

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

## **Analisi di fenomeni corrosivi mediante termografia attiva**



Relatore

Prof.ssa Francesca Maria Curà

Correlatori

Prof.ssa Raffaella Sesana

Prof.ssa Manuela De Maddis

Tutor Aziendale

Dott.ssa Marie Marguerite Dugand

Candidato  
Silvia Lazzaro

Anno Accademico 2019-2020

## Sommario

La corrosione è un fenomeno chimico che si manifesta nei materiali metallici causando il deterioramento della loro superficie e della loro microstruttura. La rilevazione dei danneggiamenti corrosivi è oggetto di numerosi studi poiché presenta alcune difficoltà: le superfici corrose possono essere nascoste alla vista, sono non uniformi e i metodi di rilevazione spesso utilizzati forniscono informazioni qualitative. Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di caratterizzare quantitativamente i danni da corrosione tramite tecnica termografica attiva in riflessione. Per indagare i campioni danneggiati, si è deciso di ricorrere ad una sorgente di stimolazione ottica, nello specifico un fascio laser; le modalità di eccitazione utilizzate sono la *Step Heating* e la *Lock-In*. Sono state condotte numerose prove sperimentali al fine di confrontare, al variare dei parametri di sollecitazione, i risultati ottenuti su campioni a differente grado di danneggiamento corrosivo. I parametri modificati di prova in prova sono stati la durata della sollecitazione e la potenza del fascio laser. I risultati termografici registrati durante o in seguito alla stimolazione sono stati analizzati tramite il software di post-processing IRTA, il quale ha permesso di ottenere valori quantitativi confrontabili. La presente tesi mostra, confronta e commenta i risultati ottenuti al fine di identificare la modalità e i parametri di sollecitazione più idonei alla caratterizzazione del danneggiamento corrosivo.

## Indice

Introduzione .....	1
Capitolo 1: Riferimenti teorici e sperimentali.....	4
1.1 Termografia ad Infrarossi.....	4
1.1.1 Storia della Tecnologia Infrarossa.....	8
1.1.2 Teoria della Termografia.....	10
1.1.3 Diffusione del calore nei solidi in presenza di difetti.....	15
1.2 La termografia passiva .....	19
1.2.1 Applicazioni di diagnostica strutturale e meccanica .....	20
1.2.2 Analisi del comportamento a fatica del materiale .....	21
1.3 La termografia attiva .....	23
1.3.1 Metodi di termografia attiva non ottici.....	25
1.3.2 Termografia attiva ottica .....	30
1.3.2.1 Pulsed e Step Heating Thermography .....	32
1.3.2.2 Lock-In Thermography .....	40
1.3.2.3 Problema inverso per la caratterizzazione dei difetti .....	50
Capitolo 2: Materiali e Metodi.....	54
2.1 La corrosione.....	54
2.2 La strumentazione .....	65
2.2.1 La camera salina.....	66
2.2.2 Il microscopio ottico metallografico rovesciato .....	68
2.2.3 MultiDES System Laser.....	70

2.2.3.1	La termocamera.....	71
2.2.3.2	Il modulo laser.....	74
2.2.3.3	IRTA Software .....	76
2.3	La procedura sperimentale .....	80
2.3.1	Procedura di analisi Lock-In .....	82
2.3.2	Procedura di analisi Step Heating .....	86
Capitolo 3: Risultati e Commenti.....		91
3.1	Risultati dell'analisi micrografica .....	91
3.2	Risultati dell'analisi termografica .....	93
3.2.1	Risultati dell'analisi Lock-In.....	93
3.2.2	Risultati dell'analisi Step Heating.....	102
3.2.2.1	Analisi della fase di riscaldamento.....	104
3.2.2.2	Analisi della fase di raffreddamento .....	113
Capitolo 4: Conclusioni e Sviluppi futuri .....		122
Bibliografia .....		124
Appendice .....		127

## Introduzione

Il presente elaborato ha l'obiettivo di esporre e commentare i risultati sperimentali dell'*analisi di fenomeni corrosivi mediante termografia attiva*, ottenuti in seguito all'attività di ricerca svolta presso il dipartimento di Electrical, Electronics & Multifunctional Materials del Centro Ricerche Fiat S.C.p.A. di Torino. La necessità di condurre tale sperimentazione nasce dalla ancora attuale difficoltà di valutazione quantitativa del danneggiamento corrosivo di superfici metalliche non visibili, come ad esempio la superficie interna dello sportello della scocca di un autoveicolo. Proprio nei pressi della traversa antintrusione è presente un'area in cui si accumula l'acqua piovana, filtrata attraverso le non perfette tenute del finestrino; in tale zona ha luogo un grave fenomeno corrosivo, non visibile dall'esterno e che può provocare un prematuro deterioramento della carrozzeria. Lo scopo della ricerca presentata in questa tesi è quindi quello di studiare una metodologia adatta a distinguere superfici nascoste corrose da superfici non corrose, di saper quantificare il grado di danneggiamento corrosivo e di ottimizzare i parametri di analisi termografica attiva in riflessione, in modo da rendere quanto più possibile semplici e immediate le analisi di qualità applicate nell'industria automobilistica. L'azienda FCA di Torino dispone infatti di un gruppo di ricerca impegnato nella progettazione anti-corrosione, i cui risultati devono trovare riscontro oggettivo in termini di prestazioni reali; a tale scopo vengono effettuate prove di corrosione in laboratorio come la *prova di nebbia salina* e test su veicolo come la *prova di corrosione dinamica for-life*, la quale prevede il passaggio della vettura su vari tipi di pista, guadi e docce saline seguendo un ciclo giornaliero. In seguito a quest'ultima prova è stato finora necessario rimuovere i punti di saldatura di tutte le componenti della scocca da valutare, aprirle in modo tale da avere accesso diretto alla zona danneggiata e infine effettuare analisi della riduzione del peso per valutare il grado di corrosione. Grazie alla tecnica di termografia attiva in riflessione studiata durante la qui esposta ricerca sarà possibile effettuare test sul campo più economici, più rapidi e che non necessitano la distruzione del componente ispezionato. Inoltre, grazie alla redazione di un database contenente i parametri di analisi ottimizzati e i risultati sperimentali quantitativi al variare della gravità del danneggiamento corrosivo, sarà possibile confrontare velocemente i risultati quantitativi ottenuti dai test sul campo con quelli tabulati in modo da identificare il grado di corrosione del componente analizzato.

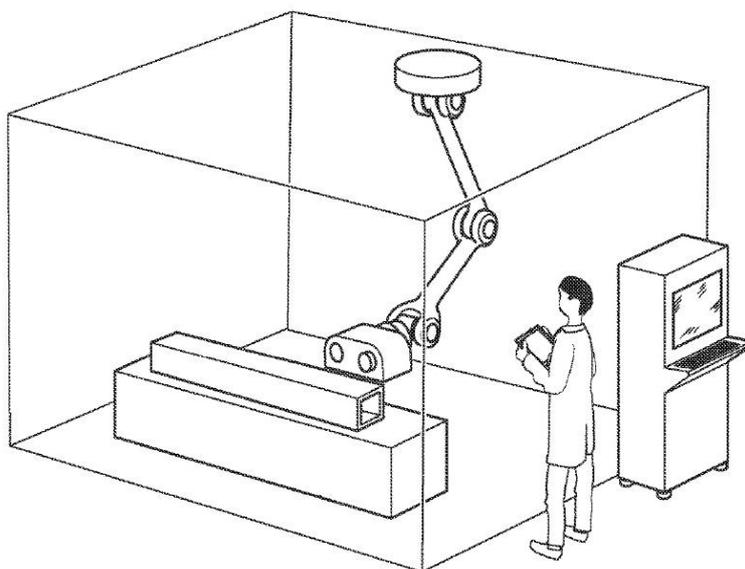
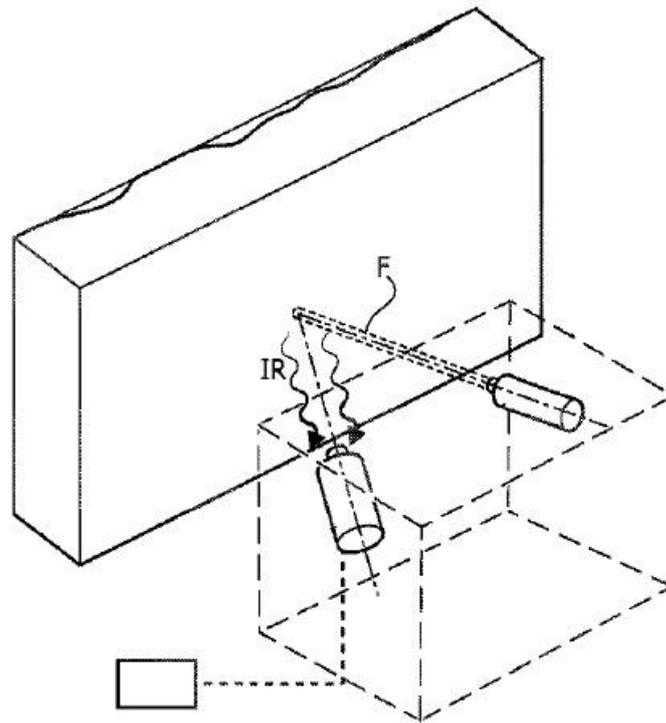


Figura 1-esempio di applicazione del metodo (da brevetto)

L'ultimo obiettivo del lavoro effettuato riguarda l'indagine della possibile correlazione tra risultati termografici ottenuti e spessore dei campioni ispezionati, caratterizzati da differenti gradi di danneggiamento corrosivo. Come è noto, la corrosione è un fenomeno responsabile della riduzione dello spessore del materiale soggetto a tale tipo di danneggiamento con conseguente formazione di uno strato di ossido. Inoltre, la tecnica termografica attiva ha lo scopo di analizzare l'energia termica emessa dall'oggetto ispezionato in seguito al riscaldamento del medesimo; tale energia è inversamente proporzionale allo spessore del campione. Per tali motivi è stato ritenuto necessario indagare la variazione di spessore dei campioni mediante un'analisi micrografica condotta nel laboratorio di Microscopia.

