

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Applicabilità della termografia per lo studio dei difetti nei giunti saldati di lamiera per uso automobilistico



Relatori

prof.ssa Francesca Maria Curà
prof.ssa Manuela De Maddis
prof. Franco Lombardi
prof.ssa Raffaella Sesana

Candidato

Nicola Lasalvia

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Introduzione	1
1. Stato dell'arte	3
1.1. Termografia ad infrarossi e sua applicazione	3
1.1.1. Termografia passiva	5
1.1.2. Termografia attiva con tecnica Lock-In	6
1.2. Difetti in giunti saldati ad arco	7
2. Materiali e metodi sviluppo del Lavoro	11
2.1. Termografia passiva applicata online sul processo di saldatura	11
2.2. Termografia Lock-In applicata offline su giunti saldati	29
2.2.1. Post processamento dati termografici con analisi Lock-In	41
3. Analisi dei risultati	47
3.1. Prove di termografia online	47
3.2. Prove di termografia Lock-In offline	65
4. Conclusioni e sviluppi futuri	91
5. Bibliografia	93

Introduzione

La seguente tesi è stata redatta in seguito alle attività sperimentali svolte presso il Group Materials Labs del Centro Ricerche Fiat di Torino e ha riguardato lo studio della termografia ad infrarossi applicata come tecnica di controllo non distruttivo per indagare sulla qualità di giunti saldati; in particolar modo l'applicazione su saldature ad arco di lamiere sottili in acciaio di ampio uso nell'industria automobilistica. L'insieme delle attività svolte si colloca all'interno del progetto di ricerca FCA-Polito che ha visto la collaborazione tra il Dipartimento di Meccanica e Aerospaziale e Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione del Politecnico di Torino e i due centri di competenza di Analisi Fisiche e Metalli del Centro Ricerche Fiat.

Il principale motivo di questo studio deriva dalla necessità di rilevare e quantificare difetti che si presentano nelle giunzioni saldate, mediante metodi non distruttivi alternativi a quelli più dispendiosi dal punto di vista economico e sostitutivi a tecniche distruttive impiegate e che possano essere implementate agevolmente in campo industriale.

Tra i controlli non distruttivi, l'ispezione radiografica rappresenta una metodologia efficace nell'individuazione di difetti subsuperficiali e interni. Gli alti costi di investimento per le attrezzature ne limitano però il suo utilizzo massivo in campo industriale e viene sfruttata solo per alluminio, su casi in cui si debbano garantire livelli di elevata conformità e su componenti dedicati al mercato del lusso. Altra tecnica che non prevede la distruzione del campione utilizzata in ambito industriale è il controllo mediante liquidi penetranti, adeguata però solamente alla rilevazione di cricche superficiali e quindi non sufficiente ad attestare le buone proprietà di un componente.

Oggigiorno infatti, la qualità di un giunto saldato con tecnica ad arco è verificata tramite il taglio, incastonatura e analisi micrografica, supportata parallelamente da prova di durezza e trazione per la caratterizzazione meccanica, unico metodo che accerti pienamente le proprietà del materiale e l'assenza di difetti ma che prevede la distruzione del componente. A causa di ciò, il suo impiego in ambito industriale è limitato ad un controllo a campione su lotti.

La termografia si presta a poter essere una tecnica di ispezione implementata nel campo industriale in quanto presenta i vantaggi di potere ottenere misure a distanza e senza

contatto, è tecnica a campo intero con risultato immediato, si serve di immagini che sono di facile interpretazione e non richiede radiazioni pericolose.

Lo scopo primario dell'indagine è la valutazione dell'adeguatezza e efficacia qualitativa e quantitativa dell'utilizzo del controllo termografico nell'identificazione di difetti ed è stata realizzata attraverso un lavoro sperimentale condotto su due fronti: da un lato è stato studiato il metodo termografico passivo, o non stimolato, applicato durante il processo di saldatura e dall'altro è stato impiegato un approccio attivo attraverso tecnica stimolata Lock-In eseguita sulle unioni saldate in seguito alla loro realizzazione.

L'obiettivo finale è stata la messa a punto e calibrazione del monitoraggio termografico sul processo di saldatura online e del sistema innovativo di imaging ad emissione termica Lock-In laser offline, per consentire una corretta procedura di misurazione, e lo studio di fattibilità relativo all'individuazione e valutazione di eventuali difetti in giunzioni saldate realizzate variando i parametri di processo rispetto a condizioni ottimali.

1. Stato dell'arte

Termografia ad infrarossi e sua applicazione

Il campo principale in cui è inserito il presente lavoro è quello della termografia che è la tecnica non distruttiva che si avvale dell'acquisizione di immagini all'infrarosso non visibili all'occhio umano e che consente di ottenere una mappatura visibile della temperatura di un corpo [1]. Prevede la rilevazione senza contatto, elaborazione e visualizzazione della distribuzione della radiazione termica che irradia da un corpo ed è registrabile con uno strumento chiamato termocamera [2]. La termografia può essere adottata per rilevare e localizzare discontinuità come cricche, distacchi e inclusioni in materiali come compositi e metalli e può essere utilizzata anche associata a eccitazione termica a seconda del tipo di applicazione.

I test termografici possono essere eseguiti in modo attivo o passivo e in modo qualitativo, comparativo o quantitativo.

Si parla di termografia qualitativa se la densità di radiazione o della distribuzione di temperatura apparente sull'oggetto è adeguata a una valutazione del risultato della prova. Un esempio tipico è il controllo della variazione nel riscaldamento a pavimento o la localizzazione di perdite nelle tubazioni o di delaminazione nei laminati.

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

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

Trova applicazione nella classificazione termica di difetti in prova termica di macchine e sistemi elettro-meccanici e nella determinazione della profondità dei difetti.

Per avere successo richiede inoltre la scelta di un filtro spettrale idoneo che corrisponda alle caratteristiche spettrali dell'oggetto sottoposto a prova.

Lo strumento che esegue la termografia è la termocamera, strumento in grado di rilevare l'intensità della radiazione all'infrarosso di un corpo, che è invisibile all'occhio umano, e non di rilevare la temperatura come erroneamente si può pensare. L'elettronica della

macchina elabora la radiazione e produce un'immagine radiometrica digitale visibile in cui è possibile visualizzare la temperatura dell'oggetto rappresentata in falsi colori. Il calcolo tiene conto dell'emissività (ϵ) della superficie dell'oggetto di misura e della compensazione della temperatura riflessa (RTC), entrambe variabili che possono essere impostate manualmente nella termocamera dall'utente [3].

In letteratura si possono trovare molti documenti relativi ai fattori che influenzano l'emissività, parametro di non sempre semplice e immediata misurazione, in particolare per quanto riguarda i metalli [3].

Le termocamere presenti oggi sono di due tipologie, quelle raffreddate e quelle non raffreddate. Le prime hanno precisioni più alte e spesso costi più elevati; soprattutto in campo edile per questi motivi sono utilizzate maggiormente le termocamere non raffreddate.

La termocamera deve essere selezionata secondo l'applicazione e la temperatura dell'oggetto ispezionato e i parametri fondamentali per una termocamera [4], che devono essere forniti dal fabbricante, sono:

- sensibilità spettrale;
- intervallo di temperatura;
- risoluzione termica, sensibilità termica NETD;
- risoluzione spaziale o campo di vista istantaneo (IFOV);
- frequenza immagine;
- risoluzione temporale.

Le termocamere possono essere classificate secondo disposizione dei sensori, in:

- sensore elemento singolo con scansione opto-meccanica bidimensionale;
- scanner in linea con scansione opto-meccanica monodimensionale o serie di sensori lineare;
- matrice di sensori bidimensionale senza scansione meccanica (Focal Plane Array, FPA).

Le tipologie di sensori possono essere:

- sensori termici;
- sensori fotonici.

I sensori termici, come i microbolometrici o i piroelettrici, funzionano a temperatura ambiente mentre i sensori fotonici, i quali hanno maggior sensibilità e con cui si possono

avere frequenze immagine superiori, devono essere raffreddati a temperature molto basse e a tal scopo il raffreddamento può essere termo-elettrico, con azoto liquido o mediante dispositivi a espansione per macchine di refrigerazione.

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

Termografia passiva

La termografia passiva, [2] è quella che sfrutta soltanto il flusso di calore intrinseco dell'oggetto sottoposto a prova e comprende anche il calore generato internamente. Solitamente è utilizzata per ispezioni negli edifici, per l'ispezione dei sistemi elettrici e meccanici e nella diagnostica di processo e dell'installazione. Uno schema semplificato sull'impiego della tecnica, col fine di rilevare difetti subsuperficiali, è mostrato in Figura 1. Lo strumento termografico, posto frontalmente alla superficie dell'oggetto che si desidera ispezionare, acquisisce immagini di segnale termico generato da differenze di temperatura sulla superficie indagata che possono visualizzate a schermo rappresentato in falsi colori, registrate e processate.

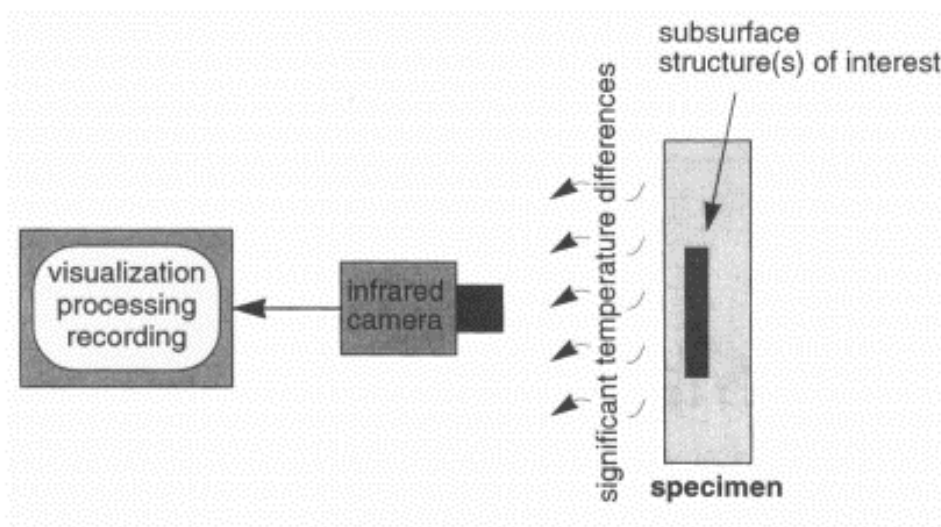


Figura 1. Schema termografia passiva

Termografia attiva con tecnica Lock-In

Con termografia attiva si definisce [4] l'impiego della tecnica termografia in cui è necessario fornire energia all'oggetto sotto osservazione, tramite stimolazione termica che può essere istantanea, periodica o continua, in modo che generi flussi di calore non stazionari che inducano variazioni di temperatura utili ad evidenziare eventuali difetti.

Secondo il tipo di eccitazione, la termografia attiva si classifica in:

- transitoria (pulsata, termografia a gradini)
- di modulazione (termografia lock-in, termografia a raffica di impulsi)

La termografia attiva inoltre comporta la scelta del tipo di sorgente eccitatrice e di valori di intensità e adeguata variazione dell'eccitazione nel tempo. L'analisi dei dati consente di estrarre informazioni quantitative sul campione ispezionato. In Figura 2 è illustrato lo schema semplificato

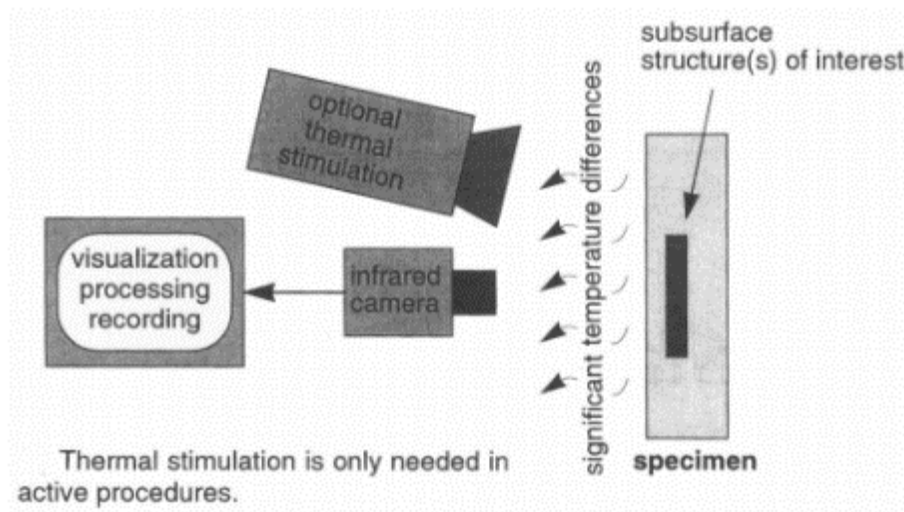


Figura 2. Schema termografia attiva

La termografia applicata come controllo non distruttivo (NDT) sfrutta solitamente sorgenti di calore esterne (ovvero proprio la termografia attiva [5-7]), ed esaminano la risposta termica del componente in regime stazionario, durante la deposizione di calore, ciò che avviene nella termografia Lock-In [8] e generalmente tramite la modulazione di onde termiche sinusoidali.

La termografia Lock In impiega onde termiche per eccitare il materiale da esaminare mediante l'utilizzo di una sorgente di calore esterna in regime stazionario e attraverso

radiazione infrarossa può essere acquisito il campo di temperatura risultante in regime stazionario. Con il termine Lock-in ci si riferisce alla dipendenza del segnale di uscita da quello di ingresso di eccitazione. È possibile sfruttare varie sorgenti tra cui laser o lampade. Le immagini ottenute del campo di temperatura, che sarà di tipo oscillatorio, elaborate con algoritmi di post-processing possono fornire informazioni relative alla fase, funzione del tempo di propagazione e l'ampiezza del segnale termico, funzione della diffusività termica. Le zone con presenza di difetti generano risposte termiche nel materiale diverse rispetto alle zone sane, quantificabili con la variazione di fase del segnale termografico.

I vantaggi della tecnica Lock-in sono il poter usufruire contemporaneamente delle immagini di fase e ampiezza ed inoltre le immagini di fase risentono in maniera inferiore della disomogeneità causata dalla stimolazione termica. Lo svantaggio maggiore è la scelta della frequenza di modulazione perché una frequenza non corretta potrebbe non permettere di rilevare il difetto.

La scelta di una forma d'onda sinusoidale permette l'ottenimento di un segnale molto pulito perché fornisce informazioni riguardanti una sola armonica. Una tecnica alternativa recente è basata invece sull'impiego di una modulazione impulsi termici, con un treno di onde quadre [9].

L'onda quadra consente di effettuare un'analisi multi-frequenziale e fornisce informazioni rispetto alla I, III e V armonica con un test di prova. Oltretutto, a frequenze di eccitazioni minori anche la III e V armonica presentano un buon rapporto segnale/rumore (SNR), simile a quello dell'onda sinusoidale.

Le frequenze più elevate sono caratterizzate da un "rumore" maggiore rispetto alla principale ma si ha l'enorme vantaggio di ridurre così il numero di prove e i tempi previsti.

Difetti in giunti saldati ad arco

Le imperfezioni geometriche che si possono riscontrare in giunti di saldatura possono essere distinte secondo la normativa [10] nelle seguenti macro-classi: cricche, cavità, inclusioni di solidi, mancanza di fusione e di penetrazione, imperfezioni di forma e di dimensioni e altre imperfezioni non classificate.

Le diverse forme di difetti sono elencate in Tabella 1 e associate alle possibili differenti cause che le possono generare.

Tabella 1. Difetti di saldatura secondo normativa UNI ISO 6520-1 correlate alle cause

1. Cricche	<p>Effetti ritiro del materiale</p> <p>Assenza di pre o post trattamento termico</p> <p>Bassa velocità di avanzamento</p> <p>Tensione/Voltaggio elevata</p> <p>Filo qualità scadente</p> <p>Impurità del materiale</p>
2. Cavità	<p>Arco lungo</p> <p>Insufficienza gas inerte</p> <p>Insufficiente purezza gas inerte</p> <p>Impurità del materiale</p>
3. Inclusioni di solidi	<p>Preparazione e pulizia lembi (ma poco probabile come difetto)</p> <p>Pulizia elettrodo (ma poco probabile come difetto)</p> <p>Filo qualità scadente</p> <p>Posizionamento torcia (troppo inclinata o distante)</p>

III. Shirinkage roots	
6. Imperfezioni varie non classificate I. Spruzzo	Filo di qualità scadente Tensione troppo alta

2. Materiali e metodi sviluppo del Lavoro

In questo capitolo vengono illustrati nel dettaglio i materiali, le procedure, la strumentazione hardware e software impiegati e l'ambiente in cui sono state condotte le prove sperimentali che hanno visto la realizzazione dei giunti saldati affiancate dall'ispezione diretta del processo online tramite controllo termografico ed offline in seguito al processo di saldatura. In primo luogo, sono descritte le caratteristiche e i parametri specifici riguardanti le prove di realizzazione dei giunti saldati ed il relativo monitoraggio termografico, in seguito, sono presentati dettagliatamente i protocolli e gli strumenti adoperati per i test di termografia attiva con tecnica di modulazione Lock-In laser.

Termografia passiva applicata online sul processo di saldatura

Questa sezione è volta all'illustrazione delle prove di saldature e di ispezione termografica realizzati in parallelo presso il Laboratorio di saldature e giunzioni del centro di competenza Metalli, all'interno del Group Materials Lab.

Gli esperimenti effettuati consistono nella realizzazione di giunti testa a testa con cordone in una sola passata, ottenuti tramite processo di saldatura ad arco pulsato di tipo MAG e a tal scopo si è impiegato l'impianto robotizzato di saldatura ad arco, costituito dal generatore di saldatura del tipo Transpulse Synergic 4000 CMT della Fronius, Figura 3, e il robot antropomorfo a sei assi con secondo braccio a due assi per base di appoggio, fornito dalla COMAU, Figura 4.



Figura 3. Generatore di saldatura ad arco filo continuo CMT (Fronius)



Figura 4. Robot antropomorfo a sei assi (COMAU)

Il suddetto sistema viene utilizzato servendosi della tecnica di saldatura Cold Metal Transfer che presenta i vantaggi di un processo con apporto termico ridotto, minore deformabilità delle lamiere, elevata stabilità dell'arco elettrico e assenza di spruzzi di saldatura sulla superficie del giunto.

Il materiale base impiegato per realizzare le unioni saldate è un acciaio dual phase con designazione commerciale DP600 zincato, le cui proprietà meccaniche e composizione chimica sono fornite nelle Tabella 2 e Tabella 3.

Tabella 2. Caratteristiche meccaniche dell'acciaio DP600

YS	TS	A50%	A80%	n4-6%	n10%-UE	BH2
330-430 MPa	590 MPa	21	20	0.18	0.14	30 MPa

Tabella 3. Composizione chimica dell'acciaio DP600

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ti+Nb	Cr+Mo	B
0.15	0.75	2.5	0.08	0.015	0.01	0.2	0.15	1.4	0.005

Si tratta di un acciaio bifasico bassolegato, alto resistenziale, che viene realizzato per laminazione a freddo e presenta una microstruttura costituita da una fase martensitica dura per il 20% dispersa in matrice ferritica duttile. La ferrite conferisce all'acciaio un'eccellente duttilità, mentre la martensite rappresenta la fase dura, capace di garantire un'alta resistenza a rottura. Quando questi acciai subiscono lavorazione, la deformazione si concentra nella ferrite, causando un elevato incrudimento per deformazione e tale meccanismo si combina alle ottime caratteristiche di allungamento per conferire un basso valore del rapporto snervamento/rottura e, quindi un carico di rottura più alto rispetto ad acciai convenzionali caratterizzati da analogo limite di snervamento.

Queste proprietà associate a elevata formabilità, buona saldabilità, capacità di incrudimento ed ottima resistenza a fatica consentono a questi acciai di essere largamente utilizzati per applicazioni automobilistiche.

Per l'esecuzione delle giunzioni, si fa uso di lamiere di spessore 1,5 mm ricavate per tranciatura in officina meccanica. In seguito, si procede ad una pulizia dei bordi di dimensione maggiore che costituiscono i due lembi dell'unione saldata, i quali vengono lavorati per mezzo di sbavatore elettrico manuale avendo cura di rimuovere eventuali sbavature presenti procurate dal taglio, col fine di eliminare effetti indesiderati in fase di saldatura.

La miscela di gas attivo utilizzata per la protezione del bagno di saldatura è M21 Ar+18%CO₂, miscela composta da 82% da Argon e 18% CO₂, normalmente impiegata per acciai al carbonio e bassolegati.

Il materiale d'apporto è un filo in acciaio dolce ramato per acciai bassolegati con denominazione commerciale G3Si1, le cui proprietà meccaniche e composizione chimica sono riassunte in Tabella 4 e Tabella 5.

Tabella 4. Caratteristiche meccaniche del materiale d'apporto

Nomenclatura	YS	TS	A ₅
G3Si1	420 MPa	530 MPa	24-29%

Tabella 5. Composizione chimica del materiale d'apporto

Nomenclatura	C	Si	Mn
G3Si1	0.08	0.6-0.8	1.18-1.25

La termocamera ad infrarossi impiegata per acquisire il segnale termografico del processo di saldatura è del tipo AGEMA Thermovision® 900 SW-TE della FLIR Systems, Figura 5, equipaggiata con detector SPRITE raffreddato termo-elettricamente, avente una risoluzione termica NETD pari a 0,1 °C e adatta al range spettrale da 2 a 5,4 µm. Caratteristiche specifiche sono riportate in Tabella 6.



Figura 5. Termocamera AGEMA Thermovision® 900 SW-TE (FLIR Systems)

Tabella 6. Caratteristiche della termocamera AGEMA Thermovision® 900 SW-TE

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

La sequenza di immagini, o termogramma, è acquisita dallo strumento direttamente collegato con un'interfaccia PCMCIA al PC che, mediante il software specifico del costruttore, ThermaCAM Researcher™ Pro 2.8, Figura 6, consente di generare file di acquisizione in formato SEQ, filmati termografici che possono essere visualizzati a schermo per estrarre informazioni qualitative sulla distribuzione delle temperature e anche essere elaborati posteriormente con gli strumenti interni al programma. Le

impostazioni dei parametri di visualizzazione possono infatti essere modificate e calibrate in seguito alla registrazione delle immagini, grazie alla loro digitalizzazione in formato 12bit che permette analisi con la stessa accuratezza di analisi in tempo reale.

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

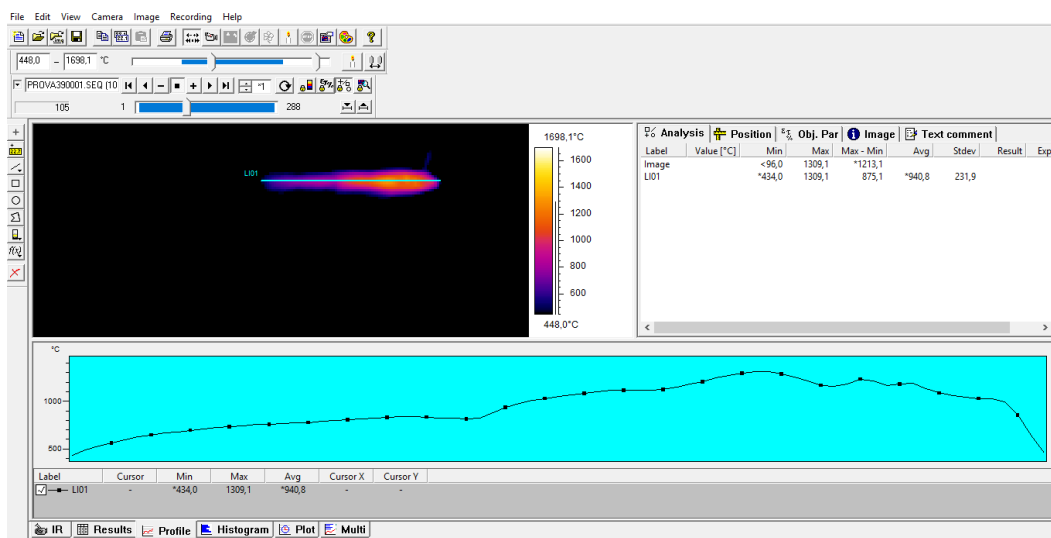


Figura 6. Schermata del software di acquisizione ThermoCAM Researcher™ Pro 2.8

Il filtro utilizzato per la registrazione delle prove di saldatura è il Glass High Temperature, adatto per misurazioni ad elevate temperature del vetro o per saldature fino a 2500°C, sopprime la radiazione a onda corta al di sotto dei 4.8 µm, Figure 7-8. L'intervallo di temperatura selezionato è da 500°C a 2500°C, e a causa di questi limiti imposti dalla strumentazione non è quindi possibile per il presente studio tenere sotto controllo il processo nella fase di riscaldamento e raffreddamento al di sotto dei 500°C. L'uso di questo filtro non permette registrazioni a massimo frame rate di 30 Hz, infatti il sensore scansiona le temperature durante la saldatura acquisendo 208×86 pixel, in modalità di finestra ridotta che permette di avere il massimo frame rate possibile di circa 7 Hz.

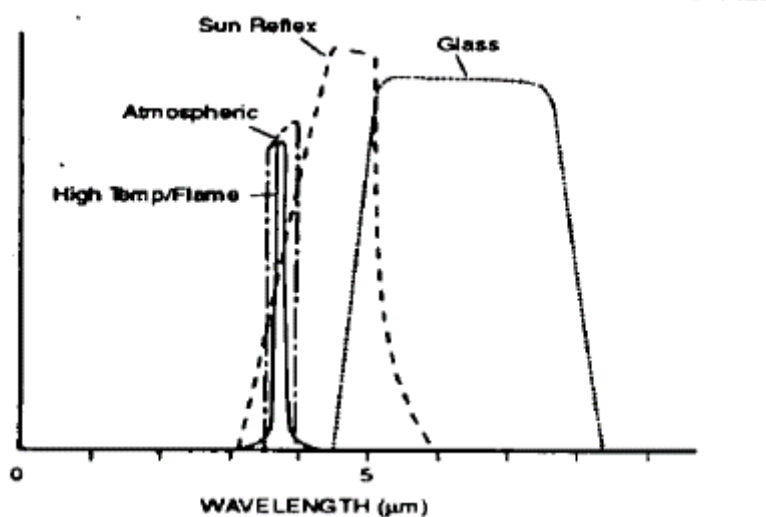


Figura 7. Risposta del sistema con 'utilizzo dei filtri standard a onda corta disponibili.

Range 1	-10°C - 80°C	Full gain Aperture 1
Range 2	0°C - 150°C	Reduced gain Aperture 1
Range 3	50°C - 250°C	Aperture 2
Range 4	100°C - 500°C 2000°C with filter	Aperture 3

Lens FOV	Minimum focus (metres)	Geometric resolution (mrad)
2.5° x 1.55°	20 m	0.31
5° x 3.13°	5 m	0.62
10° x 6.25°	1.2 m	1.25
20° x 12.5°	0.6 m	2.5
40° x 25°	0.3 m	4.9

Figura 8. Range di temperature lenti standard di Thermovision® 900 SW-TE

La fase preliminare di test ha avuto lo scopo di apprendere le caratteristiche del processo e dei sistemi da abbinare e la seguente ricerca e individuazione delle condizioni di prova ottimali per l'esecuzione del piano prove sperimentali definitivo:

- dimensione delle lamiera da saldare;
- configurazione del sistema di fissaggio delle lamiera;
- parametri specifici del processo di saldatura;

- posizionamento relativo tra sistema di acquisizione termografico e zona di saldatura da analizzare;
- parametri che deve regolare l'utente sulla termocamera per una corretta misurazione termografica.

Le condizioni ottimali devono soddisfare il requisito iniziale di realizzazione di giunti esenti da difetti che quindi saranno considerati campioni di riferimento su cui eseguire la calibrazione e verifiche iniziali. Questa prima fase ha visto l'esecuzione in totale di 48 giunzioni di saldatura e altrettante acquisizioni termografiche per poter conseguire i risultati qualitativi desiderati, valutati a livello macroscopico con controllo visivo e esigendo un livello minimo accettabile di riproducibilità di prova fissato sulla corretta esecuzione di almeno 5 prove consecutive.

Per limitare problemi di distorsione e allineamento delle lamiere durante la saldatura si è stabilito di utilizzare dimensioni di 100x150 mm, generando la giunzione tra i lati maggiori così da ottenere lunghezze di cordone di almeno 100 mm, Figura 9.

