ultimo di ottenere il giusto compromesso in termini di dimensioni dell'area di indagine, valore di emissività nota e scrittura di un codice universale per tutti i provini, la scelta definitiva dell'area di indagine è quella mostrata in Figura 95; è scelto di individuare il quadrato inscritto all'interno della ROI della quale è noto il valore di emissività.

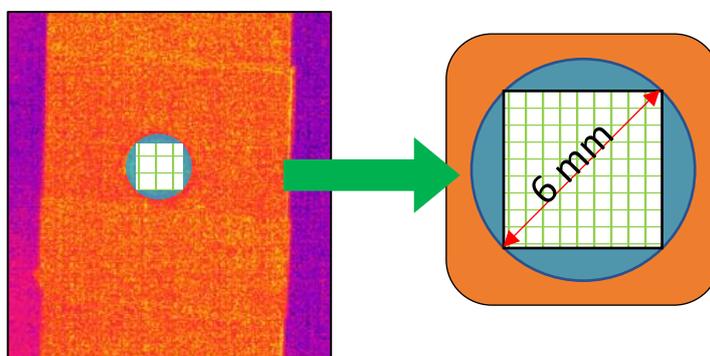


Figura 95 - Zona di indagine scelta

Prima di procedere con la descrizione delle operazioni necessarie alla corretta individuazione di tale area, bisogna far presente che l'area dell'impronta lasciata dall'elettrodo non si mantiene costante all'aumentare del numero di saldature realizzate. Come mostrato nella Figura 96, l'impronta lasciata dall'elettrodo non si mantiene costante nella sua forma. Da qui nasce l'esigenza di definire a priori un'area di indagine univoca per tutte le analisi. La scelta è ricaduta nel quadrato iscritto all'interno di una circonferenza di diametro  $\phi=6\text{mm}$ , ovvero la dimensione della punta dell'elettrodo che è in contatto con le lamiere da saldare.

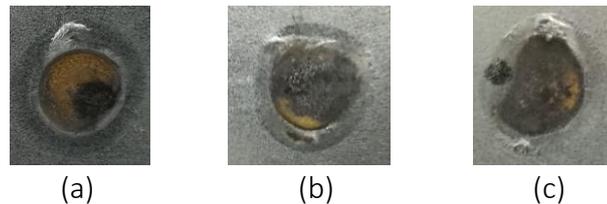


Figura 96 - Impronte lasciate dall'elettrodo superiori sul pannello 1 (a), 5 (b) e 9 (c)

Per la corretta definizione dell'area appena individuata, sono necessarie due operazioni fondamentali:

- individuazione delle coordinate del centro della ROI;
- individuazione della relazione pixel – millimetri.

Entrambe le operazioni sono state svolte all'interno del software ResearchIR.

La procedura necessaria all'ottenimento delle coordinate del centro della zona di interesse è abbastanza semplice: durante la modellazione della ROI nel calcolo dell'emissività (descritta all'interno del [capitolo 2.3.2](#)), il software riporta in automatico tali coordinate, come mostrato nella Figura 97.

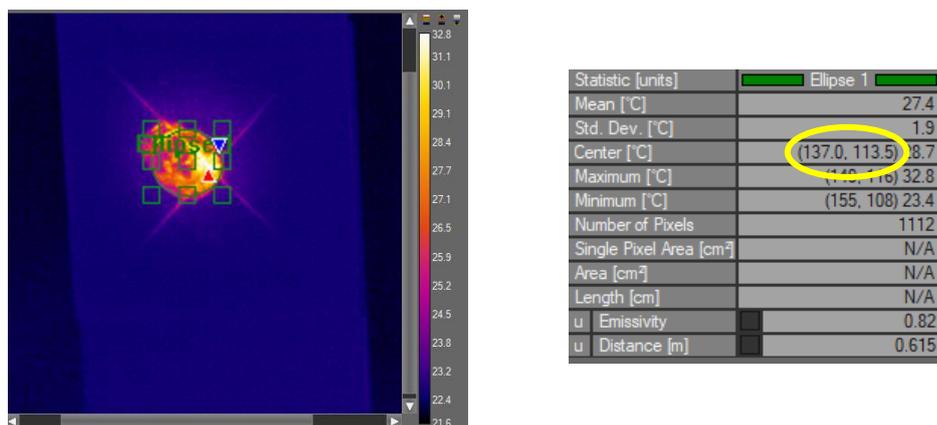


Figura 97 - Individuazioni delle coordinate del centro della ROI

Tale operazione è stata eseguita per tutti i campioni in esame. I valori ottenuti sono stati poi inseriti manualmente all'interno del codice.

Per quanto riguarda la definizione della relazione pixel – millimetri è stata seguita la seguente procedura:

1. all'interno del software ResearchIR è stata creata una ROI di tipo segmento che collega le estremità gli spigoli del segmento del campione, come mostrato in Figura 98;

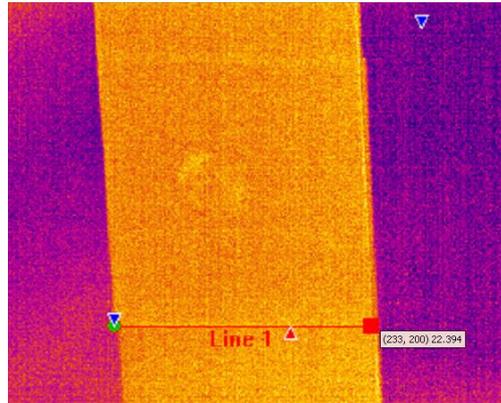


Figura 98 - Ottenimento delle coordinate degli estremi del segmento

2. salvataggio delle coordinate (x e y) dei due estremi del segmento;
3. è stata scritta la relazione di proporzionalità che consente di ottenere la lunghezza in pixel del diametro dell'impronta di 6 mm, tramite la formula:

$$\Phi_{pixel} [pixel] = \sqrt{\frac{x_2 + x_1}{y_2 + y_1}} [pixel] * \frac{6 [mm]}{30 [mm]} \quad (20)$$

dove 30 mm è la larghezza dei campioni Fronte;

4. calcolo della lunghezza del lato del quadrato inscritto nella circonferenza, tramite la formula:

$$l = \frac{\Phi_{pixel}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

5. ripetizione dei passaggi da 1 a 4 per ogni campione.

Per i pannelli invece, poiché non era possibile utilizzare come riferimento alcuna geometria nota, è stato invece posizionato del nastro adesivo nero. Nota la larghezza del nastro pari a 11,8 mm, è stata ripetuta la procedura definita per la serie Fronte, andando a sostituire il valore di 11,8 all'interno della formula ADF.

Le dimensioni ottenute per i campioni Fronte variano tra 21,8 e 23,3 pixel, mentre per i campioni Retro variano tra 29,2 e 29,9 pixel. Tali dimensioni in pixel definiscono anche il numero di elementi per ogni riga e colonna della sottomatrice che verrà estratta a partire dalla matrice definita nel [capitolo 3.1](#). Poiché gli elementi che definiscono le dimensioni riga-colonna devono essere dei numeri interi, i valori ottenuti sono stati opportunamente approssimati all'intero più vicino. In questo modo, per i campioni Fronte il numero di elementi che definiscono le dimensioni delle matrici variano tra 22 e 23 elementi, mentre per i campioni Retro variano tra 29 e 30 elementi. Da un'attenta analisi della variabilità delle dimensioni ottenute per i campioni

Frote, si nota che solo le dimensioni di due campioni sono arrotondate a 22 elementi (provino 2A e 2C). Per questo motivo si è deciso di utilizzare anche per questi campioni una dimensione univoca di 23 elementi, ottenendo così una nuova matrice di dimensione 23x23x626. Per i campioni Retro invece, in prima analisi si è scelto di uniformare la zona di indagine con matrici di dimensioni pari 29x29x626, e in caso risultati incoraggianti si prevede di andare a personalizzare tali dimensioni per ogni target analizzato.

### 3.3 Curve di evoluzione termica nel tempo

Il primo tipo di analisi effettuate riguarda le curve di evoluzione termica nel tempo, ovvero la rappresentazione del ciclo termico che ha subito il target durante la prova.

A partire dalla matrice di dimensioni ridotte (definita alla fine del capitolo precedente) si è passati ad un vettore di dimensioni 1x626 tramite la seguente procedura: per ogni istante di tempo (e dunque definito l'indice Z che varia da 1 a 626) è stata effettuata la media degli elementi racchiusi nell'area di indagine (ovvero gli elementi di coordinate X e Y, che variano da 1 a 23 per i campioni e tra 1 e 29 per i campioni Retro). Al fine di rendere più chiaro il concetto, nella Figura 99 viene proposta una rappresentazione schematica del processo appena descritto.

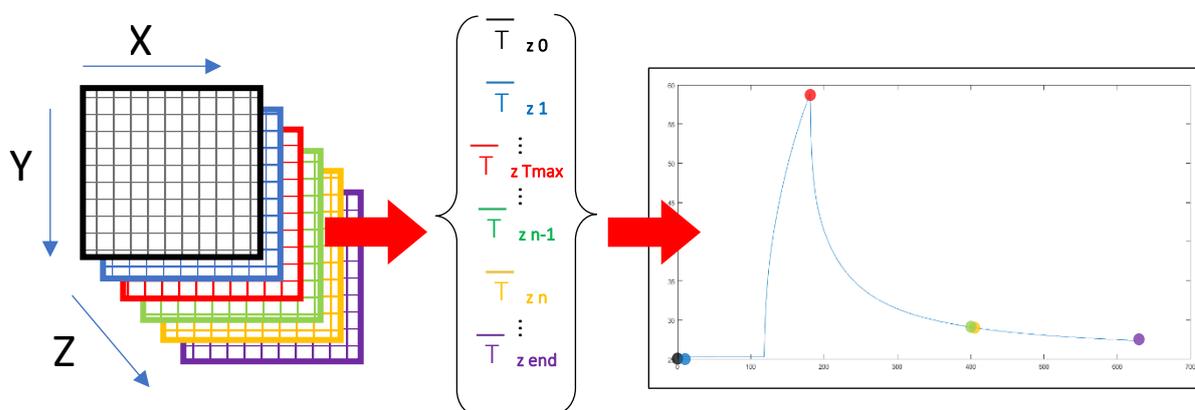


Figura 99 - Schema del processo per la creazione delle curve di evoluzione termica

Ogni quadrato con un diverso colore rappresenta uno specifico frame acquisito (istante di tempo). All'interno di questo quadrato sono riportati i valori di temperatura acquisiti per ogni pixel nell'istante di tempo considerato. Successivamente è stata effettuata una media di tali valori, la quale è stata posizionata all'interno di un vettore. Tale operazione è stata effettuata per ogni istante di tempo acquisito (per ogni quadrato colorato). In linguaggio di programmazione, ogni quadrato rappresenta la matrice X-Y che viene estratta fissando un valore di Z compreso tra 1 e 626. È stata successivamente calcolata la media degli elementi che compongono tale matrice che è stata poi inserita all'interno di un vettore 1x626, nella posizione relativa all'istante di tempo considerato.

I risultati mediati di temperatura così ottenuti sono stati poi diagrammati in funzione del numero di frame. Poiché la frequenza di acquisizione della termocamera è di 125.57 Hz, in linea di massima ogni 125 frame trascorre un secondo (tra un frame e l'altro trascorrono circa 0,008 sec).

Per quanto riguarda i grafici ottenibili da questo tipo di analisi, è stato scelto di non diagrammare tutti e trenta i campioni che costituiscono ogni serie, in modo da non appesantire la lettura dei diagrammi stessi. A titolo di esempio verranno riportate solo le curve ottenute dalle ripetizioni B di ogni serie.

Poiché, come accennato all'interno del [capitolo 2.3.2](#), è stata calcolata l'emissività secondo diversi criteri, saranno riportati i risultati ottenuti nel seguente ordine:

- Campioni Fronte:
  - Emissività a  $T_{amb}$ ;
  - Emissività a  $T_{amb}$  mediata sui pannelli;
  - Emissività a  $T=50^{\circ}C$  mediata sui pannelli;
- Campioni Retro:
  - Emissività a  $T_{amb}$ .