È importante sottolineare che il Centro Ricerche Fiat S.C.p.A. di Torino è proprietario del Brevetto US 10,145,800 B1, Dugand et al. In tale documento si attesta l'invenzione del metodo di rilevazione della corrosione di una superficie non esposta, tramite l'analisi termografica della radiazione infrarossa emessa dal componente analizzato in seguito al riscaldamento del medesimo. Il suddetto riscaldamento è causato da un fascio laser indirizzato verso la superficie visibile e non corrosa del componente, opposta alla superficie di cui si desidera analizzare il grado di corrosione. Prima di tale invenzione, la radiazione infrarossa emessa veniva rilevata tramite una termocamera posizionata dalla parte opposta del componente analizzato rispetto alla sorgente del fascio laser, secondo quindi una modalità *in trasmissione*. L'innovativo metodo, ideato al Centro Ricerche Fiat e protagonista del presente lavoro di tesi, prevede invece una rilevazione *in riflessione*

caratterizzata dal posizionamento della sorgente laser e della termocamera dal medesimo lato del campione ispezionato. Tale soluzione consente di effettuare i test in eventuali spazi ridotti, ma soprattutto di rilevare i possibili danneggiamenti del materiale anche in componenti cavi o non aggirabili.



*Figura 2-modalità di rilevazione in riflessione (da brevetto)*

# Capitolo 1

## Riferimenti teorici e sperimentali

Il primo capitolo di questa tesi ha lo scopo di riportare le informazioni teoriche che occorre conoscere per comprendere lo studio sperimentale svolto. Nel corso degli anni sono state svolte numerose ricerche riguardanti l'ambito della termografia, al fine di comprendere al meglio il fenomeno fisico responsabile della correlazione tra accumulo di calore e danneggiamento del materiale, di ideare innovative tecniche di rilevazione termografica, di progettare gli idonei strumenti di misura della radiazione infrarossa emessa da un oggetto e infine di individuare l'ottimale metodo di post-processamento dei dati acquisiti. Sono moltissime le pubblicazioni scientifiche in tale ambito, le quali hanno l'obiettivo di divulgare alla comunità scientifica le innovazioni tecnologiche o di riportare i risultati ottenuti in diversi campi di indagine, come ad esempio la rilevazione della corrosione piuttosto che del danneggiamento dovuto a prove di fatica. Per tale motivo nel presente lavoro di tesi sono riportate non solo nozioni teoriche, ma anche informazioni sulle tecniche termografiche maggiormente impiegate nei diversi ambiti di ricerca.

### 1.1 Termografia ad Infrarossi

Il termine *Termografia*, il cui significato è riportato nel testo [1], è adottato per indicare la tecnica di acquisizione di immagini raffiguranti variazioni di proprietà termiche superficiali di un oggetto ispezionato. Ogni oggetto caratterizzato da una temperatura superiore a 0 K emette una radiazione infrarossa, la quale è funzione della temperatura stessa. Tale radiazione può essere rilevata da uno strumento chiamato *Termocamera*, sensibile alle sole lunghezze d'onda dell'infrarosso e capace di calcolare la temperatura dell'oggetto a partire dall'intensità della radiazione infrarossa registrata. La figura 3 mostra una rappresentazione grafica della collocazione dello spettro infrarosso all'interno dello spettro elettromagnetico in funzione della lunghezza d'onda.

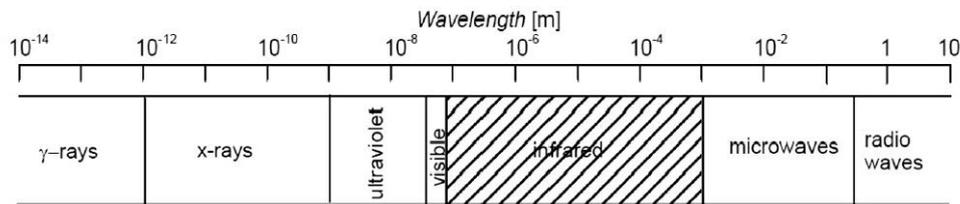


Figura 3-Lo spettro elettromagnetico

La radiazione misurata dalla termocamera, così come spiegato in [1], non dipende solo dalla temperatura dell'oggetto ma anche da fattori come la sua emissività e le caratteristiche dell'aria interposta tra la termocamera e la superficie indagata. Inoltre, la radiazione rilevata potrebbe non provenire unicamente dall'oggetto in questione ma potrebbe essere una combinazione della stessa con radiazioni emesse da sorgenti presenti nell'ambiente circostante e riflesse dall'oggetto. Per misurare correttamente la temperatura è quindi necessario compensare gli effetti che tali fattori causano, fornendo alla termocamera i valori dei seguenti parametri:

- Emissività dell'oggetto  
È la misura della quantità di radiazione emessa dall'oggetto analizzato rispetto a quella che avrebbe emesso un perfetto corpo nero. Normalmente l'intervallo di variabilità di tale parametro è compreso tra 0,1 e 0,95 per un corpo nero ed opaco: una superficie altamente lucidata, come ad esempio uno specchio, ha un valore di emissività molto inferiore a 0,1; un corpo verniciato con una vernice a base di olio è caratterizzato da un valore superiore a 0,9; infine, la pelle umana esibisce un valore di emissività prossimo a 1. È importante sottolineare che i metalli non ossidati sono caratterizzati da una elevata riflessività e di conseguenza da una bassa emissività, la quale aumenta all'aumentare della temperatura. I non-metalli mostrano un comportamento opposto, ovvero alta emissività che decresce all'aumentare della temperatura.
- Distanza tra oggetto e lente anteriore della termocamera  
Occorre impostare tale parametro al fine di compensare il fenomeno dell'assorbimento della radiazione nel tragitto dall'oggetto al rilevatore; inoltre la trasmittanza si riduce all'aumentare della suddetta distanza.
- Temperatura riflessa  
Tale parametro è spesso indicato come *background temperature* e la sua definizione ha lo scopo di compensare la radiazione riflessa dall'oggetto. È fondamentale che il suo valore venga fornito alla termocamera nel caso in cui la temperatura dell'oggetto ispezionato sia molto simile alla temperatura ambiente.
- Temperatura atmosferica e umidità dell'aria

Occorre prendere in considerazione tali fattori per correggere l'effetto dell'assorbimento della radiazione da parte dell'aria interposta tra oggetto e rilevatore. La trasmittanza, infatti, non è solo dipendente dalla distanza ma anche dall'umidità relativa dell'aria.

La corretta determinazione della temperatura di un corpo ha al giorno d'oggi grande importanza poiché la temperatura stessa può essere utilizzata come indice di "salute" del componente. Basandosi su tale principio è stata ideata la tecnica Infrared Thermography (IRT) la quale, citando quanto riportato in [4,8], è una tra le più nuove tecniche di Non-Destructive Testing (NDT). Le tecniche NDT sono metodologie di analisi di materiali e componenti impiegate per la rilevazione di discontinuità, come cricche o difetti, senza la necessità di danneggiare l'integrità fisica dell'oggetto. Nello specifico, la IRT è dedicata alla acquisizione delle variazioni della temperatura superficiale di un oggetto, correlate alla presenza di difetti sub-superficiali, principalmente in materiali metallici e compositi. La figura 4, pubblicata in [3], mostra comuni applicazioni della IRT confrontando semplici fotografie con le corrispondenti immagini termografiche; la tabella 1, invece, cataloga diverse tecniche di monitoraggio in funzione del campo industriale in cui vengono impiegate (studio relativo al periodo tra il 2013 e il 2018). Le tecniche SHM (*Structural Health Monitoring*) e CM (*Condition Monitoring*) identificano i danneggiamenti strutturali o le variazioni dei parametri meccanici e di processo tramite misurazioni globali periodiche in-situ che forniscono risultati immediati; la tecnica NDE (*Non-Destructive Examination*) è focalizzata sulla caratterizzazione di difetti già noti tramite test che forniscono risultati interessanti solo dopo analisi in laboratorio; infine la tecnica indicata in tabella 1 come DPA (*Destructive Physical Analysis*) comporta l'alterazione dell'integrità dell'oggetto di analisi.