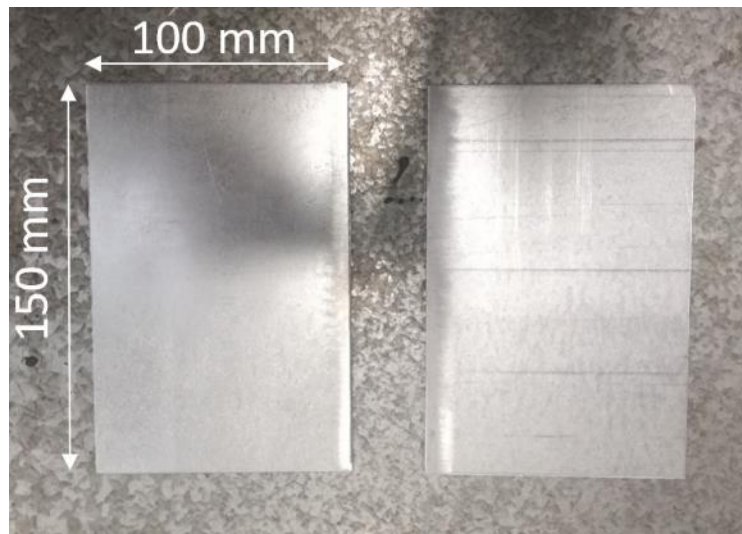


Figura 9. Lamiera DP600 utilizzate per i giunti

Il sistema di fissaggio lamiere definitivo preso in considerazione è quello presentato in Figura 10 e la procedura completa prevede l'iniziale collocazione di due piastre spesse 4 mm parallele in posizione fissa delimitata sopra la base di appoggio del secondo braccio robot, per consentire la presenza di una cava centrale in corrispondenza del cordone di saldatura. In punti ben delineati sopra le precedenti piastre, vengono accuratamente

posizionate le due lamiere da saldare, alle cui estremità vengono applicati gli spessori distanziali della dimensione necessaria per riprodurre il gap finale che si vuole ottenere nel giunto finito, Il serraggio finale avviene tramite un set di 5 pinze grip a morsetto.



Figura 10. Configurazione del bloccaggio delle lamiere su piastra di appoggio

Grazie a questo primo step sono stati ottenuti 5 giunti saldati esenti da difetti con dimensioni del cordone comprese tra 100 e 110 mm, realizzati con medesimi parametri di saldatura e di cui è stata attestata la buona qualità mediante analisi metallografica, svolta dai Laboratori di micrografia del Centro Ricerche Fiat. Uno dei giunti 5 di riferimento è illustrato in Figura 11.

In virtù di ciò, i suddetti campioni e i relativi parametri di saldatura con cui essi sono stati eseguiti, riassunti in Tabella 7, sono ritenuti il riferimento delle attività sperimentali a cui apportare le variazioni col fine di ottenere giunti da poter confrontare che presentano comportamento anomalo e difettoso.

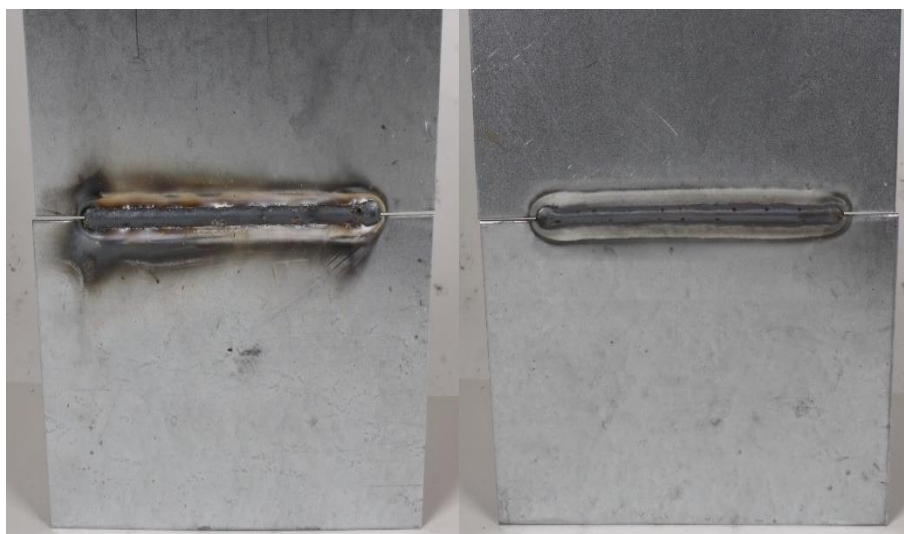


Figura 11. Fronte e retro di un giunto di saldatura di riferimento esente da difetti

Tabella 7. Parametri di saldatura ottimali dei campioni iniziali di riferimento

Stick out	15 mm
Velocità di avanzamento filo metallo d'apporto	2 m/min
Velocità di avanzamento torcia (braccio robot)	500 mm/min
Distanza tra i lembi (gap)	1,2 mm
Portata in volume di gas della miscela	15 l/min
Preapertura gas	1 s
Ritardo chiusura	1 s
Voltaggio Medio Reale	13,6 V
Intensità di corrente Media Reale	92 A
Apporto termico specifico	25,024 J/cm

La termocamera che esegue il controllo online è stata posta all'interno della cella di saldatura nella posizione finale mostrata in Figura 12 con le rispettive distanze quotate.

La ripresa è effettuata dall'alto avendo cura di focalizzare l'inquadratura sull'area di maggior interesse, cioè tutta la lunghezza del cordone di saldatura in ogni istante del processo, in modo da permettere la rilevazione di differenze della temperatura superficiale minime dovute a fattori interni all'oggetto e quindi di interesse per lo studio.

La scelta della posizione è stata effettuata tenendo in considerazione gli ingombri dei movimenti del braccio robot, cercando di ottenere la minima interferenza possibile della torcia di saldatura all'interno delle immagini, la distanza minima di sicurezza al riparo da possibili lapilli di saldatura che possono danneggiare la lente al germanio e fattori che influiscono sulla misurazione termografica, come l'angolo di vista rispetto al corpo osservato [4]. A questo riguardo si è perciò imposto un posizionamento il più ortogonale possibile rispetto alla superficie del giunto, con un'angolazione relativa inferiore ai 25°, così da non influenzare il valore di emissività.

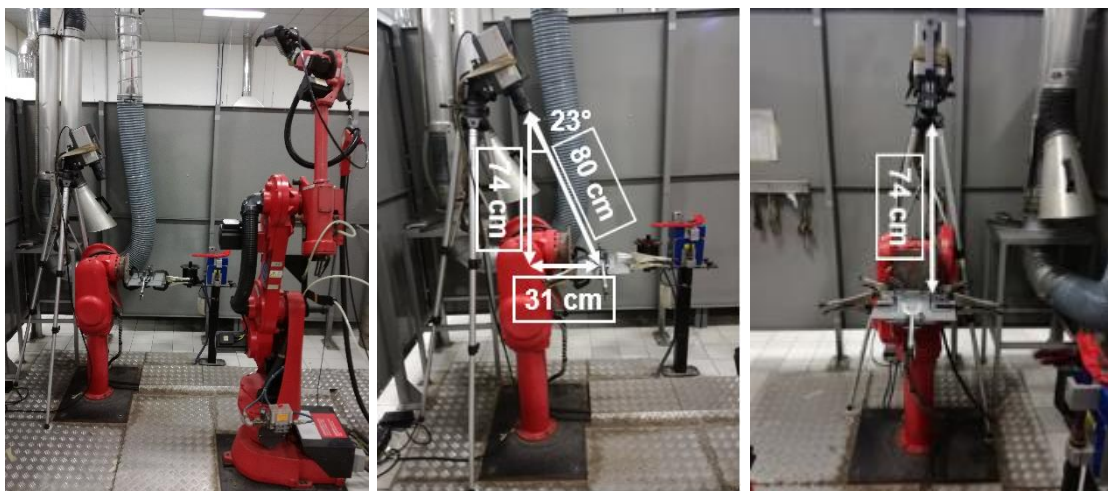


Figura 12. Localizzazione termocamera in cella di saldatura

In seguito alla calibrazione, sono stati regolati i valori da assegnare, per tutte esperienze pratiche di questo lavoro, ai parametri interni del software della termocamera di cui si è già discusso nel Capitolo 1, Tabella 8, affinché la temperatura superficiale misurata sull'oggetto studiato accurata e indisturbata da fattori derivanti dall'ambiente e dalla struttura esaminata.

Tabella 8. Parametri della termocamera inseribili dall'utente

Coefficiente di emissività	0,4
Distanza tra oggetto e termocamera	0,8 m
Temperatura riflessa	20°C
Temperatura ambiente	20°C

Umidità relativa	30%
Temperatura elementi ottici	20°C
Range di temperature	450°C -1700°C

Un commento particolare va fatto rispetto al valore di emissività impostato, per il quale sono state effettuate alcune ipotesi semplificative a causa dell'impossibilità di stabilire un parametro assoluto reale per il cordone durante la fase di saldatura.

La saldatura ad arco di acciai infatti è un processo dinamico che prevede la fusione dei materiali base e metallo di apporto con conseguente cambiamenti di fasi e di microstrutture interne ed inoltre le temperature possono raggiungere i 1500°C.

L'emissività nei metalli ha valori molto bassi ed è dipendente dalla temperatura, ad un aumento corrisponde un incremento del coefficiente. L'ampio intervallo di temperature che si ottengono durante il processo non consente di trascurare questa dipendenza. In queste condizioni risulta però complicata una sua corretta valutazione sia per la natura in sé del processo che prevede trasformazioni microstrutturali del materiale, sia per le elevate temperature a cui si giunge che non permettono le procedure convenzionali di misurazione dell'emissività dovuto all'assenza di strumentazione di misurazione termica a contatto adeguata.

A fronte di queste considerazioni e sulla base che la temperatura di fusione degli acciai si aggira tra i 1300°C e i 1500°C, il valore di emissività è stato regolato tramite osservazione delle sequenze termografiche, analizzando le distribuzioni di temperatura durante il processo in corrispondenza dei punti centrali del cordone e tarando il coefficiente in modo da ottenere intervalli di fusione desiderati, Figure 13-14. La procedura è supposta valida in quanto si è ottenuto un valore di emissività superiore rispetto ai coefficienti convenzionali tabellati in letteratura per acciai al carbonio zincati a temperature inferiori, rispettando quindi la corretta dipendenza dall'aumento della temperatura.

I valori di temperatura così ottenuti possono essere ritenuti apparenti perché ricavati con la procedura suddetta però adeguati ad una valutazione qualitativa oggetto dello studio, focalizzando confronti e analisi sulle differenze relative di temperatura e non su valori assoluti.

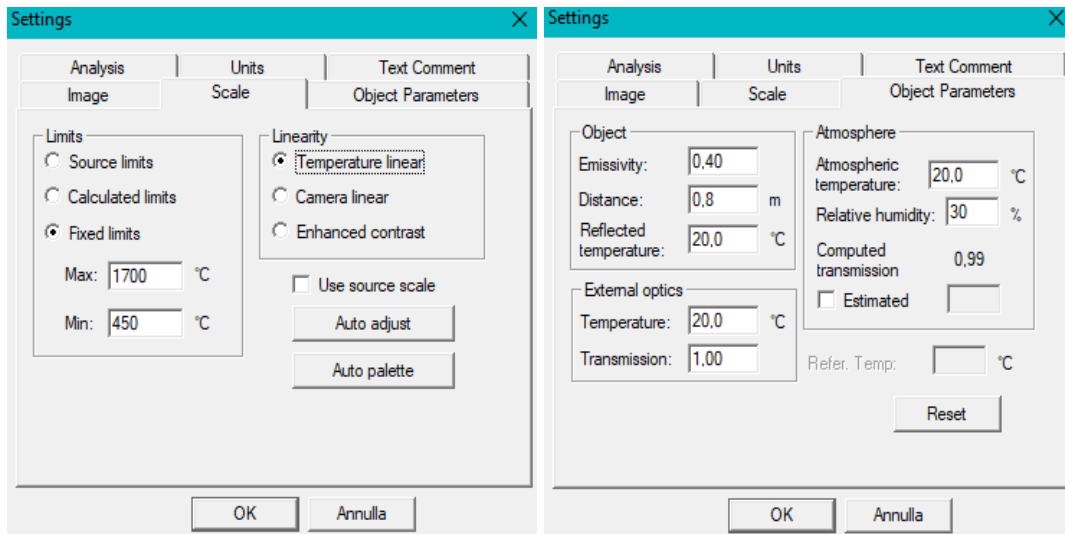


Figura 13. Impostazione parametri di taratura della termocamera

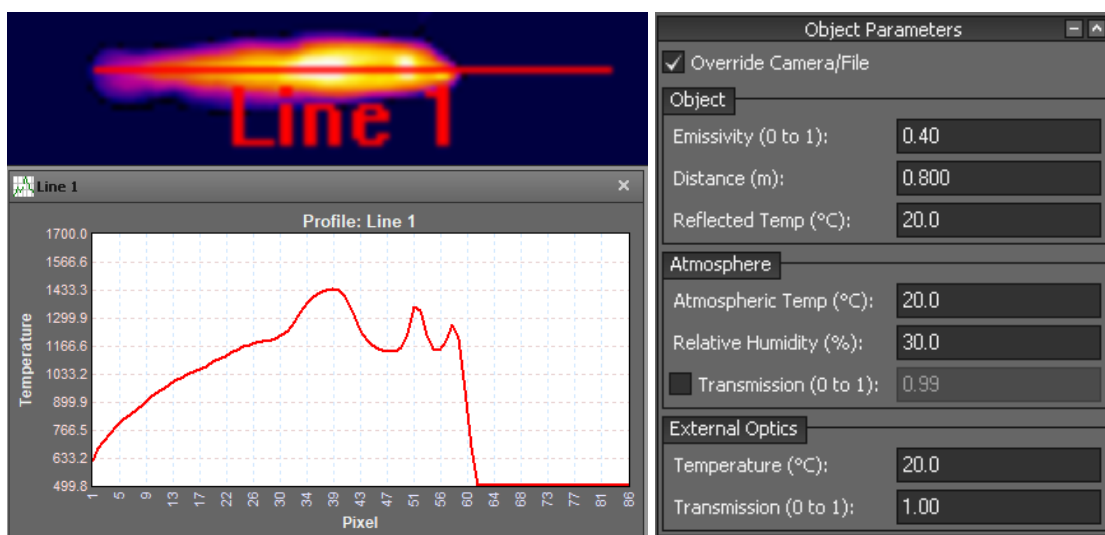


Figura 14. Taratura parametro di emissività

La distanza imposta permette di definire l'area totale dell'immagine acquisita di 208x86 pixel corrispondente a circa 270x112 mm in dimensioni reali, con dimensione del singolo pixel di circa 1,3 mm.

La temperatura ambiente di laboratorio è di circa 20°C con umidità relativa circa 30%. Nonostante la saldatura abbia temperature più elevate rispetto agli oggetti presenti nell'ambiente circostante, col fine di eliminare eventuali interferenze e riflessione che

potrebbero derivare da fonti di illuminazione, gli esperimenti sono condotti a luci spente e la temperatura riflessa viene supposta pari a quella ambiente.

Le condizioni di acquisizione, Figura 15, prevedono la registrazione alla massima velocità, cioè massimo frame rate, di sequenze di immagini della durata di 40 secondi, per garantire il salvataggio anche delle immagini in raffreddamento fino a 500°C, limite del filtro utilizzato. L'avvio della ripresa avviene mediante comando manuale da tastiera del computer, prontamente avviata prima dell'inizio della saldatura.

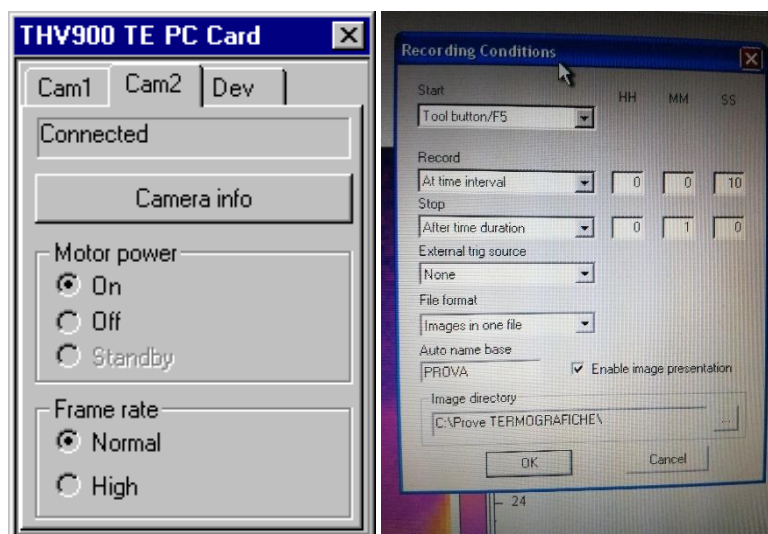


Figura 15. Schermata di controllo delle condizioni di registrazione delle immagini termiche

Il proseguimento delle attività ha riguardato la selezione dei parametri da modificare allo scopo di ottenere dei giunti saldati con induzione di difetti da poter rilevare con le tecniche non distruttive. La scelta si è basata sulla combinazione dei tipi di difetto della saldatura ad arco, trattati nel Capitolo 1, e i casi di anomalia che maggiormente si presentano e causano problematiche in produzione industriale grazie ai parametri controllabili, quindi di maggiore interesse e con la possibilità di poterli riprodurre nelle esperienze di laboratorio. I parametri su cui ci si è focalizzati sono:

- Distanza tra i lembi (gap);
- Flusso di gas;
- Velocità di avanzamento della torcia.

Le prove di saldatura sono state condotte per ognuno dei parametri individuati avanzando con modifica dei valori per step rispetto al nominale, fino al raggiungimento di condizioni

critiche di saldatura in cui l'ottenimento di un giunto anomalo o con difetti fosse visibile macroscopicamente. Giunti a quella condizione ci si è posti alle condizioni limite precedenti in cui la variazione del parametro riuscisse ancora a garantire la realizzazione del giunto ed eseguire le prove con un livello di riproducibilità che in questa fase è stato considerato accettabile con un minimo di 3 prove consecutive, vista l'utilizzo di parametri di processo non ottimali.

Il piano prove sperimentali risultante realizzato è riassunto in Tabella 9, suddiviso per classi in base al parametro di processo variabile impiegato e definendo per singolo campione la propria condizione di criticità.

Tabella 9: Piano prove sperimentali per classi di giunti con parametri variabili

Classe/ parametro variabile	Repliche	Gap tra i lembi	Iniezione Gas	Velocità avanzamento torcia	Stato di criticità
Variazione del gap	3	1,3 mm	15 l/min	500 mm/min	Limite
	3	1,5 mm	15 l/min	500 mm/min	Critico
	3	1,8 mm	15 l/min	500 mm/min	Supercritico
Variazione di gas	5	1,2 mm	10 l/min	500 mm/min	Limite
	1	1,2 mm	9 l/min	500 mm/min	Critico
	1	1,2 mm	7 l/min	500 mm/min	Supercritico
Variazione velocità avanzamento torcia	1	1,2 mm	15 l/min	540 mm/min	Buono
	1	1,2 mm	15 l/min	560 mm/min	Buono
	5	1,2 mm	15 l/min	580 mm/min	Limite
	1	1,2 mm	15 l/min	600 mm/min	Critico
	1	1,2 mm	15 l/min	620 mm/min	Supercritico

I giunti ritenuti oltre la condizione limite sono stati scartati e non utilizzati per i successivi confronti con i campioni di riferimento, a meno di alcuni confronti puramente qualitativi, effettuati successivamente in sede separata. L'insieme dei soli campioni con cui si è proceduto ad elaborazione delle acquisizioni termografiche, con lo scopo di estrapolare dati per un'analisi comparativa, si delinea nella Tabella 10.

Nel caso specifico dei giunti con variazione di apporto in volume del gas e con variazione dell'avanzamento torcia, sono state eseguite delle analisi radiografiche presso i Laboratori di prove non distruttive del Centro Ricerche Fiat, allo scopo di valutare l'eventuale presenza di porosità. I risultati hanno confermato l'esistenza, seppur in minima percentuale e con minime dimensione, di questi difetti all'interno dei primi dove una diminuzione di gas ha reso l'atmosfera più reattiva mentre nel secondo caso non sono state rilevate porosità di alcun tipo.

Tabella 10. Piano prove sperimentali definitivo per classi di giunti a confronto

Classe/Tipo di giunto	Repliche	Gap tra i lembi	Iniezione Gas	Velocità avanzamento torcia
Esente da difetto	5	1,2 mm	15 l/min	500 mm/min
Variazione del gap	3	1,3 mm	15 l/min	500 mm/min
Variazione di gas	5	1,2 mm	10 l/min	500 mm/min
Variazione velocità avanzamento torcia	5	1,2 mm	15 l/min	580 mm/min

Per la visualizzazione delle immagini termografiche di questi giunti saldati e la loro successiva elaborazione ed analisi, è stato utilizzato il software ResearchIR Max 4.40 della FLIR Systems, una versione più aggiornata rispetto all'analogo ThermaCAM Researcher™ Pro 2.8.

In primo luogo, è stato impiegato un approccio di analisi visivo-qualitativo dei filmati con lo scopo di individuare elementi di confronto all'interno della singola classe di giunzioni saldate e diversità rilevanti tra classi distinte che saranno commentati nel Capitolo 3.

I metodi di confronto di cui ci si è serviti nell'elaborazione e saranno descritti, sono stati essenzialmente di due tipi:

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

La prima tecnica utilizzata ha previsto l'individuazione di tre punti precisi su ogni singolo cordone, posizionati precisamente a distanza di 15 mm dall'inizio della saldatura, a metà

del cordone e a 15 mm prima rispetto alla fine. Questo approccio è stato pensato per individuare il minimo numero di punti per singolo cordone che potesse essere sufficiente a descrivere il comportamento complessivo della saldatura. Le distanze considerate da inizio e fine cordone sono state volutamente imposte conformemente ad un capitolato interno Fiat che stabilisce che siano trascurati almeno i primi e ultimi 5 mm in un cordone di saldatura per la caratterizzazione e valutazione qualità di un giunto saldato. Il punto a centro cordone rappresenta inoltre la posizione standard in cui vengono eseguiti i controlli metallurgici per discriminare se un giunto sia accettabile. L'esclusione dell'ultimo tratto di saldatura consente anche di non tenere in considerazione l'effetto di disturbo che genera la fermata finale della torcia nell'atto conclusivo di saldatura.

I tre punti così identificati, vengono contrassegnati nelle immagini termografiche da un cursore ROI (Region of Interest) di 3x3 pixel, come in Figura 16, che permette di ottenere a video 3 curve che descrivono l'andamento temporale della temperatura per ciascuno dei 3 punti, i quali saranno risultato di una media di temperature apparenti in ogni istante di tempo in un'area di 9 pixel in totale.

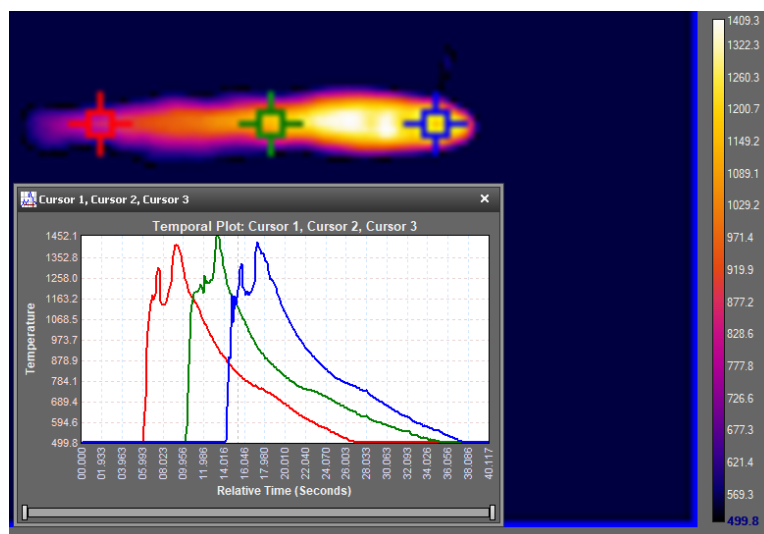


Figura 16. Andamento cicli termici di 3 punti su un giunto di riferimento

Le curve così ottenute eseguendo lo stesso procedimento per tutte le classi di giunti realizzati, possono essere salvate in file in formato CSV e quindi essere importati in programma di elaborazione dati Microsoft Excel. L'andamento, non perfettamente a campana che si può apprezzare, può essere dovuto principalmente a due fattori: scintille

che si generano durante il processo e che si interpongono tra la lente della termocamera e il giunto saldato; oscuramento della visuale da parte dell'elettrodo.

Con questa serie di dati immagazzinati dei singoli punti, l'elaborazione è proseguita da un lato con l'intento di comparare il comportamento dei punti sullo stesso cordone, valutando i valori massimi che raggiungono le singole curve di riscaldamento e identificando un valore medio di temperatura massima per singolo campione. In seguito, eseguendo un calcolo di media dei precedenti valori tra replicazioni di giunti appartenenti alla stessa tipologia, si è voluto identificare un parametro che caratterizzasse le diverse classi di giunti.

In virtù del fatto che gli andamenti termici lungo la direzione di saldatura possano variare in maniera sostanziale tra inizio a fine cordone, ovvero tra inizio e fine processo di saldatura, si è voluto procedere in parallelo eseguendo il confronto tra curve termiche di punti di diversi campioni appartenenti alla stessa classe però localizzati in stessa posizione relativa lungo il cordone. Si è individuato così un andamento medio per ogni classe di giunzioni, distinti per punti di inizio, centro e fine saldatura che sono stati poi comparati tra le diverse classi.

Per il singolo caso di variazione di gas di protezione, sono stati individuati anche i singoli punti di porosità ritenuti significativi tramite radiografia e di essi si è estrapolata la medesima curva di ciclo termico per poterla confrontare.

La seconda metodologia adottata si avvale invece dell'estrapolazione di una curva di temperatura nel tempo di un'area individuata tramite posizionamento di una ROI Box, cioè di un'area selezionata di 7 pixel in larghezza, corrispondenti a circa 9 mm in sezione trasversale rispetto alla direzione del cordone, e che comprenda tutti i punti del cordone tra gli stessi estremi considerati nel primo metodo, ovvero da 15 mm rispetto a inizio cordone fino a 15 mm dalla fine del giunto, Figura 17. La temperatura è quindi una media delle temperature dei punti presenti nell'area del cordone in ogni istante di tempo. Si vuole sfruttare questo strumento considerando che in classi di giunti come quelli generati con l'aumento del gap e l'aumento della velocità della torcia, la variazione del parametro di processo ha provocato una sensibile riduzione in spessore e sezione del cordone, quindi l'influenza di questo effetto si presume possa manifestarsi nell'andamento medio su tutta l'area del cordone. L'andamento medio in giunti realizzati con decremento di volume di gas, potrebbe vedersi influenzato dal comportamento delle porosità presenti che

altrimenti non sarebbero individuabili singolarmente con perfetta precisione, per un confronto puntuale.

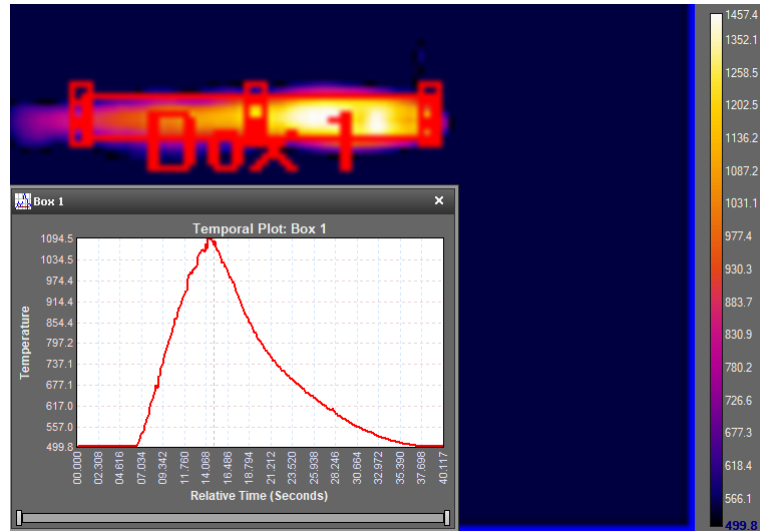


Figura 17. Andamento temporale temperatura media box cordone

Gli andamenti estrapolati per ogni singolo campione con quest'ultima tecnica, sono stati messi a confronto all'interno della stessa classe per calcolarne un andamento medio da poter utilizzare per una comparazione tra le diverse classi.

I risultati delle elaborazioni ottenuti con le tecniche descritte in questa sezione saranno illustrati e trattati nel Capitolo 3.

Termografia Lock-In applicata offline su giunti saldati

Questa sezione descrive le prove di indagine con termografia attiva con tecnica Lock-In che sono state condotte presso il Laboratorio di ottica del centro di competenza Analisi fisiche, all'interno del Group Materials Labs.