○ Campioni Fronte: emissività a  $T_{amb}$

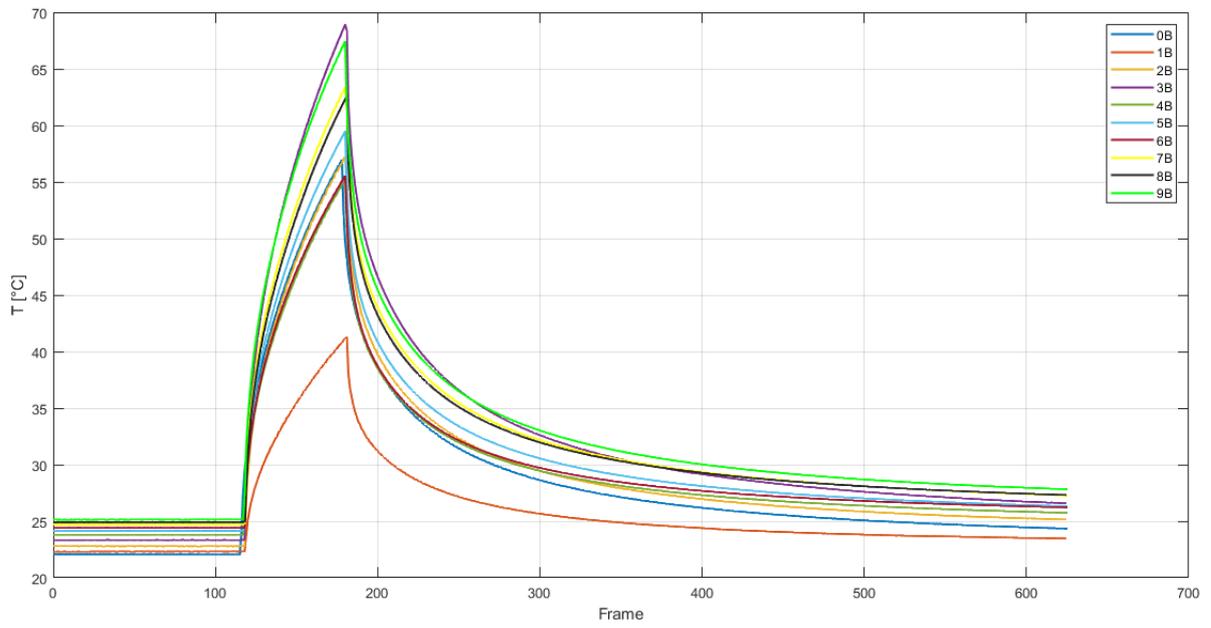


Figura 100 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

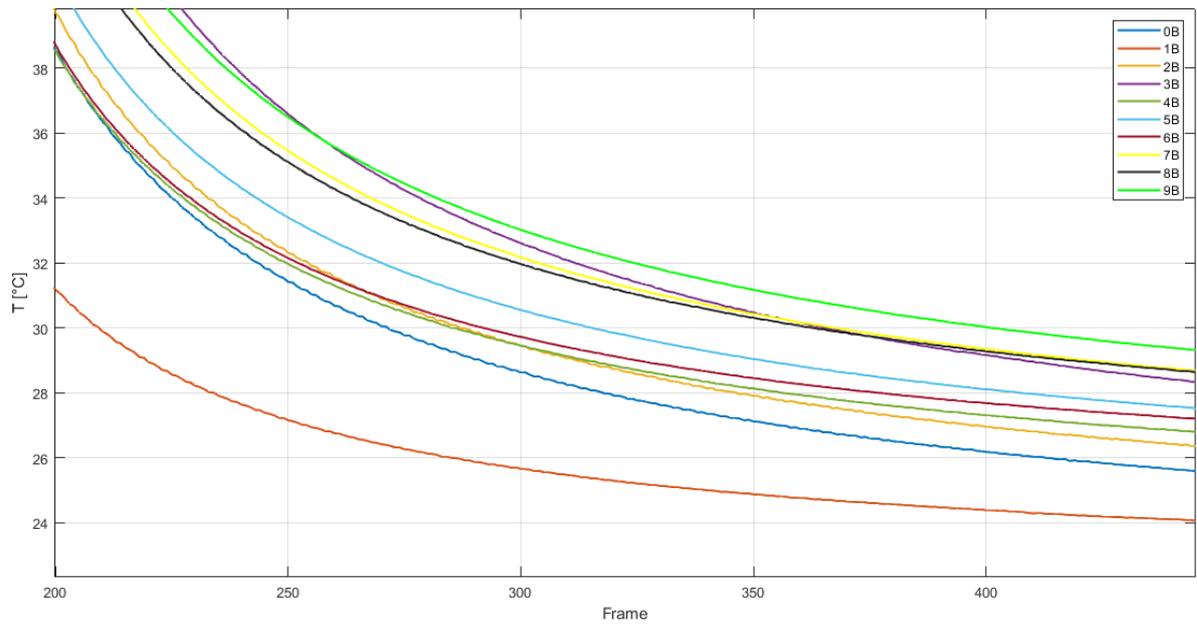


Figura 101 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

○ Campioni Fronte: emissività a  $T_{amb}$  mediata sui pannelli

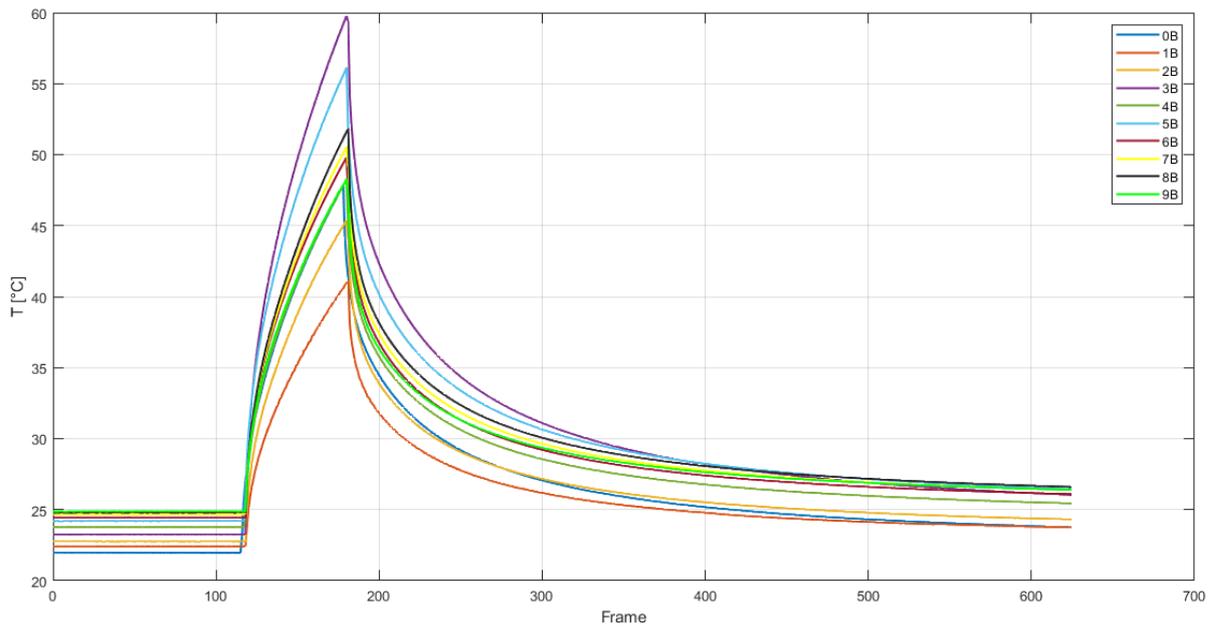


Figura 103 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

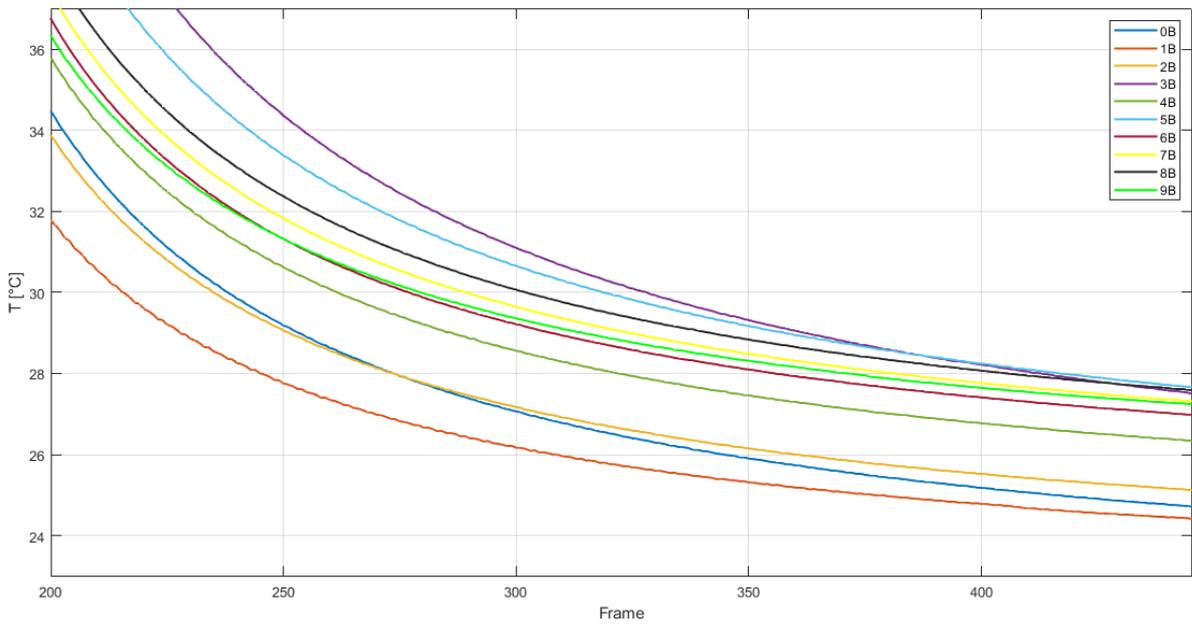


Figura 102 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

- Campioni Fronte: emissività a  $T=50^{\circ}\text{C}$  mediata sui pannelli

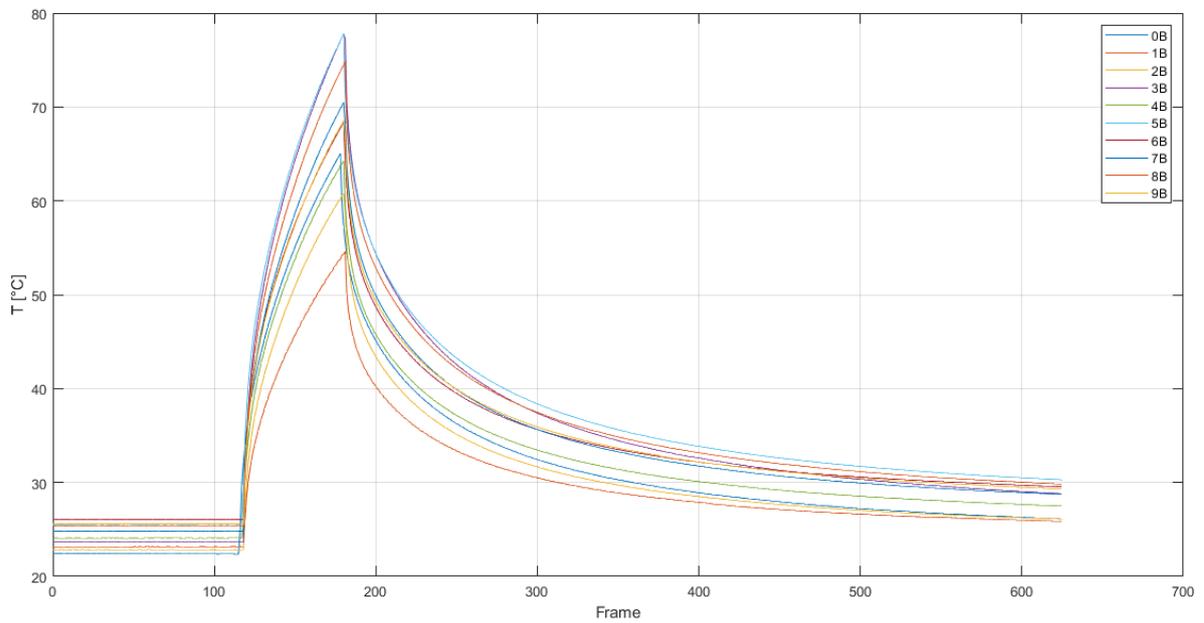


Figura 105 - Curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T=50^{\circ}\text{C}$

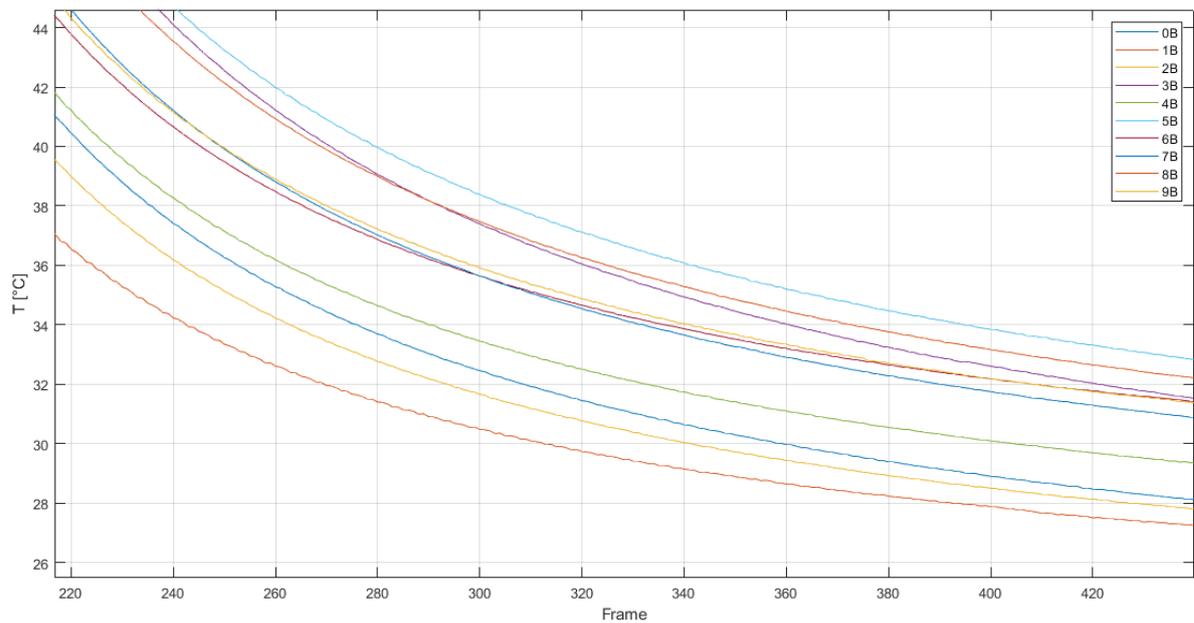


Figura 104 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T=50^{\circ}\text{C}$

Con riferimento a tutti i risultati ottenuti per i campioni Fronte, è difficile apprezzare, qualora esistesse, una particolare tendenza del comportamento dei provini all'aumentare nel numero di saldature effettuate (ovvero guardare in sequenza le curve dalla 0B fino alla 9B).

○ Campioni Retro: emissività  $T_{amb}$

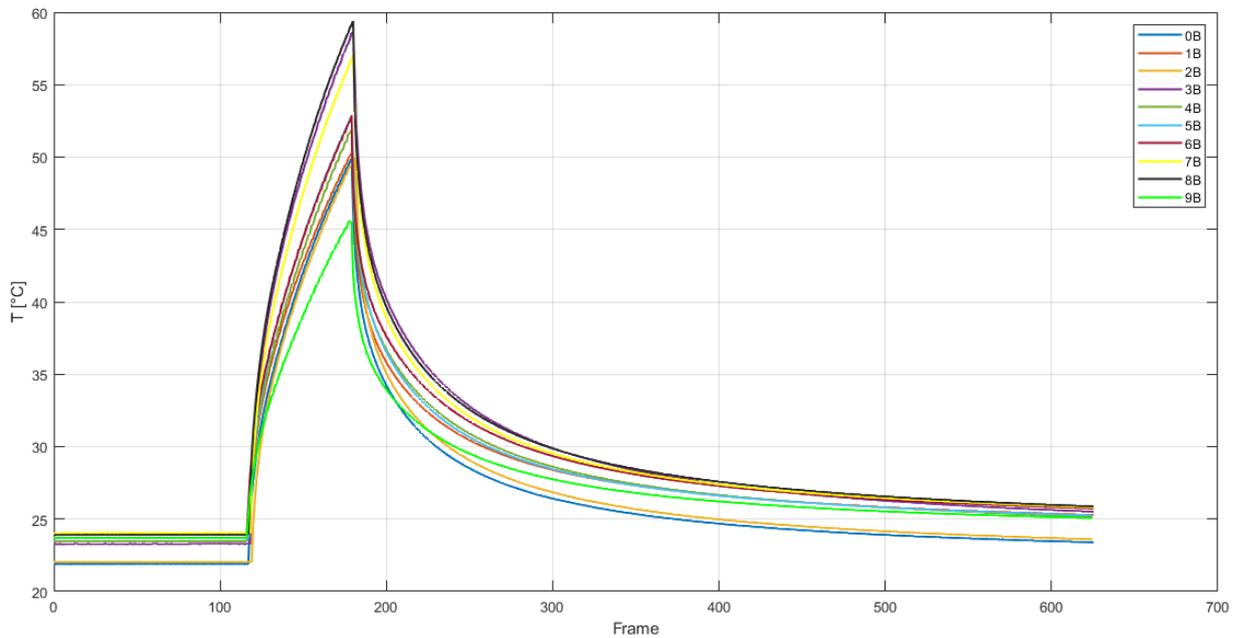


Figura 106 - Curve di evoluzione termica per i campioni Retro con emissività a  $T_{amb}$

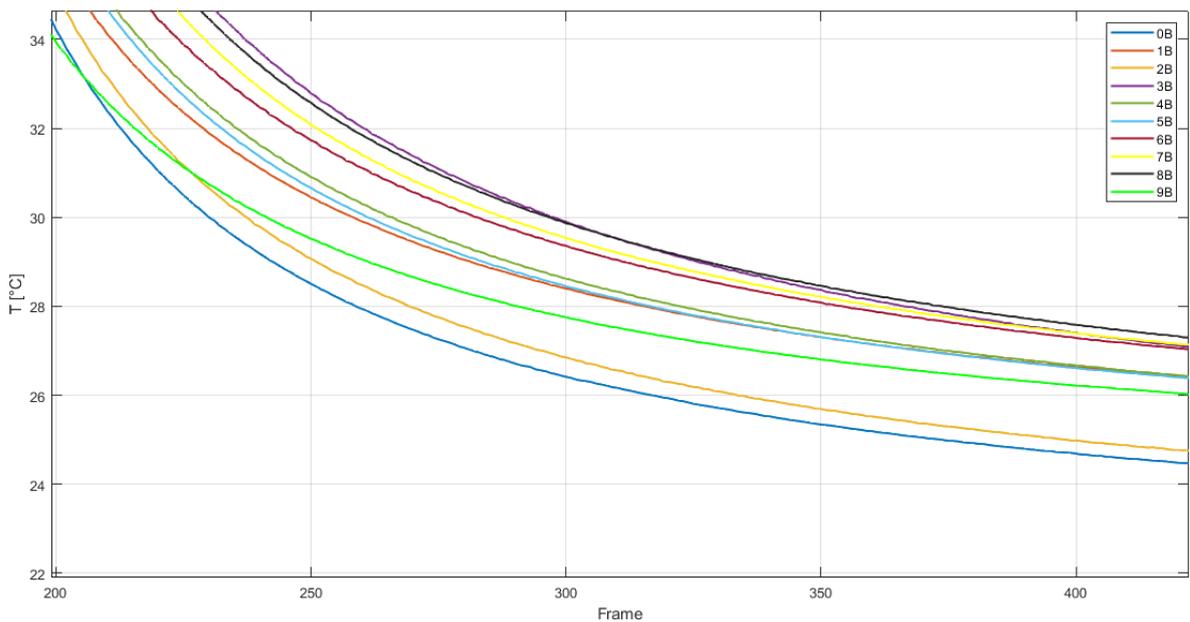


Figura 107 - Ingrandimento curve di evoluzione termica per i campioni Retro con emissività a  $T_{amb}$

Anche per i campioni Retro non si riesce ad apprezzare una particolare tendenza nel comportamento termico dei vari campioni.

Dati i risultati poco promettenti ottenuti finora, è stato deciso di normalizzare le curve ottenute: a partire dai vettori costruiti per ogni prova, questi sono stati divisi per il valore massimo registrato all'interno del vettore stesso. A titolo di esempio, nella fiasdk sono riportati i risultati

ottenuti dalla normalizzazione dei grafici ottenuti per i campioni Fronte con emissività ottenuta a temperatura ambiente, mentre nella rfaahd sono riportati i risultati ottenuti per i campioni Retro.

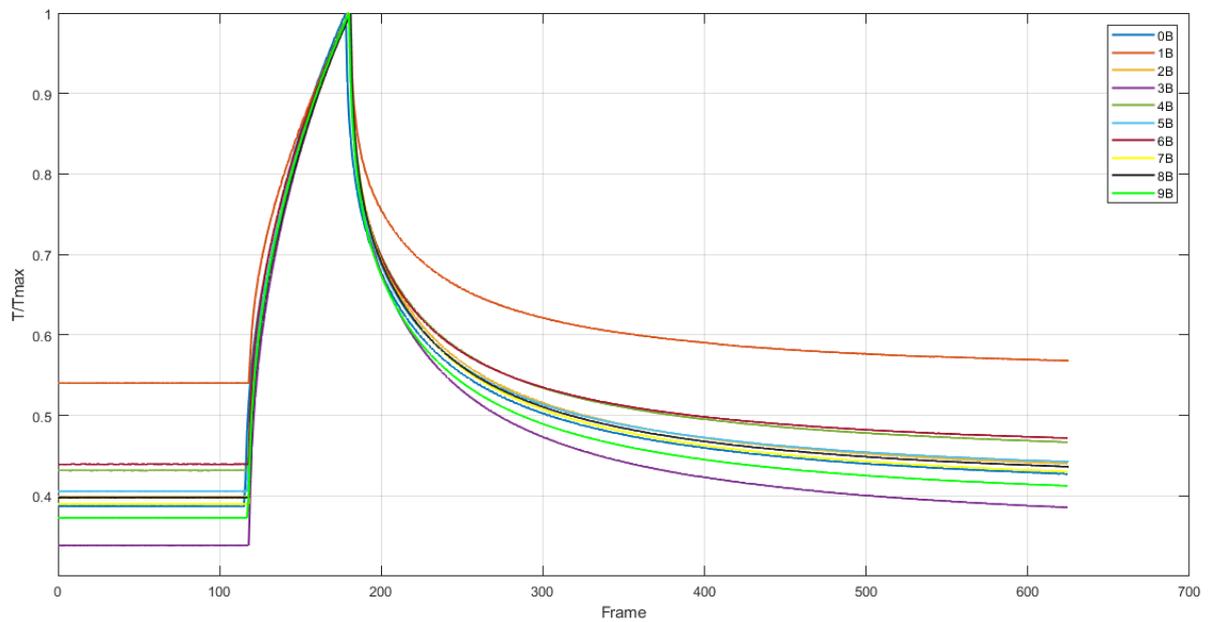


Figura 108 – Esempio di curve di evoluzione termica normalizzate per i campioni Fronte

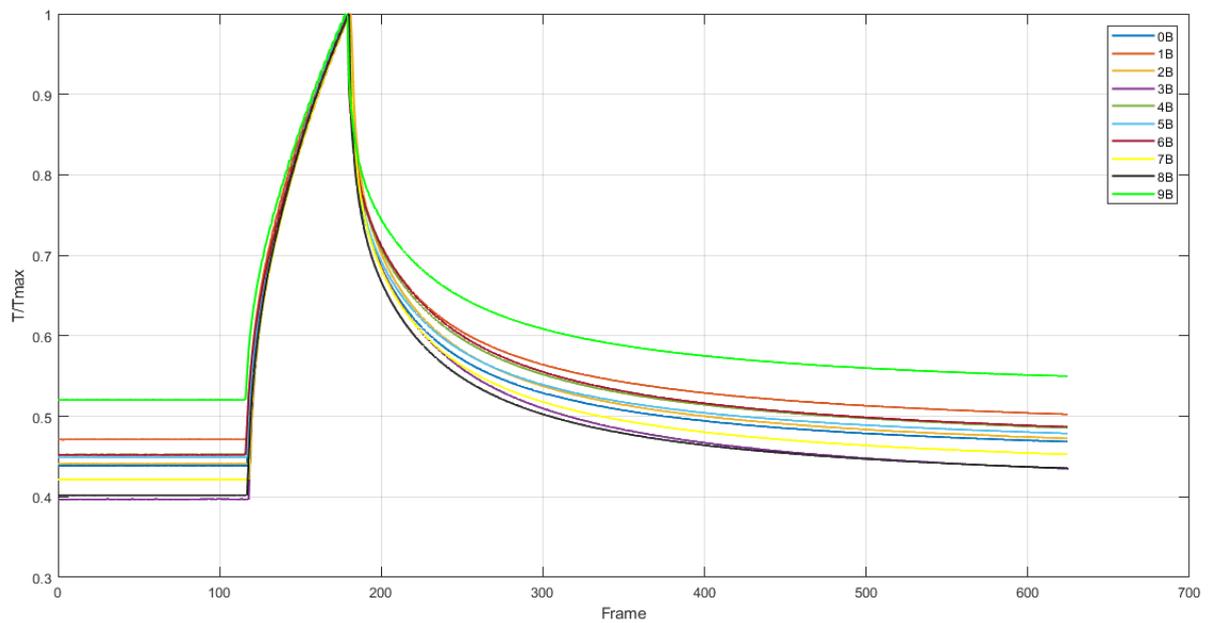


Figura 109 – Esempio di curve di evoluzione termica normalizzate per i campioni Retro

Purtroppo, anche in questo caso l'analisi non riesce a far risaltare alcun tipo di risultato promettente.

### 3.4 Media delle tre ripetizioni per ogni serie

Dato l'elevato numero di curve ottenute nelle analisi precedenti (trenta per ogni serie) risulta difficile estrapolare possibili evoluzioni nel comportamento dei campioni al variare del numero di punti di saldatura realizzati. Per ridurre il numero di curve diagrammate, si decide di effettuare una media delle tre ripetizioni per ogni serie. La sequenza di operazioni necessarie ad ottenere tale risultato è la seguente:

1. Costruzione dei tre vettori che costituiscono la singola serie, così come è stato definito nel capitolo precedente;
2. Calcolo della media delle tre ripetizioni che costituiscono la singola serie, in ogni istante di tempo;
3. Ripetizione dei passaggi 1 e 2 per ogni serie da 0 a 10, sia per i campioni Fronte che per i campioni Retro.

Nella Figura 110 è riportato in maniera grafica il passaggio dalla fase 1 alla 2. Dopo aver costruito le curve (e dunque i tre vettori) delle tre ripetizioni della serie 0 (0A, 0B e 0C) si è calcolata la media della serie 0 e diagrammato il risultato ottenuto.

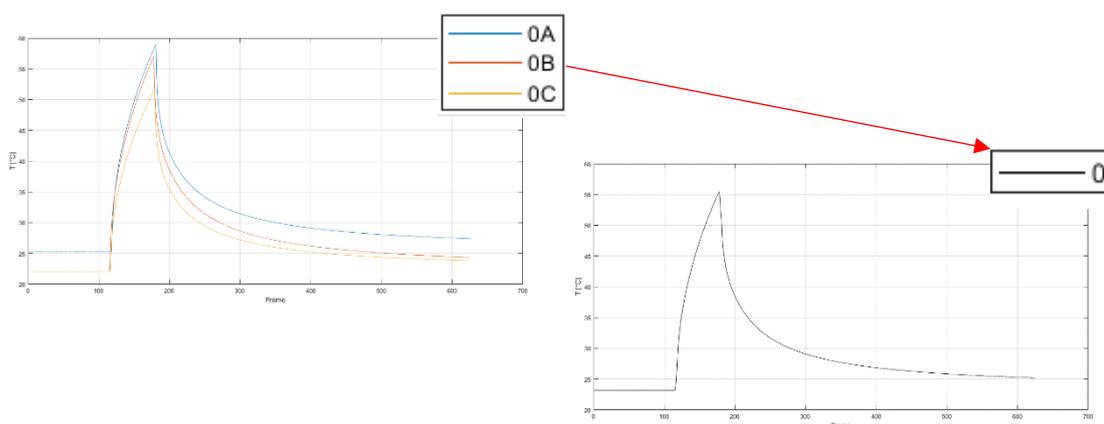


Figura 110 - Schema della procedura utilizzata per ottenere la media delle tre ripetizioni per ogni serie

Tramite questa sequenza di operazioni sono state ottenute dieci curve in totale, sia per i campioni Fronte che Retro. Di seguito saranno riportati i risultati ottenuti, seguendo lo schema adottato nel capitolo precedente e che riporteremo per facilità di lettura:

- Campioni Fronte:
  - Emissività a  $T_{amb}$ ;
  - Emissività a  $T_{amb}$  mediata sui pannelli;
  - Emissività a  $T=XtrasX^{\circ}C$  mediata sui pannelli;
- Campioni Retro:
  - Emissività a  $T_{amb}$ .