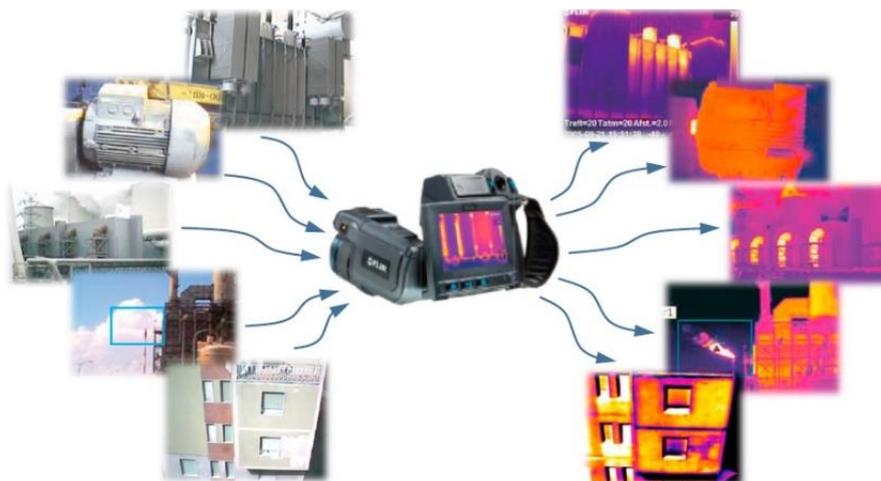


Figura 4-confronto tra visual images e thermal images (da testo [3])

Tabella 1-Applicazioni della termografia in ambito industriale (2013-2018) (da testo [3])

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

Esiste un ampio gruppo di tecniche NDT tra cui è importante citare la *ultrasonic testing* e la *eddy current testing*; nonostante ciò la *thermal imaging*, sopra indicata come IRT, sta

acquisendo sempre maggiore notorietà grazie ai vantaggi che la rendono preferibile rispetto alle altre tecniche. Tali vantaggi sono elencati nella pubblicazione [3] e qui di seguito riportati:

- IRT è una tecnica senza contatto, ovvero lo strumento di misura e il personale tecnico sono distanti dal corpo esaminato; di conseguenza possono essere analizzati anche oggetti ad altissime temperature o pericolosi;
- Il metodo IRT è non intrusivo quindi non causa interruzioni del processo durante il quale viene applicato;
- IRT fornisce immagini ovvero misure in due dimensioni; grazie a tale caratteristica è possibile confrontare facilmente diverse regioni dell'oggetto ispezionato;
- La tecnica IRT è on-line, di conseguenza permette di effettuare misure in tempo reale e di ottenere risultati immediati;
- IRT non utilizza radiazioni dannose quindi è una tecnica applicabile in modo ripetitivo per lunghi periodi di tempo;
- L'applicazione del metodo IRT necessita di pochi strumenti e, in alcuni casi, con costi accessibili;
- La durata del corso di formazione del personale impegnato nella applicazione del metodo IRT è inferiore rispetto alle durate previste per i corsi di formazione necessari per le altre tecniche NDT.

### 1.1.1 Storia della Tecnologia Infrarossa

Nel presente paragrafo è riportata una breve trattazione storica a partire dalla scoperta dello spettro infrarosso fino alla metà del XX secolo, riassumendo quanto presentato in [1].

L'infrarosso fu scoperto accidentalmente nel 1800 da Sir William Herschel durante la ricerca di un materiale capace di fungere da filtro ottico e di ridurre la luminosità del sole durante l'osservazione al telescopio. Sottoponendo a prova campioni di vetro di diversi colori, notò che questi permettevano un differente passaggio del calore trasportato dalla luce del sole. Utilizzando un termometro al mercurio con bulbo annerito dall'inchiostro, valutò la temperatura in corrispondenza dei vari colori dello spettro formatosi sulla

superficie di un tavolo in seguito al passaggio della luce del sole attraverso un prisma di vetro. La figura 5 mostra una schematizzazione dell'esperimento condotto da Herschel.

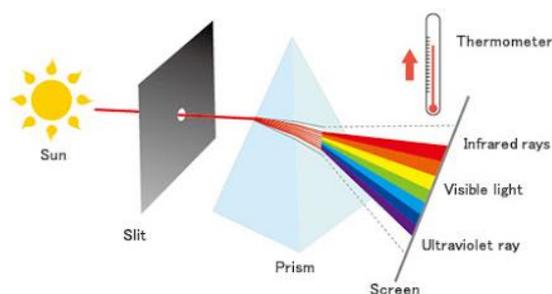


Figura 5-Esperimento di Sir William Herschel

Muovendo il termometro lungo lo spettro, Herschel rilevò un netto aumento di temperatura passando dal violetto al rosso; identificò un punto di massima temperatura posto al di fuori della porzione visibile dello spettro, locato nella sconosciuta regione buia al di là dell'estremo rosso e che venne chiamata *infrarosso*.

Il termometro è stato lo strumento di indagine utilizzato fino al 1829, anno in cui Nobili inventò la termocoppia. In seguito, Melloni collegò più termocoppie in serie formando la prima termopila, la quale era caratterizzata da una sensibilità 40 volte superiore a quella del miglior termometro dell'epoca ed era capace di rilevare la temperatura di una persona posizionandosi a tre metri di distanza.

La prima "immagine termica" venne realizzata nel 1840 da Sir John Herschel il quale osservò l'immagine formata grazie alla differente evaporazione di un sottile film di olio esposto a una sorgente di calore. Sir John conquistò inoltre il primato per l'immagine termica su carta, che definì *termogramma*.

Nel 1880 Samuel P. Langley inventò il bolometro, uno strumento in grado di misurare l'intensità della radiazione elettromagnetica e di rilevare la temperatura di un animale di grandi dimensioni da una distanza di 400 metri.

Tra il 1900 e il 1920 furono progettati numerosi dispositivi il cui principio di funzionamento era incentrato sullo spettro infrarosso e la cui tecnologia era una variazione di quella del già esistente bolometro; tra questi occorre menzionare i congegni ideati per l'individuazione di persone, artiglieria, aeromobili, navi e anche iceberg. Durante la Prima Guerra Mondiale, tra il 1914 e il 1918, entrambe le fazioni avviarono programmi di ricerca focalizzati sulle possibili applicazioni militari dei dispositivi di rilevazione della radiazione infrarossa. Furono realizzati sistemi in grado di cogliere la

presenza di aerei in avvicinamento da una distanza di 1,5 km o di soldati nemici da una distanza di 300 m.

Nel periodo tra le due guerre mondiali furono ideati due innovativi strumenti di rilevazione della radiazione infrarossa: *image converter* e *photon detector*. Il convertitore di immagini fu subito impiegato per scopi militari poiché consentiva ai soldati di “vedere nel buio”; nonostante ciò, il suo utilizzo fu in breve tempo revocato in quanto per poter individuare i soldati nemici era necessario illuminarli con un fascio laser, rivelando così la posizione dell’osservatore.

Durante la Seconda Guerra Mondiale, tra il 1939 e il 1945, furono avviati programmi di ricerca focalizzati sul *photon detector*, uno strumento ad altissima sensibilità in grado di rilevare la radiazione infrarossa emessa da un corpo senza la necessità di colpirlo con un fascio laser. Nel corso di quegli anni, le norme di segretezza militari impedirono la divulgazione delle scoperte tecnologiche nell’ambito delle immagini ad infrarosso. Solo durante gli anni ’50 del XX secolo tali norme vennero allentate consentendo l’adattamento e l’impiego dei dispositivi di *thermal-imaging* nei centri di ricerca, nelle industrie e nel monitoraggio delle opere civili.

### 1.1.2 Teoria della Termografia

Per poter comprendere il funzionamento della tecnica termografica è necessario analizzare i principi teorici su cui getta le fondamenta. Secondo quanto riportato dai testi [1, 3], le leggi fisiche che fungono da perno della tecnica termografica furono concepite in riferimento ai soli corpi neri e furono successivamente adattate ai corpi reali tramite opportune correzioni. Un corpo nero è definito come un oggetto ideale in grado di assorbire tutta la radiazione incidente su di esso indipendentemente dalla lunghezza d’onda, senza rifletterla o trasmetterla. Secondo quanto dimostrato da Kirchhoff nel 1860, un corpo capace di assorbire tutta la radiazione che lo colpisce è ugualmente capace di emettere tale radiazione; per questo motivo un corpo nero è considerato un perfetto assorbitore ma anche un perfetto corpo irradiante.

La legge fisica alla base della teoria della termografia è la legge di Planck, la quale descrive matematicamente in (1) la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero e la cui rappresentazione grafica è riportata in figura 6.

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

In cui:

- $W_{\lambda b}$  è l'emittanza spettrale di un corpo nero alla lunghezza d'onda  $\lambda$  e la sua unità di misura è Watt/m<sup>2</sup> μm;
- $c$  è la velocità della luce, pari a  $3 \cdot 10^8$  m/s;
- $h$  è la costante di Planck, pari a  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Joule s;
- $k$  è la costante di Boltzmann, pari a  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Joule/K;
- $T$  è la temperatura assoluta del corpo nero, espressa in K;
- $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione emessa, espressa in μm;
- $10^{-6}$  è il fattore di conversione da m a μm.