Le esperienze di laboratorio prevedono la stimolazione mediante sorgente di calore di tipo laser dei giunti saldati con tecnica ad arco MAG, già oggetto di studio della sezione 2.1, ed acquisizione del segnale termico di risposta del materiale da parte della termocamera.

A tal fine è stato utilizzato il sistema di laser termografia fornito dalla DES, denominato MultiDES System Laser, Figura 18, uno strumento di eccitazione termica modulare brevettato per effettuare controlli non distruttivi con tecnica termografica su materiali di diversa natura.

Questa configurazione laser, che trova la sua principale applicazione nell'ispezione di metalli e per l'analisi delle saldature, assicura elevata duttilità, grazie alla possibilità di modulare la potenza e la dimensione del fascio, garantendo ottima risoluzione geometrica.



Figura 18. MultiDES System Laser

Il sistema è composto complessivamente da:

- Centralina elettronica di controllo DES, la quale consente di gestire differenti forme d'onda e diverse sorgenti di eccitazione termica oltre che di acquisire il segnale termico dalla termocamera;
- Modulo Laser (YLP-V2 Series 1mJ energy Pulsed Itrerbium Fiber Laser), Laser Control Unit (LCU) composto da Laser in fibra da 30W di potenza massima, testa di scansione e Beam expander 2-8x, Tabella 12;
- PC;
- Termocamera FLIR X6540sc con sensore di tipo raffreddato ad alte prestazioni, con specifiche tecniche in Tabella 11;

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

Tabella 11. Caratteristiche termocamera FLIR X6540sc (FLIR System)

Detector	FPA Indium Antimode (InSb) raffreddamento a ciclo chiuso Stirling a 77K
Campo spettrale	Da 1,5 a 5,1 μm (Short Wave length)
Pitch	15 μm
Sensibilità termica NETD	< 25mK (18mK tipico)
Integration time	Da 160ns a 20000 μs
Campo di vista (FOV)	11°x8,8°
Range di temperatura	Da 5°C a 300°C (senza filtri)
Filtri disponibili	3 (CO ₂ , Through Glass, Through Flame)
Accuratezza	$\pm 1^\circ\text{C}$ o $\pm 1\%$ della lettura
Frequenza acquisizione immagine	125 Hz (Full frame)
Massima image frequency	4011 HZ
Risoluzione delle immagini	640x512 pixel (Full frame)
Numero di linee per frame	512
Pixel per linea	640
Numero di pixel	327680
Windowing	320x256/160x128
Digitalizzazione immagini	14bit

Tabella 12. Caratteristiche specifiche del Modulo Laser

Tipologia	Pulsed Itterbium Fiber Laser
Potenza massima	30 W
Forma d'onda	Impulso singolo/treni di impulsi
Ripetizioni	1-65025
Durata impulso	5 ms – 10000 s (step 1 ms)
Modulazione potenza	11-100% (step 1%)
Dimensione spot laser	6-9 mm

Le prove basate su termografia attiva, sono state eseguite in modalità riflessione, cioè con fonte di stimolazione termica e termocamera posizionate dalla stessa parte e l'eccitazione viene indotta localmente in un punto del cordone di saldatura.

La procedura di prova consiste nel posizionamento accurato del campione da esaminare all'interno della cabina di protezione, sistemando il retro della lamiera contro la parete della cabina protettiva, in maniera tale da avere la parte frontale del cordone in direzione orizzontale e frontalmente alla termocamera ad una distanza di 2 m, come si nota in Figura 19. Grazie all'aiuto del puntatore rosso del laser si centerà il punto preciso da dover indagare e dopo aver chiuso la tenda protettiva è quindi possibile agire in condizioni di sicurezza e armare il laser. Il campione è così riscaldato con un treno di impulsi laser di breve durata e sia il riscaldamento che il successivo raffreddamento vengono registrati dalla FLIR X6540sc, equipaggiata con detector FPA InSB, avente una risoluzione termica NETD inferiore a 25mK e adatta al range spettrale da 1,5 a 5,1 μm . La termocamera avvia l'acquisizione grazie ad un controllo trigger con il laser con cui è sincronizzata ed è direttamente collegata al pc e gestita con software ResearchIR Max 4.40, che permette la registrazione delle sequenze di immagini in file formato PTW che possono essere direttamente visualizzate a video per estrarre informazioni qualitative sulle temperature, come in Figura 20.

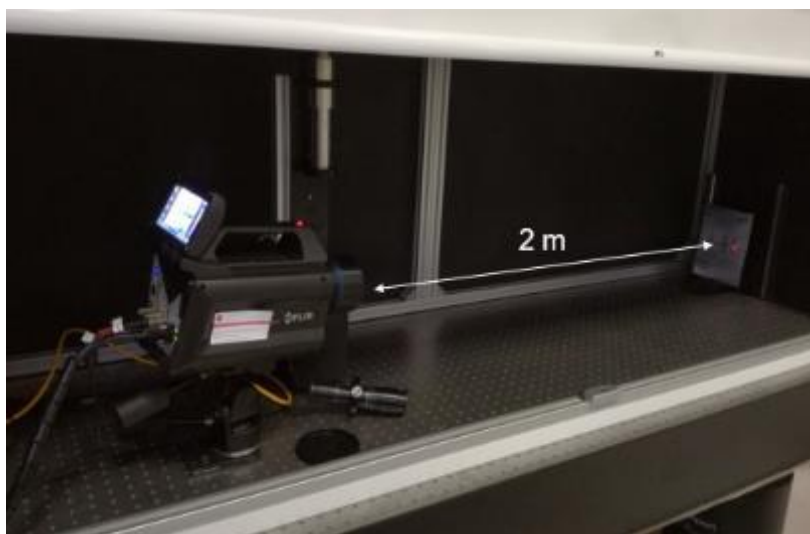


Figura 19. Posizionamento campione in cabina protettiva

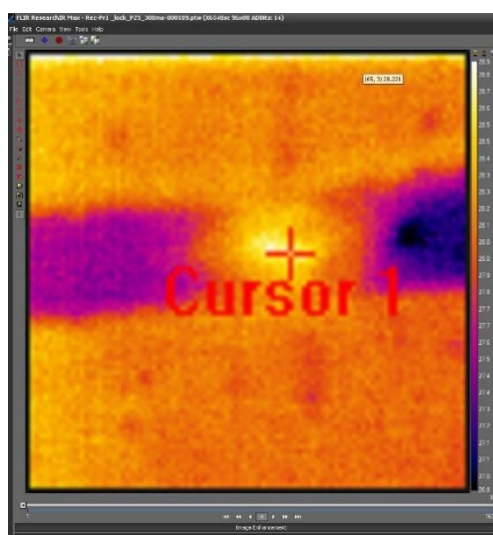


Figura 20. Visualizzazione di un frame del segnale termico acquisito con ResearchIR Max

Per i test sono stati adottati treni di impulsi di eccitazione in forma d'onda quadra, di cui si conoscono le potenzialità e vantaggi rispetto ad una forma di onda termica sinusoidale [3]. I parametri fondamentali che caratterizzano la prova sono la modulazione della potenza del laser e il tempo di riscaldamento per singolo impulso, i quali sono impostati nel software MultiDES R3.0, Figura 21.

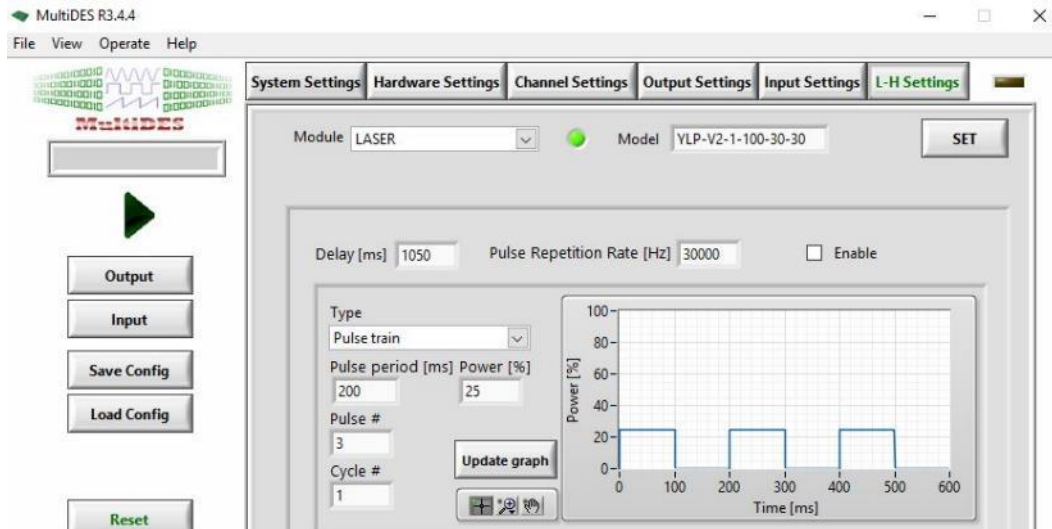


Figura 21. Impostazione dei parametri di prova del laser tramite MultiDES

Lo scopo che si vuol raggiungere, è di poter adottare questa tecnica di ispezione in sostituzione della normale procedura di controllo qualità su saldatura che oggi è svolta tramite taglio e controllo metallografico, generalmente su punto centrale dei cordoni di saldatura. In virtù di questo, associato alla necessità di definire il minimo numero di prove da realizzare si è basata la scelta sulla quantità e localizzazione dei punti da esaminare su ogni giunto di saldatura. Sono stati definiti tre punti lungo la sezione centrale del cordone, Figura 22, misurati a 15 mm da inizio saldatura, al centro e a 15 mm dalla fine, in modo da mantenere una perfetta corrispondenza con i metodi di analisi utilizzati nello studio della termografia online di sezione 2.1. I punti sono stati individuati con utilizzo di pennarello nero, utile a semplificare la procedura di posizionamento del campione rispetto al puntatore laser.

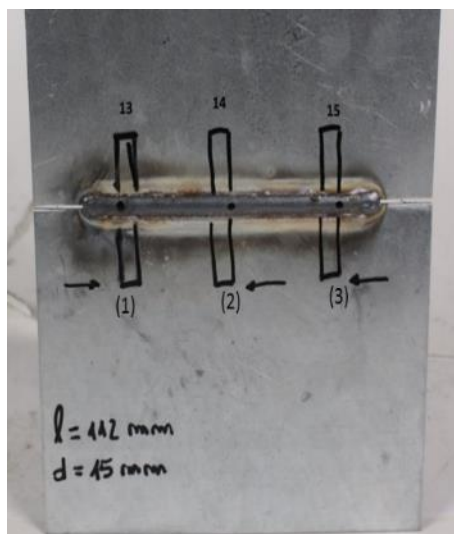


Figura 22. Individuazione dei tre punti da esaminare con tecnica Lock-In

La fase preliminare dei test si è focalizzata sull'apprendimento dell'utilizzo del sistema e sulla ricerca delle condizioni e parametri di prova ottimali adeguati alla tipologia di giunto in esame, col fine di rilevarne i difetti interni.

I parametri devono esser scelti sulla base del componente da esaminare e per il presente studio ci si è serviti dell'esperienza pregressa che hanno avuto gli ingegneri della DES con il sistema Lock-In, fornitori della strumentazione.

La scelta del periodo di eccitazione termica, o frequenza di eccitazione, dipende principalmente dallo spessore del campione e sulla posizione dei difetti su cui si vuole indagare. In generale per difetti superficiali si preferisce l'impiego di periodi brevi di impulso mentre si adottano in genere periodi maggiori per analizzare i componenti in profondità, in relazione alla dipendenza della massima profondità ispezionabile dalla frequenza di eccitazione. La selezione di una frequenza di modulazione non adatta potrebbe impedire la rilevazione di una difettologia, è quindi prassi consolidata quella di procedere ad ispezioni operando inizialmente con bassi valori di frequenza.

I valori di potenza ottimali vanno scelti a seconda del tipo di materiale. Materiali come i metalli con bassa emissività e che presentano caratteristiche termiche di elevata conduzione del calore e quindi alta diffusività termica, risultano più difficoltosi da analizzare e con una conseguente diminuzione della sensibilità del metodo. Essi necessitano di potenze più elevate ed è buona pratica condurre le prove che riguardano materiali del genere combinando alti valori di potenza e periodi più brevi.

Il numero di cicli (o numero di impulsi per treno di impulsi) e frame rate devono essere scelti in maniera da massimizzare il rapporto segnale-rumore SNR: maggiori sono il numero di cicli e valore di frame rate, maggiore è il rapporto segnale-rumore. Dall'esperienza si è osservato che 3 cicli e 100 frame per ciclo (per impulso nel presente caso di studio) rappresenta una situazione ideale perché combina un efficiente valore di SNR associato a un non eccessivo ammontare di dati in acquisizione. L'incremento di numero cicli oltre questo valore fornisce, con quanto si è potuto sperimentare in precedenti attività condotte da parte della DES, un minimo miglioramento del segnale di 1-2%.

Sulla base di queste considerazioni le prove preliminari sono state effettuate definendo un treno di 3 impulsi con due valori di durata dell'impulso di 200 ms e 300 ms, con rapporto di tempo di acceso-spento del periodo di onda quadra del treno d'onde, noto duty cycle, del 50%,

La frequenza di acquisizione della termocamera adottata di conseguenza è stata di 540 Hz per soddisfare il requisito minimo dei 100 frame per singolo impulso e la registrazione ha durata di 3 s, sufficienti per il tempo di riscaldamento. Per modulazione di potenza invece sono stati scelti i tre valori di 15%, 25%, 35% della potenza massima del laser corrispondenti a 4,5 W, 7,5 W e 10,5 W.

La frequenza di acquisizione è direttamente dipendente dalla risoluzione immagine impostata, cioè dalla dimensione in pixel della finestra di visualizzazione su cui si vuole concentrare la registrazione. La termocamera infatti presenta una funzione di windowing, Figura 23, che permette la riduzione della finestra visualizzata rispetto alla risoluzione massima con conseguente aumento del frame rate massimo con cui si possono acquisire le immagini. Per il caso in oggetto, per ottenere la frequenza di 540 Hz si è effettuata una windowing su una finestra di 96x88 pixel focalizzandosi sul punto da ispezionare.



Figura 23. Funzione windowing della termocamera

Il frame rate massimo è inoltre legato alla scelta della scala di temperature di misura impostata e questo agisce anche sul valore del tempo di integrazione della termocamera (integration time IT), infatti un incremento dell'intervallo e innalzamento dei valori massimi della scala di temperatura causa una riduzione del valore di IT ed un aumento del frame rate massimo. Questi tre parametri sono stati per cui definiti in maniera dipendente, Figura 24.



Figura 24. Selezione dei parametri di range di temperatura, IT e frame rate della termocamera

Un requisito fondamentale che deve essere soddisfatto nel risultato di tali prove è evitare che il segnale complessivo di risposta del materiale all'eccitazione esterna non vada in saturazione, cioè non ecceda oltre i valori di soglia minimo e massimo della scala di temperatura. È necessario quindi che la temperatura minima del range sia minore o uguale alla temperatura ambiente del componente e la temperatura massima del range sia maggiore o al più uguale alla massima raggiunta dal componente in fase di riscaldamento altrimenti non viene acquisito un segnale reale ma segnale smorzato e filtrato, risultante piatto e pari ai valori limite per il range e parametri di prova scelti. Il risultato derivante dal post processamento di questi segnali con l'analisi Lock-In non risulterebbe quindi ottimale e reale. Occorre ricercare il giusto compromesso nella scelta tra periodo e potenza di eccitazione e scala di temperatura, sia rispetto ai valori del minimo che sul massimo, in modo tale da non saturare il segnale.

Per le prove di calibrazione, sulla base del periodo e potenza scelti, è stata utilizzata come primo tentativo una scala da 5°C-66,4°C, ritenuta sufficiente per le temperature in esame ed un integration time di 1281,37 μ s.

I parametri di emissività, temperatura ambiente e temperatura riflessa sono stati impostati con valori di default visto non sono parametri che influenzeranno le attività di post processamento dei dati con analisi Lock-In, in quanto ci si servirà direttamente del segnale termico ottenuto in unità di segnale, senza la necessità di avere una corretta conversione in temperature.

I parametri principali adottati per le prove di calibrazione sono riassunti in Tabelle 13-14.

Tabella 13. Parametri di eccitazione di prova di calibrazione preliminare termografia Lock-in

Potenza	Tipo di segnale in input	Periodo dell'impulso	Numero di impulsi
4,5 W	Treno impulsi laser	200 ms	3
7,5 W	Treno impulsi laser	200 ms	3
10,5 W	Treno impulsi laser	200 ms	3
7,5 W	Treno impulsi laser	300 ms	3

Tabella 14. Parametri della termocamera per prova calibrazione preliminare termografia Lock-in

Frame rate	540 Hz
IT	1281,37 μ s
Durata registrazione	3 s
Coefficiente di emissività	0,9
Umidità relativa	30%
Temperatura ambiente	20°C
Temperatura riflessa	20°C
Temperatura elementi ottici	20°C
Distanza tra oggetto e termocamera	2 m
Range di temperature	5°C – 66,4°C

La calibrazione della strumentazione Lock-In, con i parametri di prova trattati e scelti, è stata effettuata tramite test iniziali condotti sui 5 campioni di riferimento eseguiti con parametri nominali ed esenti da difetti. Tramite questa serie di prove sono stati valutati se i parametri di prova scelti fossero adeguati ad ottenere segnali termici non in saturazione e non disturbati da rumore.

Il rumore di fondo è stato calcolato effettuando una registrazione di immagini senza l'attivazione del laser quindi al di fuori del contesto di prova e con l'ausilio degli strumenti del programma ResearchIR Max, si è valutato l'intervallo medio di variazione nel tempo della temperatura, che denominiamo ΔT_{rumore} , assunto da un cursore ROI posizionato nel punto da esaminare. In seguito, il valore così calcolato è stato messo a confronto con la variazione di temperatura osservata in fase di prova nel salto termico causato dal primo impulso di eccitazione, ΔT_1 in Figura 25, e sul salto termico complessivo derivante dal riscaldamento totale del treno di impulsi del laser, ΔT_{max} . È necessario che le variazioni di temperatura siano considerevolmente maggiori rispetto al rumore per identificare un rapporto SNR elevato. Sulla base dell'esperienza è sufficiente avere un ΔT_1 pari ad almeno 5°C per avere buona qualità del segnale, in quanto di norma si hanno valori di rumore che si aggirano intorno a 1°C, per cui per il set di prove iniziali si è verificato di rispettare quei due requisiti minimi. I risultati sono illustrati nel Capitolo 3.

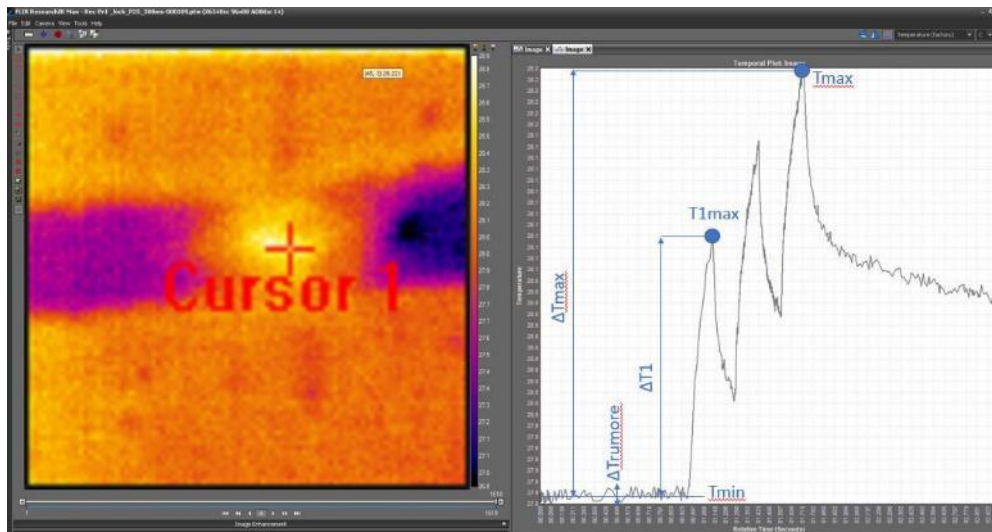


Figura 25. Calcolo del rumore di fondo dal segnale termico di risposta e verifica del parametro SNR

Si sono inoltre volute valutare:

- la ripetibilità dello stesso punto di misura, per escludere errori umani e errori di prova non legati al materiale, valutando di variabilità di risultati nell'acquisizione della termocamera, nell'utilizzo del sistema laser conducendo prove su singolo punto a pari condizioni di parametri;
- l'influenza dovuta a diverso orientamento del giunto rispetto al laser e termocamera, variando lievemente l'inclinazione del campione, come visibile in Figura 26, su prova nello stesso punto a pari condizioni di prova;
- l'influenza della variazione dei parametri di tempo di integrazione IT selezionato, a parità di tutti gli altri parametri.

I risultati sono stati esaminati osservando gli intervalli di temperatura raggiunti su primo picco e ultimo picco di risposta, come già visto in precedenza, basandosi sul calcolo di media e deviazione standard.

In seguito alla procedura di calibrazione, l'attività è proseguita con l'ispezione con termografia Lock-In sui giunti che sono stati ottenuti con risultati soddisfacenti di saldatura e non presentavano difetti visibili ad occhio. Il piano prove sperimentali complessivamente eseguito si presenta come in Tabella 15.

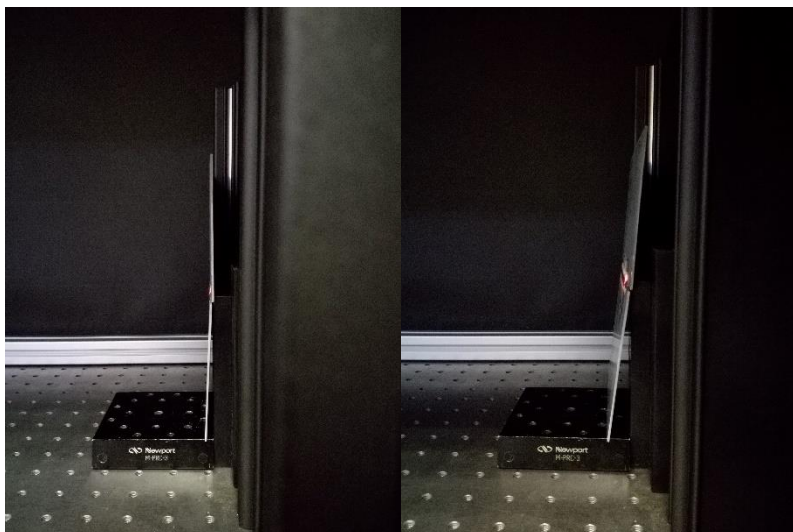


Figura 26. Influenza dovuta a diversa inclinazione del giunto rispetto al laser e termocamera

Tabella 15. Piano prove sperimentali termografia Lock-in

Classe/Tipo di giunto	Repliche	Gap tra i lembi	Iniezione Gas	Velocità avanzamento torcia
Esente da difetto	5	1,2 mm	15 l/min	500 mm/min
Variazione del gap	3	1,3 mm	15 l/min	500 mm/min
Variazione di gas	5	1,2 mm	10 l/min	500 mm/min

Anche per le prove sui giunti saldati non con parametri nominali si è continuato a rispettare e a verificare la non saturazione del segnale e un segnale termico non soggetto a troppo rumore.

Post processamento dati termografici con analisi Lock-In

Il segnale termico acquisito dalla termocamera durante la prova viene successivamente elaborato mediante programma di post processamento dati termografici, IRTA (InfraRed Thermography Analysis), in cui è possibile importare direttamente sequenze in formato SEQ, FCF e PTW solo se il numero di frame è inferiore a 3000, quindi vincolo aggiuntivo da dover rispettare nel presente lavoro.

Le sequenze importate vengono convertite in formato IRT in cui ogni pixel delle immagini assume valore in unità di segnale ed è possibile eseguire la procedura di analisi

Lock-In fornendo in input la frequenza di eccitazione a cui è stata condotta la prova, il frame iniziale e finale dell'intervallo da analizzare. L'intervallo da analizzare inizia il primo frame in cui appare la risposta del materiale e si conclude con il frame in cui si esaurisce l'ultimo dei 3 impulsi del treno di impulsi.

Per identificare l'intervallo, c'è la possibilità interna al programma di creare tracce temporali della temperatura di un pixel (per mezzo del comando spot track), Figura 27, per cui posizionandolo al centro del punto in esame si può individuare manualmente il frame nel punto antecedente il primo salto di segnale dovuto al primo impulso, associato anche alla visualizzazione a schermo dell'immagine del bagliore sul materiale causato da laser.

Il frame finale viene invece calcolato dalla combinazione della frequenza di acquisizione e del periodo complessivo di riscaldamento, ottenendo 325 frame relativo alle prove di 200 ms e 487 frame per il caso a 300 ms.

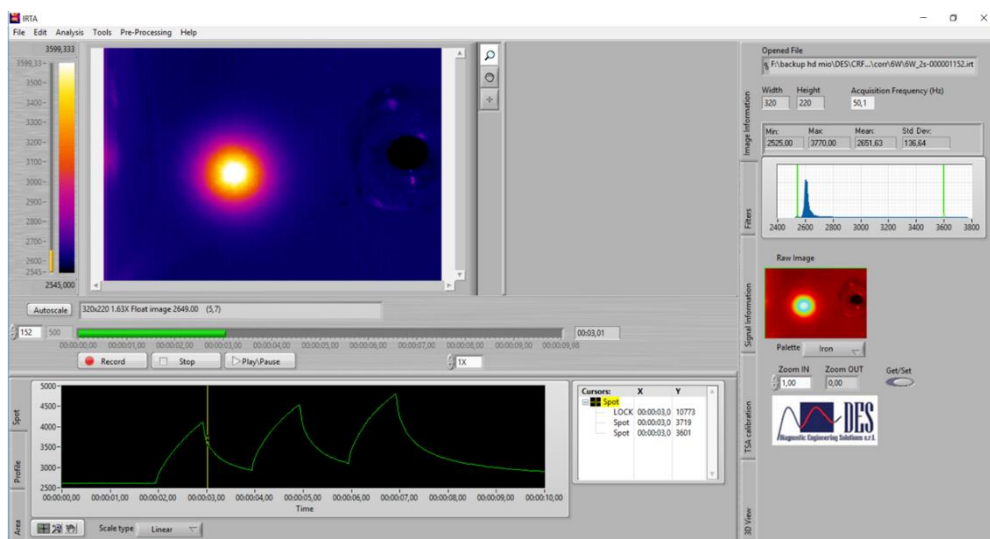


Figura 27. Interfaccia di IRTA 1.6.13 e creazione traccia temporale temperatura con comando spot track

L'analisi Lock-In eseguita su forma d'onda quadra permette di ottenere un'analisi multi-frequenziale, consentendo di avere informazioni sulla I, III e V armonica con un'unica prova [3]. All'immissione della frequenza (o periodo di impulso) della portante dell'eccitazione, il software infatti calcola in automatico dalla prima le altre due frequenze permettendo analisi contemporanea sulle tre frequenze selezionate, le armoniche possono anche essere scelte indipendentemente di altro valore.

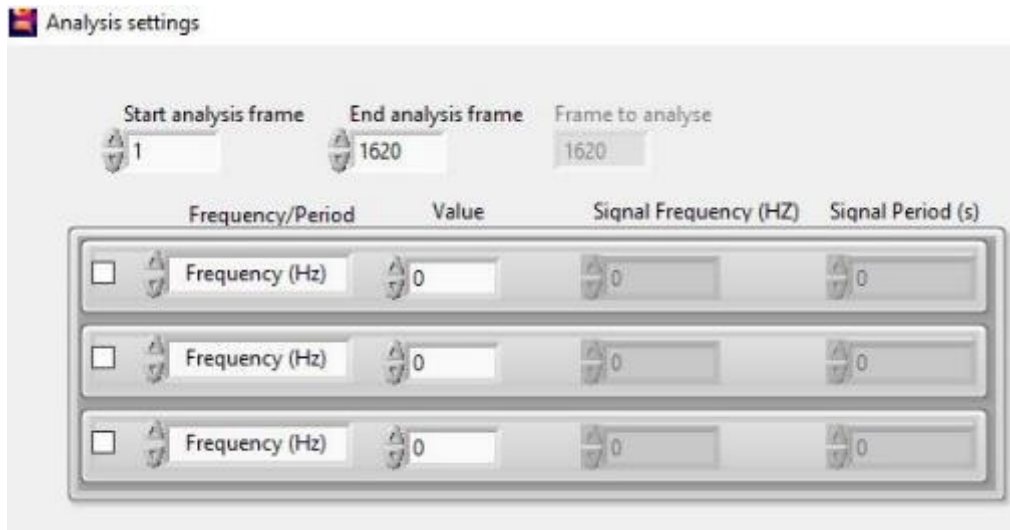


Figura 28. Selezione intervallo di frame e frequenze per analisi Lock-In

Il risultato che si ottiene in output è un'immagine in falsi colori del ritardo di fase e ampiezza della risposta del materiale rispetto all'input di eccitazione, relative alle 3 frequenze selezionate, quindi ampiezza e fase per ogni armonica, di cui un esempio è fornito in Figura 29-30. Per ogni singolo pixel dell'immagine visualizzata si ha un valore di ampiezza in unità di segnale e di angolo di fase.