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$

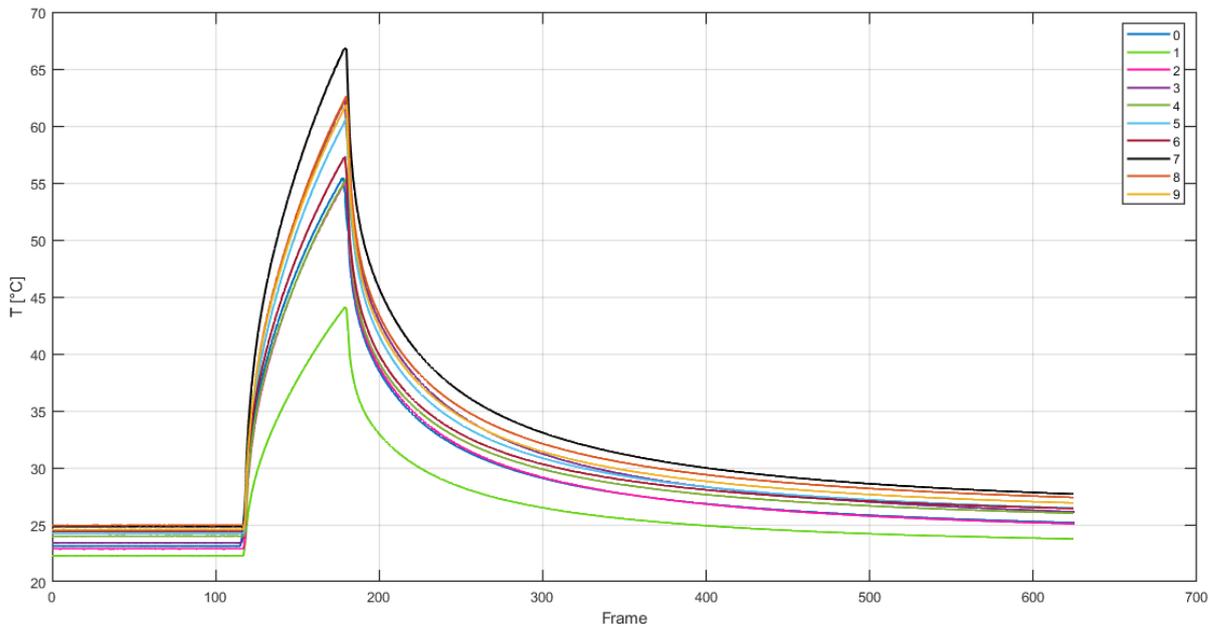


Figura 111 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

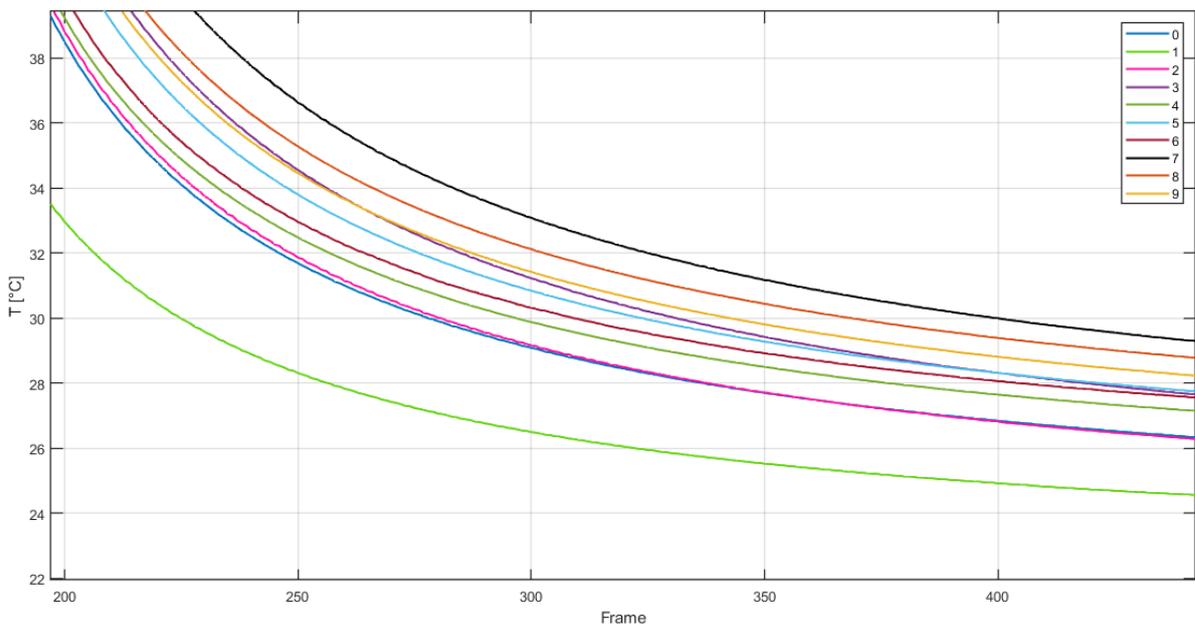


Figura 112 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

Osservando attentamente le varie curve, si può notare una tendenza della temperatura massima che cresce a partire dalla serie 1 fino a raggiungere dei valori massimi intorno alla serie 7, per poi decrescere. Nulla ancora si può dire per i tratti di raffreddamento, di difficile interpretazione tramite questi grafici.

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$  mediata sui pannelli

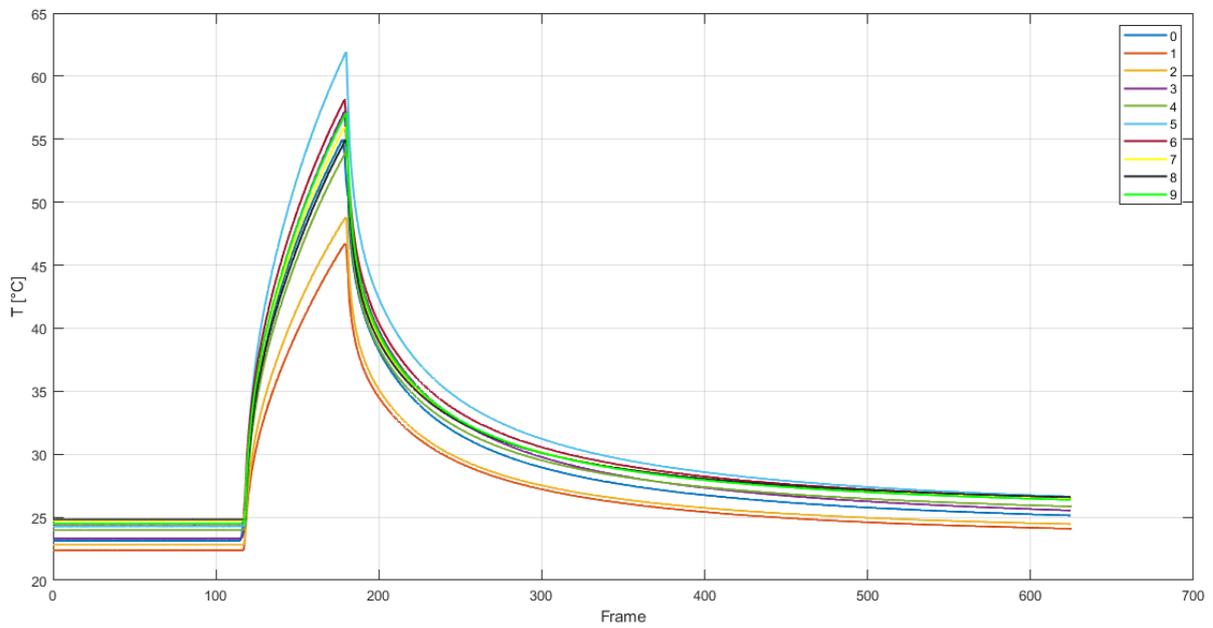


Figura 114 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

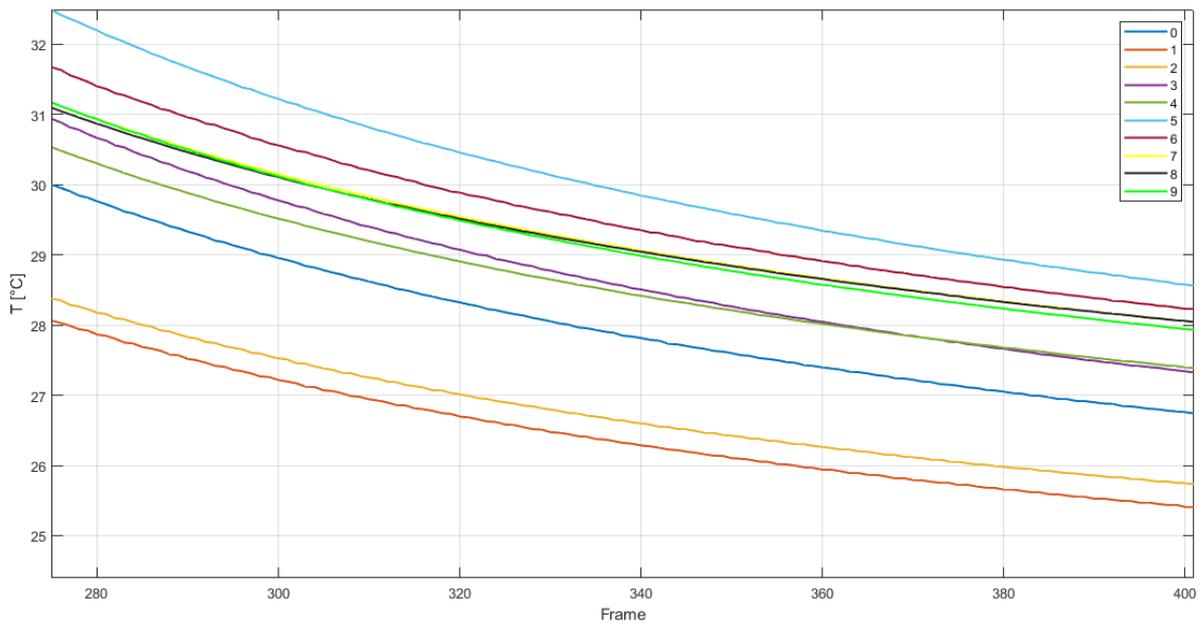


Figura 113 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

Anche in questo caso si può notare una tendenza crescente del valore di temperatura massima per poi decrescere. A differenza dell'analisi precedente però, sembrerebbe che l'inversione di tendenza avvenga in corrispondenza della serie 5.

○ Campioni Fronte: emissività  $T = 50^{\circ}\text{C}$  mediata sui pannelli

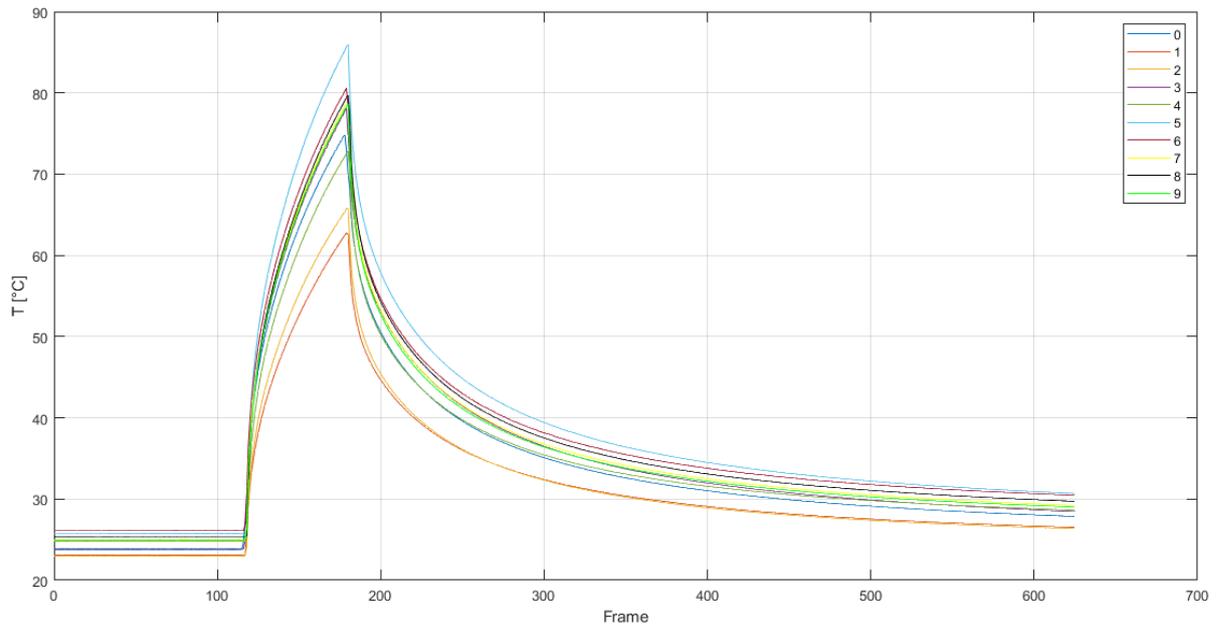


Figura 116 - Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T=50^{\circ}\text{C}$

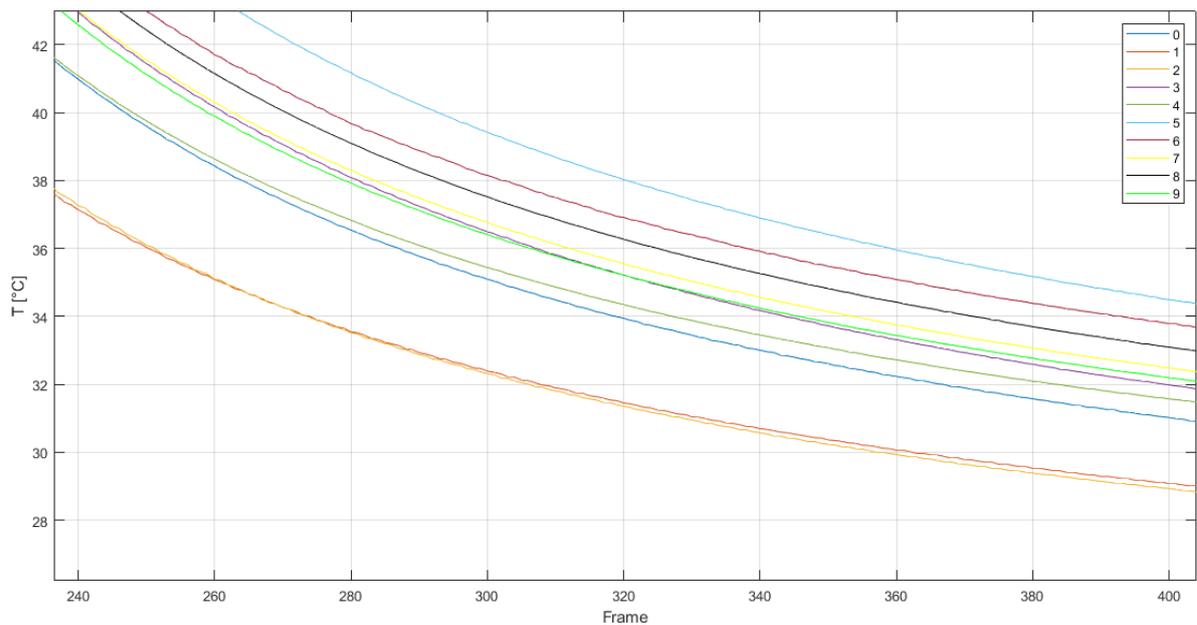


Figura 115 - Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T=50^{\circ}\text{C}$

I risultati ottenuti in quest'ultima analisi per i campioni Fronte è in accordo con i risultati ottenuti nella precedente analisi effettuata mediando l'emissività sui pannelli e ottenuta a temperatura ambiente.

I risultati ottenuti per i campioni Fronte mediante questa analisi offrono un primo spunto su un possibile comportamento dei campioni analizzati, che meritano ulteriori analisi e approfondimenti.

○ Campioni Retro: emissività  $T_{amb}$

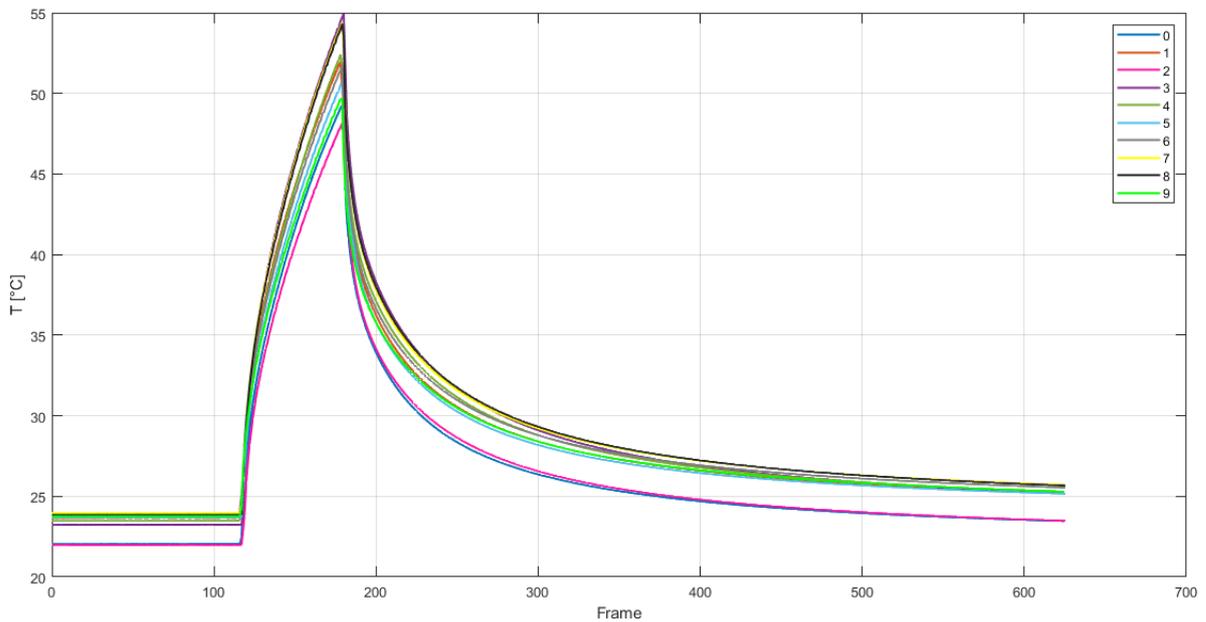


Figura 117 -Media delle 10 serie dei campioni Retro con emissività a  $T_{amb}$

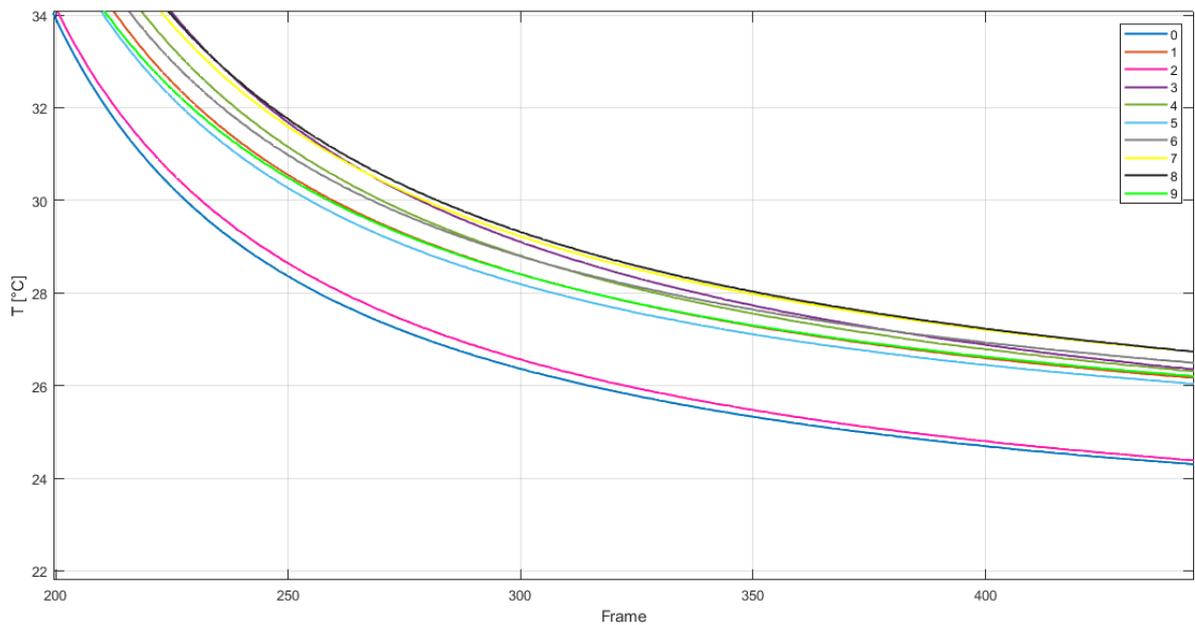


Figura 118 -Ingrandimento Media delle 10 serie dei campioni Retro con emissività a  $T_{amb}$

A differenza dei campioni Fronte, è difficile estrapolare visivamente qualsiasi tipo di andamento per i campioni Retro. Data la scarsa qualità dei risultati ottenuti si è deciso di interrompere le analisi dei campioni Retro a partire da questo momento.

Tale scelta non vuole però escludere possibile analisi future per campioni analizzati dal retro. Il consiglio è quello di effettuare le analisi sia sul fronte che sul retro degli stessi campioni, al fine di poter comparare i risultati ottenuti tra loro (cosa che non è stato possibile effettuare in tale lavoro di tesi).

### 3.5 Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento - $T_{max}$

I risultati promettenti ottenuti a seguito delle analisi descritte nel capitolo precedente hanno reso possibile le analisi più dettagliate che verranno proposte a partire da qui fino al [capitolo 3.7](#). In particolare, si cercherà di individuare delle caratteristiche comuni a tutte le curve, e di studiarne la loro variabilità in funzione del numero di punti di saldatura effettuati. In questo modo verranno costruiti dei grafici a dispersione, nei quali verranno riportati i valori relativi alla grandezza individuata per tutti e trenta i provini dei campioni Fronte.