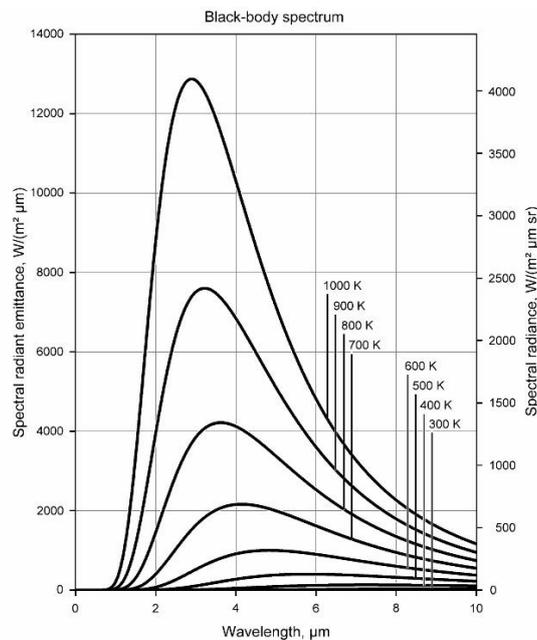


Figura 6-rappresentazione grafica della legge di Planck

Come è possibile notare dalla figura 6, l'emittanza spettrale di un corpo nero è nulla per  $\lambda = 0$  e per valori di  $\lambda$  molto elevati; raggiunge il suo massimo in corrispondenza di una lunghezza d'onda pari a  $\lambda_{max}$  il cui valore è inversamente proporzionale al valore della temperatura. Tramite derivazione della legge di Planck (1) rispetto a  $\lambda$ , Wien identificò una semplice formula per il calcolo di tale lunghezza d'onda espressa in [μm]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$$

Nel 1879 Stefan dimostrò sperimentalmente e nel 1884 Boltzmann dimostrò teoricamente che la potenza totale emessa da un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta del corpo. Integrando la legge di Planck (1) su tutte le possibili lunghezze d'onda, si ottenne quella che è oggi nota come legge di Stefan-Boltzmann:

$$W_b = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda = \bar{\sigma} T^4 \quad (2)$$

In cui:

- $W_b$  è l'emittanza totale di un corpo nero, ovvero l'intensità totale della radiazione emessa. Corrisponde graficamente all'area sottesa dalla curva di Planck per una determinata temperatura e la sua unità di misura è Watt/m<sup>2</sup>;
- $\bar{\sigma}$  è la costante di Stefan-Boltzmann, il cui valore è pari a  $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>.

Gli oggetti reali non si attengono mai alle leggi fino ad ora riportate su un ampio spettro di lunghezze d'onda; possono tuttavia esibire un comportamento simile a quello dei corpi neri su limitati intervalli spettrali. Differentemente da un corpo nero, un corpo reale non è in grado di assorbire tutta la radiazione su di esso incidente poiché una frazione di quest'ultima viene riflessa dalla sua superficie e un'ulteriore frazione viene trasmessa attraverso il corpo stesso. I parametri rappresentanti le frazioni assorbita, riflessa e trasmessa dal corpo reale sono dipendenti dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e sono definiti come segue:

- $\alpha_\lambda$  assorbanza spettrale, definita come il rapporto tra la potenza spettrale assorbita dall'oggetto e la potenza spettrale incidente sullo stesso;
- $\rho_\lambda$  riflettanza spettrale, pari al rapporto tra la potenza spettrale riflessa dalla superficie del corpo rispetto a quella incidente;
- $\tau_\lambda$  trasmittanza spettrale, definita come il rapporto tra la potenza spettrale trasmessa attraverso l'oggetto e la potenza spettrale incidente sullo stesso; nel caso di un materiale opaco, il valore di tale parametro è nullo.

Trattandosi di parametri definiti da frazioni della potenza incidente, la somma dei tre contributi restituisce esattamente l'intero:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

La capacità di un corpo reale di emettere la radiazione elettromagnetica assorbita è limitata da un quarto fattore noto come emissività, il cui valore è sempre pari ad  $\alpha_\lambda$  a causa della sopra menzionata legge di Kirchhoff.

- $\varepsilon_\lambda$  emissività spettrale o emittanza, definita come il rapporto tra la potenza spettrale emessa dal corpo reale e la potenza spettrale emessa da un corpo nero alla medesima temperatura e lunghezza d'onda.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

Nel caso di un corpo nero, l'emissività spettrale ha valore pari a  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$ ; nel caso di un corpo grigio, il suo valore è indipendente dalla lunghezza d'onda e  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon < 1$ ; infine considerando un materiale altamente lucidato,  $\varepsilon_\lambda \cong 0$ .

L'introduzione del parametro  $\varepsilon_\lambda$  ha consentito di correggere le leggi fisiche su cui si basa la teoria della termografia e di adattare ai corpi reali. La potenza totale emessa da un corpo grigio, ad esempio, può essere espressa tramite la legge di Stefan-Boltzmann (2) modificata come segue:

$$W = \varepsilon \bar{\sigma} T^4$$

Poiché negli esperimenti il valore medio di emissività di un corpo reale nell'intervallo di lunghezze d'onda in cui la termocamera opera è normalmente ipotizzato, è pratica comune considerare il generico oggetto reale assimilabile ad un corpo grigio, la cui caratteristica è di avere un valore di emissività indipendente dalla lunghezza d'onda. La meticolosa calibrazione del valore di emissività del corpo, ispezionato durante un esperimento termografico, consente di misurare accuratamente l'energia elettromagnetica emessa e conseguentemente di derivare con precisione i valori di temperatura di ogni punto.

Negli esperimenti, tuttavia, l'emissività non è l'unico fattore da cui dipende l'accuratezza dell'ispezione termografica. La termocamera infatti non acquisisce solo la radiazione emessa dall'oggetto analizzato, ma anche la radiazione riflessa dal corpo generata da sorgenti presenti nell'ambiente circostante e la radiazione emessa dall'atmosfera interposta tra termocamera e oggetto ispezionato. Un quarto contributo dovuto alla diffusione nell'atmosfera di radiazioni provenienti da fonti esterne al campo di osservazione, come ad esempio la luce solare, può essere generalmente trascurato poiché supposto di lieve entità; è compito dell'operatore modificare le condizioni sperimentali al fine di minimizzare i disturbi, ad esempio utilizzando schermature o modificando la direzione di osservazione. La potenza della radiazione totale ricevuta dalla termocamera può essere quindi espressa come la somma dei tre contributi sopra citati:

$$W_{tot} = W_{obj} + W_{refl} + W_{atm}$$

In cui:

- $W_{obj}$  è l'intensità della radiazione emessa dal corpo analizzato, il quale è caratterizzato da emissività  $\varepsilon_{obj}$  e temperatura assoluta  $T_{obj}$ ;
- $W_{refl}$  è l'intensità della radiazione riflessa dal corpo e generata da sorgenti esterne, le quali sono caratterizzate da temperatura assoluta  $T_{refl}$  ipotizzata uguale per tutte le sorgenti. La riflettanza dell'oggetto opaco ispezionato è pari a  $\rho_{obj} = 1 - \varepsilon_{obj}$ ;
- $W_{atm}$  è l'intensità della radiazione emessa dall'atmosfera, la quale è caratterizzata da temperatura assoluta  $T_{atm}$ , trasmittanza  $\tau_{atm}$  ed emissività  $\varepsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm}$ .

Applicando la legge di Stefan-Boltzmann adattata per i corpi grigi/reali, è possibile esprimere la somma dei contributi come segue:

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} \tau_{atm} \bar{\sigma} T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) \tau_{atm} \bar{\sigma} T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm}) \bar{\sigma} T_{atm}^4 \quad (3)$$

La rappresentazione grafica del bilancio appena ottenuto è stata pubblicata dal testo [3] e qui riportata in figura 7.

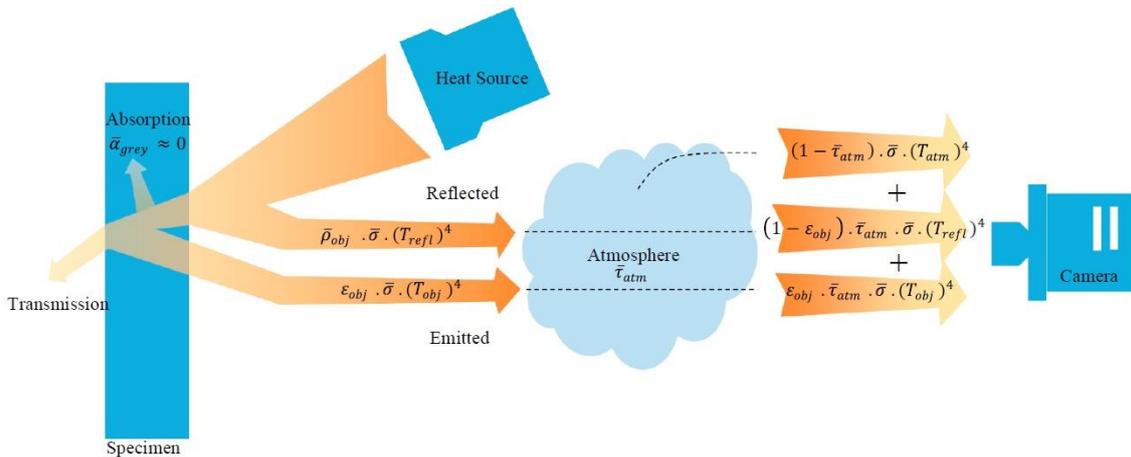


Figura 7-componenti della radiazione acquisita dalla termocamera (da testo [3])

L'obiettivo della tecnica termografica è la rilevazione della temperatura del corpo ispezionato, la quale può essere facilmente ricavata tramite formula inversa dall'equazione (3).