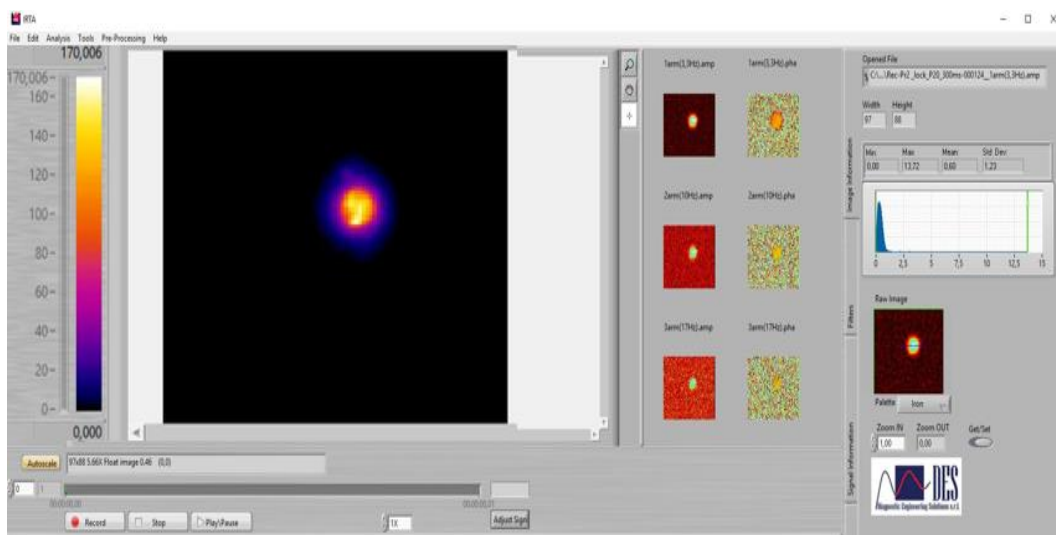


Figura 29. Esempio di immagine di ampiezza in output da analisi Lock-In

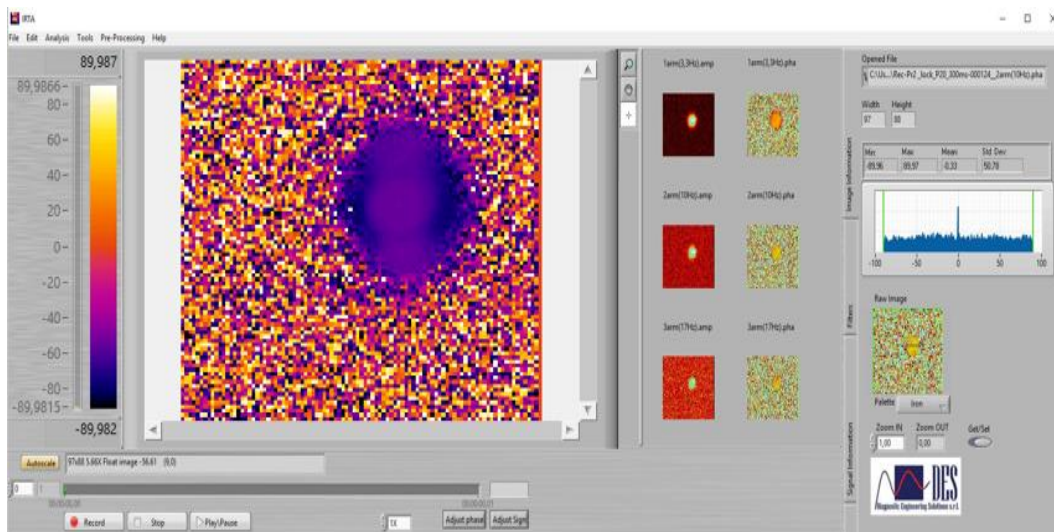


Figura 30. Immagine di ritardo di fase in output da analisi Lock-In

Per ogni prova sono state ricavate le relative immagini di ritardo di fase e ampiezza di risposta del segnale del campione e, dopo un'analisi visiva qualitativa che ha messo a confronto le distinte prove, si è proceduto con elaborazione dei dati estrapolati dalle immagini.

La metodologia che si è utilizzata ha previsto l'estrazione dei profili ottenuti tramite creazione di una ROI lineare orizzontale passante per il punto di massimo nell'immagine dell'ampiezza di estensione sufficiente a poter includere tutta l'area centrale della fase ad esclusione del rumore di fondo esterno agli estremi, come osservabile in Figura 31. Avvalendosi di questo criterio di confronto ci si è serviti quindi di una linea di 50 pixel e si sono tracciati gli andamenti di fase e ampiezza, importandoli all'interno del programma di Microsoft Excel e si presentano con andamenti che hanno un aspetto come quelli mostrati nelle Figure 32-33. In genere l'ampiezza mostra un andamento a campana mentre la fase, escludendo le zone agli estremi caratterizzate da rumore, da non prendere in considerazione nelle nostre analisi ed elaborazione dati, si presenta con un salto ad una zona di appiattimento nella zona centrale.

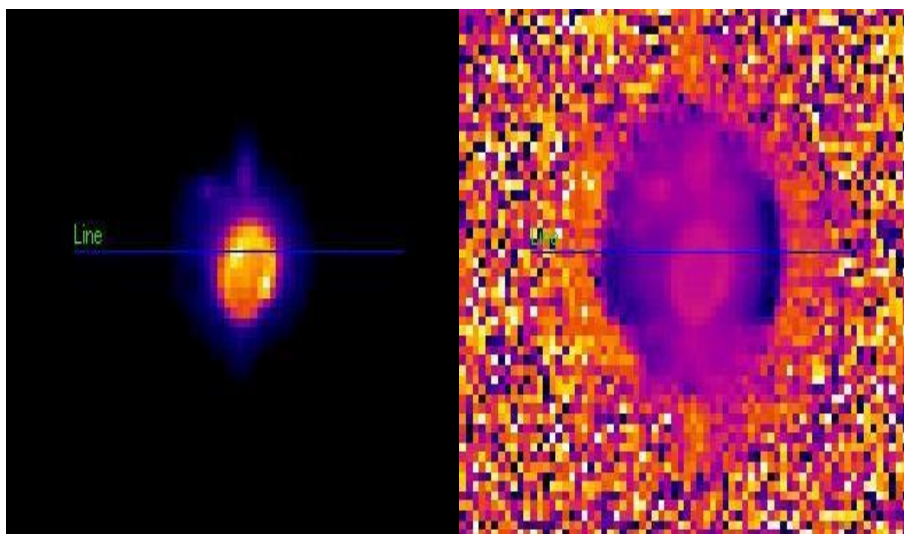


Figura 31. Linea di selezione per tracciamento andamento dell'ampiezza e della fase

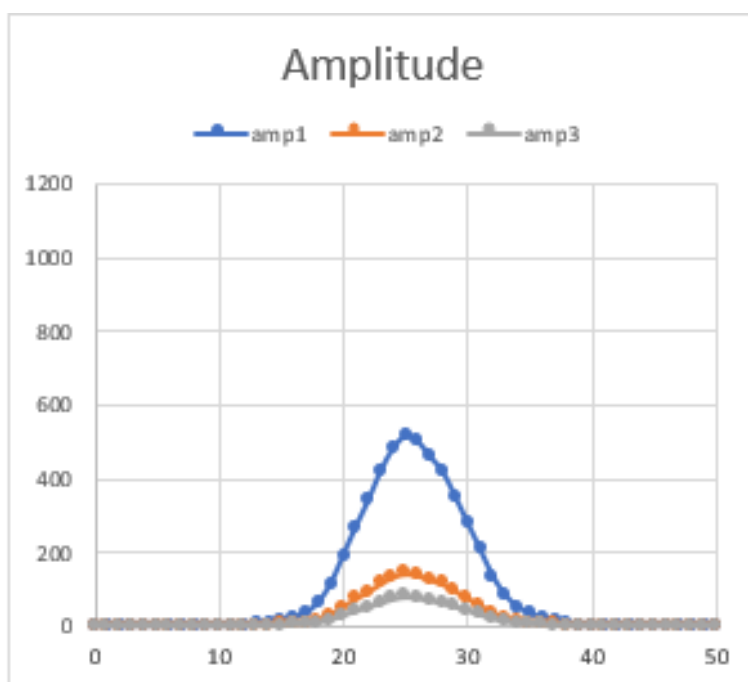


Figura 32. Andamento ampiezza delle 3 armoniche lungo il profilo ROI tracciato

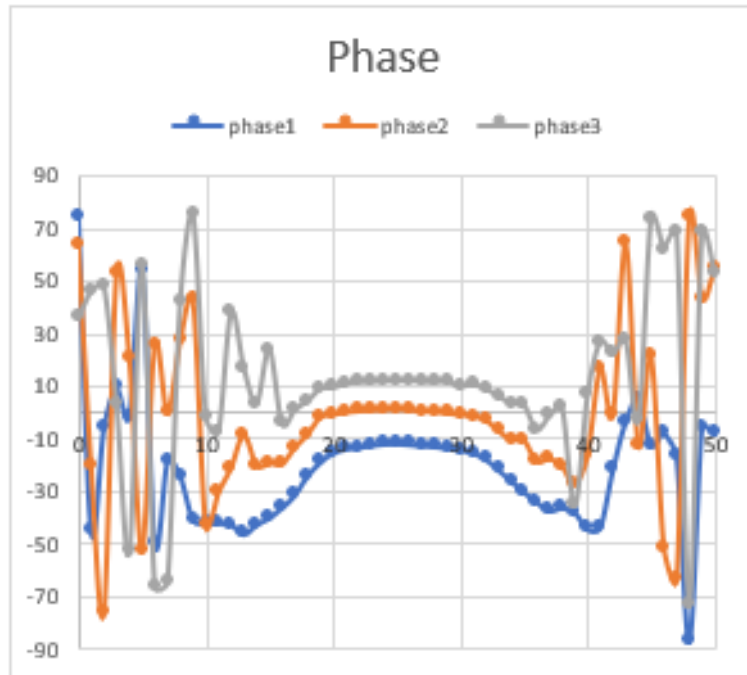


Figura 33. Andamento ampiezza delle 3 armoniche lungo il profilo ROI tracciato

Come effettuato in precedenza sulla valutazione del segnale termico, si sono volute valutare anche in questo caso l'influenza che si ha sui risultati dell'analisi post-processing Lock-In, rispetto a:

- ripetibilità dello stesso punto di misura della prova;
- scelta del frame iniziale, eseguendo tre prove scegliendo tre frame vicini, uno col criterio normalmente utilizzato, il secondo è il frame precedente e il terzo è il frame successivo quando il bagliore dovuto al laser è già presente nell'immagine della sequenza termica.

I risultati sono stati esaminati osservando i valori massimi, medi e deviazioni standard dell'intera immagine di ampiezza e media e deviazione standard dell'immagine di fase, entrambe relative alla sola I armonica ed eseguendo una media e deviazione standard di tali valori.

Per la prova di ripetibilità è stato eseguito anche un confronto grafico degli andamenti tracciati sul profilo ROI orizzontale come già spiegato in precedenza.

Successivamente le immagini e gli andamenti di fase e ampiezza dei differenti punti e dei diversi giunti sono state messe a confronto per trarne conclusioni.

3. Analisi dei risultati

In questo capitolo sono illustrati i risultati relativi alle prove eseguite tramite termografia online sul processo di saldatura e successivamente sono mostrati i risultati sulla calibrazione del sistema Lock-In laser e i risultati preliminari in merito alle prove eseguite con i parametri di prova scelti.

Prove di termografia online

In questa sezione saranno presentati i risultati riguardanti l'investigazione online del processo di saldatura e derivanti dalle elaborazioni mediante gli strumenti descritti nella sezione 2.1.

L'analisi dei risultati vuole cominciare con un commento completamente qualitativo rispetto alla visualizzazione delle sequenze termografiche online. Ad una prima vista si può notare una significativa differenza nella forma della distribuzione delle temperature tra giunti realizzati in condizioni ottimali, con assenza di difetti, e giunti dal risultato critico con presenza di fori o addirittura sfondamento. A titolo di esempio sono illustrati nelle Figure 34-37, il giunto sano ed i giunti critico e supercritico ottenuti per incremento di gap.

La differenza che si può ben apprezzare è nella forma ed estensione più omogenea nel campo di temperature del giunto da 1,2 mm mentre nei giunti con il gap maggiore l'andamento sui bordi è molto discontinuo ed irregolare. Il confronto invece fatto rispetto al termogramma del giunto realizzato a velocità di avanzamento maggiore consente di osservare che la distribuzione delle temperature è continua e lineare senza presentare discontinuità, si nota perfettamente però che si estende su un'area più sottile rispetto a quello sano. Questo primo risultato di impatto qualitativo visivo è in grado di dire che tramite controllo visivo è possibile discriminare giunti totalmente difettosi macroscopicamente o con significativa riduzione nello spessore del cordoncino rispetto a giunti sani.

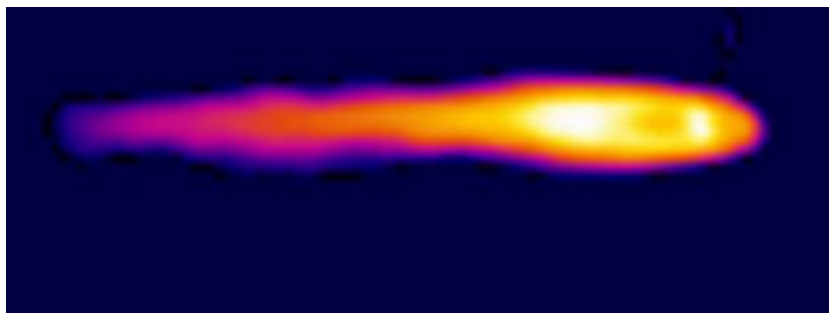


Figura 34. Frame di termogramma giunto esente da difetti gap 1,2 mm

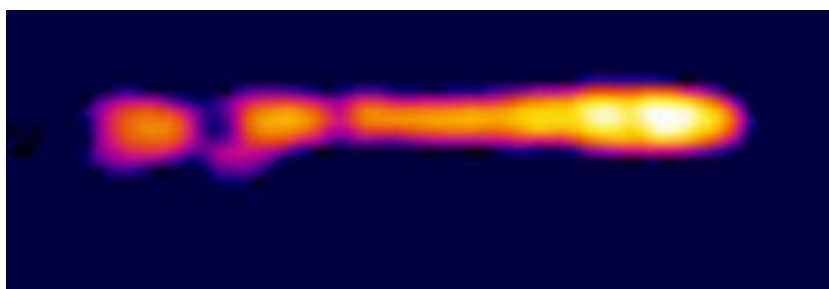


Figura 35. Frame di termogramma giunto difettoso gap 1,5mm

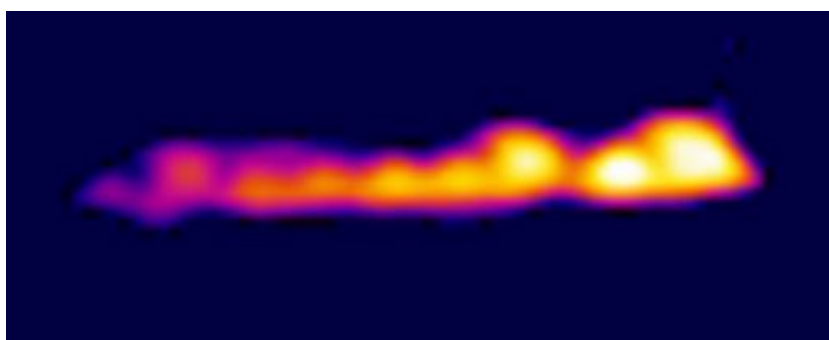


Figura 36. Frame di termogramma giunto difettoso gap 1,8 mm

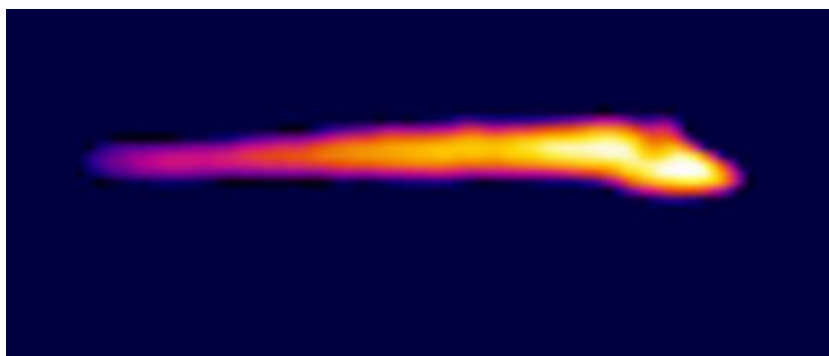


Figura 37. Frame di termogramma giunto difettoso velocità 580 m/min

Il commento dei risultati continua illustrando gli andamenti dei cicli termici ottenuti in corrispondenza dei punti iniziale, centrale e finale del cordone come descritto nella sezione 2.1. A seguire si mostrano nelle Figure 38-43 le curve di un giunto per ogni tipo di classe a titolo di esempio e per semplicità espositiva, saranno però commentati gli andamenti generali riguardanti gli stessi.

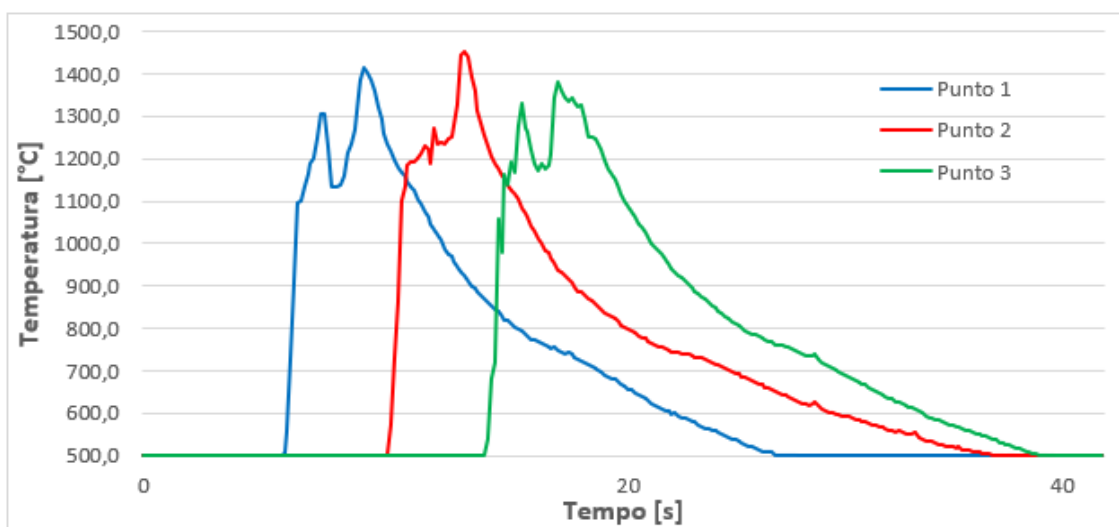


Figura 38. Andamento cicli termici 3 punti campione esente da difetti

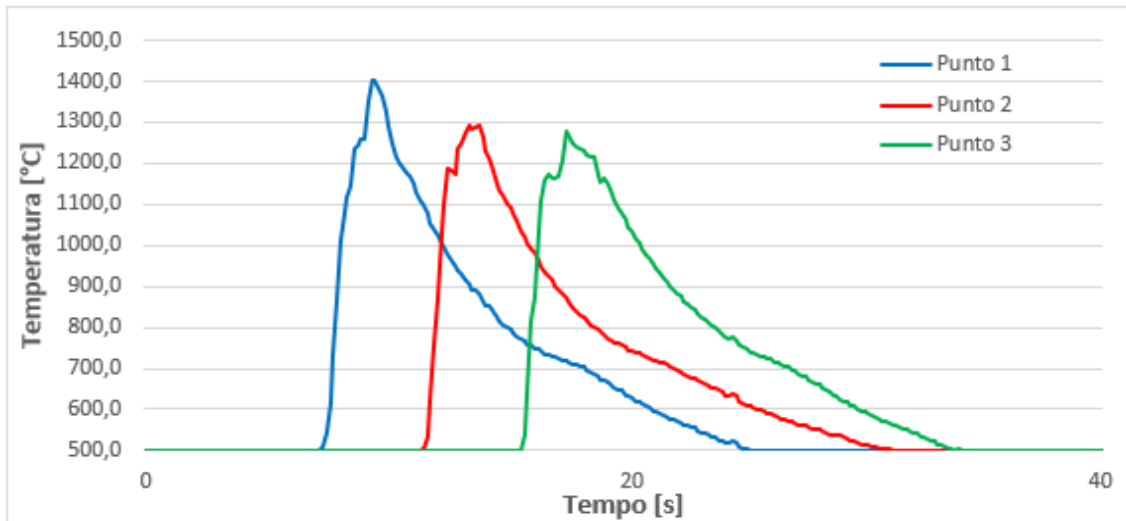


Figura 39. Andamento cicli termici 3 punti campione gap 1,3 mm

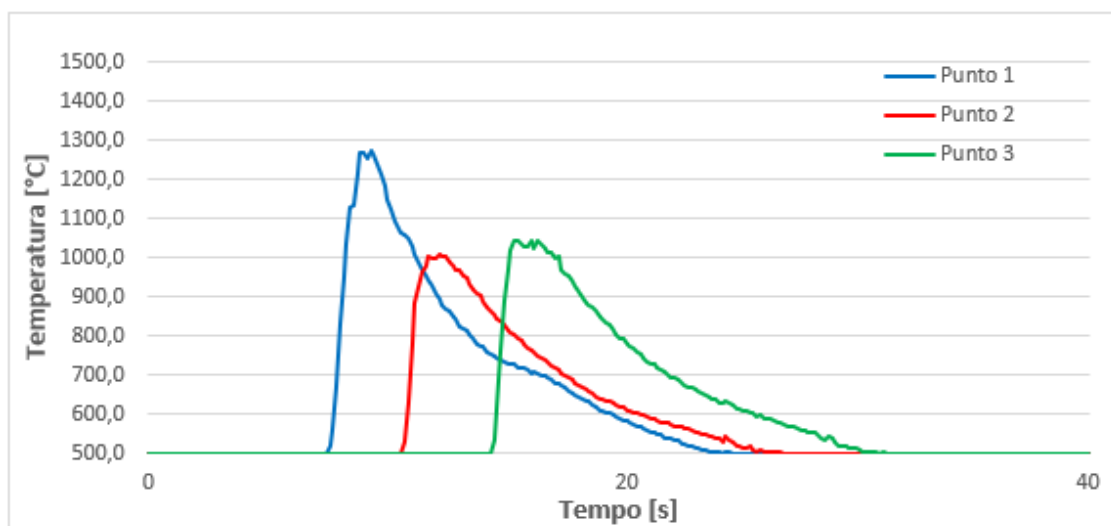


Figura 40. Andamento cicli termici 3 punti campione gap 1,5 mm

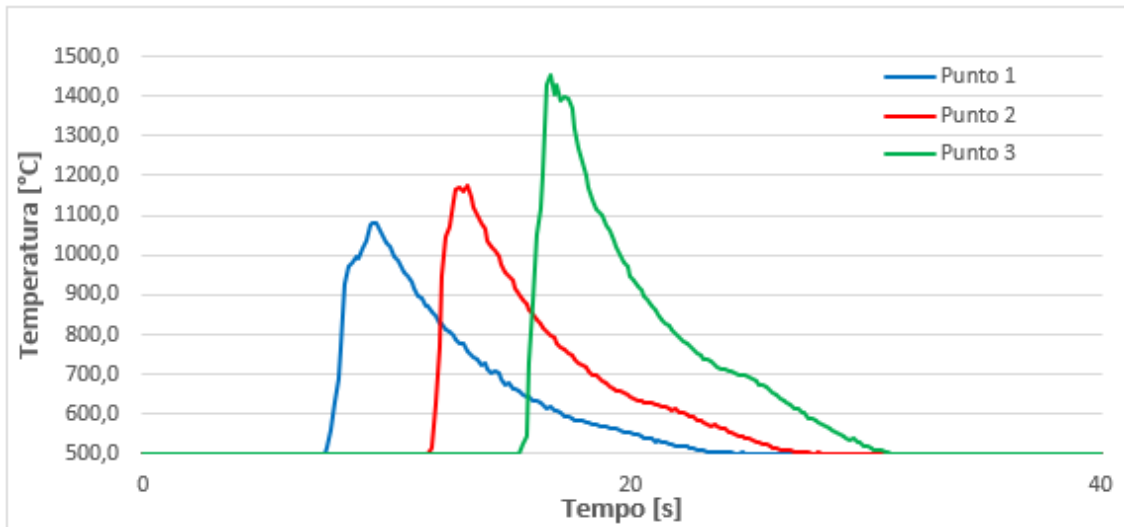


Figura 41. Andamento cicli termici 3 punti campione gap 1,8 mm

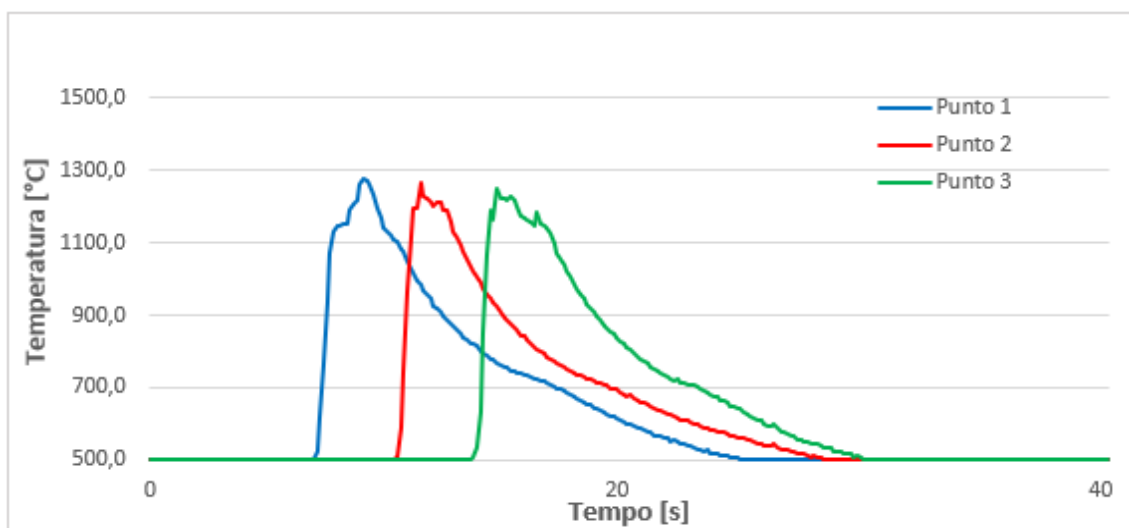


Figura 42. Andamento cicli termici 3 punti campione velocità 580 m/min

Dall'osservazione dei grafici precedenti si può osservare che l'andamento delle temperature dei singoli punti su tutti i campioni esaminati si presenta con classico tratto di riscaldamento caratterizzato da rapida salita fino al picco massimo, per poi raffreddare con discesa su curva all'incirca tendente ad esponenziale. Si può notare in genere sul singolo cordone che il gradiente di raffreddamento dell'ultima curva, relativa al tratto di fine giunto, è minore della prima, cioè la prima curva, all'inizio della saldatura, ha un tempo di raffreddamento maggiore dell'ultima. Questo comportamento può essere spiegato perché la parte iniziale del giunto, contraddistinto dall'andamento della prima

curva, risente di un effetto termico maggiore dovuto al materiale che a valle di sé si sta ancora saldando, mentre il punto finale invece vedrà questo effetto ridursi in funzione della distanza che lo separa dal punto di fine saldatura.

Il giunto di riferimento sano in Figura 38 mostra un carattere dei tre punti estremamente simile e ripetuto lungo la direzione del cordone, non solo come trend ma soprattutto nel raggiungimento di picchi di temperatura equivalenti, in questo caso pari a circa 1400°C, dimostrando l'elevata stabilità e omogeneità del processo di saldatura per questa classe di campioni realizzata ad hoc con parametri ottimali.