La prima caratteristica della curva analizzata è legata all'istante in cui si raggiunge la temperatura massima durante la prova. Si riporta di seguito il processo utilizzato per quest'analisi:

1. Costruzione del vettore come descritto nel [capitolo 3.3](#);
2. Individuazione dell'istante temporale nel quale si raggiunge il valore mediato massimo di temperatura;
3. Rappresentazione di tale valore sul grafico a dispersione, in funzione del corrispettivo numero di saldatura a cui esso è associato;
4. Ripetizione dei passaggi da 1 a 3 per tutti i provini dallo 0A al 9C.

Nella Figura 119 viene riportato in maniera schematica il processo appena descritto. L'istante temporale nel quale viene raggiunto il valore mediato massimo è evidenziato dalla colorazione in rosso.

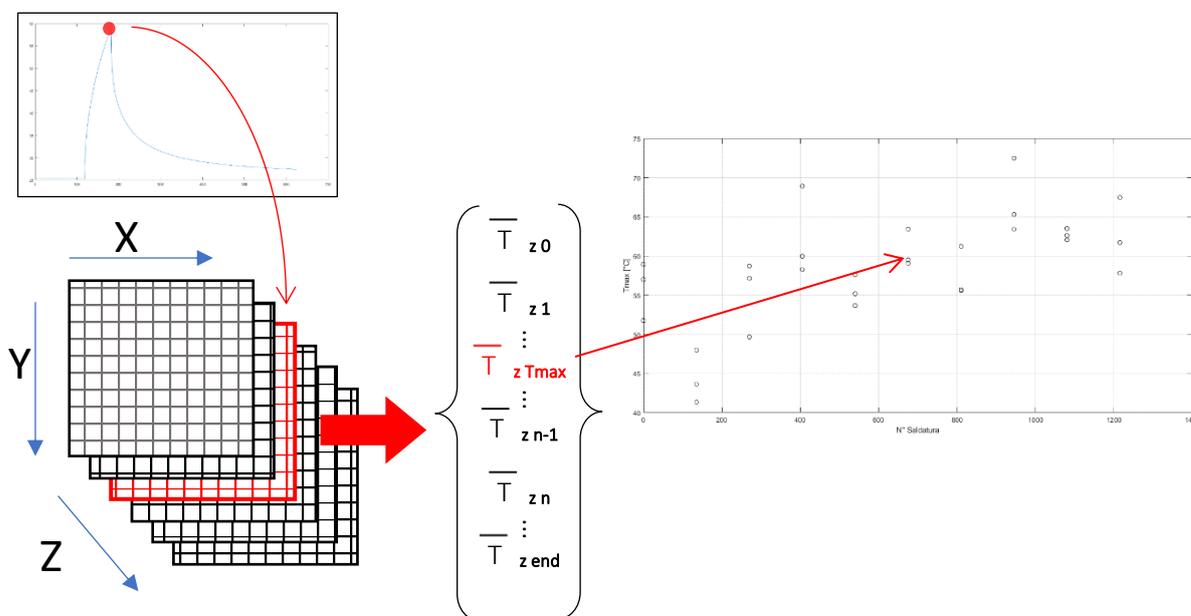


Figura 119 - Schema della procedura utilizzata per il calcolo della temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$

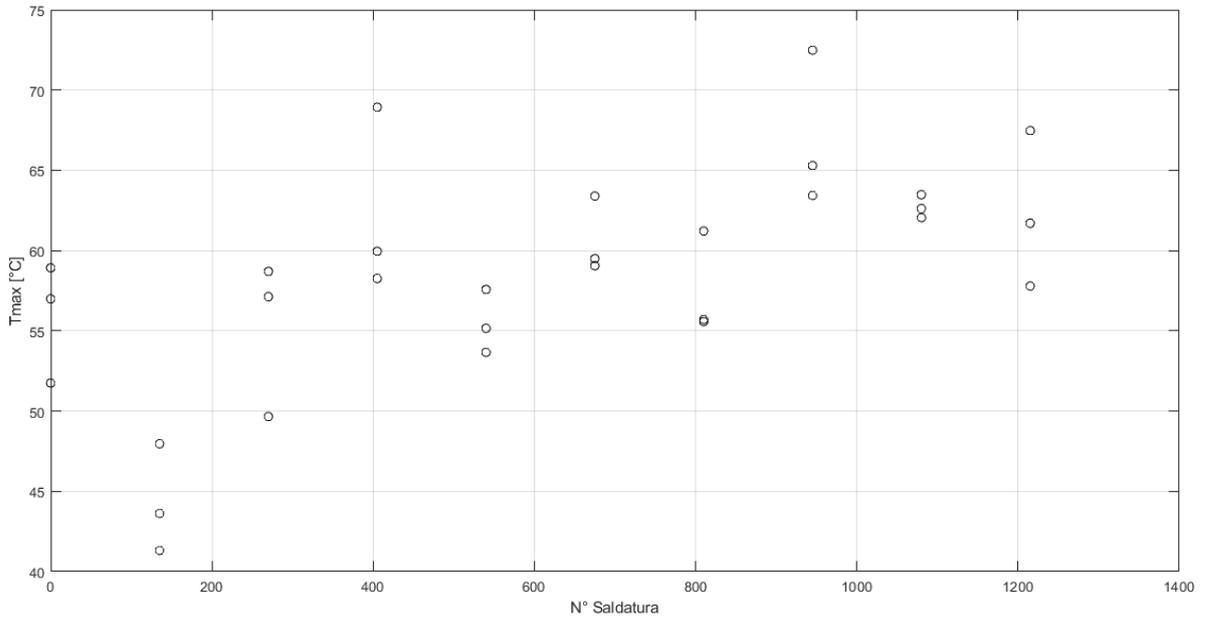


Figura 120 - Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

Come osservato nell'analisi precedente, sembra esserci una tendenza a crescere per poi decrescere del valore di temperatura massima mediata, ma non in modo lineare come ci si aspettava. Nulla può dirsi sulla dispersione dei risultati delle singole serie all'aumentare del numero di saldature.

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$  mediata sui pannelli

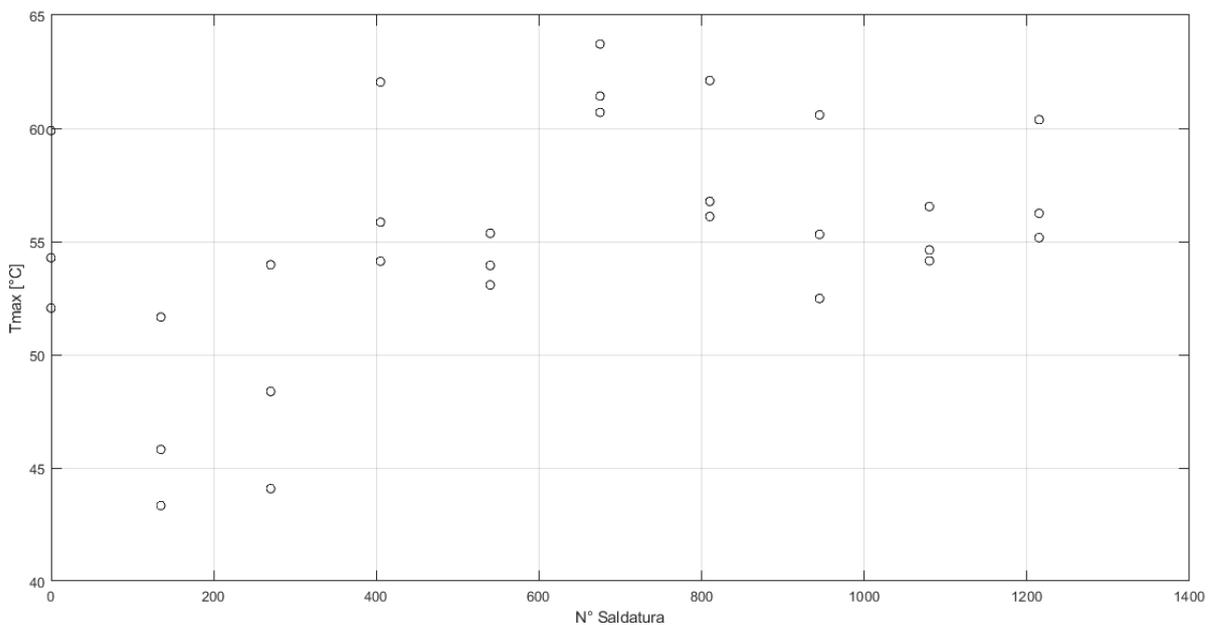


Figura 121- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

In questo caso, esclusa la serie 0 e la 9, si nota una certa tendenza della temperatura massima mediata a crescere fino alla serie 5 per poi decrescere. Anche in questo caso nulla può dirsi sulla dispersione delle singole serie all'aumentare del numero di saldature.

○ **Campioni Fronte: emissività T=50°C mediata sui pannelli**

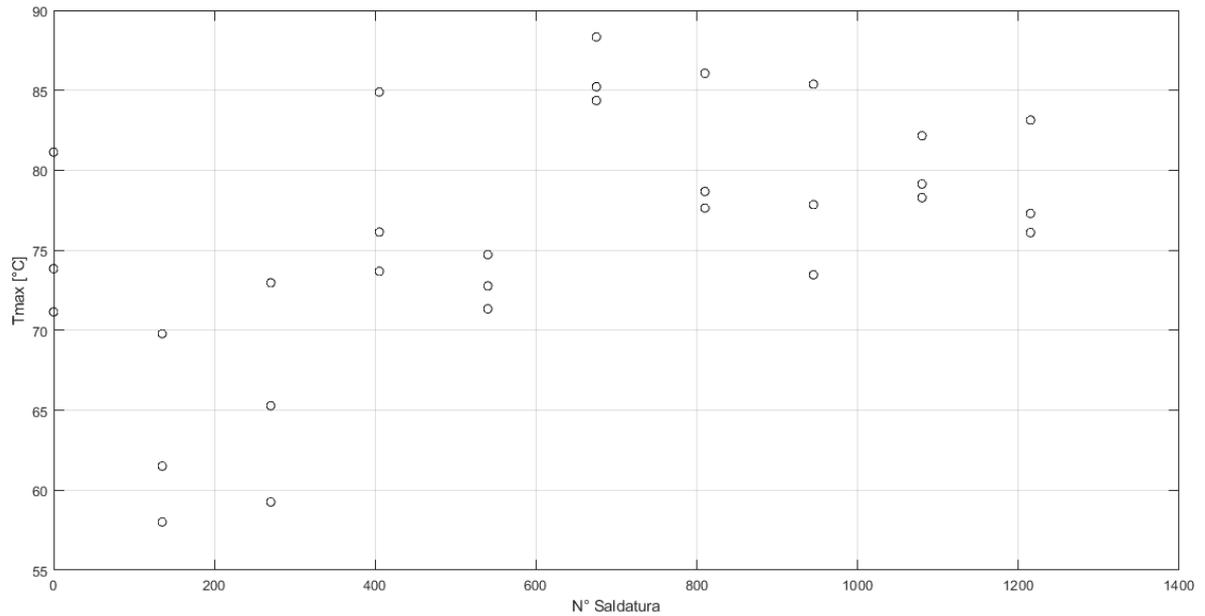


Figura 122- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

Anche in questo caso, come in quello precedente, i risultati ottenuti mostrano una tendenza che cresce (esclusa la serie 0) fino all'intervallo tra i 600 e gli 800 punti di saldatura, per poi decrescere fino alla serie 9.

### 3.6 Temperatura media della prova - $T_m$

In questa analisi, piuttosto che calcolare la media del singolo istante di fine riscaldamento, si è stato scelto di calcolare la media per un prefissato intervallo di tempo. Nello specifico è stato deciso di inglobare all'interno di questo intervallo di tempo sia il tratto di riscaldamento che quello di raffreddamento. La scelta di non considerare il tratto iniziale a temperatura ambiente ha consentito da una parte di ridurre il calcolo computazionale, e dall'altra di non avere valori mediati eccessivamente bassi. Il processo di analisi si articola come segue:

1. Costruzione della matrice come descritto nel [capitolo 3.3](#), ma escludendo i primi 118 frame acquisiti. Tale scelta è stata ottenuta in quanto la fase di eccitamento termico del target inizia a partire dal 118esimo o 119esimo frame tra i vari provini;
2. Creazione del vettore come descritto nel [capitolo 3.3](#);
3. Media di tutti gli elementi che compongono il vettore costruito al punto 2. Si passa dunque da un vettore ad uno scalare;
4. Rappresentazione di tale valore sul grafico a dispersione, in funzione del corrispettivo numero di saldatura a cui esso è associato;
5. Ripetizione dei passaggi da 1 a 4 per tutti i provini dei campioni Fronte.

Nella Figura 123 è riportato in maniera schematica il processo appena descritto. I soli frame considerati sono quelli evidenziati in verde.

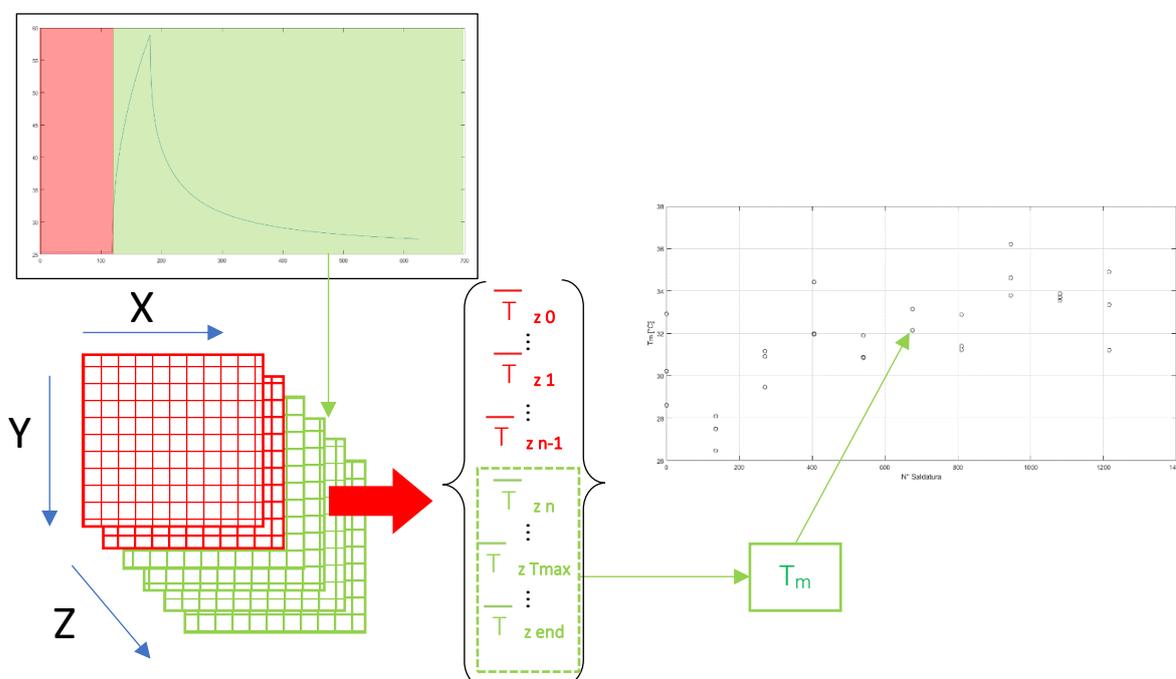


Figura 123 - Schema della procedura utilizzate per il calcolo della temperatura media della prova

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$

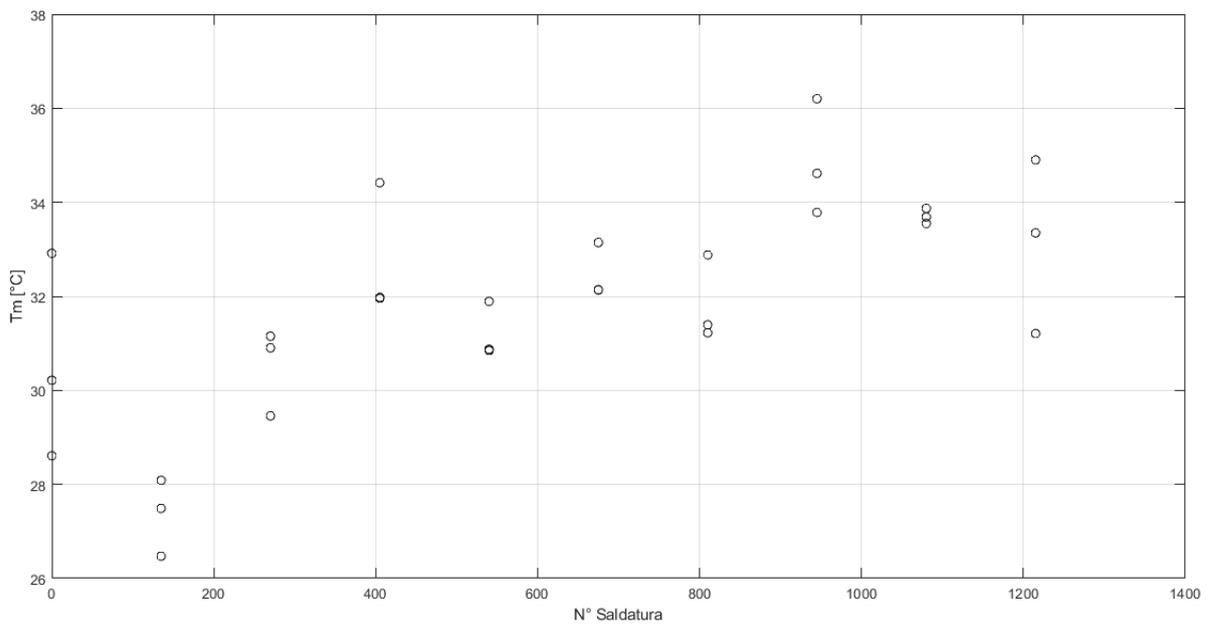


Figura 124 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività a  $T_{amb}$

I risultati ottenuti da quest'analisi rispecchiano quelli ottenuti nella precedente analisi.

○ Campioni Fronte: emissività  $T_{amb}$  mediata sui pannelli

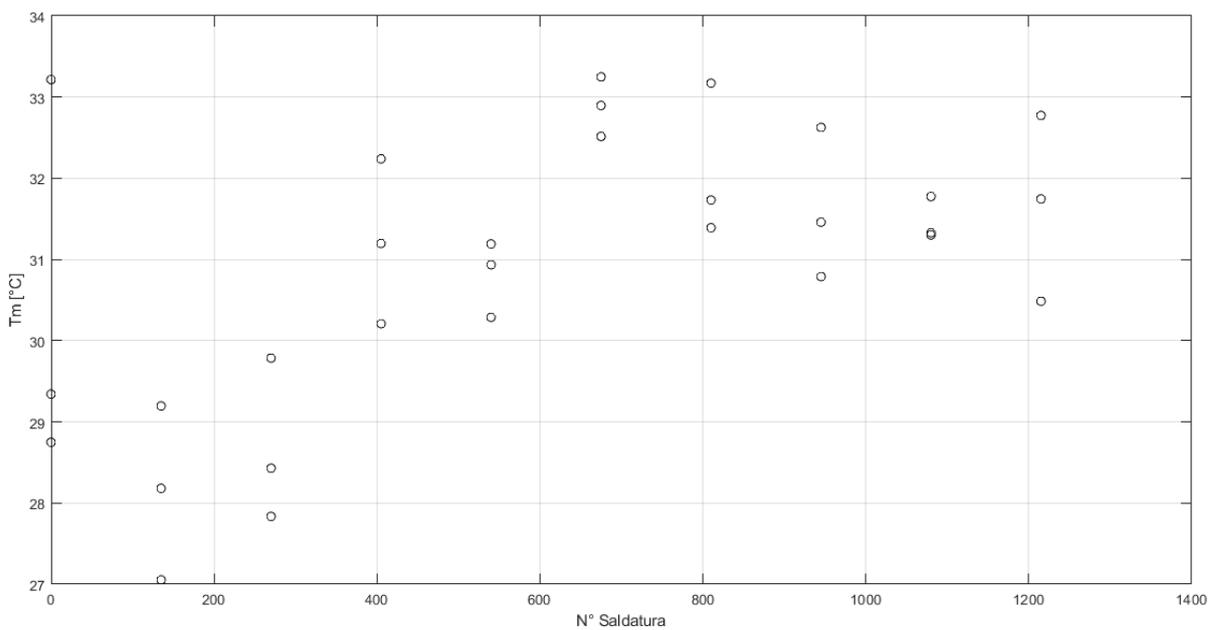


Figura 125 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T_{amb}$

In questo caso, la tendenza riscontrata dalla precedente analisi sembra inglobale in parte anche i risultati ottenuti per la serie 9. La variazione nella tendenza avviene sempre in corrispondenza della serie 5.