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj})\tau_{atm}\bar{\sigma}T_{refl}^4 - (1 - \tau_{atm})\bar{\sigma}T_{atm}^4}{\varepsilon_{obj}\tau_{atm}\bar{\sigma}}}$$

Il calcolo della temperatura dell'oggetto nel rispetto degli effetti causati dall'atmosfera e dalle sorgenti esterne è noto come *compensazione*. Tale processo può risultare molto complesso poiché non è banale individuare i corretti valori reali dell'emittanza dell'oggetto e della trasmittanza dell'atmosfera.

### 1.1.3 Diffusione del calore nei solidi in presenza di difetti

Il fenomeno fisico sulla base del quale sono stati ideati i metodi di rilevazione e caratterizzazione dei difetti tramite tecniche termografiche è la conduzione (diffusione) del calore nei solidi. Il classico modello di conduzione del calore è espresso dall'equazione di Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (4)$$

In cui:

- $T$  è la temperatura del corpo, espressa in [K];
- $t$  rappresenta la variabile tempo, con unità di misura [s];
- $\alpha = \frac{k}{\rho c}$  è la diffusività termica, espressa in [m<sup>2</sup>/s];
- $k$  è la conducibilità termica, la cui unità di misura è [W/mK];
- $\rho$  è la densità del materiale, espressa in [kg/m<sup>3</sup>];
- $c$  è il calore specifico, la cui unità di misura è [J/kg K].

La risoluzione dell'equazione di Fourier (4) del flusso termico, nel rispetto di determinate condizioni al contorno, consente di stimare l'andamento della temperatura del corpo nel tempo. Per poter considerare correttamente applicabile l'equazione sopra scritta è necessario che vengano rispettate due ipotesi: condizioni adiabatiche, al fine di poter

trascurare le perdite di calore; materiale opaco e isotropo. Secondo quanto riportato nella pubblicazione scientifica [3], nelle applicazioni pratiche è difficoltoso risolvere la forma classica dell'equazione (4) di Fourier a causa del mancato rispetto dell'ipotesi di adiabaticità; nella realtà, infatti, non è possibile trascurare le perdite di calore attraverso le superfici del corpo in questione.

La forma classica dell'equazione di Fourier può essere semplificata considerando la superficie del corpo uniformemente riscaldata e, di conseguenza, la propagazione termica al suo interno può essere trattata come se fosse unidimensionale. La forma semplificata dell'equazione del flusso termico, scritta in funzione della coordinata  $z$  parallela allo spessore del componente, può essere espressa come:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Risolvendo analiticamente o numericamente l'equazione (5), è possibile ottenere l'espressione rappresentante l'andamento della temperatura in funzione del tempo e della coordinata  $z$ . Per trovare riscontro pratico della soluzione teorica ottenuta, è sufficiente registrare il campo di temperatura sulla superficie dell'oggetto tramite uno strumento termografico. Qualora si dovesse manifestare una perturbazione della mappa termica e un incremento di intensità in specifiche aree, ciò rispecchierebbe la presenza di generiche discontinuità o di difetti sub-superficiali poiché tali difetti riducono la velocità di diffusione del calore nel corpo. La figura 8, pubblicata nel testo [3], mostra la maggiore intensità sull'immagine termica in corrispondenza di un difetto rispetto all'area circostante non difettata.

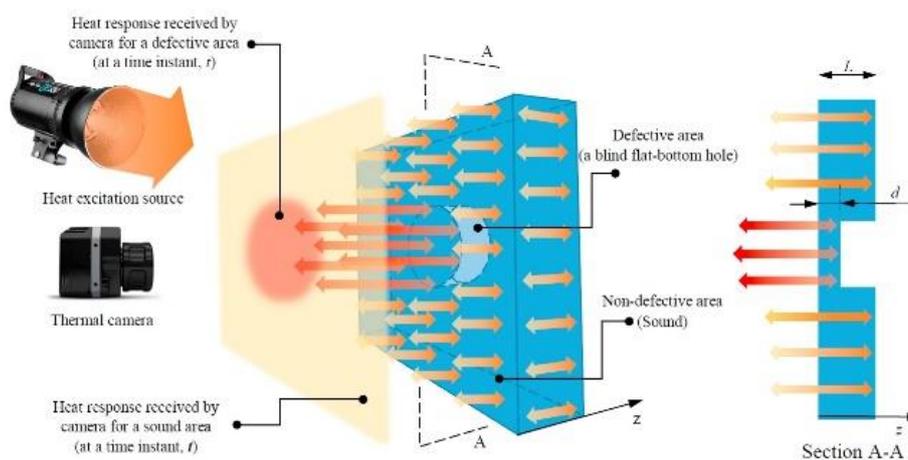


Figura 8-Diffusione e risposta termica in un solido difettato (da testo [3])

Per comprendere quale sia il modo più corretto per rappresentare il difetto corrosivo, la comunità scientifica ha analizzato le proprietà e caratteristiche dei difetti di interfaccia. Secondo quanto riportato in [3], in letteratura i difetti di corrosione sono generalmente rappresentati tramite semi-infiniti *air gap* posizionati al di sotto della superficie di un solido monostrato in un piano parallelo alla superficie e posto ad una distanza  $L$  dallo stesso. L'*air gap*, caratterizzato da una conducibilità termica molto minore rispetto a quella del solido, riflette la maggior parte dell'energia termica incidente causando una *riverberazione* della stessa tra *air gap* e superficie del campione. Il coefficiente di riflessione termica di un difetto di interfaccia è definito come:

$$\Gamma = \frac{e_m - e_d}{e_m + e_d}$$

In cui  $e_m$  e  $e_d$  rappresentano rispettivamente le diffusività termiche del materiale solido e del difetto. Nel caso del modello utilizzato per simulare il difetto corrosivo, si può considerare valida l'approssimazione per la quale  $\Gamma = 1$  poichè  $e_m \gg e_d$ .

Nel caso di un corpo dotato di un difetto sub-superficiale, la modellazione monodimensionale del fenomeno della diffusione del calore è applicabile solo nel caso di difetto molto ampio ovvero caratterizzato da un'estensione laterale  $D$  molto maggiore della sua profondità  $d$ . In alcuni casi, secondo quanto riportato in [3], i difetti di corrosione hanno un'estensione laterale finita quindi il fronte del flusso termico viene deviato lateralmente ai bordi del difetto generando una diffusione del calore tridimensionale. I ricercatori Almond e Pickering hanno proposto nel testo [22] un modello analitico della diffusione laterale del flusso termico basandosi sull'equazione del calore in 2D. Il modello in questione considera il trasferimento del calore dalla zona a maggiore temperatura corrispondente al centro del difetto verso la zona a minore temperatura sottostante l'*air gap* al fine di raggiungere un equilibrio termico stazionario. La diffusione laterale causa quindi un ridotto accumulo di calore al centro del difetto e conseguentemente una inferiore intensità di temperatura registrata sulla corrispondente superficie sovrastante. La figura 9, pubblicata in [3], mostra un confronto tra il flusso termico monodimensionale in un solido con difetto ampio ( $D \gg d$ ) e il flusso termico bidimensionale in un corpo con difetto di dimensioni limitate (estensione laterale  $D$  finita).

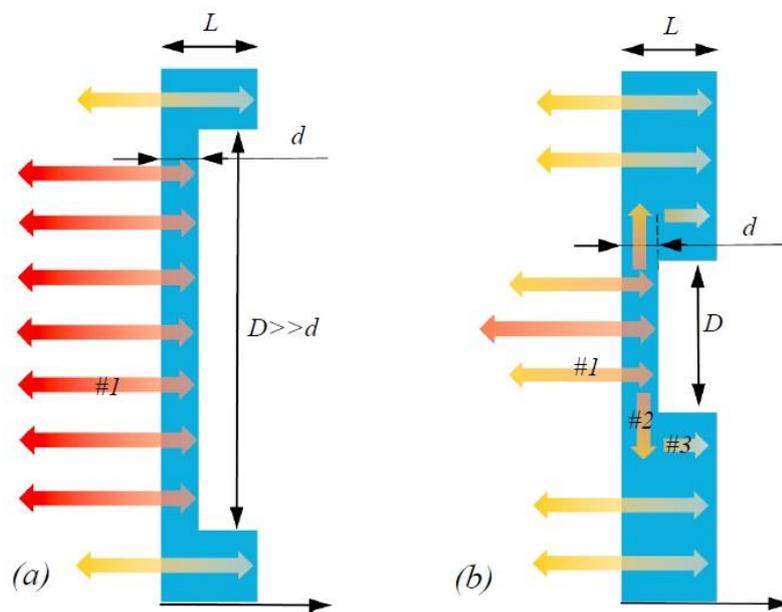


Figura 9-Diffusione del calore in presenza di difetto ideale o di difetto reale (da testo [3])

## 1.2 La termografia passiva

Le metodologie di analisi termografica possono essere classificate in due categorie principali: le tecniche passive e le tecniche attive. La termografia passiva non necessita di alcuna sorgente di eccitazione esterna poiché l'oggetto dell'analisi presenta naturalmente proprietà termiche differenti da quelle dell'ambiente circostante. La figura 10 mostra uno schema semplificato di una generica prova di termografia passiva.