Spostando la concentrazione sulla classe dei campioni con gap aumentato si può riscontrare che sul campione con incremento minimo a 1,3mm, Figura 39, le tre curve preservano il carattere di omogeneità lungo la direzione di saldatura però si osserva un principio di perdita di uguaglianza sui tre picchi massimi raggiunti, mostrando inoltre differenze di temperatura di anche 100°C inferiori a confronto con quelli sani. L'aspetto macroscopico del giunto è stato ritenuto al limite dell'accettabilità, quindi rispetto ad un controllo visivo si è rilevato un carattere più anomalo grazie al controllo termografico. Passando ai casi più critici di variazione di gap nelle Figure 40-41 si nota che le temperature dei picchi variano molto lungo la direzione di saldatura da un punto a uno successivo, con salti di anche 200°C-300°C. Rispetto al giunto medio di riferimento si hanno quindi temperature massime che vanno da notevolmente inferiori in alcuni punti a molto superiori in altri indicando una situazione nettamente al di fuori dagli standard ottimali e che è pienamente confermato dal controllo visivo dei cordoni che presentano fori e sfondamenti ripetuti.

Focalizzando l'attenzione sull'andamento delle giunzioni da aumento di velocità della torcia, Figura 42, si vede che per essi in genere si mantiene l'equivalenza dei picchi massimi in maniera ottima lungo l'avanzamento sul cordone. I valori massimi risultano però nettamente inferiori di anche 200°C rispetto ai 1400°C dei giunti sani e la spiegazione di questi due effetti è nel processo di saldatura avvenuto in maniera continua e stabile e che trova riscontro nel controllo visivo del cordone, risultante di bell'aspetto ma con un assottigliamento in dimensioni dovuto alla minor quantità di materiale depositato e causando la diminuzione di temperature raggiunte associate anche all'effetto che la torcia sosta sul punto per un periodo più breve, quindi vi è un apporto termico inferiore sul singolo punto.

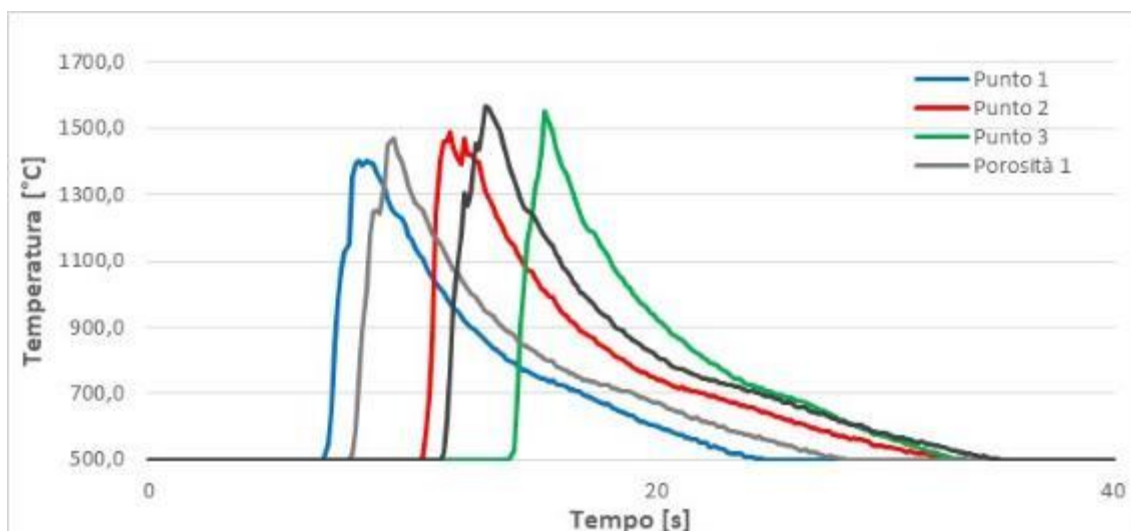


Figura 43. Andamento cicli termici 3 punti campione gas 10 l/min

La giunzione con minor apporto di gas di miscela merita un commento approfondito, Figura 43. Questi giunti sono eseguiti con uguali parametri di saldatura rispetto a quelli di riferimento, a parte la protezione del bagno di saldatura differente. Esaminando infatti gli andamenti dei cicli termici sui tre punti, si ha buona omogeneità sui valori massimi di temperatura tra i diversi punti raggiungendo però dei valori nominali poco superiori ai giunti sani.

Per queste unioni saldate si sono diagrammati anche i punti che sono stati individuati con presenza di porosità all'interno ed in corrispondenza di questi si è potuto osservare in genere un picco più elevato rispetto ai punti nelle immediate vicinanze, con differenze di anche 60°C.

Per individuare dei parametri che possano confermare questi trend osservati si è calcolata la media dei picchi raggiunti e la deviazione standard in ogni campione, così da descrivere il comportamento di un cordone con due dati; in seguito, tramite i valori calcolati, si è ottenuto un parametro di valor medio per ogni classe di giunto. Il risultato finale è una media sui valori medi dei massimi e sui valori di deviazione standard dei massimi che descrivono il carattere della singola classe. I risultati sono mostrati in Tabella 16 e commentati a seguire.

Tabella 16. Elaborazione statistica andamento temporale su 3 punti

Classe	Repliche	Valore parametro variabile	Media media dei massimi	Δ Media media	Media della Dev. St.	Δ Media Dev. St
Esente da difetto	5	/	1385,22	0	45,09	0
Variazione del gap	3	1,3 mm	1334,39	50,83	35,05	10,04
	3	1,5 mm	1213,03	172,19	143,96	98,87
	3	1,8 mm	1200,60	184,62	120,99	75,9
Variazione di gas	5	10 l/min	1434,10	48,88	42,26	2,83
Variazione velocità avanzamento torcia	5	580 mm/min	1314,80	70,42	49,70	4,61

Esaminando la tabella precedente vi è buona corrispondenza con i comportamenti descritti in precedenza. Il valor medio individuato permette di dire che la variazione di gap non consente di raggiungere gli stessi picchi di temperatura dei campioni di riferimento pur mantenendo buon livello di omogeneità a dimostrazione di un valore medio buono di deviazione standard. Al raggiungere la condizione di maggiore criticità di gap il valor medio precipita rispetto a quello di riferimento e si caratterizza da elevata dispersione dei risultati, ovvero dispersioni tra picchi di temperatura lungo il cordone.

Alla variazione di gas, l'effetto di una sua diminuzione è invece un incremento di temperatura, eventualmente connesso all'influenza di picchi maggiori in corrispondenza delle porosità, trovando però anche spiegazione in un processo in atmosfera meno pulita che quindi permette all'arco di esser meno stabile e controllato.

Infine, l'incremento della velocità del braccio robot causa una brusca caduta a livello di temperature massime raggiunte ed è anche confermato dal parametro medio calcolato inferiore al caso sano; la buona uniformità osservata negli andamenti non si perde attestandosi sugli stessi livelli dei giunti sani.

Sono illustrati, nelle Figure 44-47, i grafici di un caso per ogni classe diversa di giunto ad esempio, in cui sono tracciati gli andamenti temporali come in precedenza però di quattro punti lungo il cordone, in cui sono stati presi in considerazione anche il punto di saldatura iniziale, arc-start, e il punto finale, arc-end, finora esclusi dalla trattazione.

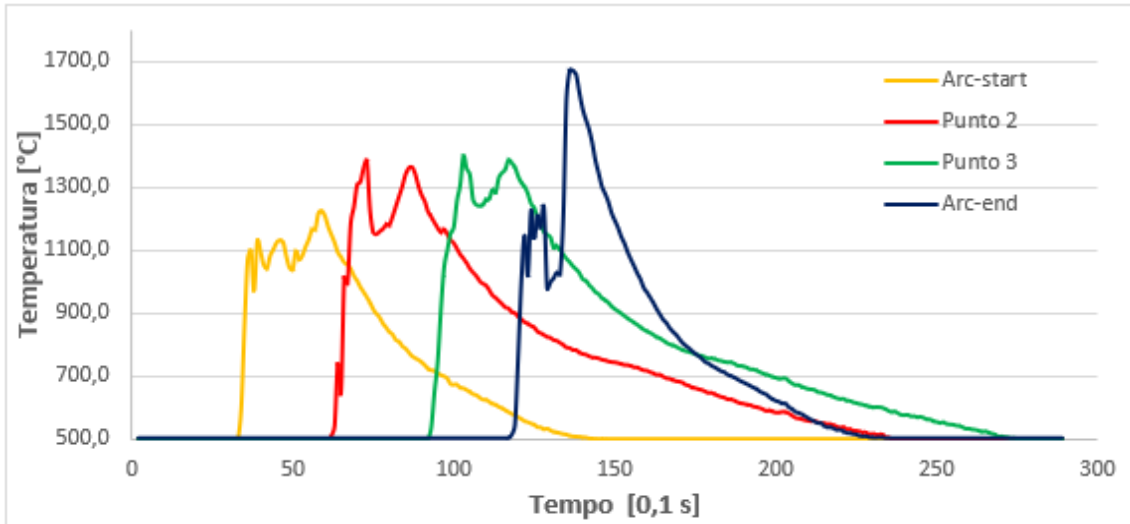


Figura 44. Andamento cicli termici 4 punti campione esente da difetti

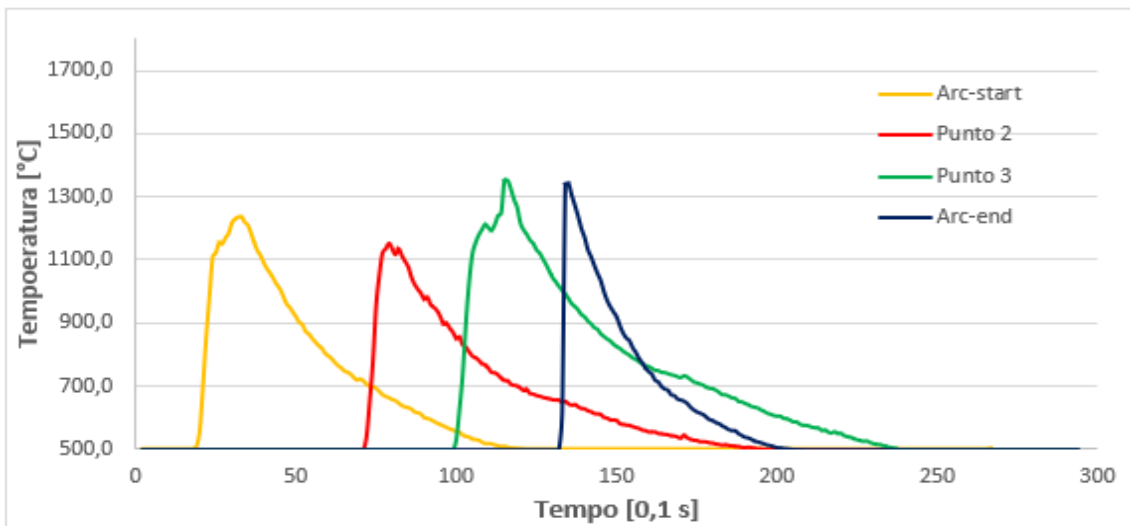


Figura 45. Andamento cicli termici 4 punti campione gap 1,3 mm

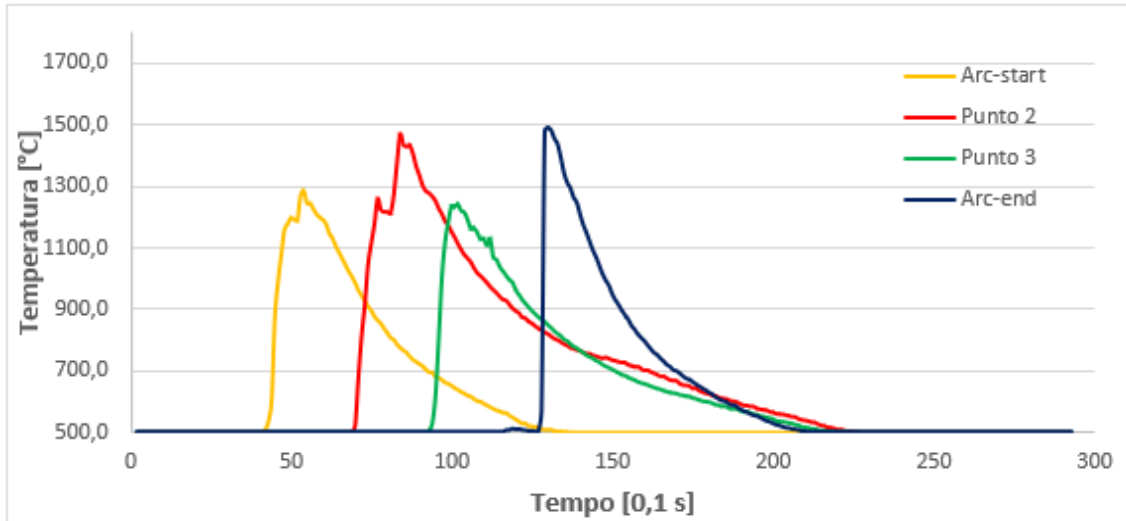


Figura 46. Andamento cicli termici 4 punti campione variazione di gas 10 l/min

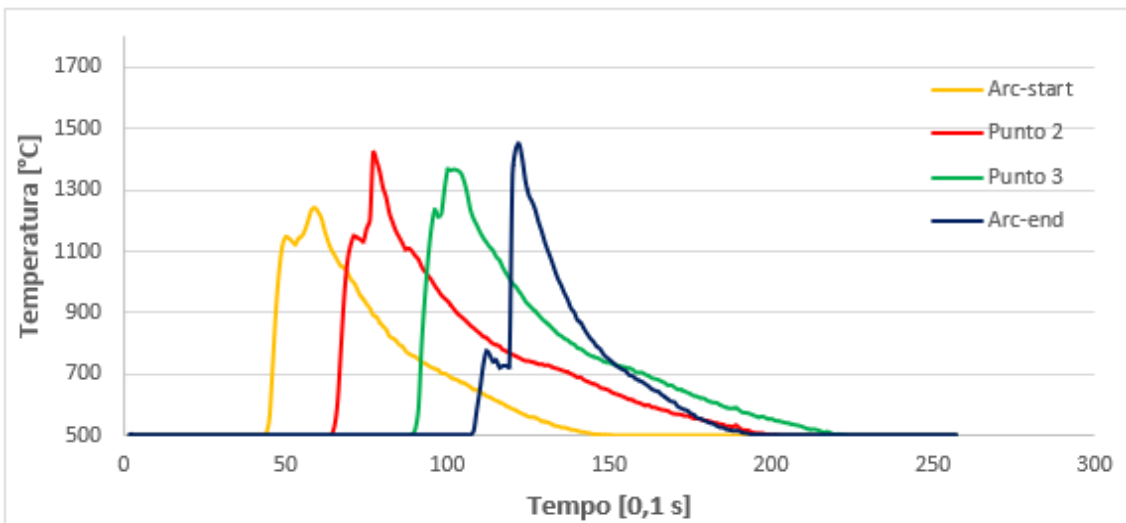


Figura 47. Andamento cicli termici 4 punti campione variazione di velocità di avanzamento 580 mm/min

Dalla loro osservazione si può notare che per tutti i giunti si ha un andamento crescente tra primo e ultimo punto di saldatura, questo dovuto all'atto iniziale del processo di saldatura e allo stop della torcia nel punto finale con creazione del classico gocciolone e raggiungimento di temperature più elevate.

Si può inoltre osservare che il punto di arc-start è caratterizzato da una velocità di raffreddamento minore rispetto all'arc-end, spiegabile con l'effetto termico derivante dal materiale che si vede a valle ancora in fase di saldatura mentre il punto finale non ha altro

materiale oltre di sé, quindi lo scambio termico avviene con maggior quantità di aria ed è più veloce a raffreddare.

Vengono inseriti per completezza i grafici ottenuti tramite l'approccio condotto in parallelo ovvero individuando andamenti medi per singole classi a seconda del posizionamento relativo dei tre sul cordone, Figure 48-53.

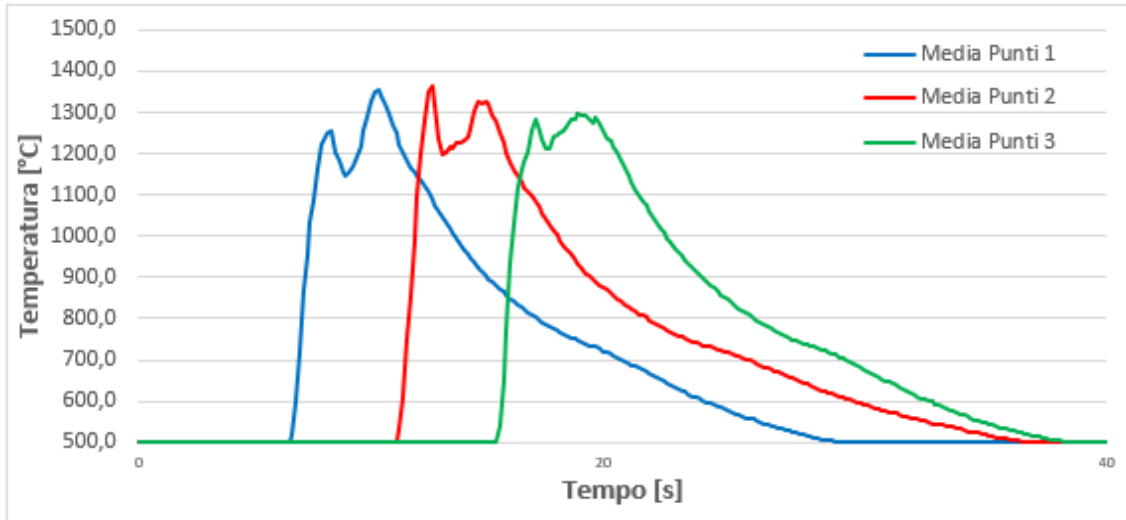


Figura 48. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti sani

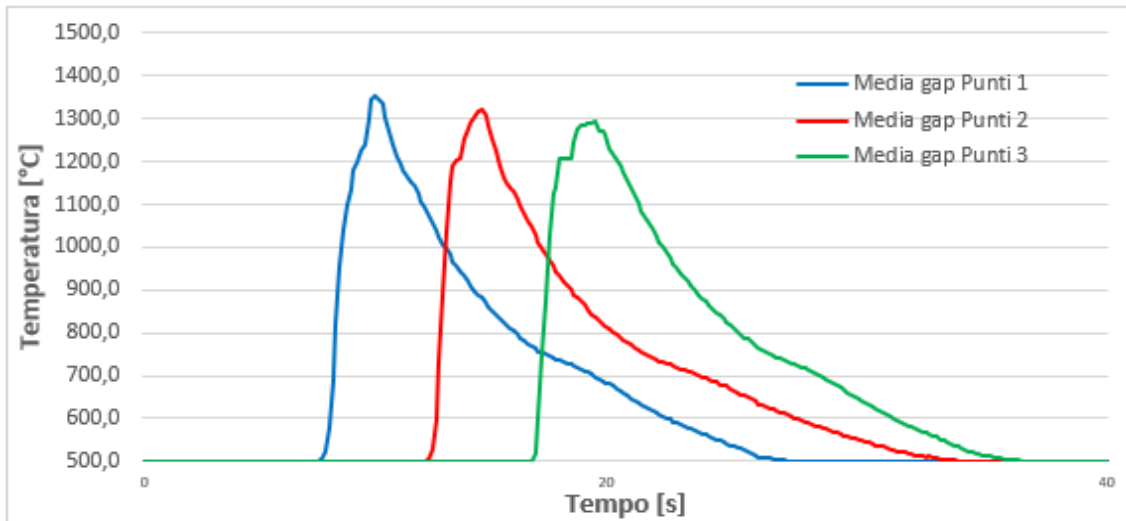


Figura 49. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti variazione gap 1,3 mm

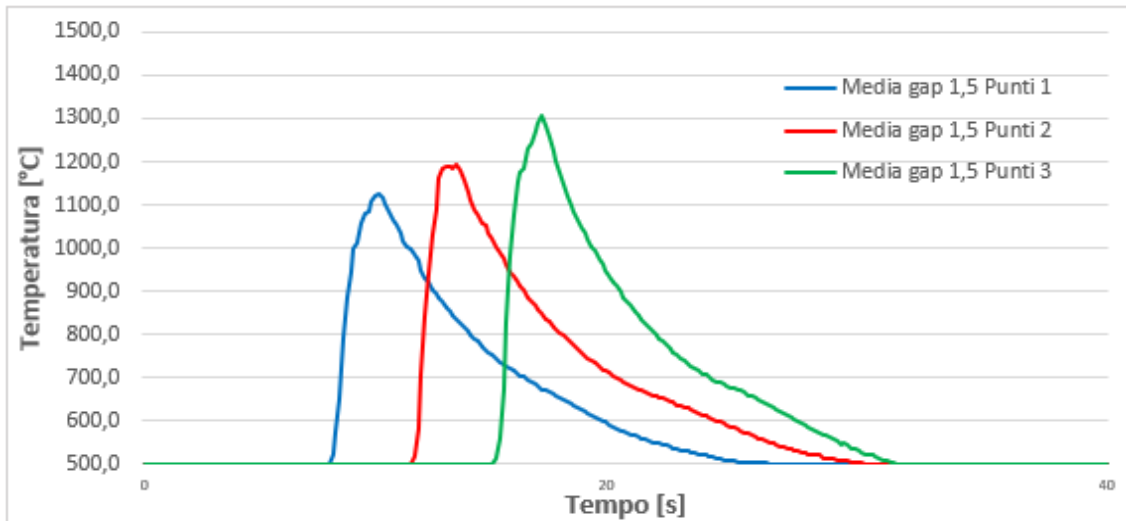


Figura 50. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti variazione gap 1,5 mm

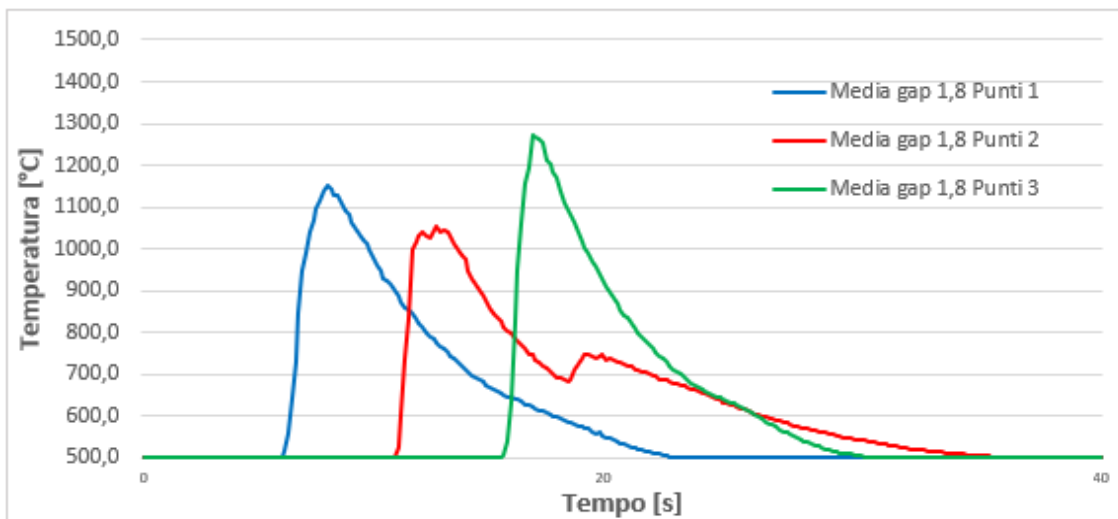


Figura 51. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti variazione gap 1,8 mm

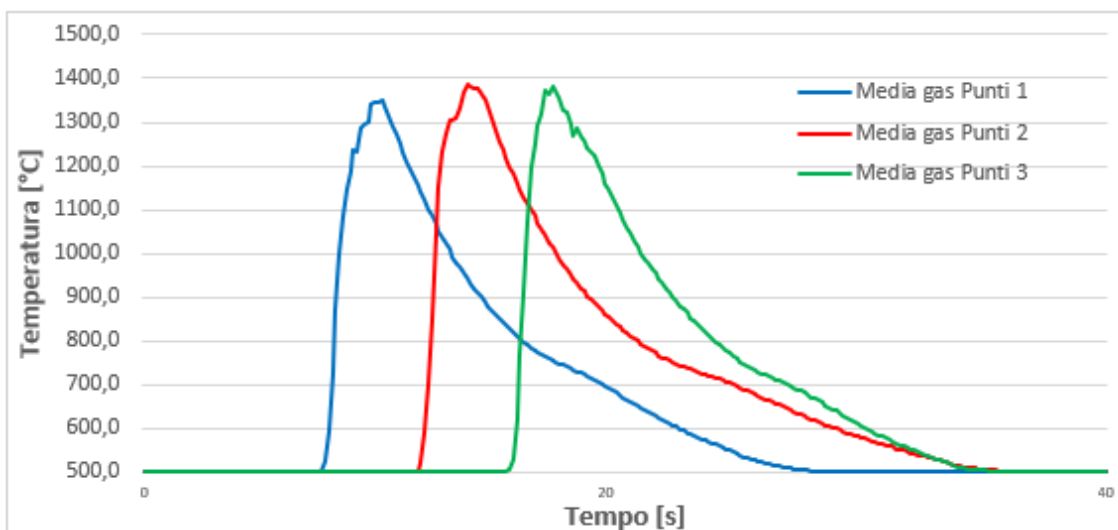


Figura 52. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti variazione gas 10 l/min

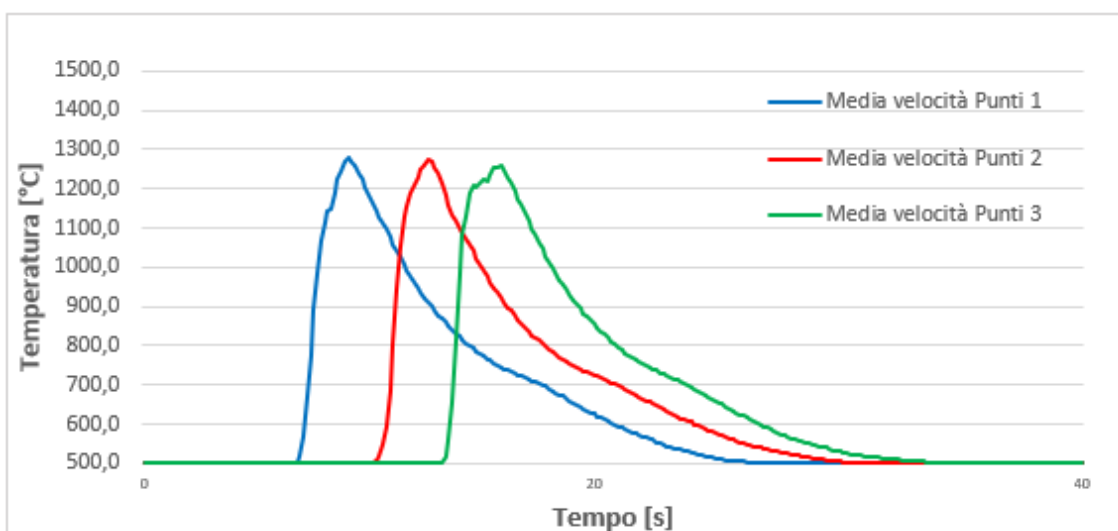


Figura 53. Media punti inizio, centro e fine cordone per classe giunti variazione velocità di avanzamento

Dall'osservazione dei grafici precedenti si riesce in genere a confermare il carattere già riscontrato con il primo approccio. Infatti, nei giunti sani si può notare che gli andamenti medi dei tre punti sono equivalenti, mentre in quelli con incremento di gap di 1,3 mm gli andamenti si presentano sensibilmente ridotti rispetto al giunto con parametri nominali e si raggiungono comportamenti notevolmente differenti nelle curve nei casi più critici di gap di 1,5 mm e 1,8 mm. Gli andamenti che si hanno nei giunti con variazione gas si

presentano più elevati rispetto al giunto sano mentre quelli con incremento di velocità al contrario inferiori, come già dimostrato tramite il precedente approccio.

Di seguito sono presentati i grafici dell'andamento delle temperature medie raggiunte lungo il cordone nelle modalità commentate nella sezione 2.1, per i campioni di riferimento, Figura 54, giunti con incremento del gap, Figura 55, i campioni con difetto del gas, Figura 56, e i giunti realizzati con incremento di velocità di avanzamento torcia, Figura 57. Successivamente avverrà il confronto finale tra gli andamenti medi definiti per le differenti classi di giunti, Figure 58-60.