○ **Campioni Fronte: emissività T=50°C mediata sui pannelli**

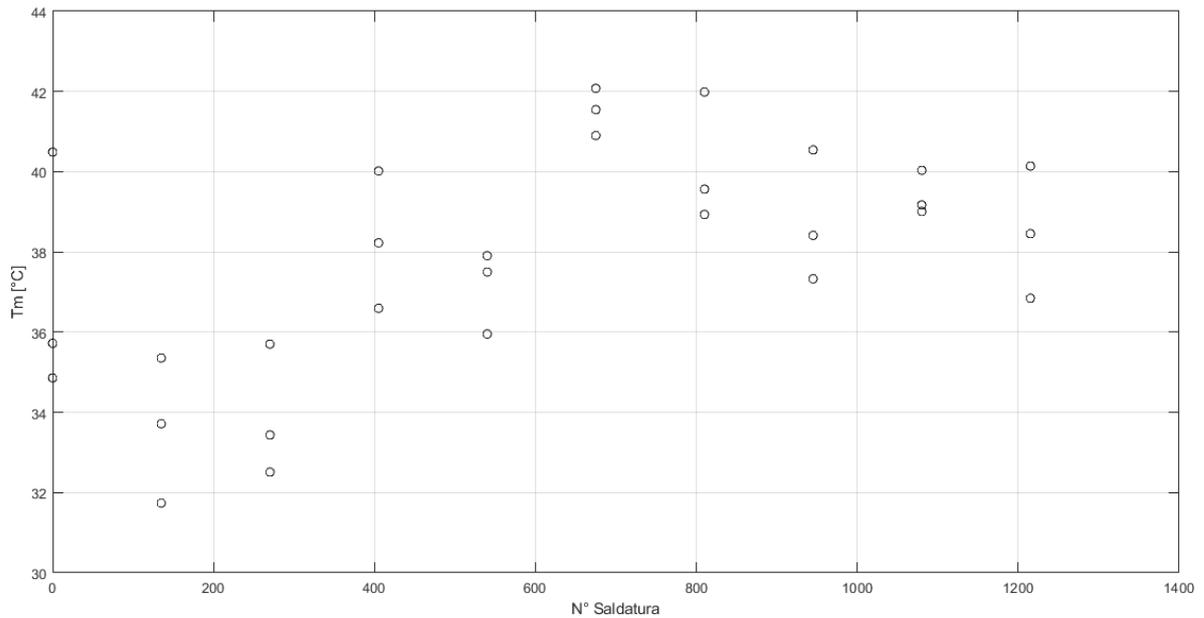


Figura 126 - Temperatura media della prova per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

I risultati ottenuti confermano la tendenza riscontrata nelle precedenti analisi.

## 3.7 Pendenza approssimata

Uno degli aspetti di maggiore interesse nelle applicazioni della termografia pulsata è lo studio del tratto di raffreddamento. Tale studio è utilizzato soprattutto per valutare la possibile presenza di difetti all'interno dei giunti saldati [30]. Nella zona in cui è presente un difetto si riscontrano profili di raffreddamento diversi dalla zona priva di difetti. Come mostrato negli articoli citati, tale studio prevede di diagrammare la parte di raffreddamento in un grafico doppio logaritmico. Prendendo spunto da tale approccio, è stata effettuata una prima analisi in cui i risultati ottenuti sono stati diagrammati come appena descritto. Per semplicità di visualizzazione vengono riportati nella Figura 127 i risultati ottenuti mediando le ripetizioni delle varie serie (in maniera analoga a quanto descritto nel [capitolo 3.4](#)).

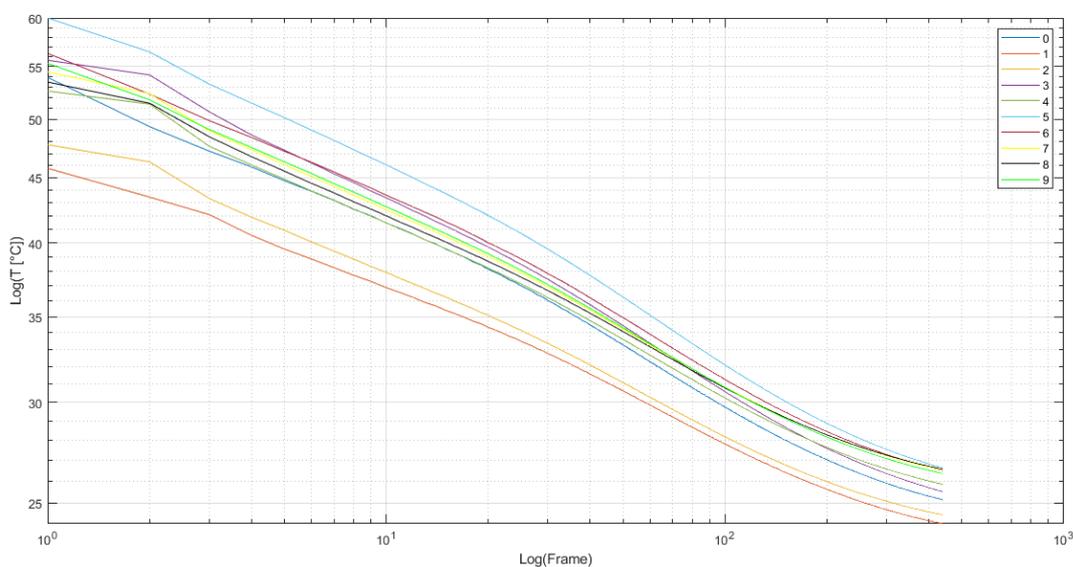


Figura 127 - Curve di raffreddamento in un diagramma log-log

Purtroppo, il grafico ottenuto non riporta informazione aggiuntive rispetto a quelle già ottenute. Per tale motivo è stato deciso di tralasciare questo tipo di analisi e di effettuarne delle nuove tramite l'utilizzo di grafici a dispersione, così come avvenuto per le precedenti analisi. In particolare, il calcolo della pendenza non è avvenuto su tutta la lunghezza del tratto di raffreddamento, ma per quattro intervalli di campionamento.

La procedura necessaria all'estrapolazione dei risultati è la seguente:

1. Ricerca del frame in cui viene raggiunto il valore massimo di temperatura,  $t_{max}$ ;
2. A partire da  $t_{max}$ , costruzione della matrice come descritto nel [capitolo 3.3](#), contenente le sole informazioni del tratto di raffreddamento;
3. Creazione di un vettore denominato 'Cooling', così come avvenuto nelle analisi precedenti;
4. A partire da  $t_{max}$  sono stati creati quattro intervalli temporali successivi, ognuno di lunghezza pari a 50 elementi (circa 0,4 s);
5. Calcolo della pendenza approssimata per ogni intervallo mediante la formula:

$$P_{tratto\ n} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta t} \quad (22)$$

1. dove:
  - $P_{tratto\ n}$ : rappresenta il valore ottenuto di pendenza, calcolata per il tratto n-imo (con n che varia tra 1 e 4);
  - $T_1$ : valore di temperatura all'istante iniziale dell'intervallo;
  - $T_2$ : valore di temperatura all'istante finale dell'intervallo (50 frame dopo il primo);
  - $\Delta t$ : lunghezza dell'intervallo di riferimento (50 frame).
6. Rappresentazione di tale valore sul grafico a dispersione, in funzione del corrispettivo numero di saldatura a cui esso è associato;
7. Ripetizione dei passaggi da 1 a 6 per tutti i provini dei campioni Fronte.

Nella Figura 128 è riportato in maniera schematica la procedura appena descritta.

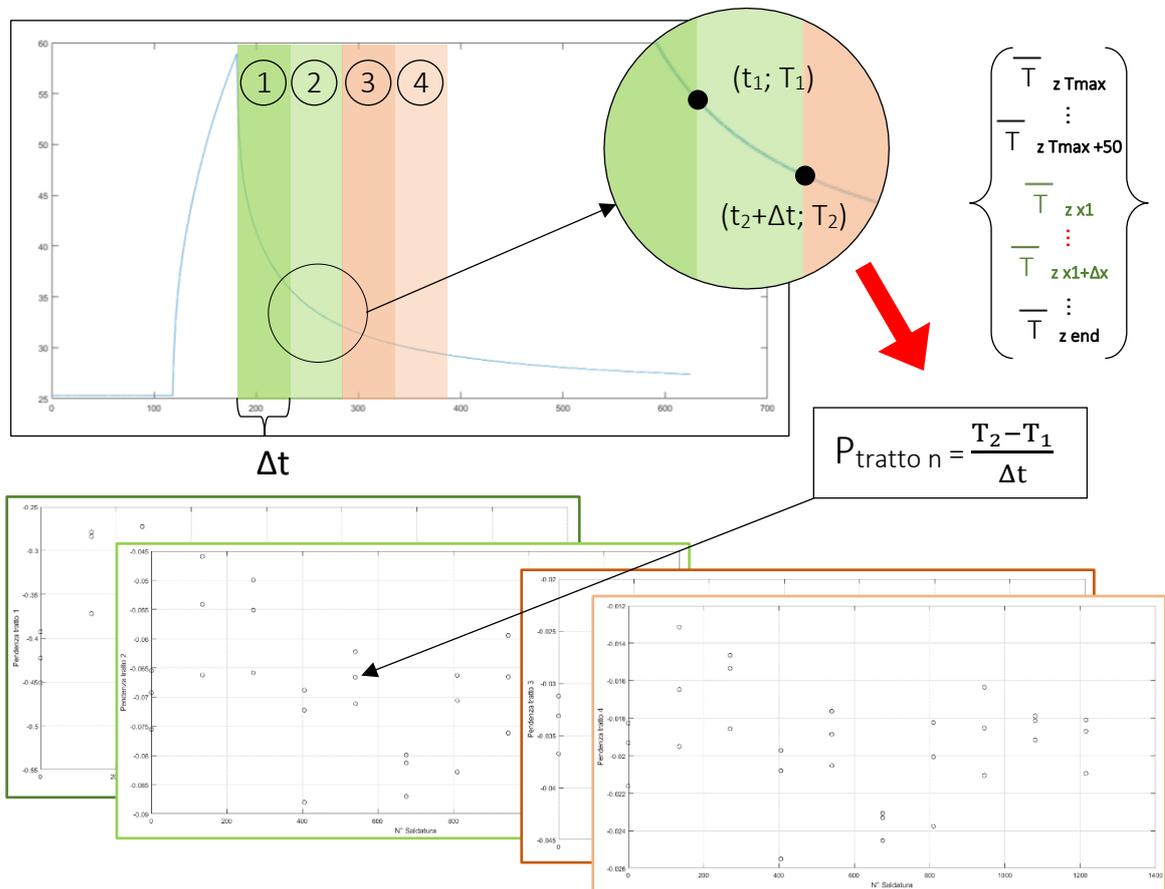


Figura 128 - Schema della procedura utilizzata per il calcolo della pendenza nel singolo intervallo di campionamento