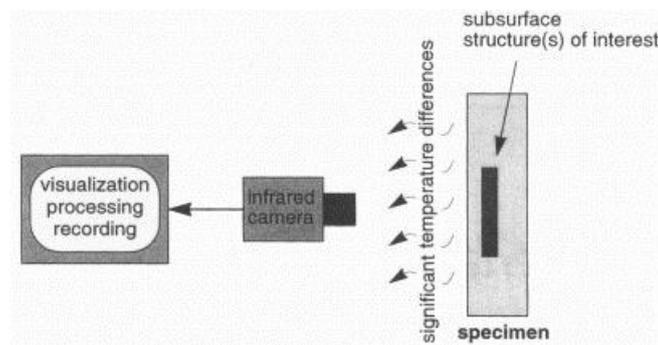


Figura 10-schema di un test in termografia passiva

Secondo quanto riportato nel testo [10], la termografia passiva è ampiamente utilizzata in diversi campi che spaziano dalla medicina all'agricoltura, alla tutela dell'ambiente, alla termo-fluidodinamica, all'analisi di componenti elettronici, alla prevenzione di guasti negli impianti.

Riguardo la termo-fluidodinamica, ad esempio, la termografia può essere impiegata per valutare i comportamenti non lineari dei flussi nelle vicinanze di corpi di forma complessa e per misurare il coefficiente di scambio termico convettivo tra flusso e oggetto. La termografia passiva è applicabile solo nel caso di flussi con numero di Mach elevato, ovvero caratterizzati da un contenuto di energia cinetica così elevato da consentire lo scambio termico tra flusso e modello senza un contributo esterno.

In riferimento alle analisi termografiche su dispositivi elettronici, questi generano necessariamente una determinata quantità di calore durante il normale funzionamento. Secondo quanto riportato in [11], il principale obiettivo è quindi la rilevazione di difetti del componente che si manifestano come fonti localizzate di calore anomalo in condizioni operative termicamente omogenee. La tecnica di termografia passiva, a causa della sua limitata sensibilità, può rilevare solo fonti di calore relativamente elevato; inoltre l'immagine termografica ottenuta risulta sfocata a causa della diffusione del calore nel materiale, non consentendo quindi una precisa localizzazione del difetto.

Le applicazioni di maggiore interesse della termografia passiva riguardano: la diagnostica dei danneggiamenti di strutture civili e opere d'arte; l'analisi del malfunzionamento dei componenti meccanici; lo studio della propagazione della frattura in condizioni di sollecitazione a fatica.

### 1.2.1 Applicazioni di diagnostica strutturale e meccanica

Il continuo monitoraggio delle condizioni di edifici ed opere d'arte è un processo fondamentale per la rilevazione di difetti e la successiva pianificazione di opere di manutenzione e restauro. Le principali cause di danneggiamento degli edifici, citando il testo [10], includono: compattazione e creazione di vuoti nel calcestruzzo, scheggiature e crepe nelle mura, deterioramento dell'armatura, deterioramento del rivestimento, elevato contenuto di umidità, perdite nel sistema di copertura, infiltrazioni di acqua. La tecnica di analisi termografica passiva ha un ruolo fondamentale nel monitoraggio di edifici di interesse storico o utilizzo civile poiché può fornire indicazioni riguardo la maggior parte delle cause di danneggiamento e può rilevare danni già esistenti. La presenza di perdite nel tetto, ad esempio, può essere rilevata grazie all'elevato contenuto termico dell'acqua intrappolata nello strato isolante, riscaldata durante il giorno dalla luce solare. A causa della sua maggiore capacità termica rispetto al materiale del rivestimento, l'acqua trattiene il calore per un lungo periodo di tempo permettendo la rilevazione delle aree umide durante la notte, quando ormai le aree asciutte si sono raffreddate.

Di maggiore interesse è sicuramente l'impiego della termografia passiva nella valutazione del funzionamento di componenti meccanici, come ad esempio pompe, ventole, motori e cuscinetti. Le immagini termografiche vengono rilevate ed analizzate durante il normale utilizzo dei componenti negli impianti industriali al fine di prevedere possibili guasti ed intervenire tempestivamente con azioni manutentive, evitando costosi danneggiamenti dell'attrezzatura e lesioni del personale. La figura 11 mostra un esempio di cuscinetto difettoso indagato con tecnica termografica passiva.

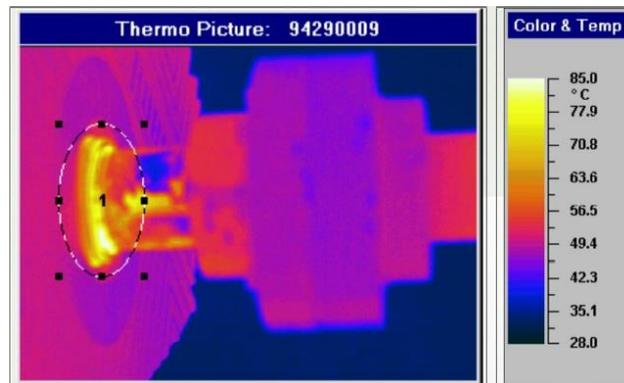


Figura 11-cuscinetto difettoso rilevato con tecnica termografica passiva (da testo [29])

## 1.2.2 Analisi del comportamento a fatica del materiale

Le cricche di fatica costituiscono uno dei fenomeni più critici di danneggiamento delle strutture metalliche, infatti causano circa il 90% dei guasti di tali componenti durante la messa in opera. Condotture in pressione e serbatoi di stoccaggio sono solo alcuni esempi di strutture soggette a tale fenomeno, a causa del quale possono incorrere in rotture prima dei normali intervalli manutentivi. L'elevata difficoltà di rilevazione di tali difetti durante la fase iniziale di nucleazione ha reso necessaria la valutazione di numerose tecniche di monitoraggio non distruttive tra le quali l'analisi termografica. Come risultato di recenti studi di termografia passiva, tra cui quello riportato in [12], è oggi possibile prevedere il punto a partire dal quale inizierà la propagazione della frattura in condizioni di sollecitazione a fatica.

La tecnica termografica, così come riportato in [12], è in grado di rilevare la quantità di energia rilasciata da un corpo sottoposto a deformazione, anche se quest'ultima viene generata da fenomeni strettamente localizzati. Il comportamento a fatica del materiale, per l'appunto, è legato a fenomeni di microplasticità localizzati quindi l'energia rilevata con ispezione termografica è fornita sia dalla crescita di fratture che dalla deformazione plastica. Il metodo Risitano, secondo quanto citato in [12], ha dimostrato che gli incrementi di temperatura superficiale registrati, normalmente associati in termografia alla presenza di un evento danneggiante, possono considerarsi proporzionali all'energia di deformazione prodotta nel materiale: a carichi più elevati corrispondono incrementi di temperatura più significativi. Nella pubblicazione [12] sono stati riportati i risultati di analisi termografiche eseguite su campioni sollecitati a fatica. I test sono stati condotti applicando dall'origine carichi oscillanti sia ad ampiezza costante (ampiezza del carico

superiore al limite di fatica e inferiore a quello di snervamento del materiale) che ad ampiezza crescente a gradini. È stata registrata la temperatura superficiale di ciascun provino per l'intera durata delle prove e, sulla base delle immagini termiche, sono state costruite le curve di incremento di temperatura in funzione del tempo. Osservando tali grafici, riportati nella figura 12, è possibile distinguere tre fasi: rapida crescita dell'energia di deformazione, corrispondente alla nucleazione della cricca di fatica; stabilizzazione degli incrementi di temperatura, dovuta alla fase di stazionarietà della cricca; forte incremento di temperatura, dovuto all'energia plastica rilasciata nella fase di propagazione instabile.