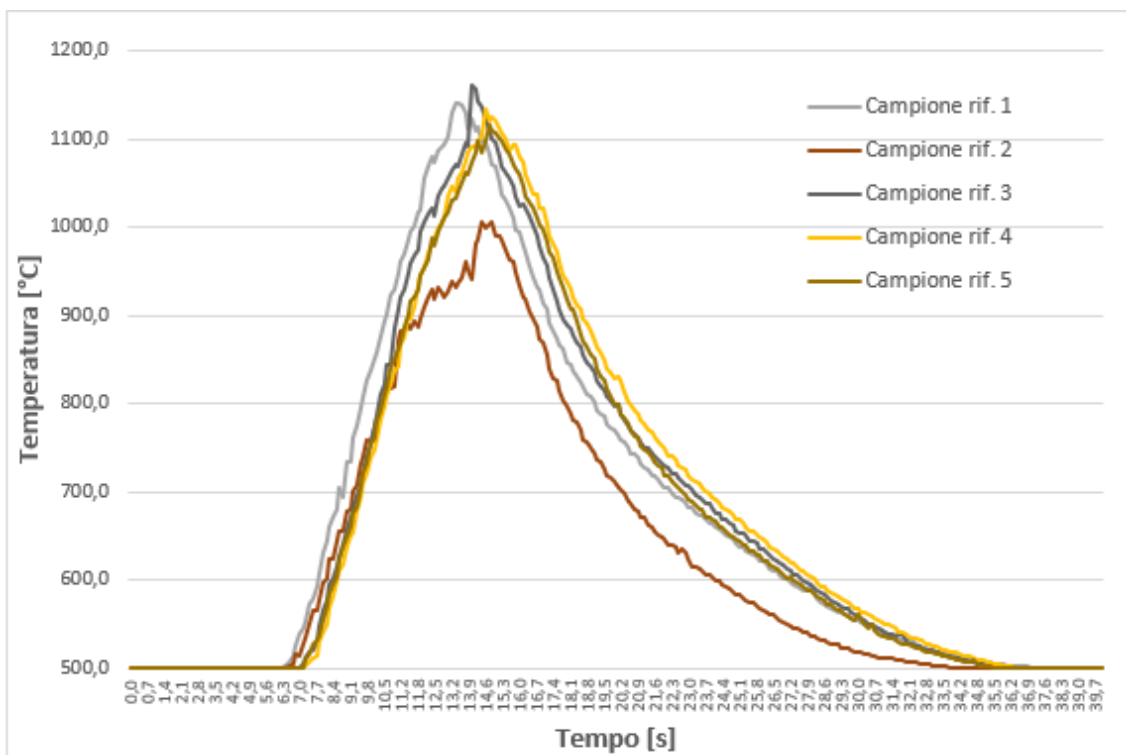


Figura 54. Andamento temperatura medio nel tempo in giunto di riferimento

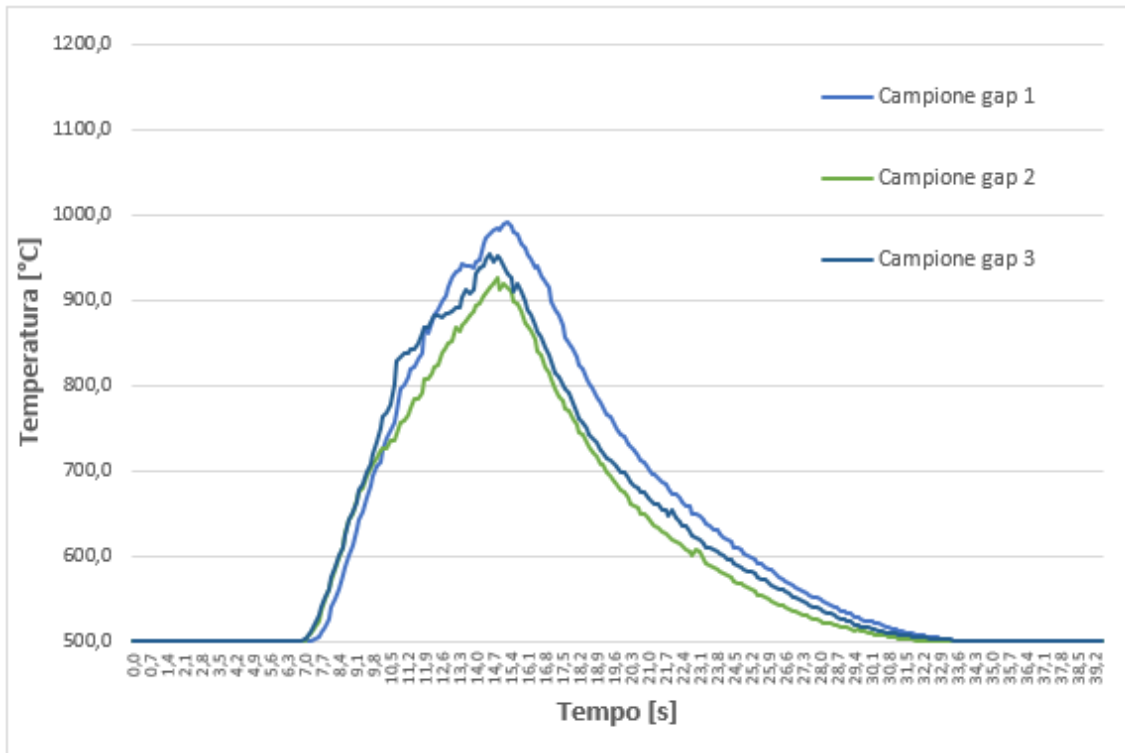


Figura 55. Andamento temperatura medio nel tempo in giunto incremento di gap

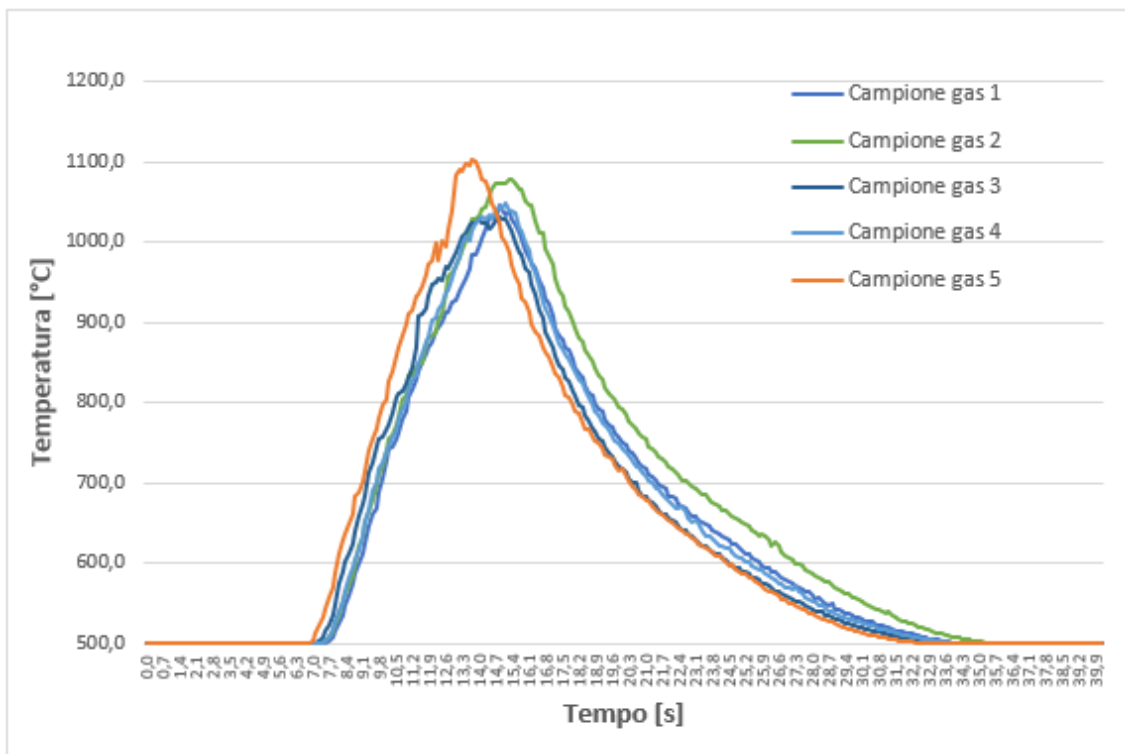


Figura 56. Andamento temperatura medio nel tempo in giunto variazione di gas

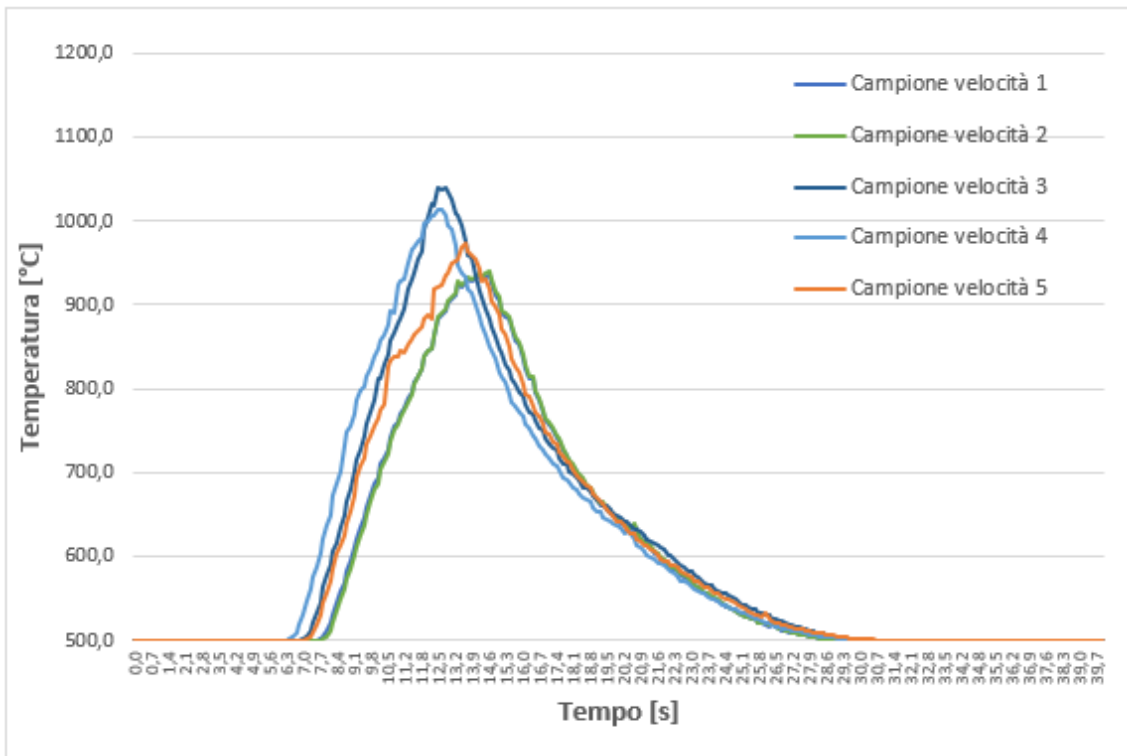


Figura 57. Andamento temperatura medio nel tempo in giunto velocità di avanzamento torcia

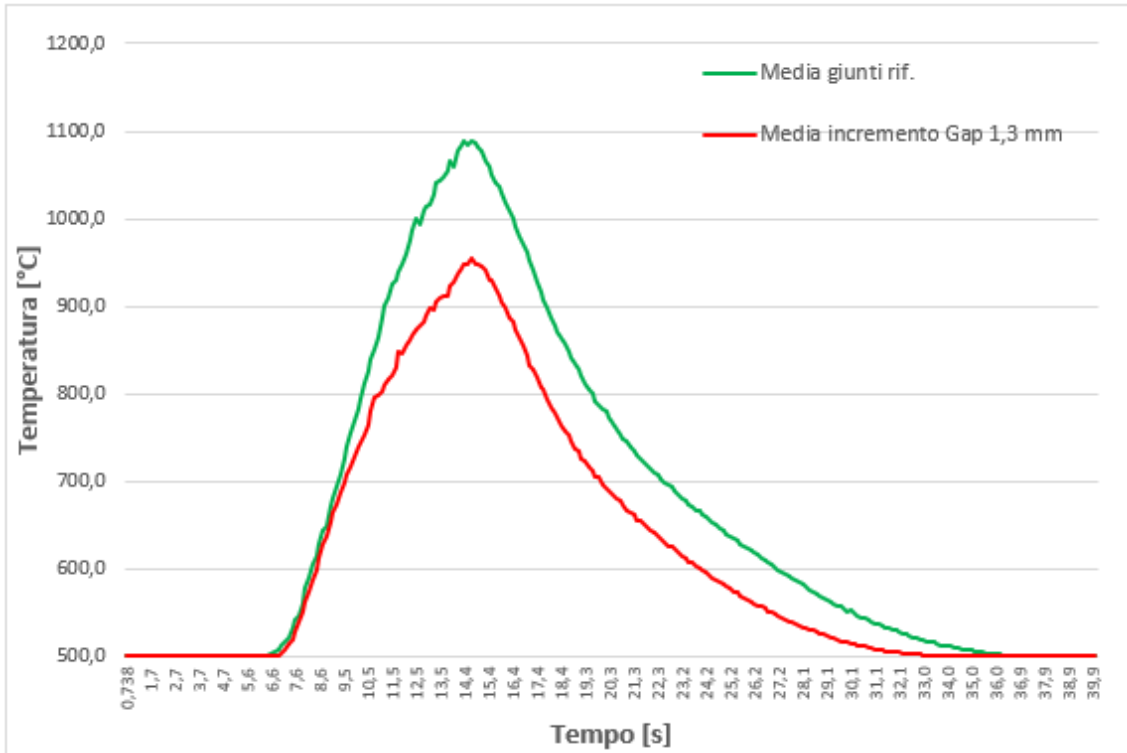


Figura 58. Confronto sani e difetto incremento di gap media temperatura sul cordone nel tempo

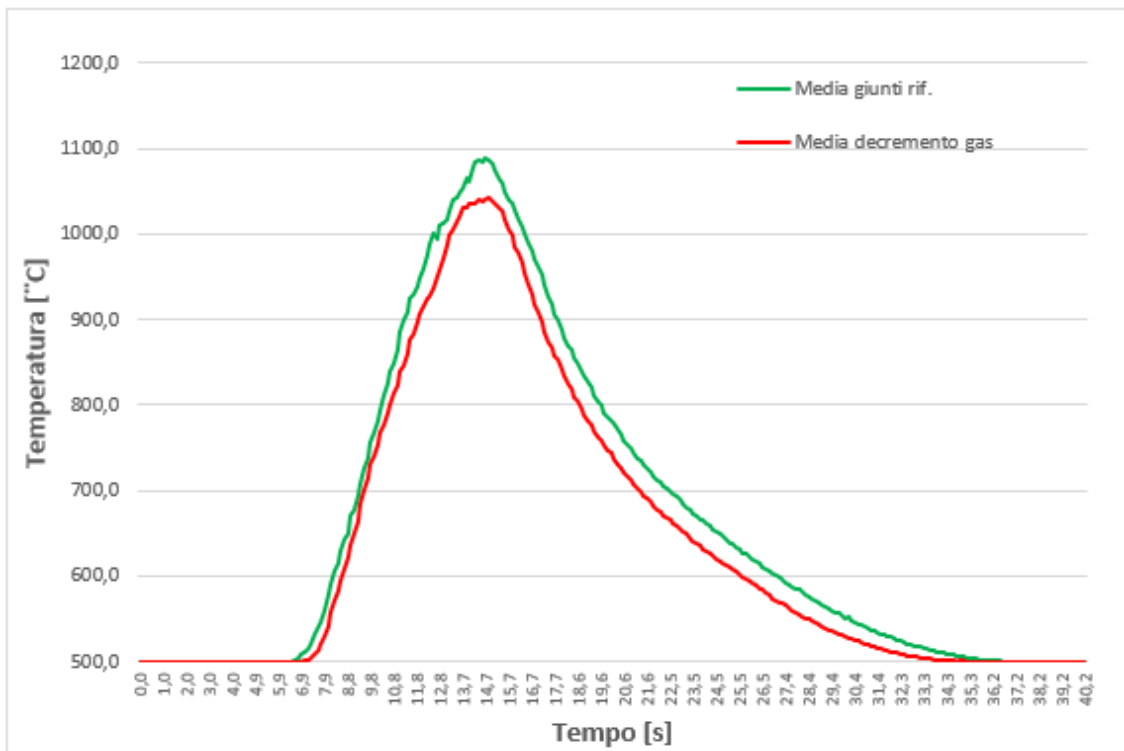


Figura 59. Confronto sani e difetto variazione gas di media temperatura sul cordone nel tempo

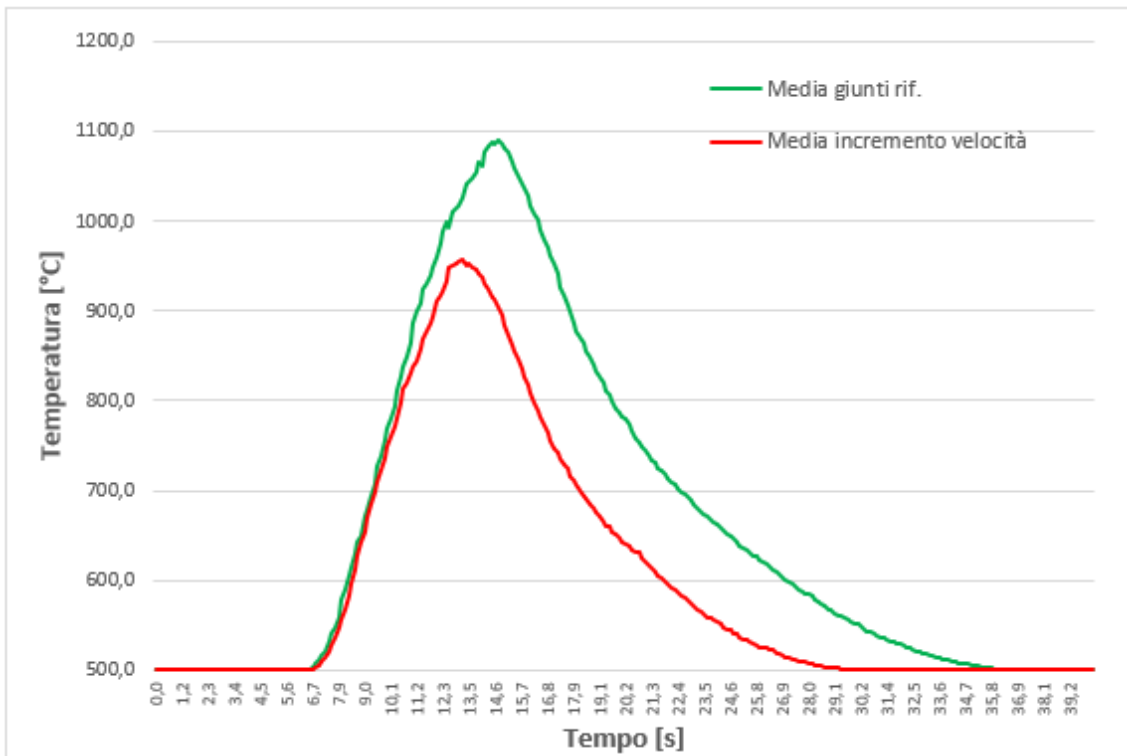


Figura 60. Confronto sani e difetto velocità di media temperatura sul cordone nel tempo

Per mezzo di un andamento medio della distribuzione delle temperature lungo tutta la superficie del cordone di saldatura durante tutto l'arco del processo è possibile osservare se vi sono influenze significative all'interno dell'area analizzata dovuto a eventuali effetti puntuali e locali.

Nel caso di confronto delle giunzioni sane con la classe di unioni saldate a velocità di avanzamento torcia 580 mm/min, Figura 60, la differenza di andamento che possiedono le due curve è ben apprezzabile e lo scostamento tra i due picchi massimi si aggira intorno ai 140°C, con la curva dei campioni senza difetto che si localizza al di sopra. La spiegazione può essere data da un minor apporto termico per unità di area e una curva che raffredda in minor tempo dovuto alla velocità del processo maggiore che non consente di far raggiungere picchi elevati pari agli altri giunti.

Nell'aumento del gap, Figura 58, l'effetto è un abbassamento della curva quindi con raggiungimento di valori massimi più bassi che può essere interpretato come effetto

derivante da una minor quantità di materiale base fuso ed un maggior scambio termico con aria dovuto al gap incrementato.

Analizzando il confronto tra i campioni esenti da difetti e i giunti con decremento di gas di protezione, Figura 59, si può notare che la curva relativa al parametro di processo variato si posiziona lievemente al di sotto della curva del giunto realizzato con parametri nominali con uno scostamento massimo inferiore a 50°C contraddistinguendo così una differenza di comportamento percepibile ma non significativo, indice che nella media della temperatura all'interno dell'area di tutto il cordone nel tempo vi è poca influenza derivante dal decremento del gas, per distinguere ottimamente i due diversi giunti.

Prove di termografia Lock-In offline

La presente sezione illustra in dettaglio i risultati riguardanti la calibrazione del sistema Lock-In e i risultati preliminari ottenuti nei giunti di saldatura e derivanti dalle elaborazioni mediante gli strumenti descritti nella sezione 2.2.

Le analisi sono iniziate calcolando il rumore di fondo, ΔT_{rumore} , che si ha in condizioni di ambiente di laboratorio e questo è stato valutato essere circa 0,2°C quindi poco rilevante per poter disturbare il segnale.

In ogni caso è stata effettuata la verifica che sulle variazioni di temperature ΔT_1 e ΔT_{max} durante lo svolgimento delle prove fosse maggiore a 5°C, potendo osservare nelle Tabelle 17-21 i valori rilevati per ognuno dei 5 campioni esenti da difetti e per ogni parametro di prova.

Tabella 17. Valutazione rumore in campione 1 esente da difetti

Campione	Posizione punto esaminato	Pulse period (ms)	Power %	ΔT_1 [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	1	200	25	10,3	12,2
1	1	300	25	10,6	12,6
1	1	200	15	5,3	6,4

1	1	200	35	13,2	15,9
1	2	200	25	7,9	9,6
1	2	300	25	8,8	10,6
1	2	200	15	5	5,9
1	2	200	35	11,8	14,1
1	3	200	25	10,8	12,9
1	3	300	25	11,4	13,8
1	3	200	15	6,3	7,6
1	3	200	35	15	18,1

Tabella 18. Valutazione rumore in campione 2 esente da difetti

Campione	Posizione punto esaminato	Pulse period (ms)	Power %	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
2	1	200	25	12,2	13,9
2	1	300	25	12,9	15,1
2	1	200	15	6,9	8,2
2	1	200	35	17,4	20,3
2	2	200	25	18,6	21,5
2	2	300	25	20	23,1
2	2	200	15	11,5	13,2
2	2	200	35	26,8	30,8
2	3	200	25	16,4	19,4
2	3	300	25	17	20
2	3	200	15	10	11,3
2	3	200	35	22,1	26,1

Tabella 19. Valutazione rumore in campione 3 esente da difetti

Campione	Posizione punto esaminato	Pulse period (ms)	Power %	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
3	1	200	25	13,4	16
3	1	300	25	15	18,3
3	1	200	15	8,5	10,1
3	1	200	35	19,3	23,2
3	2	200	25	13,4	15,9
3	2	300	25	14,2	17,4
3	2	200	15	8,1	9,6
3	2	200	35	18,8	22,4
3	3	200	25	14,3	16,9
3	3	300	25	15,6	18,6
3	3	200	15	8,6	10,4
3	3	200	35	20,4	24,5

Tabella 20. Valutazione rumore in campione 4 esente da difetti

Campione	Posizione punto esaminato	Pulse period (ms)	Power %	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
4	1	200	25	12,9	16,2
4	1	300	25	14,4	17,9
4	1	200	15	8,1	9,8
4	1	200	35	18,3	22,6
4	2	200	25	18,2	21,2
4	2	300	25	19,4	22,8
4	2	200	15	10,9	12,8
4	2	200	35	26	30,1
4	3	200	25	14	16,93

4	3	300	25	15,4	18,7
4	3	200	15	8,6	10,3
4	3	200	35	19,9	24

Tabella 21. Valutazione rumore in campione 5 esente da difetti

Campione	Posizione punto esaminato	Pulse period (ms)	Power %	ΔT_1 [°C]	ΔT_{max} [°C]
5	1	200	25	11,9	14,7
5	1	300	25	13,3	16,7
5	1	200	15	7,3	9,1
5	1	200	35	17,3	21,2
5	2	200	25	15,1	17,6
5	2	300	25	16,3	19,3
5	2	200	15	9	10,8
5	2	200	35	21,5	25,4
5	3	200	25	15,4	18,1
5	3	300	25	16,7	19,9
5	3	200	15	9,4	11,1
5	3	200	35	22	25,9

Si osserva che in ogni tabella relativa alle prove eseguite in via preliminare sui 5 campioni esenti da difetti, per ogni prova svolta con diversi parametri di potenza e periodo dell'impulso si sono raggiunti salto di temperatura sempre superiori ai 5°C di requisito minimo da rispettare per segnale di buona qualità.

La prova di ripetibilità è stata eseguita su un punto di un giunto per tre volte di seguito, effettuandola anche al variare dei parametri di potenza e periodo di impulso. I risultati sono forniti nelle Tabelle 22-25.

Tabella 22. Ripetibilità potenza 7,5 W e impulso di 200 ms

Prova	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	23,9	40,5	43,4
2	23,9	40,3	43,4
3	23,9	40,7	43,6
Media	23,9	40,5	43,47
Deviazione standard	0,00	0,16	0,09

Tabella 23. Ripetibilità potenza 7,5 W e impulso di 300 ms

Prova	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	24	42	45,2
2	24	42	45,4
3	24	42	45,4
Media	24	42	43,33
Deviazione standard	0,00	0,00	0,09

Tabella 24. Ripetibilità potenza 4,5 W e impulso di 200 ms

Prova	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	24	34,3	36
2	24	34,2	36,2
3	24	34,3	36,1
Media	24	34,27	36,1
Deviazione standard	0,00	0,05	0,08

Tabella 25. Ripetibilità potenza 10,5 W e impulso di 200 ms

Prova	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	24,1	47,6	51,8
2	24,1	47,8	52,2
3	24,1	47,8	51,9
Media	24,1	47,73	51,97
Deviazione standard	0,00	0,08	0,17

Dai risultati delle prove di ripetibilità si può osservare che per i valori di media e deviazioni standard ottenuti le prove possono ritenersi molto ripetibili e non influenzate in alcun modo da errore umano, acquisizione della termocamera e laser per test effettuati in diversi momenti.

In seguito, sono mostrati in Tabelle 26-27 i risultati delle prove condotte posizionando il giunto con diverso orientamento rispetto a termocamera e laser per valutare l'influenza derivante. Le prove sono state eseguite su un punto di un giunto alle potenze di 7,5 W e 10,5 W con periodo di impulso di 200 ms.

Tabella 26. Influenza diverso orientamento campione per potenza 10,5 W

Inclinazione	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	21,7	70,7	74,7
2	21,4	61	65,5
3	21,7	59	63
Media	21,6	63,57	67,73
Deviazione standard	0,14	5,11	5,03

Tabella 27. Influenza diverso orientamento campione per potenza 7,5 W

Inclinazione	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	21,7	56,4	59,3
2	21,4	49	51
3	21,7	47,7	50,3
Media	21,6	51,03	53,53
Deviazione standard	0,14	3,83	4,09

Dai risultati dei test condotti variando l'orientamento del campione, valutando i valori medi e di deviazioni standard si può notare che c'è un minimo fattore di variabilità che però è ritenuto accettabile visto i valori così bassi di deviazioni standard.

La prova per valutare l'influenza di una diversa scelta del tempo di integrazione della termocamera è stato effettuato su un punto di un giunto utilizzando una potenza di 10,5 W e periodo di impulso di 200 ms, Tabella 28.

Tabella 28. Influenza della scelta di integration time della termocamera

Tempo integrazione IT	Tambiente	$\Delta T1$ [°C]	ΔT_{max} [°C]
720 μs	21,6	64,2	68,2
900 μs	21,6	63,6	68
Media	21,6	63,9	68,1
Deviazione standard	0,00	0,30	0,10

Sulla base dei risultati mostrati in tabella una scelta di diverso IT non influenza il risultato del segnale termico acquisito.

Dopo aver visualizzato e valutato l'influenza di suddetti parametri rispetto al segnale termico acquisito dalla termocamera, si prosegue con la valutazione degli stessi parametri sui risultati di fase e ampiezza dell'analisi Lock-In con IRTA, cominciando dalla prova di ripetibilità, Tabelle 29-34, eseguita a potenza 4,5 W, 7,5 W e 10,5 W con periodo di impulso di 200 ms.