○ Campioni Fronte: emissività Tamb

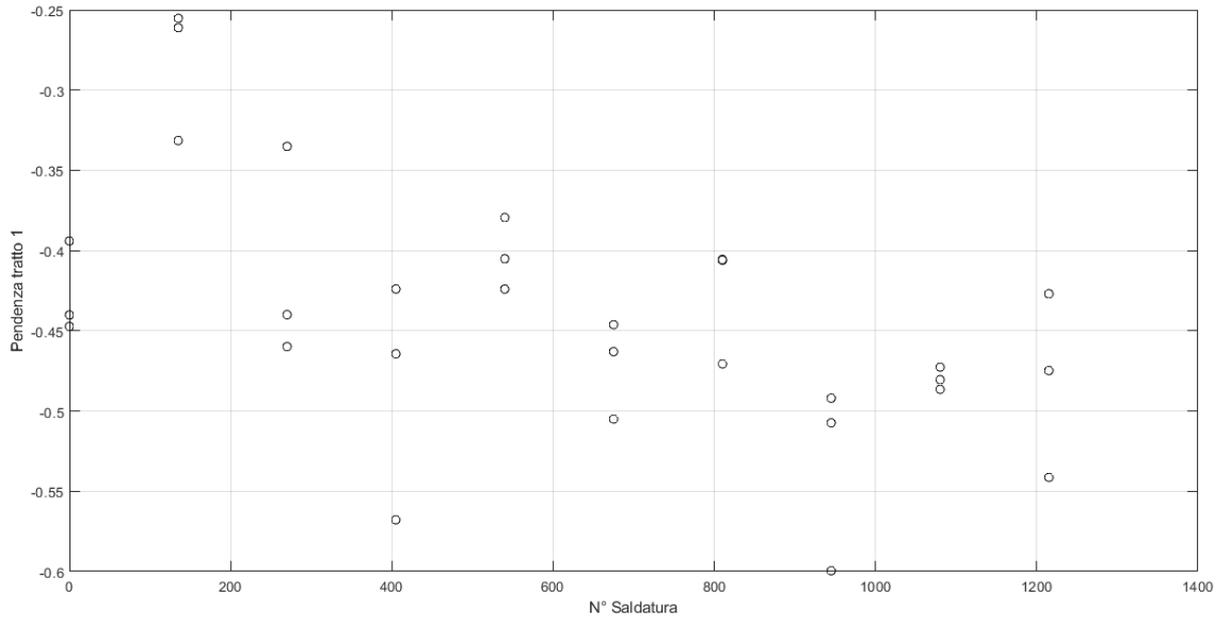


Figura 129 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività a Tamb

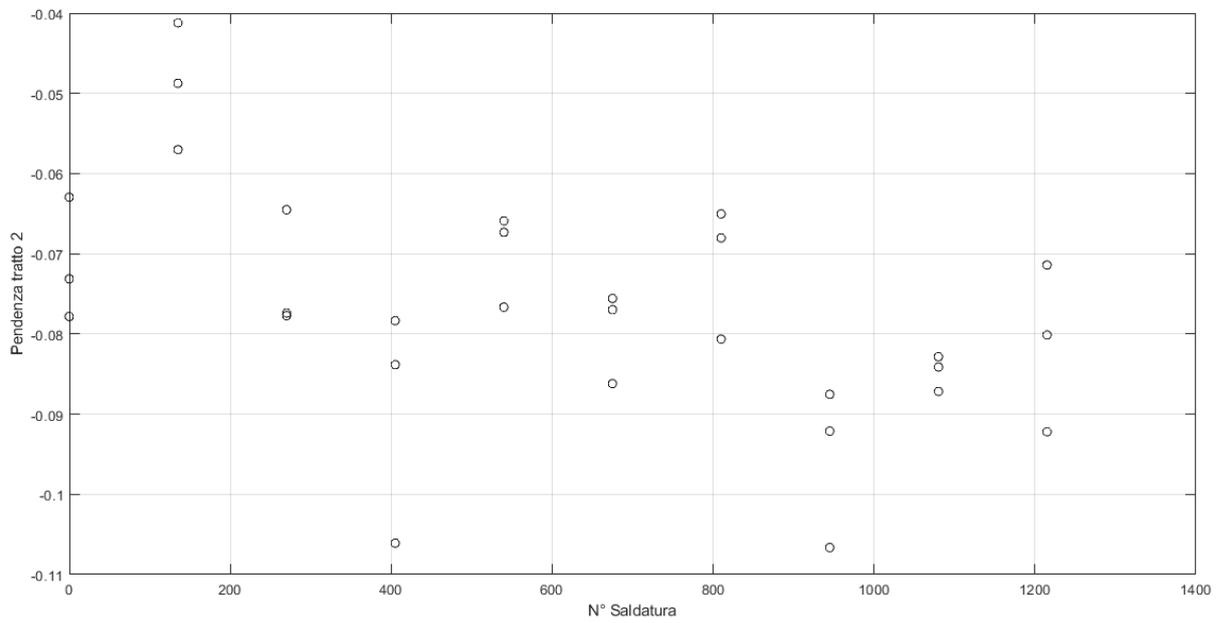


Figura 130 - Pendenza tratto 2 campioni Fronte con emissività a Tamb

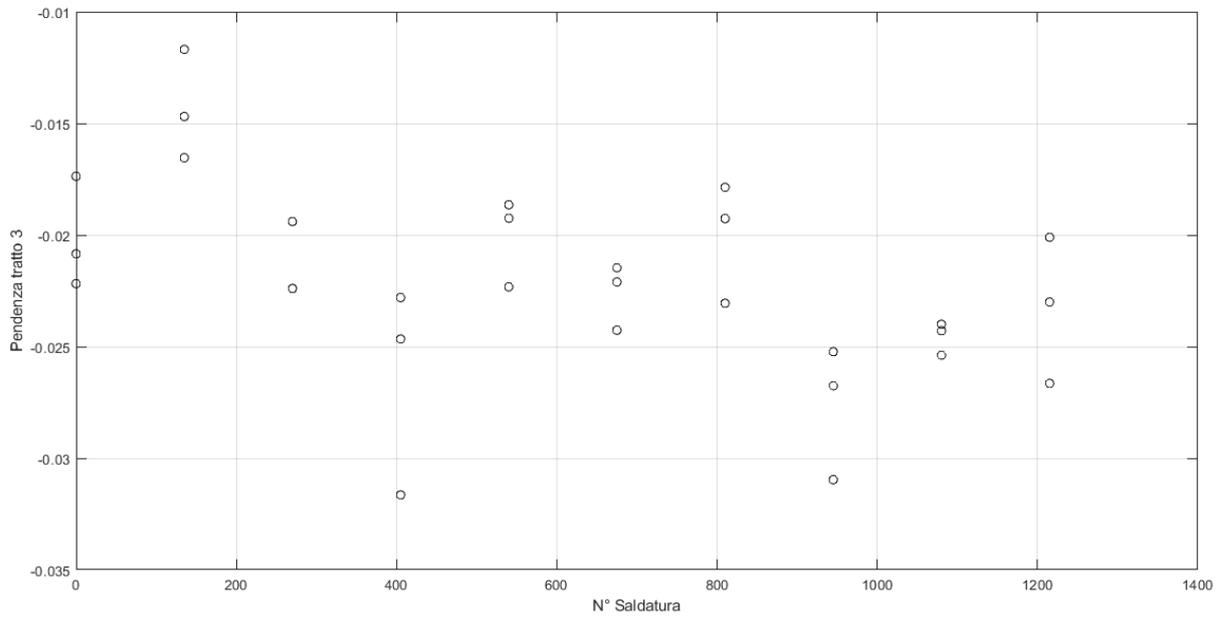


Figura 131 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività a Tamb

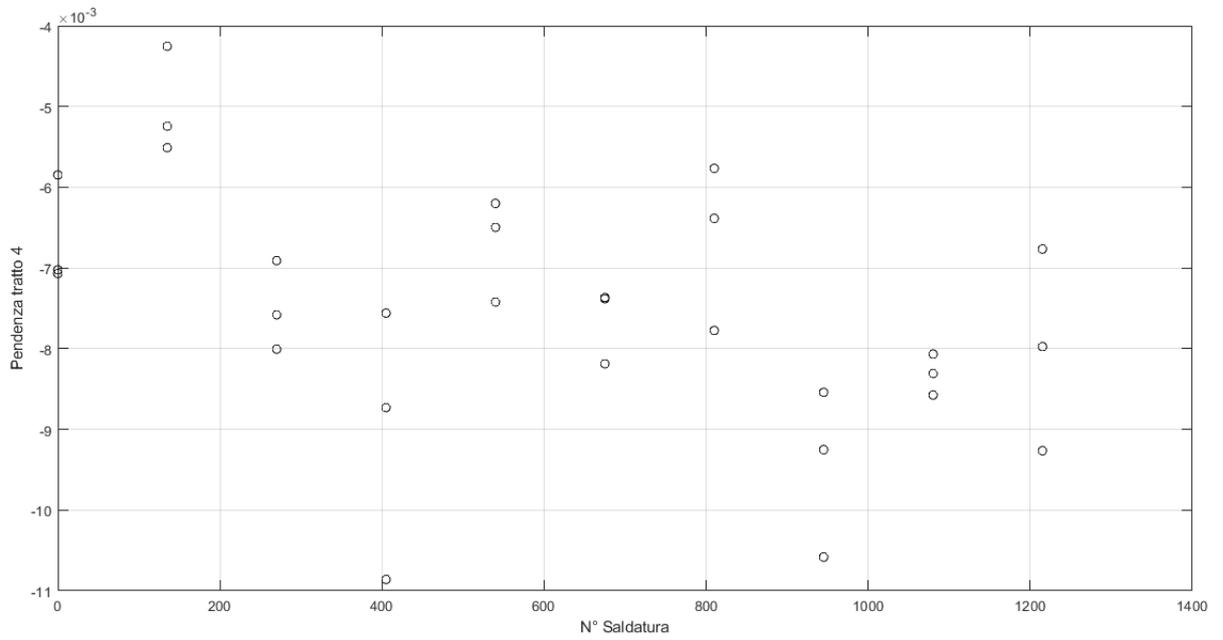


Figura 132 - Pendenza tratto 4 campioni Fronte con emissività a Tamb

○ Campioni Fronte: emissività Tamb mediata sui pannelli

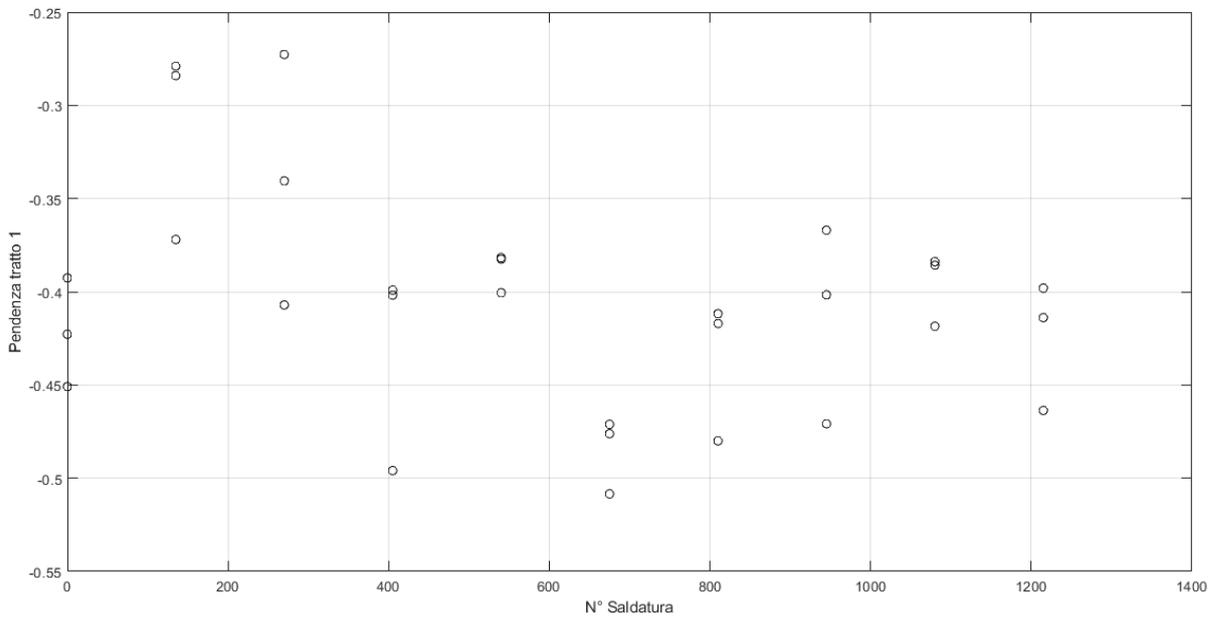


Figura 133 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb

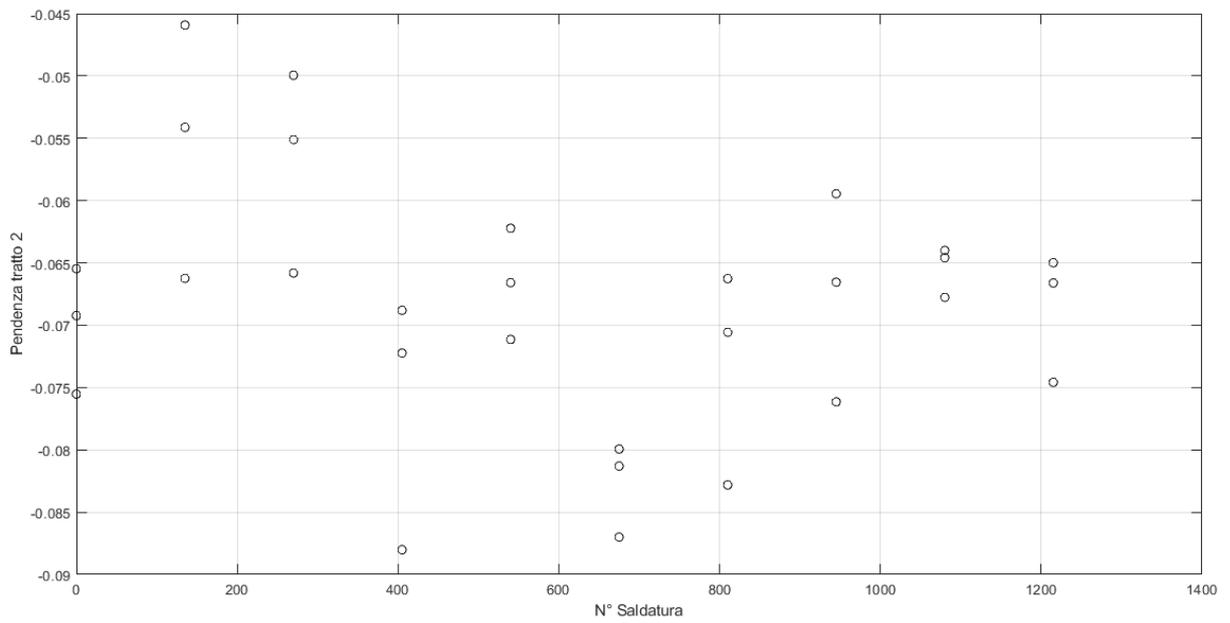


Figura 134 - Pendenza tratto 2 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb

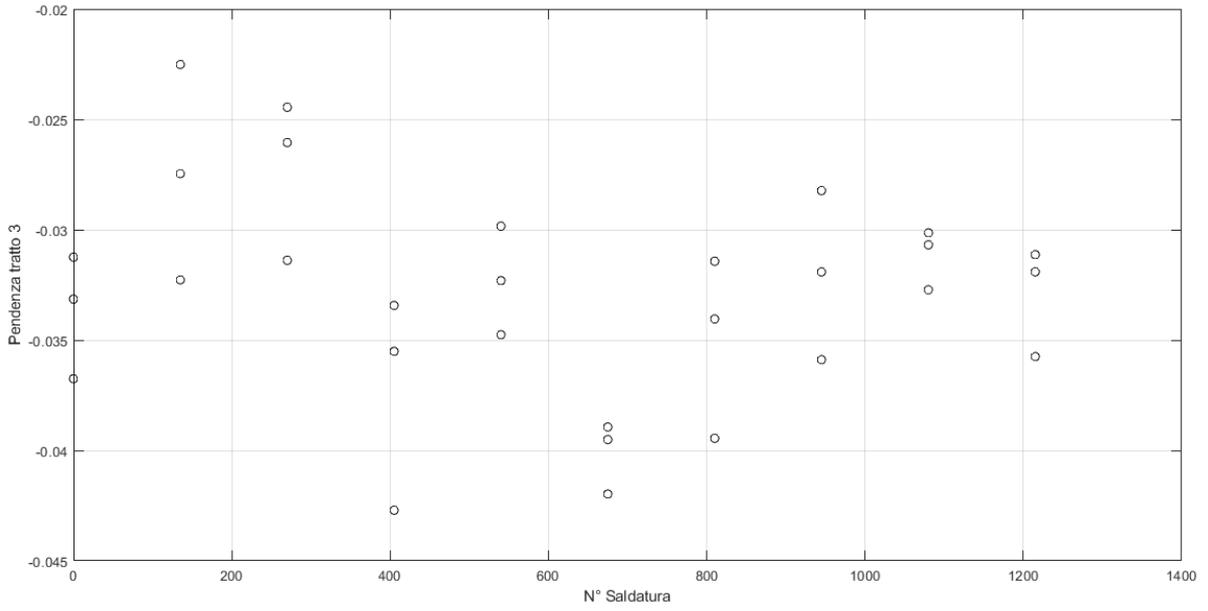


Figura 136 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb

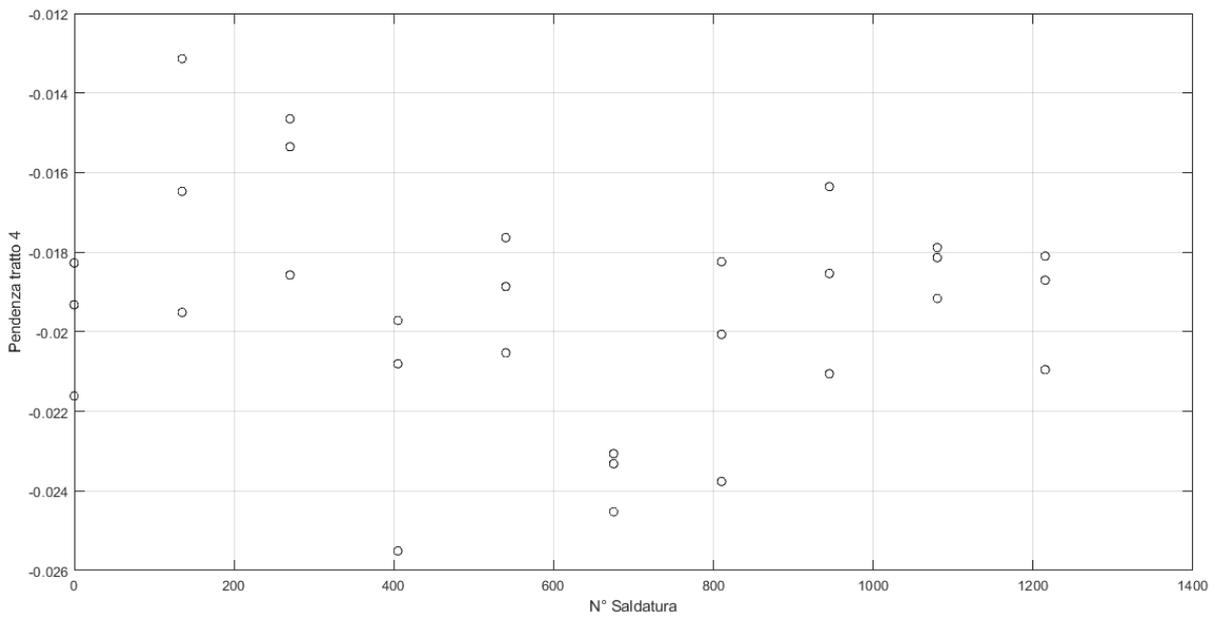


Figura 135 - Pendenza tratto 4 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a Tamb

- Campioni Fronte: emissività T=50°C mediata sui pannelli

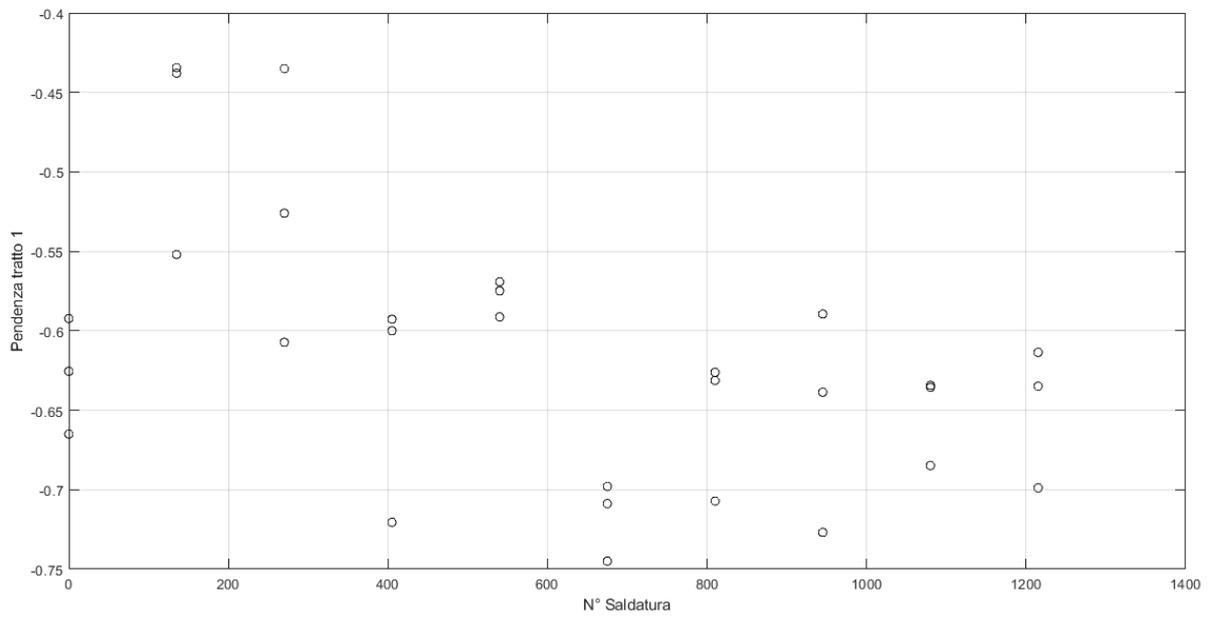


Figura 137 - Pendenza tratto 1 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

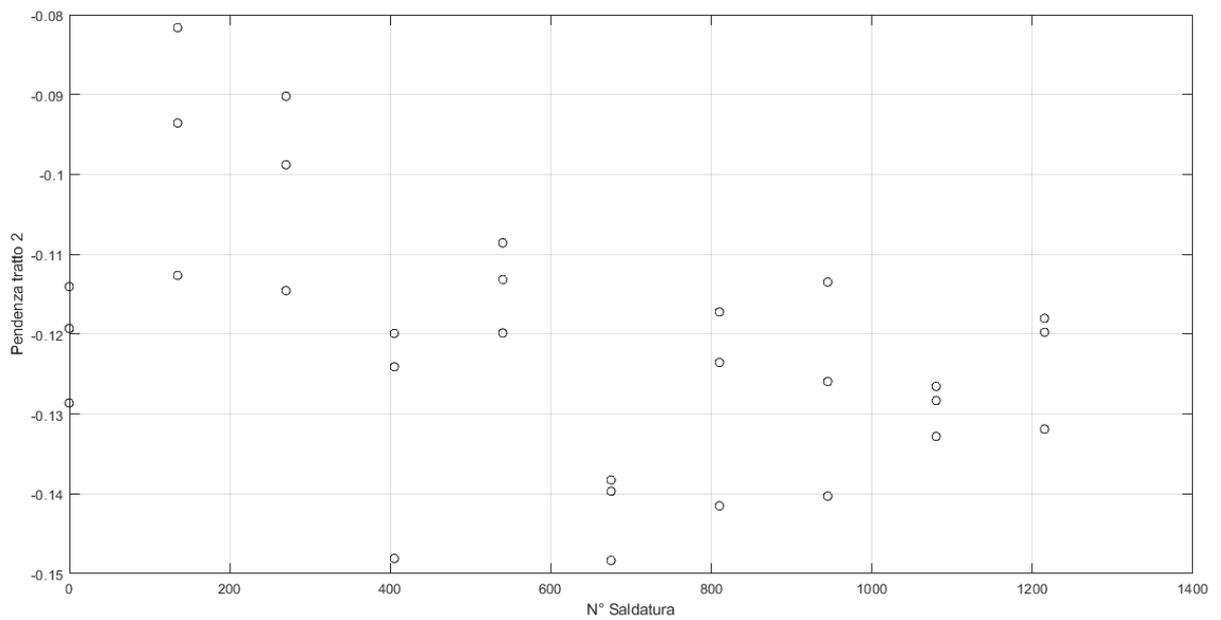


Figura 138 - Pendenza tratto 2 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

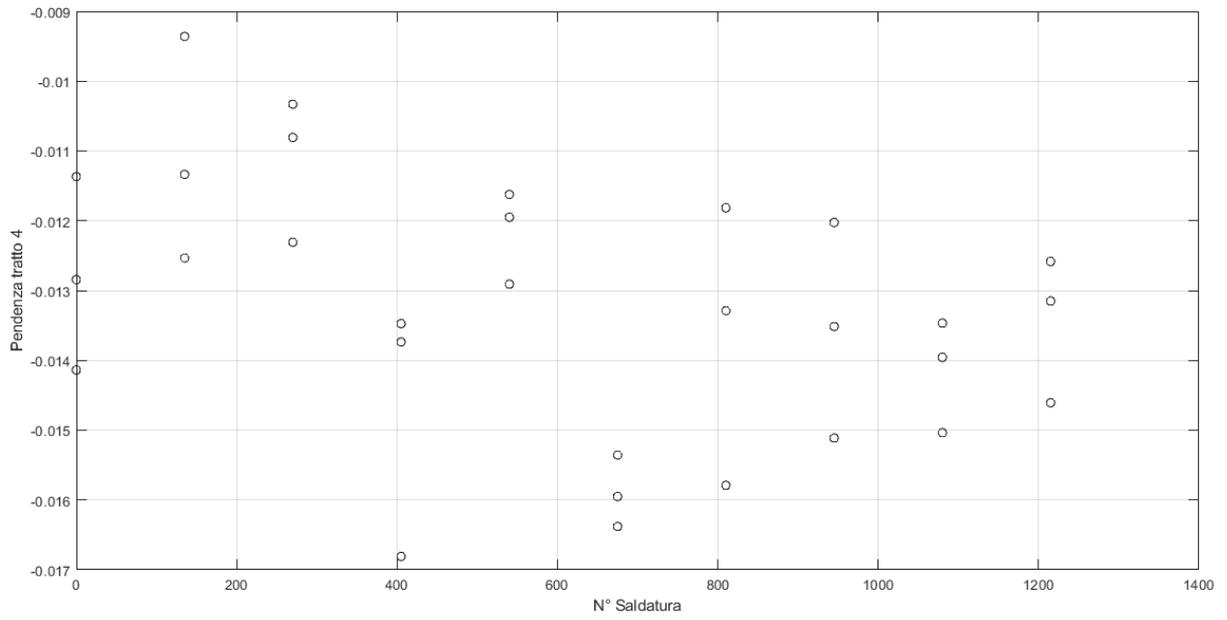


Figura 139 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

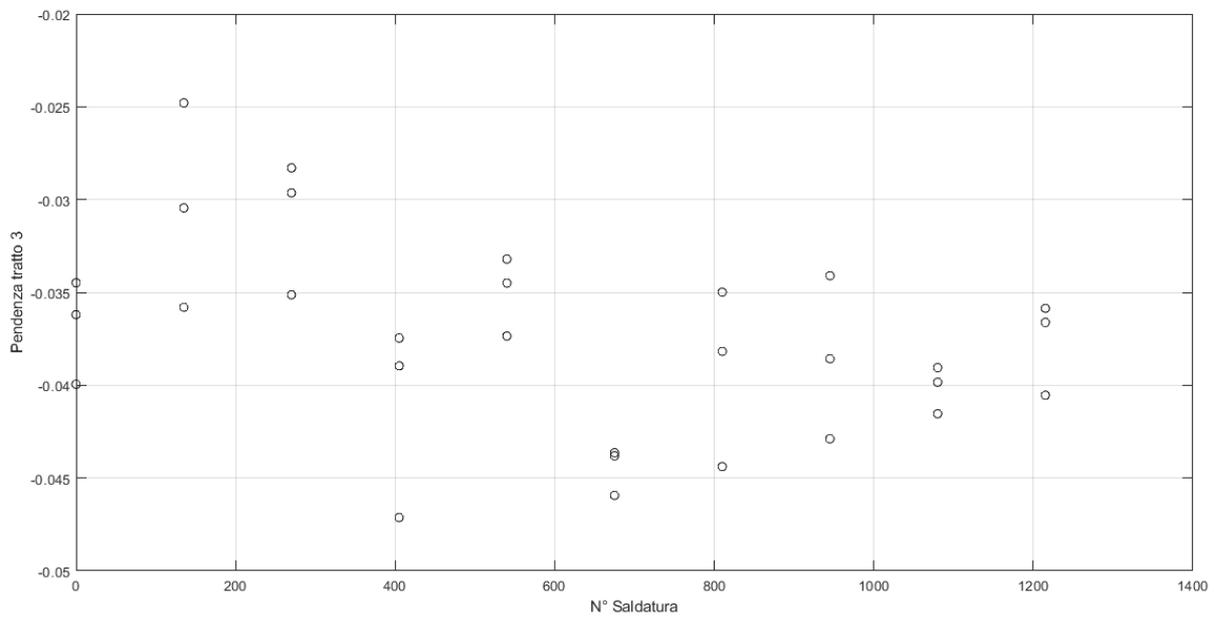


Figura 140 - Pendenza tratto 3 campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli a T=50°C

sa

### 3.8 Analisi per sotto-aree dell'impronta dell'elettrodo

A differenza delle analisi effettuate finora per le quali sono state ricavate caratteristiche che descrivano il comportamento dell'intera area di indagine, con quest'analisi è stato deciso di suddividere l'area di indagine in sotto aree. Con questo tipo di approccio ci si domanda come le grandezze, ottenute con le precedenti analisi, varino all'interno della dell'area in esame. Nello specifico è stata creata una griglia di suddivisione 5x5, ottenendo in questo modo 25 sotto aree di indagini. In Figura 141 è mostrato lo schema di suddivisione adottato (si prenda come riferimento iniziale la Figura 95).

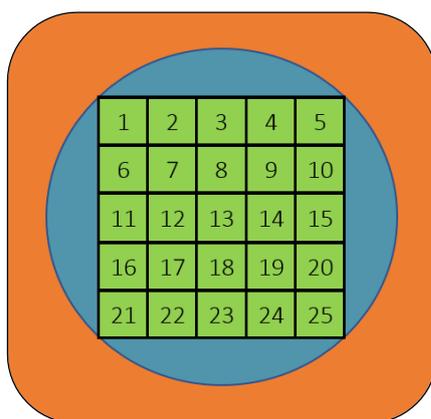


Figura 141 - Schema di suddivisione dell'area di indagine

Per facilitare la scrittura del codice Matlab per questo tipo di analisi sono state adottate alcune semplificazioni. Come descritto all'interno del [capitolo 3.2](#), l'area di indagine ha definito per i campioni Fronte la creazione di matrici 23x23x626. In questa analisi, è stato scelto di aumentare l'area di indagine in modo da ottenere matrici di dimensioni 25x25x626. Tale semplificazione si ripercuote anche sulla suddivisione delle sottomatrici estratte, infatti in questo modo verranno create 25 sottomatrici di dimensioni 5x5x626 ciascuna. Bisogna però fare una breve precisazione: le matrici 23x23 rappresentavano i limiti del quadrato inscritto all'interno dell'impronta lasciata dall'elettrodo, per la quale era stata valutata l'emissività (come descritto nel [capitolo 2.3.2](#)). Aumentare la zona di indagine ad una dimensione 25x25 vuol dire eccedere i suddetti limiti. In realtà questa scelta crea un'approssimazione per le sole sottomatrici 1, 5, 21 e 25. Nella Figura 142 è mostrato lo schema utilizzato.