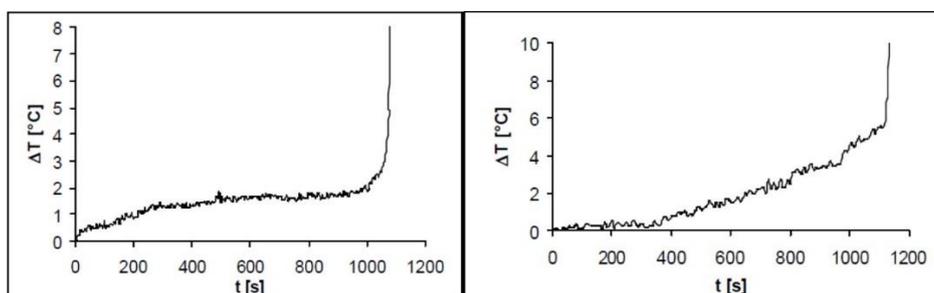


Figura 12-variazione di temperatura, per carico ad ampiezza costante (sx) e carico ad ampiezza crescente a gradini (dx) (da testo [12])

Analizzando il gradiente di temperatura medio del primo tratto della curva  $\Delta T-N$  per ogni carico applicato, mostrato in figura 13, è possibile identificare il limite di fatica.

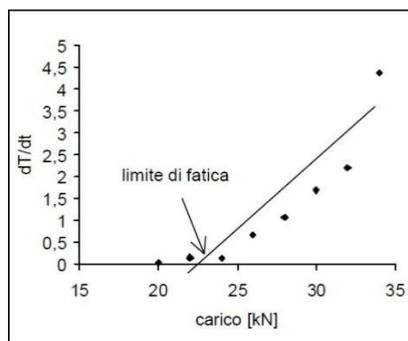


Figura 13-gradiente di temperatura medio per ogni carico - limite di fatica (da testo [12])

In conclusione, lo studio del comportamento a fatica del materiale può essere affrontato grazie alla rilevazione dei gradienti termici, correlati all'energia plastica localizzata. Inoltre, osservando i dati termografici rilevati, è possibile prevedere il punto in cui avverrà la rottura poiché è in tale punto che si verifica il massimo incremento di temperatura.

## 1.3 La termografia attiva

Il presente paragrafo ha lo scopo di illustrare le caratteristiche delle più utilizzate tecniche di termografia attiva, le quali possono essere suddivise in tecniche non-ottiche e ottiche. Nel corso della trattazione sono state menzionate le metodologie *Lock-In Thermography* e *Pulsed Thermography*, correlate alle diverse forme di eccitazione utilizzate in generale nelle tecniche attive e il cui significato è stato approfondito nel paragrafo dedicato alle tecniche ottiche.

Le tecniche di termografia attiva necessitano del contributo fornito da una sorgente di eccitazione esterna, la quale ha la funzione di stimolare una evoluzione termica all'interno dell'oggetto ispezionato. La figura 14 mostra uno schema semplificato di una generica prova di termografia attiva.

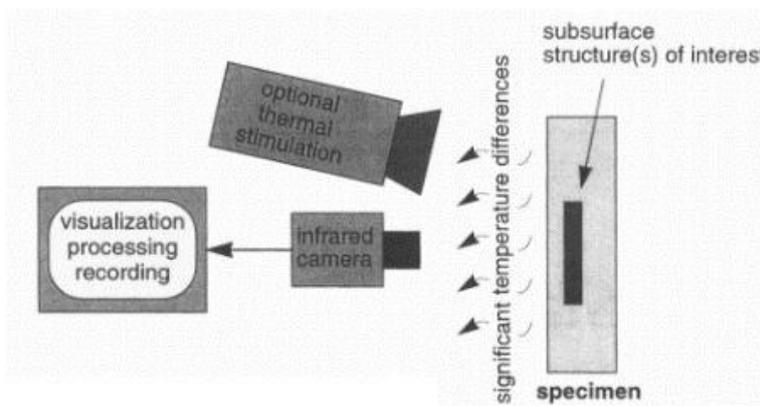


Figura 14-schema di un test in termografia attiva

A differenza delle tecniche di termografia passiva che costituiscono solitamente un metodo qualitativo di rilevazione di anomalie termiche, le tecniche attive permettono di identificare e caratterizzare quantitativamente eventuali difetti presenti nel materiale. Secondo quanto riportato nella pubblicazione [3], le tecniche di termografia attiva sono maggiormente utilizzate negli ambiti NDE/DPA (ispezioni non periodiche, off-line) mentre quelle di termografia passiva sono preferibili negli ambiti SHM/CM (ispezioni periodiche, on-line). La figura 15, pubblicata in [3], mostra un confronto tra le applicazioni delle tecniche attiva e passiva presenti in letteratura (nel periodo compreso tra il 2013 e il 2018).

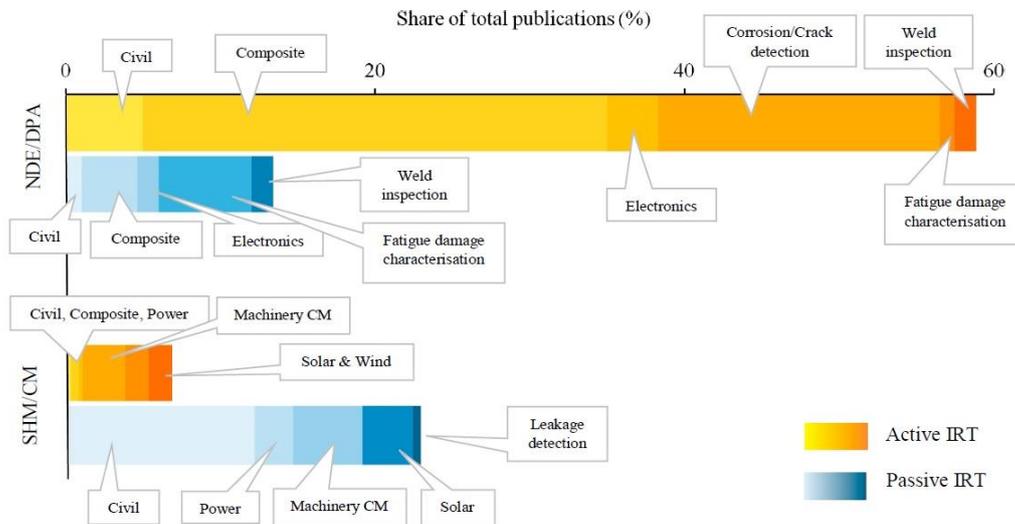


Figura 15-confronto tra le applicazioni della termografia in letteratura (da testo [3])

Come è possibile osservare, i difetti di corrosione sub-superficiale vengono rilevati ed analizzati tramite tecnica termografica attiva generalmente in modalità NDE/DPA. Raramente è stata indagata la possibilità di rilevare i difetti corrosivi sul campo (SHM/CM), quindi il lavoro sperimentale condotto nel presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di contribuire alla attuabilità dei test in-situ.

A causa della presenza della sorgente di eccitazione che stimola l'evoluzione termica del corpo ispezionato, è necessario modificare l'equazione della diffusione del calore di Fourier (4) come segue:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c} \quad (6)$$

In cui  $q$  rappresenta la fonte di calore interna per unità di volume. In letteratura, in genere, si riportano meccanismi di eccitazione che causano il riscaldamento del corpo. Poiché i fenomeni di trasmissione del calore sono simili nei casi di riscaldamento e raffreddamento, alcune nuove ricerche sono focalizzate su metodi di termografia attiva con sorgenti termiche fredde.

Le tecniche di termografia attiva impiegate per la rilevazione di difetti possono essere classificate in funzione del meccanismo di eccitazione termica. La tabella 2, pubblicata in [3], menziona le metodologie maggiormente impiegate e riporta i rispettivi vantaggi e limitazioni.

Tabella 2-tecniche di termografia attiva maggiormente utilizzate (2013-2018) (da testo [3])

Excitation Mechanisms	Source	Major Advantage	Major Limitations
Optical	Photographic Flashes	- Wide surface inspection; - High energy; - Short pulse (few ms); - More suitable for planar defects (e.g. corrosion).	- Relatively expensive; - Non-uniform heating; - Limited practicality for some field applications.
	Halogen Lamps	- Fairly low cost; - Relatively low energy; - Wide surface inspection; - More suitable for planar defects (e.g. corrosion).	- Long heating time (few seconds); - Limited practicality for some field applications.
	Laser	- More suitable for perpendicularly extended defects (e.g. cracks).	- Spot inspection; - Longer inspection time than optical; - Non-uniform heating.
Inductive	Electro-magnetic Coils	- More suitable for surface and near-surface perpendicularly extended and fine defects (e.g. cracks).	- Long time of inspection; - Inefficient for subsurface defects; - Non-uniform heating.
Vibro-thermography	Ultrasonic/sonic (Transducer)	- More suitable for hardly visible surface/near-surface defects (e.g. cracks) undetectable by other IRT methods.	- Limited practicality of using mechanical excitation in some occasions.
	Microwave (Horn)	- Relative uniform heating; - Energy efficient.	- Limited practicality of using microwave device in some occasions.
Others (Convection, Conduction, etc.)	Cooling (e.g. air/water cooler, fan, freezing spray, etc.)	- Potentially low cost, - Less reflection - Relatively more practical than heating for the field applications	- Lack of literature; - Lack of efficient cooling equipment; - Less control over heat waveform.
	Heating (e.g. heat gun, heat blanket, hot rod/coil, hot air, etc.)	- Potentially low cost;	- Lack of literature; - Lack of efficient heating equipment; - Less control over heat waveform.