Tabella 29. Ripetibilità risultato di ampiezza analisi Lock-In a potenza 4,5 W e 200 ms, I armonica

Prova	Massimo	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	755,09	6,39	46,33
2	755,64	6,38	46,37
3	753,32	6,38	46,15
Media	754,68	6,38	46,28
Deviazione standard	0,99	0,00	0,10

Tabella 30. Ripetibilità risultato di fase analisi Lock-In a 4,5 W e 200 ms, I armonica

Prova	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	5,42	52,77
2	5,16	51,51
3	6,59	52,99
Media	5,72	52,42
Deviazione standard	0,62	0,65

Tabella 31. Ripetibilità risultato di ampiezza analisi Lock-In a potenza 7,5 W e 200 ms, I armonica

Prova	Massimo	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	1391,61	11,07	84,31
2	1384,75	11,05	83,91
3	1387,52	11,10	84,15
Media	1387,96	11,07	84,12
Deviazione standard	2,82	0,02	0,16

Tabella 32. Ripetibilità risultato di fase analisi Lock-In a 7,5 W e 200 ms, I armonica

Prova	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	8,21	53,21
2	7,15	55,02
3	6,75	51,93
Media	7,37	53,39

Deviazione standard	0,62	1,27
---------------------	------	------

Tabella 33. Ripetibilità risultato di ampiezza analisi Lock-In a potenza 10,5 W e 200 ms, 1 armonica

Prova	Massimo	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	2299	17,31	136,43
2	2303	17,32	137,15
3	2274,23	17,15	135,26
Media	2292,08	17,26	136,28
Deviazione standard	12,72	0,08	0,78

Tabella 34. Ripetibilità risultato di fase analisi Lock-In a 10,5 W e 200 ms, 1 armonica

Prova	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	9,14	47,39
2	11,54	51,08
3	11,41	51,10
Media	10,70	49,86
Deviazione standard	1,10	1,74

I risultati di ripetibilità dell'analisi Lock-In valutata rispetto alle immagini di ampiezza e fase permettono di dire che elevata ripetibilità. Per cui per le prove successive sarà sufficiente una sola prova per singoli parametri di prova, senza la necessità di dover avere più prove ripetute.

La prova di ripetibilità è stata effettuata ripetendola tre volte anche su altro campione con potenza 10,5 W e periodo di 200 ms su cui sono stati estrapolati gli andamenti di un profilo ROI lineare orizzontale tracciato con il criterio illustrato nella sezione 2.2. Di essi sono mostrati i grafici delle curve relative alle tre armoniche di fasi, Figure 61-63, e ampiezza, Figure 66-68, e l'andamento medio calcolato dalle tre prove, Figure 64 e Figura 69, e relative deviazione standard, Figure 65 e Figura 70.

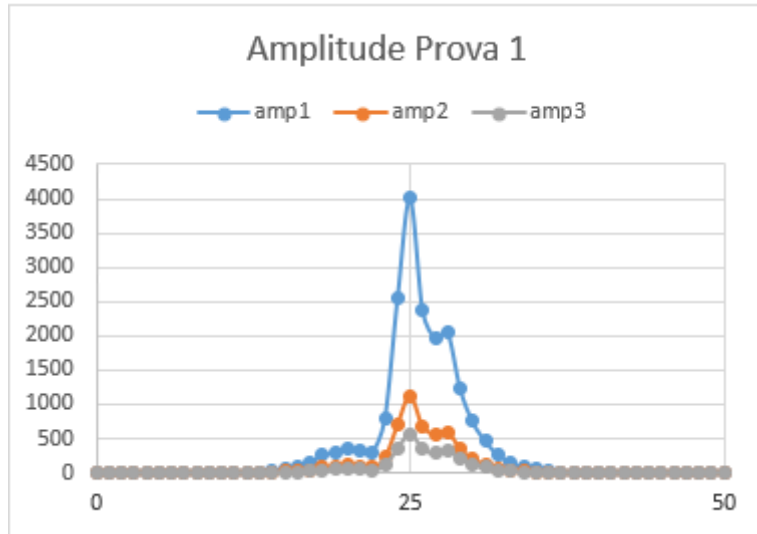


Figura 61. Ripetibilità Lock-In andamenti ampiezze profili prova 1

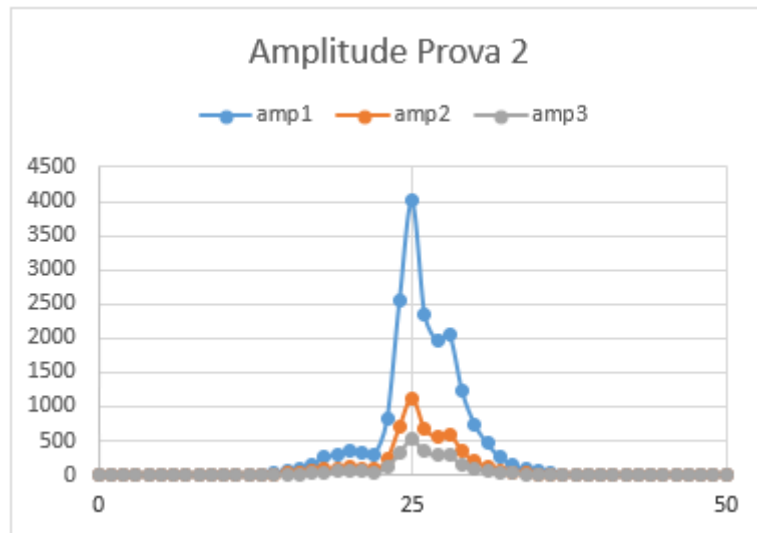


Figura 62. Ripetibilità Lock-In andamenti ampiezze profili prova 2

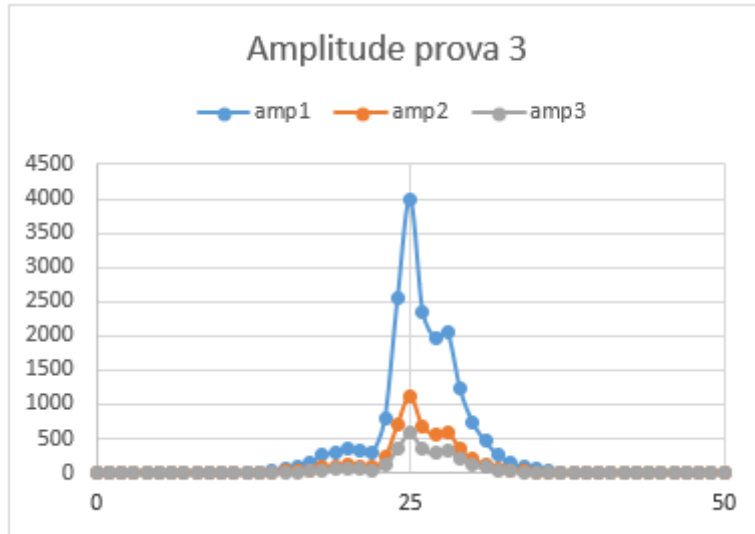


Figura 63. Ripetibilità Lock-In andamenti ampiezze profili prova 3

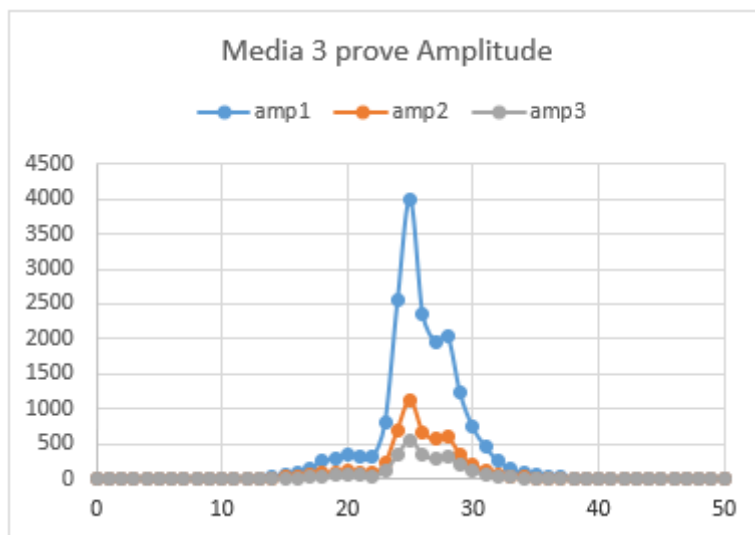


Figura 64. Andamento medio dell'ampiezza delle 3 prove di ripetibilità

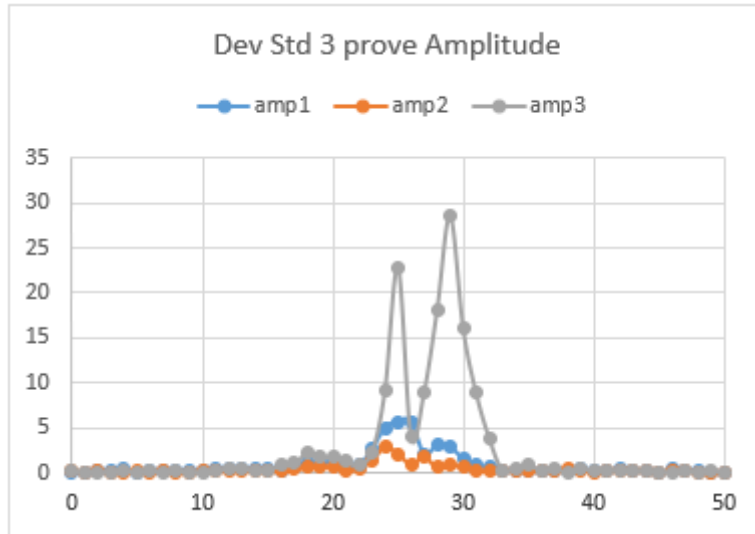


Figura 65. Andamento deviazione standard dell'ampiezza delle 3 prove di ripetibilità

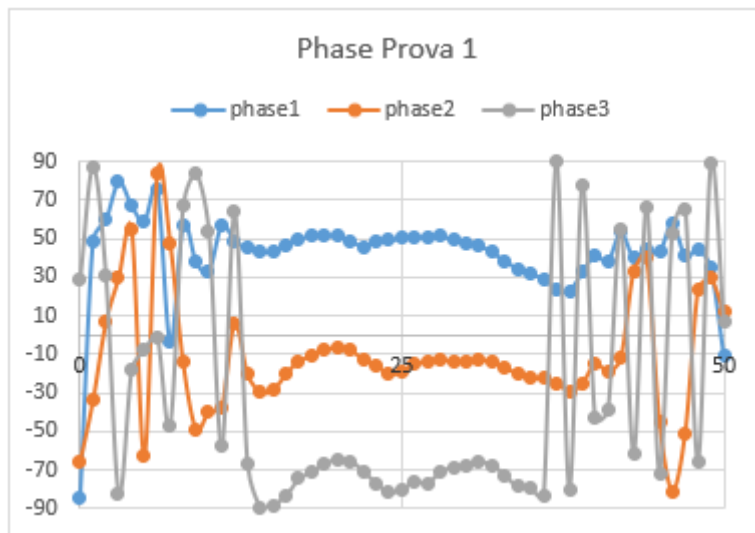


Figura 66. Ripetibilità Lock-In andamenti fase profili prova 1

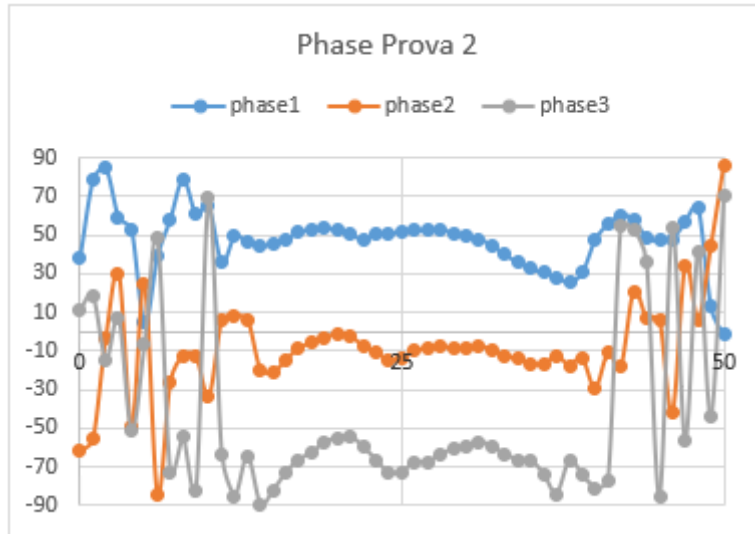


Figura 67. Ripetibilità Lock-In andamenti fase profili prova 2

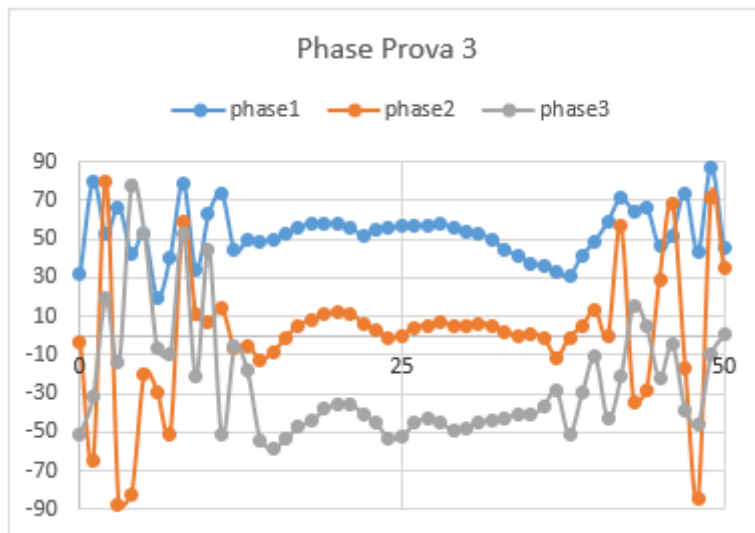


Figura 68. Ripetibilità Lock-In andamenti fase profili prova 3

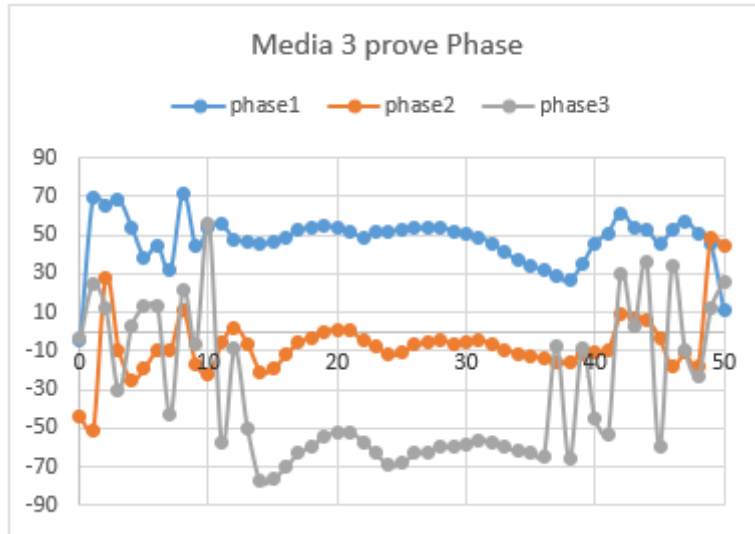


Figura 69. Andamento medio delle fasi delle 3 prove di ripetibilità

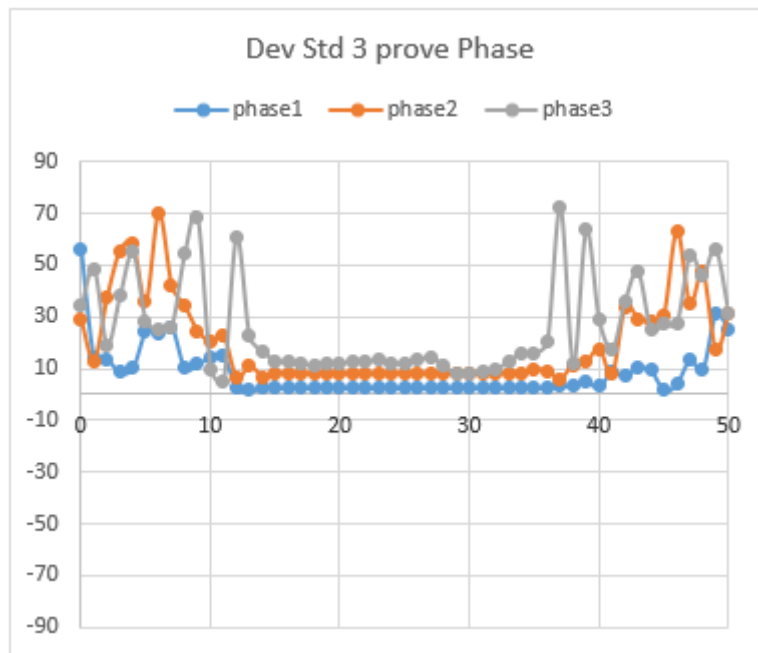


Figura 70. Andamento deviazione standard della fase delle 3 prove di ripetibilità

Dall'osservazione degli andamenti delle ampiezze sulle prove di ripetibilità si può notare che gli andamenti sono ripetuti confermato anche da un andamento medio che rispecchia gli stessi valori delle singole prove. Inoltre, l'andamento della deviazione standard mostra che si ha bassa variabilità nei valori e dove si hanno i più elevati è nella terza armonica che presenta valori più modesti in valore assoluto rispetto alle altre due armoniche.

Commento simile può essere fatto rispetto alle fasi, le quali manifestano un andamento qualitativo equivalente confermato anch'esso da un carattere di alta somiglianza con l'andamento medio ed inoltre la sua deviazione standard si presenta, ad esclusione delle zone estreme laterali caratterizzate da rumore, con zona centrale piatta e valori bassi.

In virtù di tutte le prove di ripetibilità eseguite si può essere sicuri che le prove non sono influenzate da questi fattori.

In Tabella 35 e Tabella 36 sono illustrati i risultati riguardanti lo studio sull'influenza della scelta del frame iniziale dell'intervallo da inserire in input nell'analisi Lock-In. Anche in questo caso è possibile dire che la scelta di un frame nei dintorni dell'immagine in cui si visualizza la prima risposta del materiale non ha grande influenza sul risultato finale dell'analisi Lock-In.

Tabella 35. Influenza dei risultati di ampiezza dell'analisi Lock-In rispetto a scelta del frame iniziale

Frame	Massimo	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	5011	17,53	184,23
2	5019,34	17,56	184,57
3	5000	17,49	183,78
Media	5010,11	17,52	184,19
Deviazione standard	7,92	0,03	0,32

Tabella 36. Influenza dei risultati di fase dell'analisi Lock-In rispetto a scelta del frame iniziale

Frame	Media dell'immagine	Dev. Std dell'immagine
1	10,66	56,41
2	10,77	56,45
3	10,69	56,39
Media	10,71	56,42
Deviazione standard	0,05	0,02

In seguito ad aver stabilito che i risultati delle analisi Lock-In sono poco influenzati da altri fattori esterni ai parametri di prova impostati, si procede al confronto dei risultati

ottenuti dalle prove sui 5 campioni esenti da difetti in fase di calibrazione con parametri di potenza e periodo di impulso fatti variare.

Da una prima indagine di confronto visiva delle immagini di ampiezza e fase non è stato possibile apprezzare variazioni significative indotte dalla variazione dei parametri di prova da poter immediatamente escludere o scegliere quali fossero i parametri ottimali da mantenere nell'esecuzione delle prove. Nelle Figure 71-72 sono riportati due casi a confronto a scopo illustrativo di esempio. Le ampiezze presentano scale diverse in falsi colori.

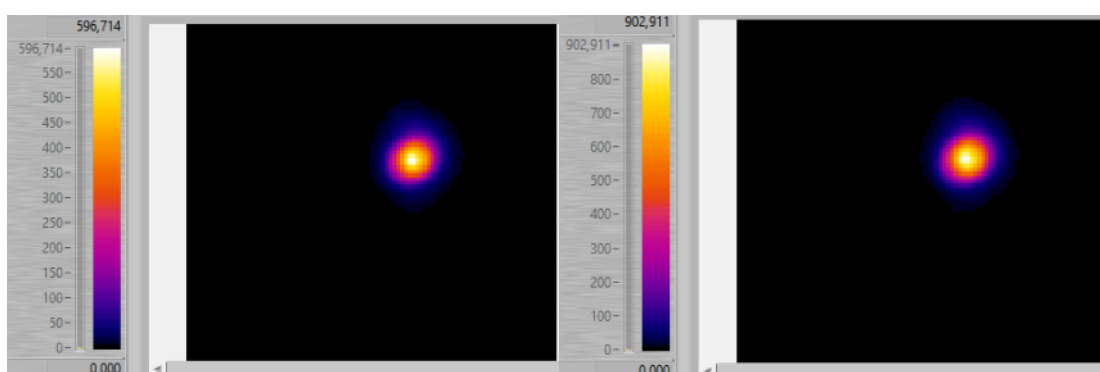


Figura 71. Immagini di ampiezza a confronto a potenza 7,5W e 10,5 W con periodo di 200 ms

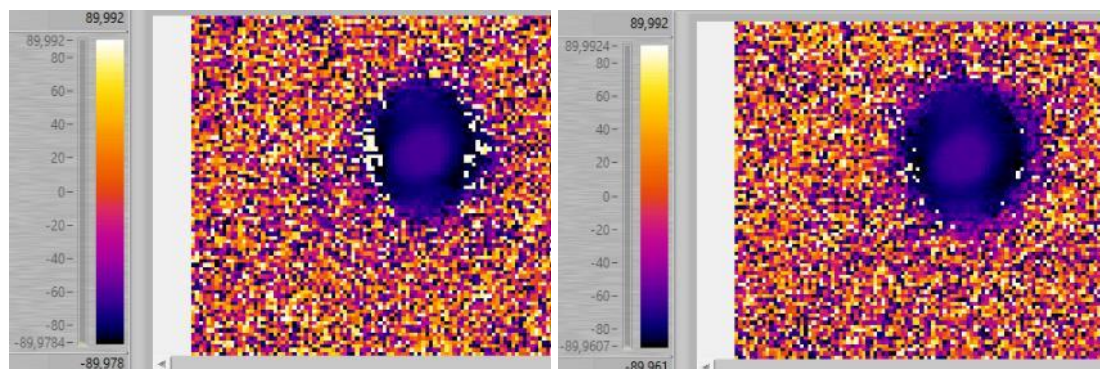


Figura 72. Immagini di fase a confronto a potenza 7,5W e 10,5 W con periodo di 200 ms

È stata effettuata quindi un'analisi quantitativa sulle immagini di fase e ampiezza andando a identificare la ROI lineare di 50 pixel come utilizzata già in precedenza e di essa si è costruito un grafico dell'andamento. La procedura è stata impiegata su ognuno dei singoli tre punti appartenenti ai cinque giunti esenti da difetti e per i quattro parametri di prova variabili.

Un esempio di risultati relativi ad un punto di un giunto e al confronto tra le quattro diverse prove eseguite è illustrato nelle Figure 73-76.

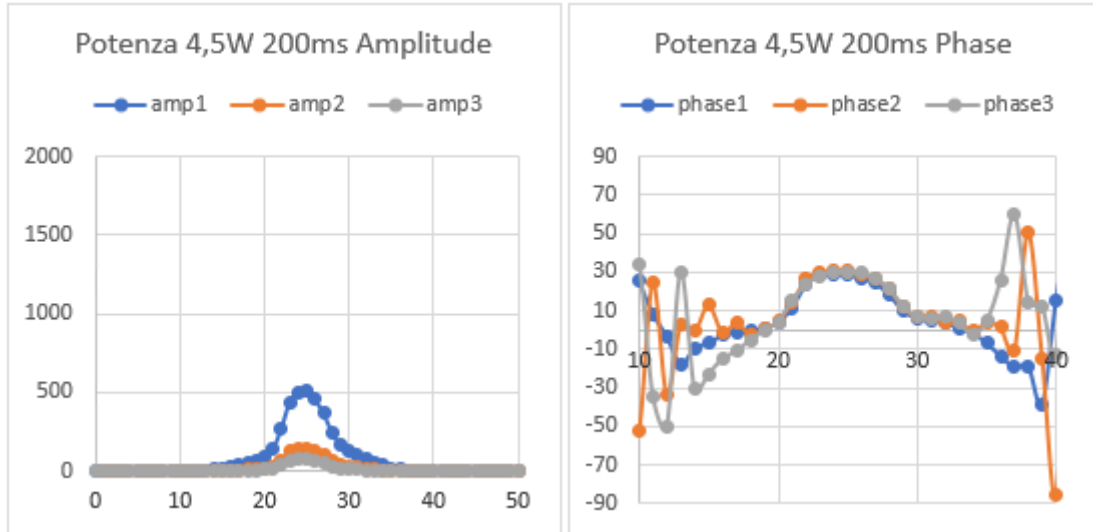


Figura 73. Andamento ampiezza e fasi delle tre armoniche per potenza 4,5W e 200ms

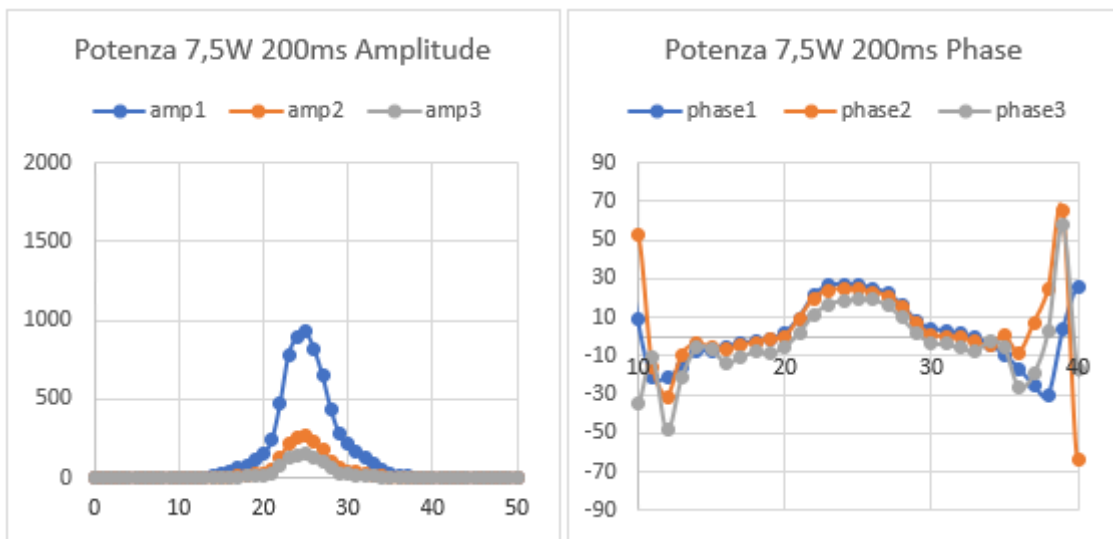


Figura 74. Andamento ampiezza e fasi delle tre armoniche per potenza 7,5W e 200ms

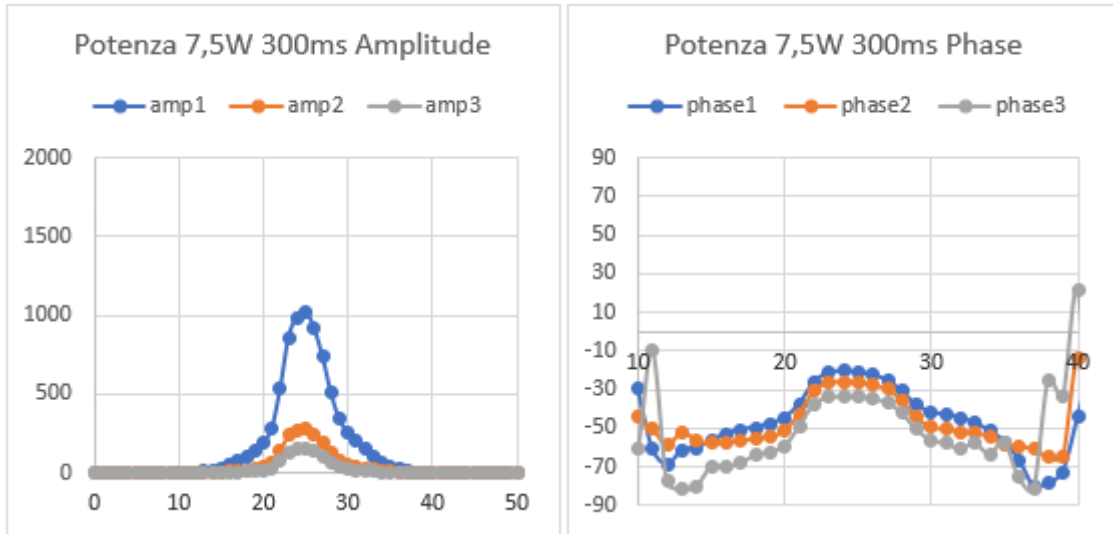


Figura 75. Andamento ampiezza e fasi delle tre armoniche per potenza 7,5W e 300ms

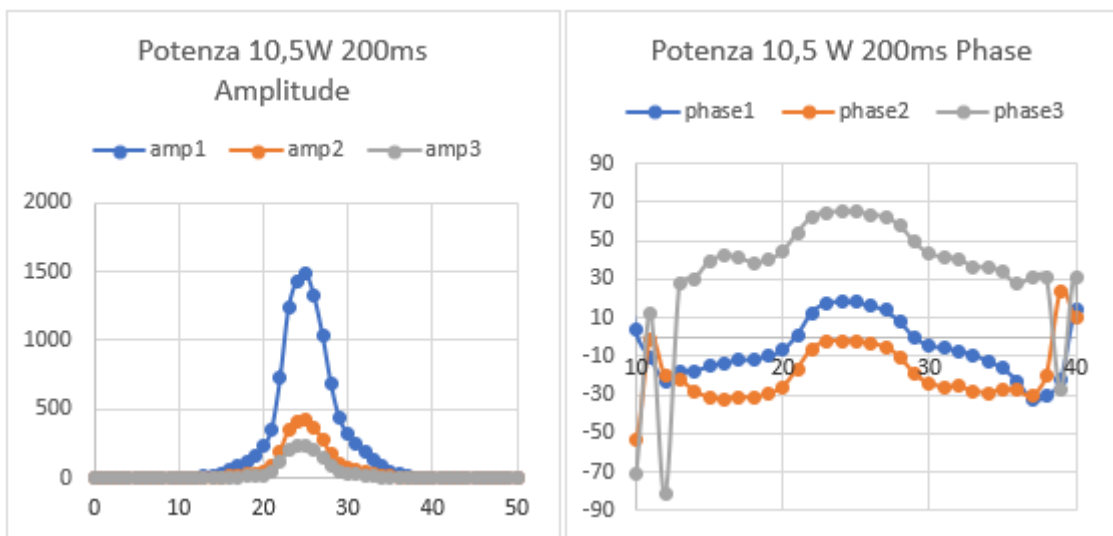


Figura 76. Andamento ampiezza e fasi delle tre armoniche per potenza 10,5W e 200ms

Dal confronto degli andamenti delle ampiezze si può osservare che esse raggiungono valori maggiori a potenze maggiori. Anche incrementare il periodo dell'impulso da 200 ms a 300 ms ha permesso un lieve aumento nei valori di ampiezza raggiunti.