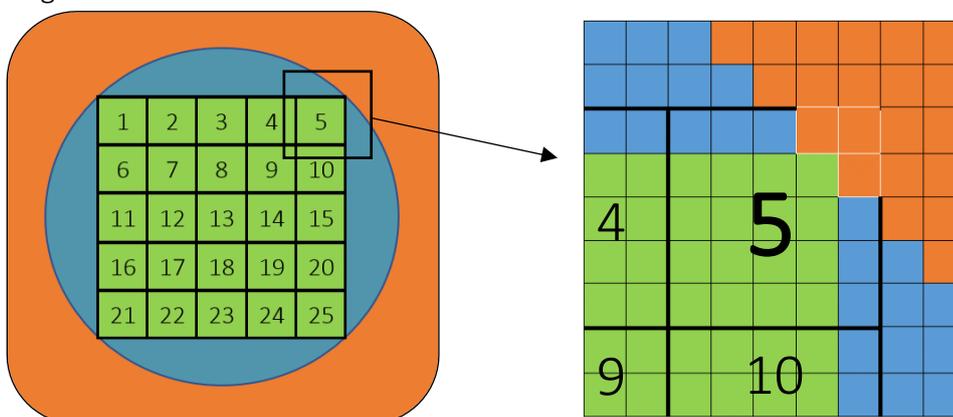


Figura 142 - Ingrandimento zona di indagine relativa all'approssimazione

Come si può notare dallo schema in questione, l'aumento della zona di indagine consiste nel selezionare un'ulteriore riga/colonna di pixel (e dunque di elementi che compongono la matrice) su tutti e quattro i lati che ne definiscono il perimetro. I pixel di colore blu rientrano comunque all'interno dell'area per la quale è noto il valore di emissività e ne è possibile un loro utilizzo per l'analisi. Le sole sottomatrici 1, 5, 21 e 25, che costituiscono le matrici ai vertici dell'area di indagine, inglobano al loro interno 3 pixel arancioni (evidenziati con bordi bianchi) per i quali non se ne conosce l'effettivo valore di emissività. La valutazione dell'emissività per quei 12 pixel è sicuramente un processo molto dettagliato che potrebbe non incidere molto sui risultati ottenuti. Inoltre, data la rottura dei campioni Fronte durante le prove di shear stress, ne risulta praticamente impossibile la valutazione dell'emissività. In definitiva, per i pixel in questione è stato scelto di utilizzare come valore di emissività quelli ottenuti durante le precedenti prove ([capitolo 2.3.2](#)).

Definita la nuova area di indagine, l'analisi prevede di diagrammare le curve di evoluzione termica nel tempo per ogni sotto-area precedentemente definita. Successivamente, tramite il comando 'subplot' in Matlab, è stata definita una griglia 5x5 al cui interno sono stati riportati i risultati ottenuti per le varie sotto-aree. In particolare, la numerazione adoperata per le sotto-aree è stata utilizzata anche per numerare le varie posizioni della griglia contenente i risultati. Nella Figura 143 è riportato in maniera schematico l'associazione area-diagramma.

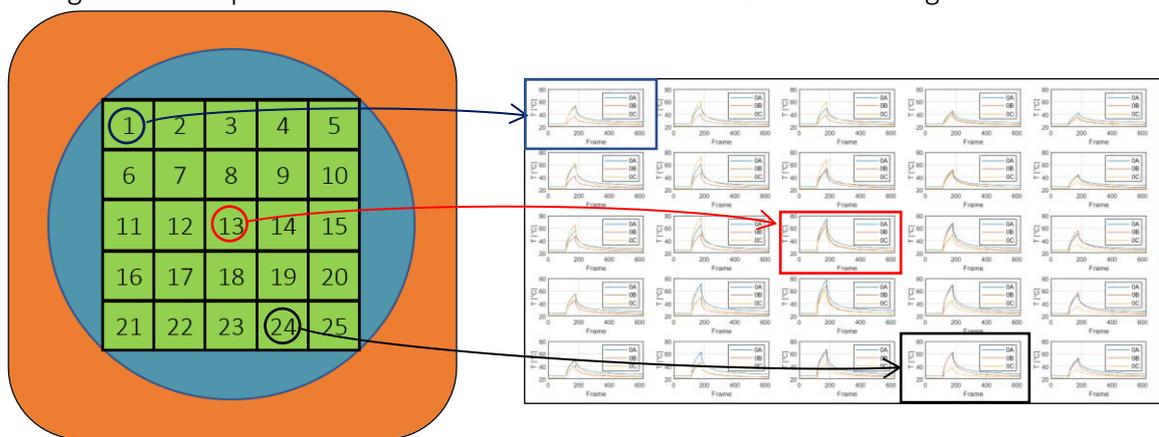


Figura 143 - Schema della procedura per la rappresentazione dei vari risultati

In totale sono stati creati dieci schemi, in cui vengono riportati i risultati ottenuti per ogni ripetizione che costituisce la serie stessa. Per non appesantire troppo la lettura con numerosi grafici, a titolo di esempio si riporta in Figura 145 i risultati della serie 6. Nei risultati in questione, si nota come i valori di temperatura massima mediati registrati alla fine del riscaldamento non siano uniformi in tutte le aree. In particolare, si registrano valori di temperatura maggiori nella zona centrale dell'impronta (aree 13 e limitrofe) che diminuiscono spostandosi verso le zone periferiche (aree lungo il perimetro di indagine), con valori minimi nei quattro vertici (aree 1, 5, 21 e 25). Non avendo la possibilità di analizzare tali campioni, si può supporre che tale distribuzione di temperatura sia determinata dalla struttura interna del giunto saldato, ovvero dalla formazione del nocciolo di saldatura, della zona termicamente alterata e dal materiale di base (come descritto nel [capitolo 1.6.4](#)).

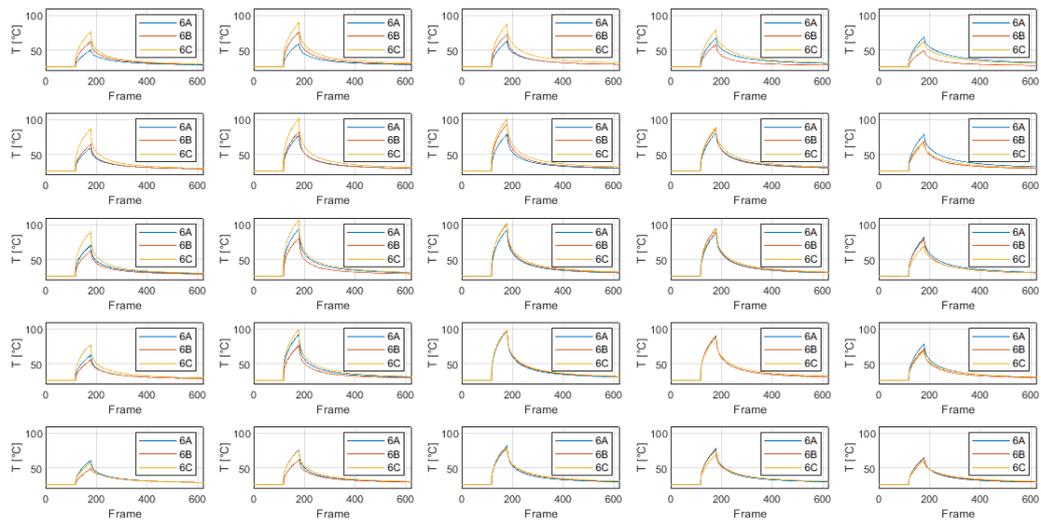


Figura 145 - Risultati ottenuti per la serie 6 Fronte con emissività mediata sui pannelli a  $T=50^{\circ}\text{C}$

Come descritto anche in [25], il processo di saldatura modifica le proprietà termiche del materiale base: i differenti profili termici proposti nell'articolo ne sono una dimostrazione (Figura 144).

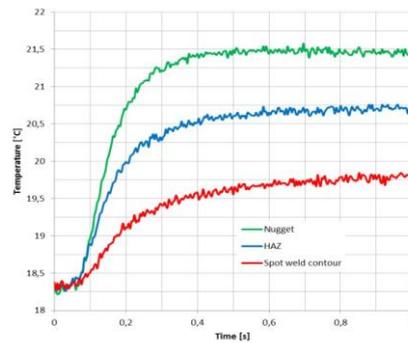
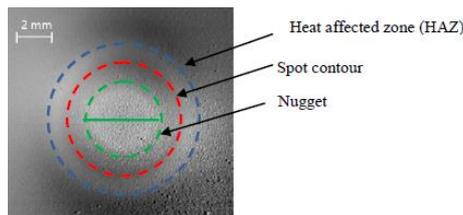


Figura 144 - Risultati ottenuti dalle indagini in per le 3 aree identificate

A seguito di questo tipo di analisi, è stato deciso di effettuare un'ulteriore analisi sulla base della procedura utilizzata nel [capitolo 3.4](#). È stata calcolata la media delle tre ripetizioni che compongono ogni singola serie e successivamente è stata effettuata l'analisi descritta in questo capitolo. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 146.

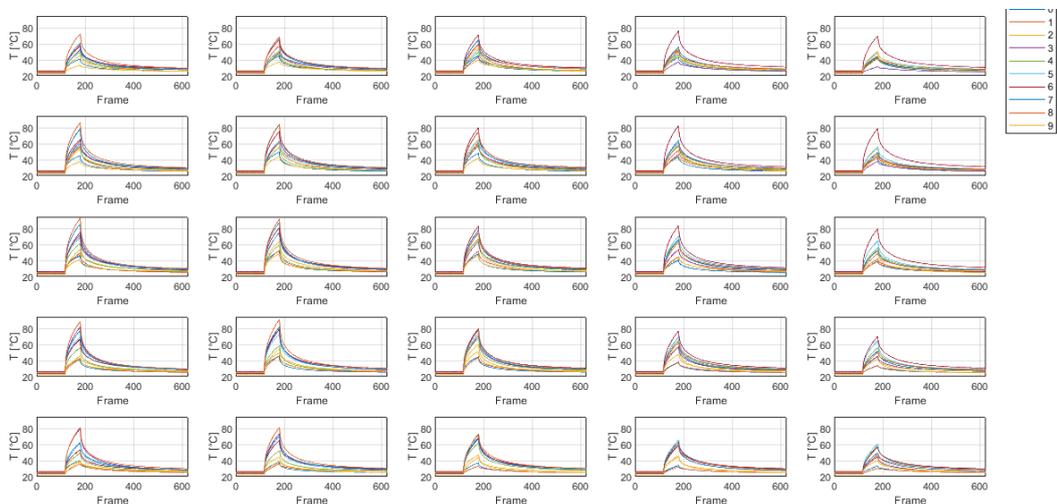


Figura 146 - Risultati ottenuti dalla media delle ripetizioni delle singole serie

Con questa analisi è possibile indagare in maniera dettagliata il comportamento termico dei vari campioni per le singole sotto-aree di indagine. L'eccessiva quantità di diagrammi costruiti rende difficile l'extrapolazione di possibili risultati e andamenti di questi. Per tale motivo si prevede di utilizzare tale approccio per progetti futuri, in cui si prevede l'utilizzo di algoritmi di machine learning. Si prevede l'utilizzo di tale algoritmo di analisi come possibile strumento per la valutazione delle dimensioni delle zone che costituiscono il punto di saldatura (nocciolo di saldatura, zona termicamente alterata e materiale base), oppure per l'ispezione di difetti interni al giunto. Inoltre, tramite semplici implementazioni del codice Matlab, è possibile eseguire le analisi trattate in questa tesi per ogni sotto-aree di indagine.

### 3.9 Interpretazione dei risultati

I ragionamenti effettuati in questo capitolo fanno riferimento solo ed esclusivamente ai risultati ottenuti per i campioni Fronte con emissività mediata sui pannelli alla temperatura  $T=50^{\circ}\text{C}$ .

Le curve di evoluzione termica temporale (Figura 105) contengono al loro interno un numero di informazioni sicuramente maggiori rispetto alle altre analisi. Tuttavia, dato l'elevato numero di dati elaborati, risulta difficile estrapolare informazioni in merito alla variazione di un opportuno parametro in funzione del numero di saldature effettuate.

Effettuare la media delle tre ripetizioni per ogni serie (Figura 116) ha permesso anzitutto di avere una riduzione dei dati elaborati, ed inoltre ha consentito l'extrapolazione di un possibile andamento del comportamento termico dei giunti, all'aumentare del numero di saldature effettuate. Come già accennato a fine [capitolo 3.4](#), che il valore massimo di temperatura tende a crescere fino alla serie 5, per poi iniziare a diminuire.

Discorso a parte può essere fatto per i grafici a dispersione costruiti per le analisi della temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento (Figura 122), della temperatura media della prova (Figura 126) e per la pendenza approssimata del tratto di raffreddamento (dalla Figura 137 alla Figura 140). Infatti, sia nel primo che nel secondo caso i risultati ottenuti evidenziano una crescita dei valori di temperatura (fatta eccezione della serie 0) in funzione del numero di saldature effettuate, e successivamente si nota un decadimento di tali valori. Il punto di inflessione di tale tendenza avviene tra la serie numero 5 e la numero 6, ovvero tra il 693imo punto di saldatura e l'831imo punto. Discorso analogo può essere fatto per quanto riguarda i risultati ottenuti per la pendenza approssimata del tratto di raffreddamento: in questo caso l'evoluzione della caratteristica analizzata (in funzione del numero di saldature effettuate) tende dapprima a diminuire e successivamente a crescere (sempre ad eccezione della serie 0). Il punto di inflessione che riscontra la serie 5 e la 6 determina sicuramente una variazione delle caratteristiche termiche del giunto.

Per queste tre analisi bisogna sottolineare il fatto che sono state effettuate utilizzando, per ognuna, un diverso numero totale di frame. Infatti, per l'analisi della temperatura media della

prova sono stati indagati poco più di 500 frame; per l'analisi della pendenza approssimata del tratto di raffreddamento ne sono stati utilizzati solo 2; mentre per l'analisi della temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento è stato indagato addirittura un solo frame. Ciò si ripercuote ovviamente sui risultati ottenuti. Nel primo caso intervengono nell'analisi molte più informazioni rispetto agli altri due casi. Inoltre, nel caso della temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento, i risultati ottenuti per la singola serie variano tra 4°C (serie 4) e 14°C (serie 3). Nel caso della temperatura media della prova invece, la variabilità dei risultati per le singole serie è inferiore a 4°C. Dunque, è lecito pensare che i risultati ottenuti dalla temperatura media della prova sono più robusti e affidabili rispetto agli altri.

Prima di proseguire con l'interpretazione dei dati è necessario soffermarsi su alcuni aspetti non citati precedentemente. Come anticipato nella prefazione, lo scopo di questa tesi è quello di ispezionare il processo di saldatura a punti attraverso l'utilizzo della termografia attiva. Ispezionare il processo altro non vuol dire che assicurarsi che i giunti saldati mantengano inalterata la propria qualità, entro determinati limiti. La qualità del giunto è da imputarsi alla qualità del nocciolo di saldatura realizzato all'interfaccia tra le due lamiere. Come citato nel [capitolo 1.7](#), l'usura dell'elettrodo comporta il deterioramento delle qualità del giunto, in quanto determina la riduzione delle dimensioni del nocciolo di saldatura. Tale fenomeno è ben noto in letteratura, come mostrato ad esempio in [26][32][33], e si articola secondo il seguente ragionamento: l'usura fa sì che l'area di contatto tra elettrodo e lamiera aumenta all'aumentare del numero di punti di saldatura realizzati. L'aumento dell'area di contatto comporta principalmente la diminuzione della densità di corrente (a parità di intensità di corrente impostata alla macchina di saldatura). Una riduzione di tale parametro si traduce in una riduzione della potenza termica generata per effetto Joule e dunque una minor zona sarà portata a fusione all'interfaccia tra le due lamiere. Tutto ciò si traduce in una diminuzione delle dimensioni del nocciolo di saldatura e dunque in un peggioramento delle qualità del giunto saldato. In letteratura ([27][32][33]) sono presenti numerosi articoli che descrivono tale ragionamento e dimostrano che le dimensioni del nocciolo di saldatura diminuiscono all'aumentare del numero di saldature effettuato (tutto ciò a causa dell'usura degli elettrodi). Il decadimento delle caratteristiche termiche del giunto potrebbe essere dunque funzione dello stato di usura dell'elettrodo, e dunque determinare l'istante in cui è possibile effettuare operazioni di rinvigorisca o sostituzione dell'elettrodo stesso.

Per verificare l'effettiva riduzione di dimensioni del nocciolo di saldatura all'aumentare del numero di punti di saldatura, sono stati ricavati dei campioni dai pannelli ispezionati mediante metallografia. Nello specifico è stato analizzato i primi punti saldati sui pannelli 1, 3, 5, 7 e 9 (uno ogni 276 punti di saldatura). In Tabella 6 e in Figura 148 sono riportate le dimensioni misurate del nocciolo di saldatura, come mostrato nell'esempio di Figura 147.

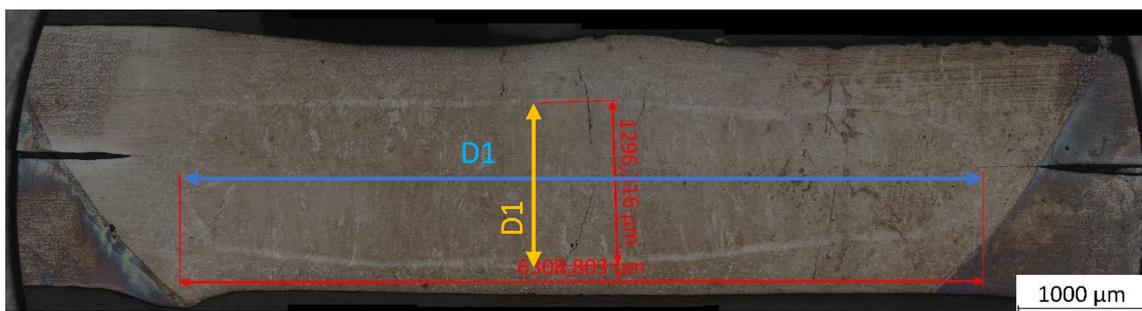


Figura 147 - Metallografia del campione 3A

Campione	D1 [mm]	D2 [mm]
1A	5,046	1,224
3A	6,309	1,296
5A	2,87	1,263
7A	2,651	1,196
9A	0,769	0,342

Tabella 6 - Dimensioni nocciolo di saldatura

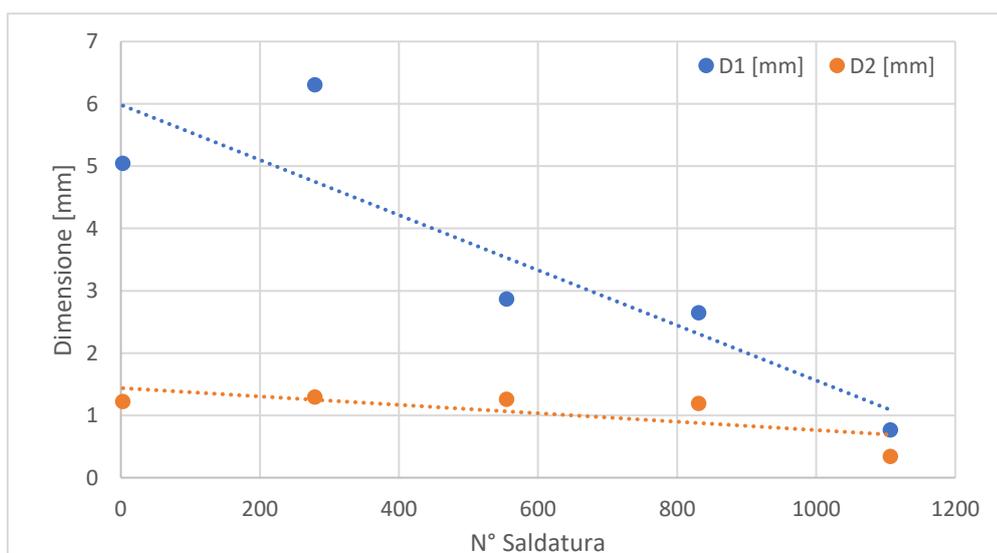


Figura 148 - Variazione delle dimensioni del nocciolo di saldatura in funzione nel numero di saldature effettuate

Ad esclusione del primo campione analizzato, si nota che effettivamente le dimensioni del nocciolo di saldature diminuiscono all'aumentare del numero di saldature effettuate, nonostante il numero di campioni ispezionati sia relativamente basso.

La riduzione delle dimensioni del nocciolo di saldatura, e dunque la riduzione della qualità del giunto, potrebbe spiegare la fase di decadimento (o incremento nel caso della pendenza approssimata) dei risultati ottenuti delle analisi dei capitoli [3.5](#), [3.6](#) e [3.7](#).

Per quanto riguarda invece il tratto iniziale dei risultati ottenuti (crescente per  $T_{max}$  e  $T_m$ , decrescente per la pendenza), una sua interpretazione risulta alquanto complicata. Da una parte vi è una mancanza di dati acquisiti durante il processo di saldatura, dall'altra vi è una

manca di dati ottenuti a seguito di prove post processo. La mancanza di suddetti dati non permette di descrivere con certezza ciò che avviene in quel tratto. Nemmeno in letteratura sono presenti articoli che abbiano utilizzato l'approccio di ispezione non distruttiva descritto in questa tesi. Si può comunque provare a fornire una plausibile spiegazione a ciò che avviene nel primo tratto. I ragionamenti che seguiranno da qui in avanti sono frutto di ipotesi effettuate dal sottoscritto. Per i ragionamenti si farà riferimento ai risultati ottenuti per la temperatura media della prova, come mostrato in Figura 126.