Sul comportamento delle fasi invece non è possibile valutarne l'andamento in base ai valori assoluti assunti in quanto essi, si può però riscontrare un'uguaglianza nella forma delle curve sia al variare della potenza che al variare del periodo e si mantiene l'equivalenza nell'aspetto anche tra le tre armoniche.

Lo sfasamento che si ha tra le tre armoniche all'interno della singola prova non presenta un dato da prendere in considerazione in quanto fanno riferimento a tre analisi Lock-In distinte come se fossero tre prove differenti condotte a diversa frequenza di eccitazione. Per cui il confronto deve nascere tra le ampiezze e fasi appartenenti alla stessa armonica. Quello che si nota di differente negli andamenti tra le presenti prove effettuate è che solamente con l'utilizzo di una potenza di 10,5 W con periodo di 200 ms si riescono ad ottenere le fasi delle tre armoniche distaccate e non sovrapposte nel grafico rispetto alle altre tre prove.

Tali comportamenti si presentano in genere in modo simile sui vari punti dei campioni esaminati in fase preliminare visto che si ottengono stessi andamenti e sulla base delle considerazioni effettuate si può supporre che sia indifferente valutare tra uno di questi parametri. Si è scelto quindi di ridurre il numero di prove preferendo utilizzare la potenza di 10,5 W e periodo di 200 ms perché si ottiene un segnale maggiore e possono essere estrapolate informazioni aggiuntive dalle diverse armoniche siccome non si sovrappongono. Si mantiene in parallelo anche la prova con potenza di 7,5 W e periodo di 200 ms per poter ovviare al problema nel caso in cui si presentasse saturazione del segnale termico con la potenza superiore.

Le successive prove che costituiscono il piano sperimentale Lock-In presentato in sezione 2.2 avverranno con i suddetti due parametri di prova.

La differenza presentatasi fin da subito nelle prove di riscaldamento con eccitazione laser sulle giunzioni realizzate variando i parametri nominali, è stata la saturazione del segnale termico verificatasi sia sui giunti con incremento di gap a 1,3 mm sia su quelli con decremento di gas di protezione di 10 l/min, in particolar modo nei punti in cui si è individuata presenza di porosità.

I parametri di prova non sono stati cambiati rispetto alla prima serie di prove sui giunti esenti da difetti, per cui l'acquisizione di un segnale saturo avvenuto in caso di giunzioni al di fuori dei parametri nominali è indice di un comportamento di risposta differente all'input di stimolazione.

I segnali saturi ottenuti in questo modo non possono essere impiegati per una corretta analisi Lock-In quindi è stato necessario porre delle modifiche ai parametri di prova in maniera da ottenere segnale all'interno della scala di temperature.

Per fare ciò sono possibili due strade:

- variare la potenza e/o il periodo di eccitazione;
- variare il range di temperature di misura.

La prima opzione deve essere attuata su tutti i campioni in esame per poter avere risultati in output dall'analisi Lock-In adeguati a effettuare i confronti perché non si possono paragonare dati derivati da diversi parametri di prova. La seconda soluzione, se possibile da applicare, permette di cambiare le scale di temperature che quindi obbligano a variare solamente il tempo di integrazione ad esso collegato e conseguente modifica del valore di frame rate massimo di acquisizione. Quest'ultimo è il parametro che è necessario non diminuisca a valori che non consenta acquisizione di 100 frame per impulso e inoltre sarebbe sempre ottimale mantenere la stessa frequenza della termocamera tra le diverse prove.

L'analisi Lock-In infatti non è influenzata dalla variazione del IT e nei presenti casi è stato sufficiente una variazione dell'intervallo di temperatura con conseguente diminuzione del tempo di integrazione che produce un aumento del frame rate massimo selezionabile, il quale non è stato modificato per le prove.

I parametri che sono stati modificati alla termocamera e hanno consentito di ottenere non saturazione di segnale per le due classi di giunti con incremento di gap 1,3 mm e decremento di gas 10 l/min è riassunto in Tabella 37:

Tabella 37. Modifica ai parametri della termocamera per corretta acquisizione su giunti non nominali

Classe di giunto	Scala di temperatura	Integration time IT
Incremento di gap 1,3 mm	15°C – 91,5°C	720 μs
Decremento di gas 10 l/min	20°C – 97,2°C	637,18 μs

In seguito alle dovute correzioni per permettere le condizioni di corretta elaborazione in post-processing tramite analisi Lock-In, si sono ottenute le immagini di ampiezza e fase anche dei giunti caratterizzati da incremento di gap e decremento di gas.

La prima analisi di confronto visivo sulle immagini in relazione a quelle dei giunti di riferimento non ha fatto emergere differenze qualitative visibili per cui come avvenuto in precedenza è stata necessaria un'elaborazione più approfondita con lo stesso criterio già impiegato di tracciare l'andamento lungo un profilo lineare orizzontale.

Dopo attente analisi si è ritenuto opportuno effettuare una pulizia sulla mole di dati disponibili e scegliere quelli considerati più idonei a caratterizzare i singoli giunti, col fine di identificare delle diversità tra le singole categorie. Sono stati utilizzati i dati relativi a ampiezze e fasi ottenuti dalle condizioni di prova con la potenza di 10,5 W e periodo di impulso di 200 ms e di questi si sono trattati solo gli andamenti della I armonica principale di eccitazione, ritenuta la meno affetta da rumore e la più caratteristica per singola prova. In seguito ad elaborazione dati sulle rispettive curve dei singoli punti esaminati per classe di giunto per individuare comportamenti caratterizzanti, in cui si è inoltre provveduto ad escludere singoli casi che sono apparsi anomali rispetto alla maggioranza delle prove effettuate all'interno della stessa categoria di giunzioni, si sono diagrammati gli andamenti sovrapposti sullo stesso grafico per ogni classe analizzata. Gli andamenti così ottenuti sono presentati nei grafici nelle Figure 77-82, in cui l'ultimo numero per ogni simbolo della legenda identifica la posizione del punto a cui si riferisce l'andamento. Con 1 si fa riferimento al punto dopo inizio cordone, con 2 al centro e con 3 il punto prima del tratto conclusivo di saldatura.

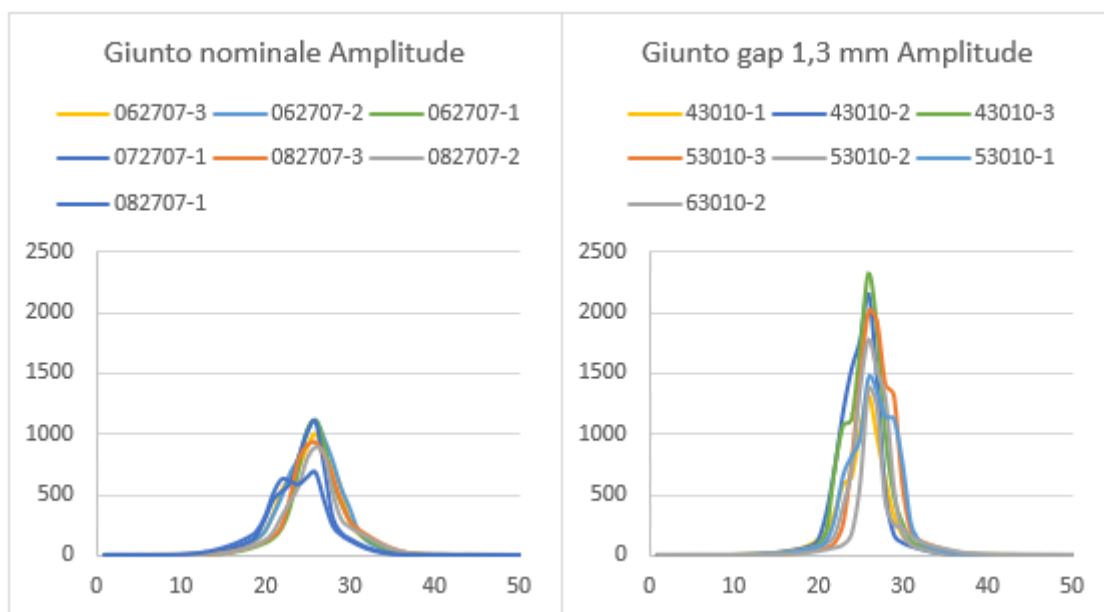


Figura 77. Confronto ampiezza giunto nominale e giunto con incremento di gap 1,3 mm, I armonica

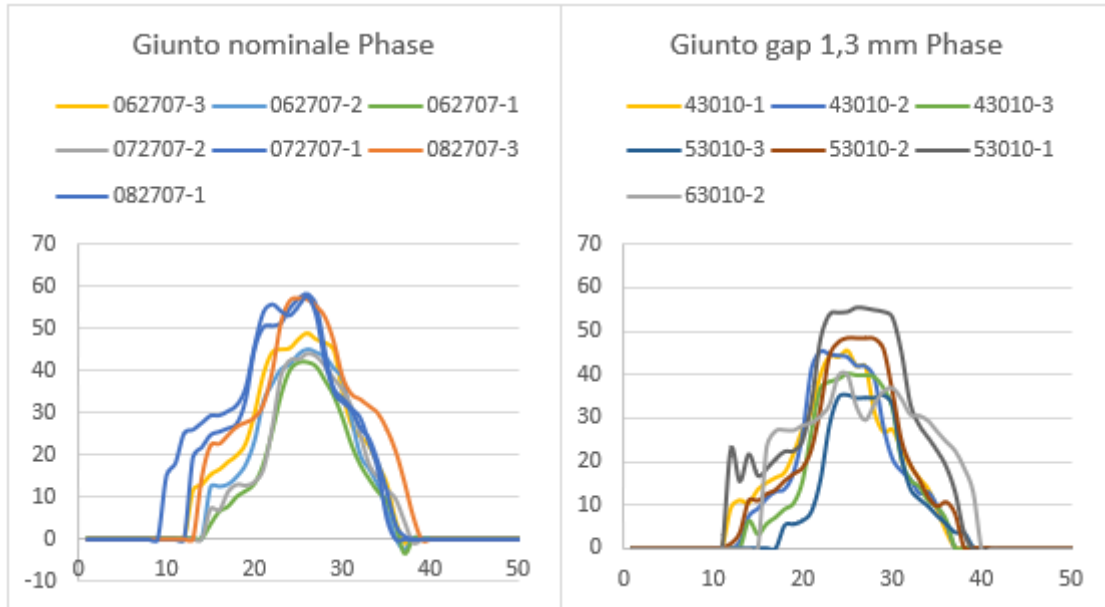


Figura 78. Confronto fasi giunto nominale e giunto con incremento di gap 1,3 mm, I armonica

Dal confronto degli andamenti tra giunto nominale e giunto con gap di 1,3 mm, Figure 77-78, si può notare immediatamente che generalmente le ampiezze si presentano notevolmente più elevate nel caso con incremento di gap mentre le fasi mostrano un carattere simile ed è arduo identificare elementi differenti che contraddistinguono totalmente una classe dall'altra.

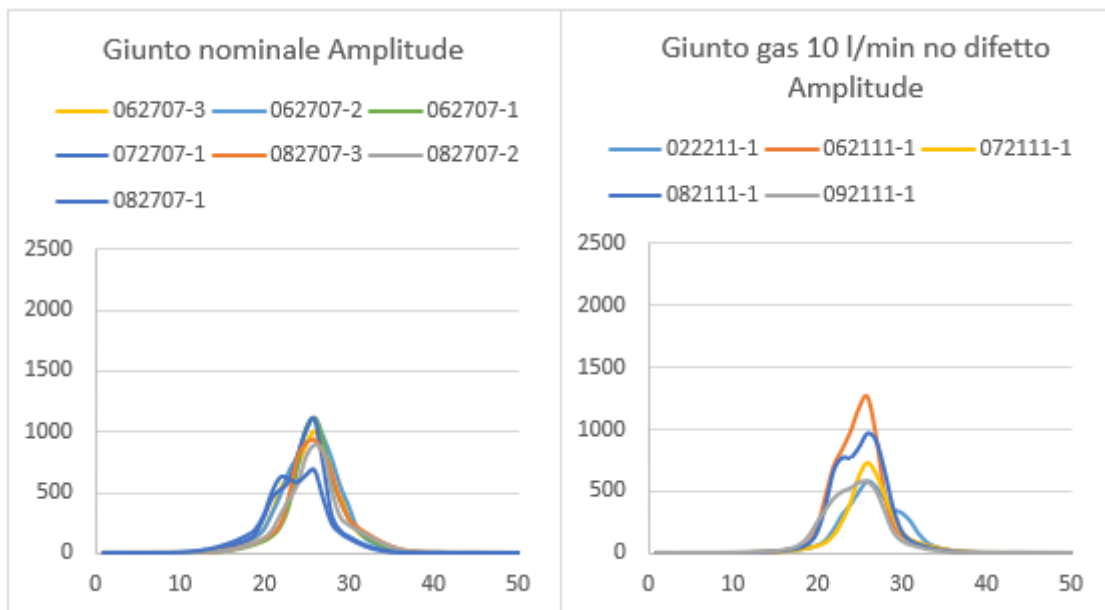


Figura 79. Confronto ampiezze giunto nominale e giunto con decremento di gas 10 l/min, I armonica

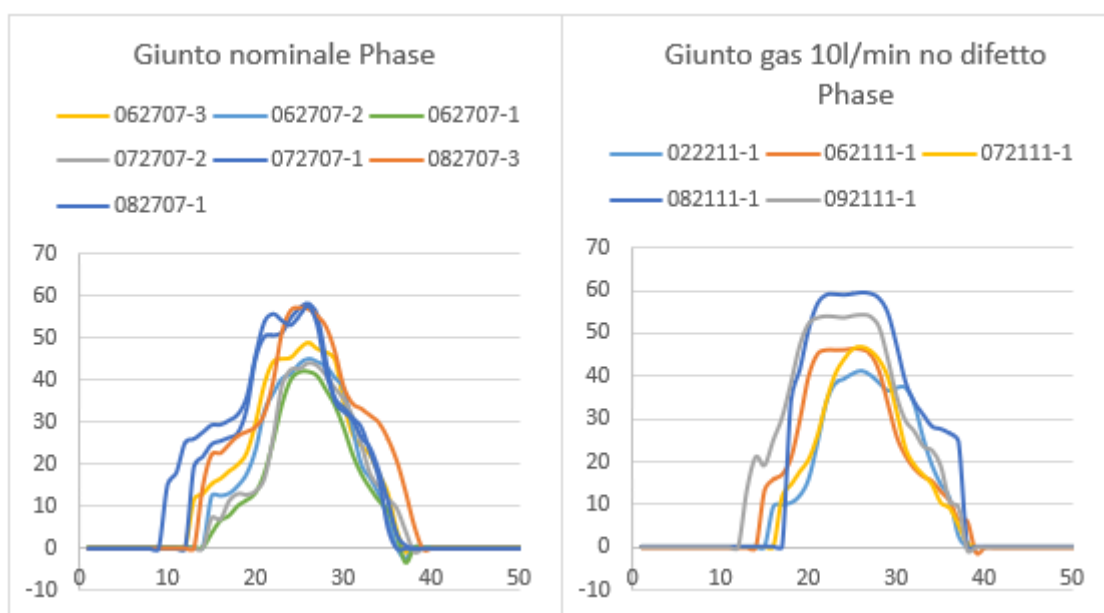


Figura 80. Confronto fasi giunto nominale e con decremento di gas 10 l/min senza porosità, 1 armonica

Nelle Figure 79-80 il confronto che è stato effettuato è fra il giunto realizzato con parametri nominali e il giunto eseguito con decremento di apporto di gas ma esaminato nei punti in cui non sono state individuate porosità, per cui punti esenti da difetti.

Le ampiezze e le fasi in questo caso appaiono molto simili di carattere, risultando difficile affermare che i due giunti presentino caratteristiche differenti derivanti da una diversa realizzazione, sulla base del presente criterio analizzato. Secondo questi risultati preliminari appare che l'andamento di ampiezze e fasi di punti non difettosi siano distinti da andamenti di ampiezza e fasi del genere.

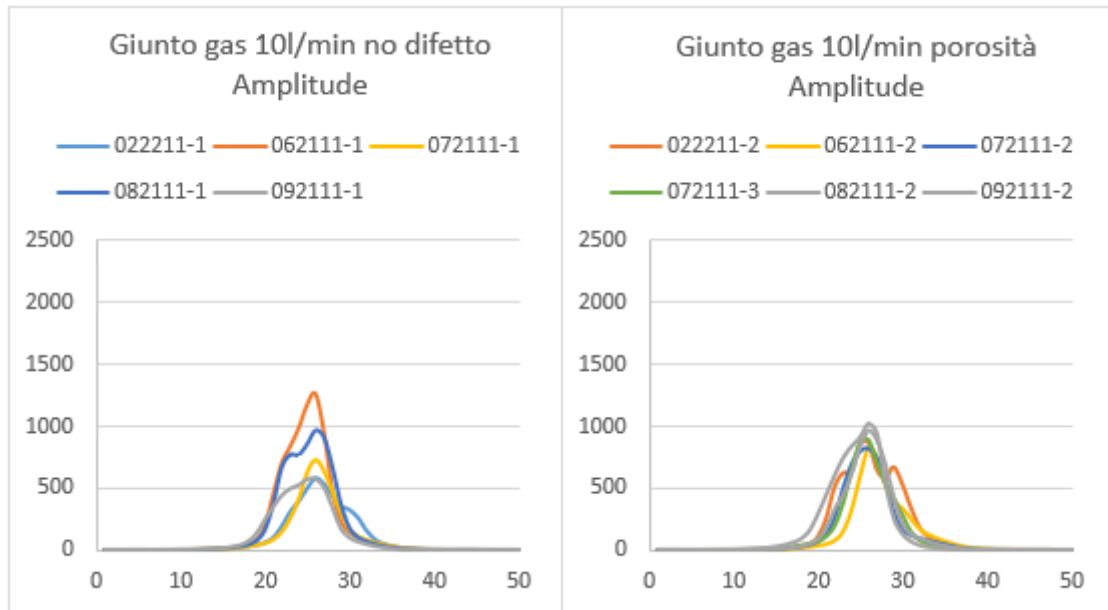


Figura 81. Confronto ampiezze giunto con decremento di gas 10 l/min senza e con porosità, I armonica

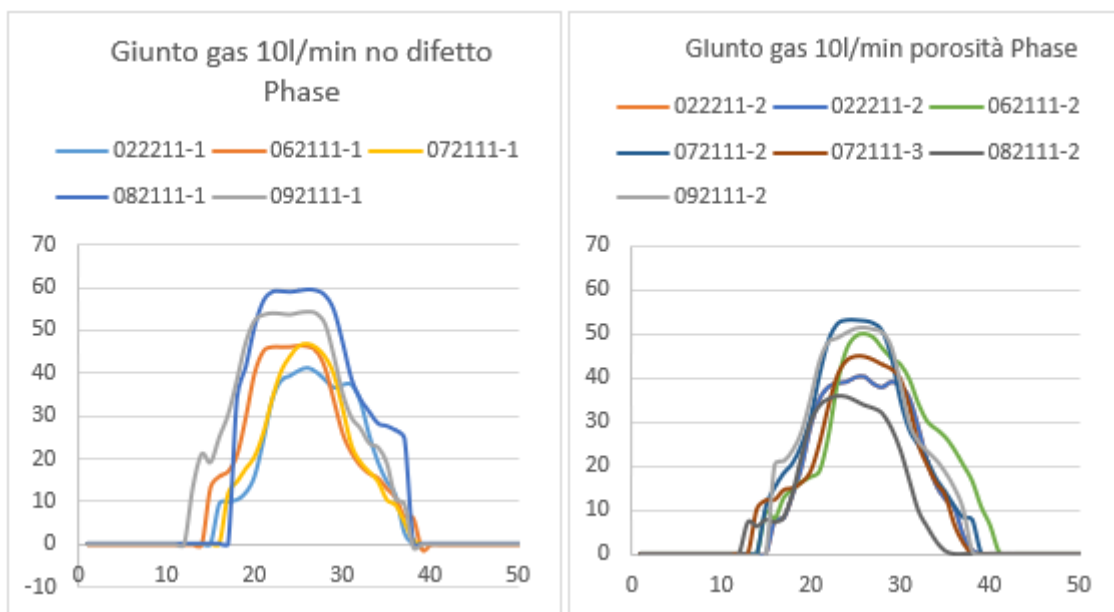


Figura 82. Confronto fasi giunto con decremento di gas 10 l/min senza e con porosità, I armonica

L'ultimo confronto analizzato nelle Figure 81-82 è tra punti esenti da porosità e punti con porosità di unioni saldate realizzate con decremento di gas.

In esso si osserva che il carattere di fase e ampiezza varia sensibilmente come andamento generale, che può essere riscontrato in valori inferiori di ampiezza e intervalli di Δ fase inferiori nei punti con porosità.

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Questo capitolo è volto al commento esaustivo finale sulle attività svolte, fornendo una visione generale sui relativi risultati conseguiti in ambito di termografia online e offline con tecnica Lock-In, dando forma a possibili avanzamenti e sviluppi nel futuro.

Le attività sperimentali svolte in questo lavoro tramite l'impiego della termografia sono state uno studio di fattibilità e hanno avuto un carattere innovativo nello studio della saldatura ad arco elettrico, campo difficile relativamente al controllo qualità, soprattutto per quanto riguarda tecniche non distruttive.

L'utilizzo della termografia tradizionale, applicata direttamente durante la saldatura, ha dimostrato di avere grandi potenzialità nel rilevare differenze di comportamento tra diversi processi realizzati e tramite i risultati conseguiti in termini di andamenti termici risulta possibile controllare e distinguere come avviene il processo in base a come variano i suoi parametri. La modifica di alcuni parametri di saldatura è causa infatti di giunti non conformi alle richieste o giunti che sono soggetti a difetti.

La saldatura realizzata con parametri nominali, con cui si ottiene il giunto ottimale, può essere caratterizzata da un andamento termografico tipico e quindi in fase di processo sarebbe possibile rilevare quando ci si discosta dall'andamento nominale e quindi riconoscere un giunto non realizzato secondo le richieste. Nel presente lavoro è stato possibile discriminare giunti in cui è stato incrementato il gap tra i lembi, giunti realizzati con minor apporto di gas di protezione del bagno di saldatura e giunti eseguiti con aumento della velocità di avanzamento della torcia di saldatura.

La potenzialità che si è visto possiede la termografia è quella di riuscire a rilevare facilmente a video giunti altamente al di fuori degli standard di accettazione che sarebbero eliminati anche nella fase di controllo visivo. Inoltre, per mezzo dell'analisi degli andamenti termografici risulta fattibile riconoscere giunzioni realizzate con diversi parametri di processo che al controllo visivo non sarebbero rilevate.

In una logica futura di implementazione industriale di un controllo qualità del genere, si avrebbe il grosso vantaggio di poter perlomeno eseguire il primo controllo su tutti i campioni in produzione e direttamente in fase di realizzazione, perché la tecnica è di tipo non distruttivo e non di contatto quindi non vincola ad esami a campione. Inoltre, si

potrebbe pensare di eliminare il controllo visivo macroscopico eseguito in un secondo momento e unire tutto in nell'unica fase di controllo a bordo macchina legata agli andamenti termici.

La tecnica più recente ed innovativa di termografia Lock-In, proprio perché di recente sviluppo, ha necessitato e avrà ancora bisogno di maggiore sperimentazione applicata nel campo della saldatura ad arco dove non ci sono stati finora molti studi in merito.

Le esperienze condotte hanno consentito di tracciare degli andamenti tipici relativi a fasi ed ampiezza del segnale del materiale per ogni tipo di giunto ispezionato. Sono emersi risultati che hanno evidenziato differenze più o meno marcate a seconda della tipologia di giunto. La difformità maggiore si è riscontrata per il giunto eseguito con un gap incrementato mentre per quello ottenuto con diminuzione del gas protettivo il divario è meno evidente però in relazione a questo bisogna aggiungere che questi giunti presentavano presenza di porosità minima che avrebbero permesso al giunto di passare le normali procedure di verifica qualità.

I risultati da cui si sono potute trarre le suddette conclusioni sono ritenuti preliminari e utili a stabilire le potenzialità e le possibilità di sviluppi futuri che necessiteranno maggiori prove in numero e casi di studio.

I suggerimenti di sviluppo del lavoro in futuro in questo campo sono molti, per esempio si potrebbe adottare un sistema appositamente studiato per la realizzazione dei giunti in maniera più omogenea perché permetterebbe di poter slegare maggiormente le componenti variabili riguardanti le deformazioni delle strutture in fase di saldatura ed errori nel posizionamento dalla sola presenza del difetto.

Un ulteriore miglioramento per l'analisi termografica online potrebbe essere fatto riguardo al sistema di acquisizione, con ottimizzazione della frequenza di acquisizione o una termocamera in movimento o fissata alla torcia del robot, questo consentirebbe di avere maggior livello di dettaglio sul processo.

Gli sviluppi futuri di questo lavoro dovrebbero prevedere l'ottimizzazione dell'analisi di post-processing Lock-In e visto che finora la tecnica è stata applicata puntualmente su giunti si potrebbe valutare l'esecuzione dell'analisi lungo tutto il cordone di saldatura.

Gli ulteriori step da prendere in considerazione per successivi sviluppi sono lo studio di nuova casistica relativa a diversi tipi di giunto, saldatura di diversi materiali, altre tecniche di saldatura e soprattutto altri tipi di difetti.

5. Bibliografia

- [1] C. J. Hellier, “Handbook of non-destructive evaluation”, McGraw-Hill, (2001).
- [2] Norma UNI EN 16714-1, (2008).
- [3] D. Lanzoni, “Termografia - Le applicazioni sugli impianti elettrici ed industriali”, Maggioli Editore, (2014).
- [4] Norma UNI EN 16714-2, (2008).
- [5] Meola, C., & Carlomagno, G. M. “Recent advances in the use of infrared thermography”, Measurement Science and Technology, (2004).
- [6] X. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Non-Destructive Testing. Wiley, New York, (2003).
- [7] C. Ibarra-Castanedo et al, “Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures”, Research in Nondestructive Evaluation, 20, 1–31, (2009).
- [8] G. Pitarresi, F. Riforgiato, “Implementazione di tecniche ndt di termografia ad infrarossi su pannelli in composito grp per applicazioni nautiche”, XXXIX Convegno Nazionale AIAS, Maratea, 7-10 settembre 2010.
- [9] G. Pitarresi, “Thermal NDE of thick GRP panels by means of a Pulse Modulated Lock-In Thermography technique”, EPJ Web of Conferences 6, 38014 (2010).
- [10] UNI EN ISO 6520-1, (2008).