Anzitutto bisogna affermare che con i parametri di prova definiti nel [capitolo 2.3.3](#), non si ha la certezza di aver riscaldato l'intero giunto di saldatura. In effetti, sempre con riferimento al capitolo in questione, si vuol far notare che con una potenza del laser pari al 100% le temperature registrate nella prova in modalità di trasmissione raggiungevano temperatura prossime ai 30°C. Con riferimento al fatto che le prove realizzate in questa tesi sono state eseguite con una potenza termica pari all'80% del laser, questo aspetto sottolinea la possibilità che il giunto sia stato effettivamente riscaldato parzialmente e non totalmente.

L'idea alla base di questa ipotesi è che l'energia fornita dal laser abbia riscaldato dapprima un piccolo spessore di zona termicamente alterata e poi una piccola parte del nocciolo di saldatura. Tramite questo ragionamento è stata indagata la profondità del nocciolo di saldatura per i campioni ispezionati in metallografia. I risultati sono riportati nel diagramma di Figura 149. Il valore di profondità è stato misurato a partire dalla superficie ispezionata nelle prove descritte nel [capitolo 2.3](#) (la misura rappresenta la distanza tra nocciolo di saldatura e la superficie di contratto lamiera-elettrodo mobile).

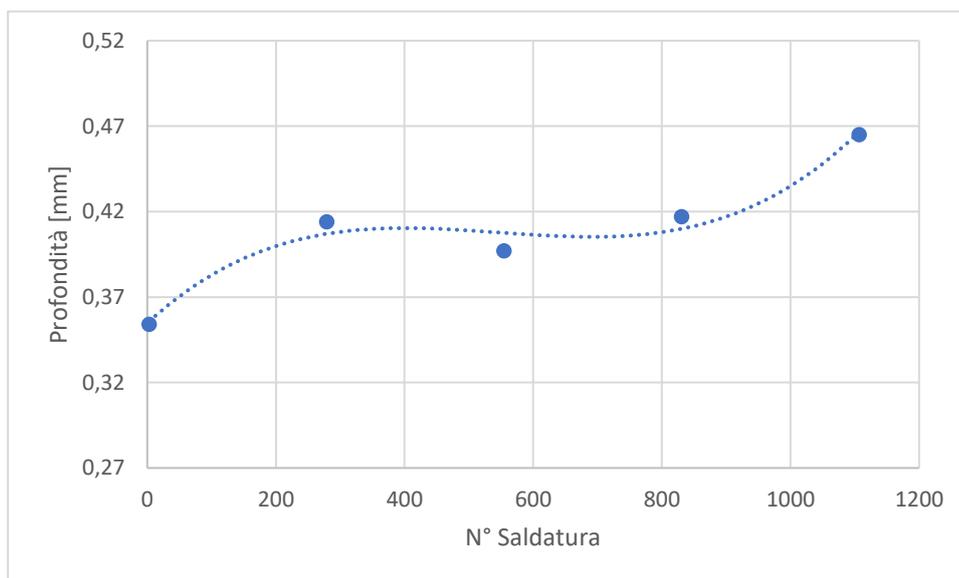


Figura 149 - Variazione della profondità del nocciolo di saldatura in funzione del numero di saldature effettuate

Attraverso un'interpolazione con un polinomio di terzo grado si nota che la distanza tra nocciolo di saldatura e la superficie in esame aumenta leggermente per un primo tratto (fino al 300imo punto di saldatura circa), successivamente si mantiene grosso modo costante ed infine (a partire dall'intervallo compreso tra il 600imo e 800imo punto di saldatura) torna ad aumentare.

Un altro aspetto fondamentale su cui si basa tale ipotesi fa riferimento all'articolo [25] (menzionato nel capitolo precedente), in cui viene evidenziato come il processo di saldatura modifica le proprietà termiche del materiale base. La prova la termografia attiva utilizzata nell'articolo di riferimento, utilizza come fonte di riscaldamento un sistema ad induzione ed inoltre le acquisizioni della termocamera sono venute con modalità in trasmissione. Il sistema ad induzione consente di riscaldare in maniera uniforme il punto di saldatura, e rispetto al sistema laser consente l'ispezione di un'area maggiore. La scelta della modalità in trasmissione invece, assicura il corretto riscaldamento dell'intero punto di saldatura ispezionato. Facendo riferimento alla Figura 144, si nota che il nocciolo di saldatura si riscalda di più rispetto alla zona termicamente alterata.

L'ipotesi che il sottoscritto avanza è che nelle prove sperimentali di termografia attiva ([capitolo 2.3](#)) l'energia termica fornita dal laser abbia riscaldato il giunto saldato solo per un piccolo spessore e che all'interno di questo siano presenti volumi variabili di zona termicamente alterata e nocciolo di saldatura eccitati. In definitiva, è possibile affermare che: poiché l'area ispezionata (definita nel [capitolo 3.2](#)) resta invariata per tutti i campioni, nello spessore (o volume) che viene riscaldato sarà presente uno strato di zona termicamente alterata variabile, e che segue l'andamento mostrato in Figura 144. Stesso discorso può essere effettuato per il nocciolo di saldatura. Dunque, per profondità maggiori sarà riscaldato un minor volume del nocciolo di saldatura e saranno registrati in superficie valori di temperatura minori, mentre per profondità minori vale il discorso opposto. In Figura 150 è stata eseguita un'interpolazione dei risultati ottenuti dall'analisi della temperatura media della prova, tramite un polinomio di terzo grado. I risultati sembrano seguire il ragionamento appena proposto: per valori di profondità crescenti vi è una riduzione dei valori di temperatura; per valori di profondità decrescenti vi è un aumento dei valori di temperatura misurati.

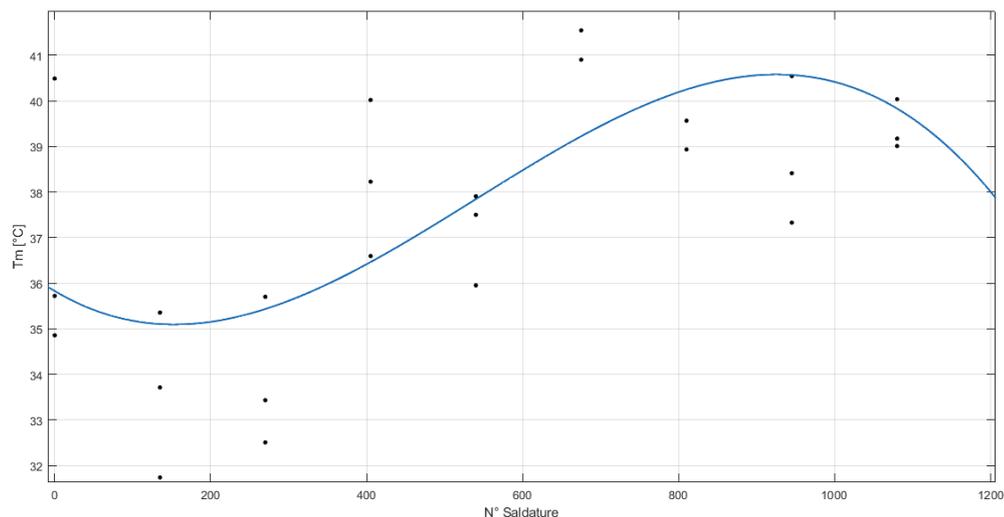


Figura 150 - Interpolazione dei valori di temperatura media della prova con un polinomio di terzo grado

Purtroppo, i dati in possesso non sono in grado di verificare con accuratezza tale ipotesi ed inoltre i polinomi interpolanti i due risultati sono ottenuti con un numero di dati differenti (appena 5 per la profondità e 30 per la temperatura media della prova), pertanto si rimanda la validazione di tale ipotesi per analisi future.



## 4 Conclusioni e possibili sviluppi futuri

La termografia infrarossa offre ottime potenzialità in un suo utilizzo in campo industriale ed è una tecnologia in continua evoluzione che attira sempre più l'interesse del mercato. Utilizzata sia per analisi qualitative che quantitative, la termografia infrarossa consente di ottenere risultati in tempi molto brevi e con costi di attrezzatura contenuti, se confrontata con altri metodi di controllo non distruttivo.

La presente tesi indaga il possibile utilizzo della termografia attiva come metodo di controllo non distruttivo per l'ispezione della qualità dei giunti saldati ottenuti con il processo di saldatura per resistenza a punti. Nello stato dell'arte sono riportate le nozioni fondamentali che consentono di comprendere al meglio i fenomeni fisici alla base di tale tecnologia. Dopo una breve descrizione dell'evoluzione dei sistemi di misura, si passa poi alla classificazione delle tecniche di termografia citandone esempi applicativi nei vari processi di saldatura.

La seconda parte della tesi vengono descritte le procedure adottate sia per la campagna di prove sperimentali, sia per la successiva analisi di dati. Come descritto ampiamente nel capitolo 2, per le prove sperimentali sono state seguite le normative in materia. Qui sono sorte le prime difficoltà in merito alla valutazione dell'emissività dei campioni ispezionati: i valori ottenuti a temperatura ambiente risultavano essere nettamente maggiori a quelli presenti in letteratura. Da qui la necessità di rivalutare l'emissività per temperature maggiori di almeno 20°C rispetto alla temperatura riflessa apparente. Per quanto riguarda la scelta dei parametri di processo questi sono in maniera arbitraria e senza alcuna direttiva.

Nell'analisi dei dati invece, l'obiettivo è stato quello di creare un codice universale che potesse essere applicato a tutti i campioni indagati. Il codice costruito in questa fase si presta ad essere utilizzato anche per possibili prove future, anche con setup di processo differenti da quelli utilizzati in questa tesi. La criticità durante questa fase è rappresentata dalla scelta dell'area di indagine: per un'area troppo piccola si ottengono risultati dal carattere fortemente locale e molto fluttuanti nel tempo; per aree di indagine troppo grandi si rischia di non apprezzare al meglio il comportamento dei singoli campioni. Definita dunque l'area di indagine univoca per tutti i campioni (quadrato inscritto in una circonferenza di 6mm) si è passati all'elaborazione dei dati ottenuti durante le prove sperimentali. Sono stati presentati in ordine i seguenti risultati:

- Curve di evoluzione termica nel tempo;
- Curve normalizzate di evoluzione termica nel tempo;
- Andamento della temperatura ottenuto dalla media delle tre ripetizioni di ogni serie;
- Temperatura mediata massima raggiunta a fine riscaldamento, che denomineremo  $T_{max}$ ;
- Temperatura media della prova,  $T_m$ ;
- Pendenza approssimata per quattro intervalli di tempo, del solo tratto di raffreddamento;
- Indagini per sotto-aree dell'impronta.

I risultati ottenuti dai grafici delle curve di evoluzione termica nel tempo sono risultati di difficile interpretazione a causa dell'elevato numero di campioni analizzati. Tali curve però rappresentano la base sulla quale ottenere le analisi successive. I risultati ottenuti dalle analisi proposte nei capitoli [3.4](#), [3.5](#) e [3.6](#) permettono di individuare facilmente una variazione delle caratteristiche termiche dei campioni analizzati al variare del numero di saldature effettuate.

Infine, nell'interpretazione dei dati tramite l'ausilio di controlli distruttivi in metallografia e di ricerche bibliografiche è stata e stato avanzata una possibile ipotesi sulla variabilità dei risultati ottenuti. Purtroppo, tale ipotesi non può essere confermata del tutto a causa della mancanza di dati disponibili.

Lo studio propone ha posto dunque le basi per possibili prove future. Inoltre, si prevede la possibilità implementare la procedura anche nel caso di termografia passiva, riducendo così i tempi di ispezione e di intervento per il rinvigoriscono o sostituzione degli elettrodi di saldatura.

# Ringraziamenti

# Bibliografia

- [1]. Siavash Doshvarpassand, Changzhi Wu, Xiangyu Wang, An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, Volume 96, 2019, Pages 366-389, ISSN 1350-4495, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.006>
- [2]. Herschel and the Puzzle of Infrared - An astronomer took a mental leap to first connect light and heat, By Jack R. White; <https://www.americanscientist.org/article/herschel-and-the-puzzle-of-infrared>
- [3]. Thermal Imaging from the Beginning of the Thermographer's Camera to the Present; Ed Kochanek; <https://irinfo.org/12-1-2013-kochanek/>
- [4]. Vladimir P. Vavilov, Douglas D. Burleigh, Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing, *NDT & E International*, Volume 73, 2015, Pages 28-52, ISSN 0963-8695, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.03.003>
- [5]. D'Accardi, E.; Palumbo, D.; Tamborrino, R.; Galietti, U. A Quantitative Comparison among Different Algorithms for Defects Detection on Aluminum with the Pulsed Thermography Technique. *Metals* 2018, 8, 859. <https://doi.org/10.3390/met8100859>
- [6]. Sun, J. G. (October 24, 2005). "Analysis of Pulsed Thermography Methods for Defect Depth Prediction." *ASME. J. Heat Transfer*. April 2006; 128(4): 329–338. <https://doi.org/10.1115/1.2165211>
- [7]. Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures , January 2009, *Research in Nondestructive Evaluation* 20(1):1-31 , DOI: [10.1080/09349840802366617](https://doi.org/10.1080/09349840802366617)
- [8]. He Y, Tian G, Pan M and Chen D 2013 Eddy current pulsed phase thermography and feature extraction *Appl. Phys. Lett.* 103084104 He Y, Tian G, Pan M and Chen D 2013 Eddy current pulsed phase thermography and feature extraction, <https://doi.org/10.1063/1.4819475>
- [9]. X. Guo, "Ultrasonic Infrared Thermography of Aluminium Thin Plates for Crack Inspection in Friction Stir Welded Joints," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 12, pp. 6524-6531, 15 June 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2020.2976144>
- [10]. Slide del corso di 'Tecnologia Meccanica', Prof.ssa Eleonora Atzeni
- [11]. Andrzej Sachajdak, Jacek Słoma, Ireneusz Szczygieł, Thermal model of the Gas Metal Arc Welding hardfacing process, *Applied Thermal Engineering*, Volume 141, 2018, Pages 378-385, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.120>
- [12]. Vasudevan, M., Chandrasekhar, N., Maduraimuthu, V. *et al.* Real-Time Monitoring of Weld Pool during GTAW using Infra-Red Thermography and analysis of Infra-Red thermal images. *Weld World* 55, 83–89 (2011). <https://doi.org/10.1007/BF03321311>
- [13]. Vemanaboina H, Akella S, Uma Maheshwer Rao A, Gundabattini E, Buddu RK. Analysis of thermal stresses and its effect in the multipass welding process of SS316L. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021;235(2):384-391. doi: <https://doi.org/10.1177/2F0954408920965062>

- [14]. Rodríguez-Martín, M.; Lagüela, S.; González-Aguilera, D.; Rodríguez-González, P. Crack-Depth Prediction in Steel Based on Cooling Rate. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016, 2016, 1–9, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/1016482>
- [15]. P. Stritt, M. Boley, A. Heider, F. Fetzer, M. Jarwitz, D. Weller, R. Weber, P. Berger, T. Graf, "Comprehensive process monitoring for laser welding process optimization," *Proc. SPIE 9741, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications V*, 97410Q (18 March 2016); <https://doi.org/10.1117/12.2212814>
- [16]. Umar, M., Paulraj, S. Thermography analysis and porosity formation during laser beam welding of AA5083-H111 aluminum alloy. *J Therm Anal Calorim* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10140-z>
- [17]. Carosena Meola, Giovanni M. Carlomagno, Antonino Squillace, Giuseppe Giorleo, The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints, *Infrared Physics & Technology*, Volume 46, Issues 1–2, 2004, Pages 93-99, ISSN 1350-4495, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.013>
- [18]. X. Guo, "Ultrasonic Infrared Thermography of Aluminium Thin Plates for Crack Inspection in Friction Stir Welded Joints," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 12, pp. 6524-6531, 15 June 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2976144>
- [19]. Davide Palumbo, Ester D'Accardi, and Umberto Galietti "A new thermographic procedure for the non-destructive evaluation of RSW joints", *Proc. SPIE 11004, Thermosense: Thermal Infrared Applications XLI*, 110040N (2 May 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2518979>
- [20]. Runnemalm, A., Ahlberg, J., Appelgren, A. et al. Automatic Inspection of Spot Welds by Thermography. *J Nondestruct Eval* 33, 398–406 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0233-0>
- [21]. Geslain, Edouard & Pierre, T. & Rogeon, P. & Pouvreau, Cédric & Cretteur, Laurent. (2018). Contact temperature measurement by infrared thermography during resistance spot welding process. <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2018.075>
- [22]. Liu, Shibo & Kouadri, Kouadri-Henni, kouadri-david, A., afia & Gavrus, Adinel. (2016). Modeling grain orientation of DP600 steel by Nd:YAG laser. *MATEC Web of Conferences*. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20168002010>
- [23]. Liu, Shibo & Kouadri, Kouadri-Henni, kouadri-david, A., afia & Gavrus, Adinel. (2018). DP600 dual phase steel thermo-elasto-plastic constitutive model considering strain rate and temperature influence on FEM residual stress analysis of laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.006>
- [24]. Sadiq, Heaja & Wong, Bill & Tashan, Jawdat & Al-Mahaidi, Riadh & Zhao, Xiao-Ling. (2013). Determination of Steel Emissivity for the Temperature Prediction of Structural Steel Members in Fire. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000607](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000607)
- [25]. A. Taram, C. Roquelet, Ph. Meilland, G. Le Noc, J. L. Bodnar, Th. Duvaut, C. Kaczynski, and Th. Dupuy "Assessment of nugget diameter of resistance spot welds using pulse eddy current thermography", *Proc. SPIE 10661, Thermosense: Thermal Infrared Applications XL*, 1066110 (14 May 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2305080>

- [26]. X.Q. Zhang, G.L. Chen, Y.S. Zhang, Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels, *Materials & Design*, Volume 29, Issue 1, 2008, Pages 279-283, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.025>
- [27]. Wang, Bin & Hua, Lin & Wang, Xiaokai & Song, Yuke & Liu, Yali. (2015). Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7703-0>
- [28]. Mathisizik, C.; Köberlin, D.; Heilmann, S.; Zschetzsche, J.; Füssel, U. General Approach for Inline ElectrodeWear Monitoring at Resistance SpotWelding. *Processes* 2021, 9, 685. <https://doi.org/10.3390/pr9040685>
- [29]. Jian Chen, Zhili Feng, "IR-based spot weld NDT in automotive applications," *Proc. SPIE* 9485, *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*, 948513 (12 May 2015); <https://doi.org/10.1117/12.2177124>
- [30]. S.K. Lau, D.P. Almond, J.M. Milne, A quantitative analysis of pulsed video thermography, *NDT & E International*, Volume 24, Issue 4, 1991, Pages 195-202, ISSN 0963-8695, [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(91\)90267-7](https://doi.org/10.1016/0963-8695(91)90267-7)
- [31]. Cheng, Liang. (2012). Comparison of Nondestructive Testing Methods on Detection of Delaminations in Composites. *Journal of Sensors*. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/408437>
- [32]. Masatsune Kondo , Tokujiro Konishi , Koji Nomura & Hiroyuki Kokawa (2013) Degradation mechanism of electrode tip during alternate resistance spot welding of zinc-coated galvanized and uncoated steel sheets, *Welding International*, 27:10, 770-778, <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2012.708502>
- [33]. Delgado-Pamanes, Miguel & Maldonado, Simitrio & Guerrero, Martha & Olvera-Vázquez, Zeydy. (2017). Evaluación del Deterioro de los Electrodo al Incrementar el Número de Pulsos del Tiempo de Soldadura en Aceros IF y HSLA Galvanizados y la Afectación de las Propiedades Mecánicas en los Puntos de Soldadura. *Soldagem & Inspeção*. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2104.07>
- [34]. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, 2nd Edition; Michael Vollmer, Klaus-Peter Möllmann, ISBN: 978-3-527-41351-5
- [35]. Sfarra, S. & Bendada, A. & Paoletti, Alfonso & Paoletti, Domenica & Ambrosini, Dario & Ibarra-Castanedo, Clemente & Maldague, X.. (2010). Square Pulse Thermography (SPT) and Digital Speckle Photography (DSP): Non Destructive Techniques (NDT) applied to the defects detection in aerospace materials
- [36]. <https://tecmated.wordpress.com/>
- [37]. <https://www.flir.it>
- [38]. <http://www.j-tech.polito.it/>
- [39]. Runnemalm, A., Ahlberg, J., Appelgren, A. et al. Automatic Inspection of Spot Welds by Thermography. *J Nondestruct Eval* 33, 398–406 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0233-0>
- [40]. Philipp Myrach, Florian Jonietz, Dietmar Meinel, Hubert Suwala & Mathias Ziegler (2017) Calibration of thermographic spot weld testing with X-ray computed tomography,

Quantitative InfraRed Thermography Journal, 14:1, 122-131, DOI:  
[10.1080/17686733.2017.1281554](https://doi.org/10.1080/17686733.2017.1281554)

- [41]. Jonietz, F., Myrach, P., Suwala, H. *et al.* Examination of Spot Welded Joints with Active Thermography. *J Nondestruct Eval* 35, 1 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0318-4>