### 1.3.1 Metodi di termografia attiva non ottici

I meccanismi di stimolazione termica non ottici maggiormente utilizzati prevedono l'impiego di onde meccaniche, come nel caso della TSA o della ultrasonic thermography, e di corrente magnetica, come nel caso della eddy current thermography.

- **Analisi Termoelastica delle Tensioni (TSA)**  
L'analisi delle tensioni viene applicata principalmente su componenti aeronautici a geometria complessa al fine di valutare i limiti operativi delle parti in sperimentazione. I modelli di riproduzione dei componenti, infatti, sono in genere

semplificati in fase di progettazione a causa della complessità geometrica di specifiche aree. Proprio in tali aree si generano di solito elevati gradienti di tensione, spesso responsabili dell'insorgenza di rotture. Per questo motivo si è reso necessario ispezionare con tecniche non distruttive i componenti progettati, al fine di stabilire eventuali azioni correttive.

La TSA viene condotta su componenti sottoposti a carichi ciclici a bassa frequenza. L'applicazione di un carico ciclico, sia esso termico o meccanico o di altra natura, determina per effetto termoelastico un'oscillazione di temperatura sinusoidale con frequenza pari a quella del carico, un'ampiezza e uno sfasamento rispetto al segnale del carico ciclico imposto dalla macchina di prova. La termografia Lock-In è lo strumento impiegato per la TSA poiché è in grado di confrontare il campo oscillante di temperatura provocato dall'effetto termoelastico con il carico ciclico imposto. La figura 16, pubblicata in [6], mostra l'apparato sperimentale per una prova TSA.

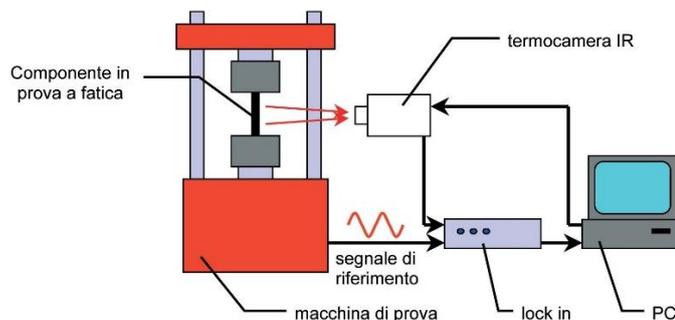


Figura 16-Apparato sperimentale per TSA (da testo [6])

Riportando quanto pubblicato nel testo [6], l'analisi termoelastica trova fondamento teorico nell'equazione di Darken e Curry:

$$\frac{\delta T}{T} = -K_0 \cdot \delta \sigma$$

In cui  $T$  è la temperatura assoluta,  $K_0$  è la costante termoelastica e  $\sigma$  è il primo invariante delle tensioni, responsabile delle variazioni di volume dell'elemento considerato e delle variazioni di temperatura. Il cambiamento delle tensioni nel tempo genera una sorgente periodica di calore che è responsabile delle variazioni locali di temperatura; tali variazioni possono essere rilevate da una termocamera e utilizzate per identificare le aree a maggiore concentrazione delle tensioni.

L'andamento oscillante della temperatura, citando quanto riportato in [13], è stato adattato dall'equazione di Thomson ad una funzione seno:

$$T(t) = -T_m K_0 \sigma_A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$$

Per minimizzare il rumore nel segnale termico registrato è possibile eseguire uno sviluppo di Fourier, il cui studio è fondamentale per comprendere il contributo della eventuale deformazione plastica. È stato dimostrato che, applicando un carico tale da generare deformazioni plastiche, l'energia dissipata è rappresentata dal secondo modo ma anche dalle armoniche di ordine superiore.

- Vibrothermography o Ultrasonic Thermography

La tecnica *Vibrothermography* utilizza onde meccaniche per stimolare internamente il materiale. Nei pressi di un difetto si ha una concentrazione delle tensioni, un aumento dello smorzamento interno e si instaurano meccanismi di micro-frizione localizzata che causano l'irreversibile conversione dell'energia meccanica in energia termica. I difetti si trasformano quindi in fonti di calore, permettendo la loro rilevazione nelle immagini termiche anche in complesse strutture non danneggiate; per questo motivo, la tecnica *vibrothermography* è nota come una tecnica di *imaging* selettivo. Sebbene sia una metodologia rapida e in grado di rilevare difetti di piccole dimensioni, spesso il suo utilizzo è impedito dall'elevata potenza del segnale di ingresso, la quale potrebbe provocare il danneggiamento della struttura ispezionata.

Secondo quanto riportato in [14], le metodologie maggiormente impiegate sono la Lock-In e la Burst Phase, i cui schemi semplificativi sono riportati nella figura 17. Entrambe le metodologie consentono di rilevare difetti a profondità maggiori rispetto a quelli rilevabili con tecnica ottica.

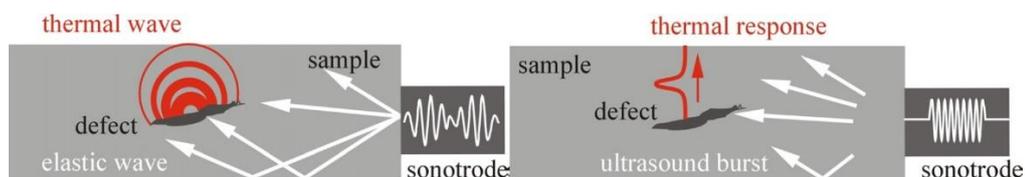


Figura 17-confronto tra Lock-In (sx) e Burst Phase (dx) Ultrasonic Thermography (da testo [14])

La Burst Phase Thermography utilizza impulsi sonici per eccitare il componente, permettendo una significativa riduzione del tempo di ispezione rispetto alla tecnica Lock-In che sollecita il corpo con onde elastiche per maggior tempo. Entrambe le tecniche forniscono immagini di ampiezza e di fase: le prime mostrano anche gli effetti della frizione tra componente e attuatori tramite delle frange nell'intorno delle posizioni occupate dagli attuatori; le seconde minimizzano gli effetti della disomogeneità.

La pubblicazione [9] mostra i risultati dell'analisi di un'area corrosa nascosta, ottenuti tramite Ultrasonic Lock-In Thermography. Le immagini di ampiezza e fase sono riportate nella figura 18.

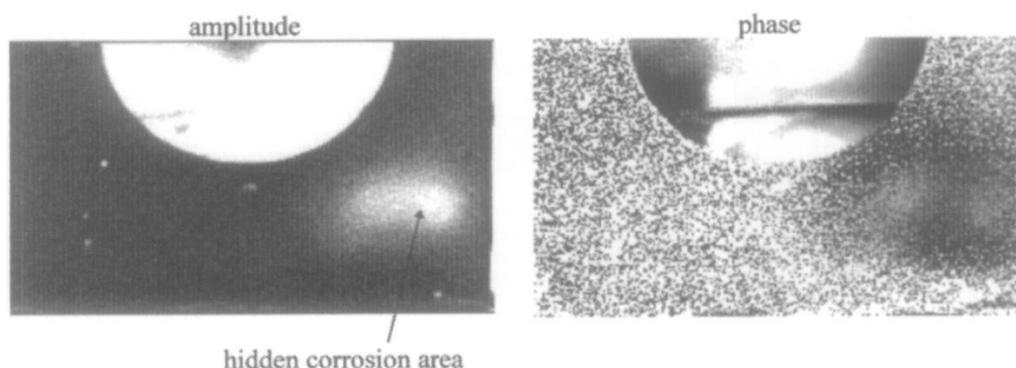


Figura 18-Analisi di un'area corrosa tramite eccitazione ultrasonica (da testo [9])

Riportando quanto commentato in [9], l'onda termica internamente generata viaggia nel componente fino a raggiungere la superficie, dove viene registrata dalla termocamera e dove fornisce immagini di fase in grado di mostrare la distanza percorsa dall'onda stessa. In questo modo è possibile risalire direttamente alla posizione in cui è stata generata l'onda, ovvero al punto in cui è presente il difetto.

- Induction Thermography o Eddy Current Stimulation Thermography

La Eddy Current Thermography è una tecnica termografica utilizzata per i materiali conduttori, la quale combina le tecniche dell'Eddy Current Testing e dell'analisi termografica. Il segnale di eccitazione è una corrente elettrica, la quale viene condotta in una bobina posta al di sopra del materiale conduttore; tale corrente induce la formazione di correnti parassite (*eddy*), le quali danno origine a calore nel materiale conduttore a causa dell'effetto Joule. Tale calore è proporzionale al quadrato della densità di corrente elettrica ed è inversamente proporzionale alla conducibilità elettrica. Il calore generato diffonde nel materiale fino al raggiungimento di un equilibrio termico. Se nel materiale sono presenti difetti, tuttavia, la distribuzione delle correnti indotte e il processo di diffusione del calore vengono influenzati provocando un aumento localizzato di temperatura. Quest'ultimo è rilevabile ispezionando la distribuzione di temperatura superficiale tramite una termocamera. La figura 19, pubblicata in [15], mostra una schema semplificato dell'esperimento di *Induction Thermography*.

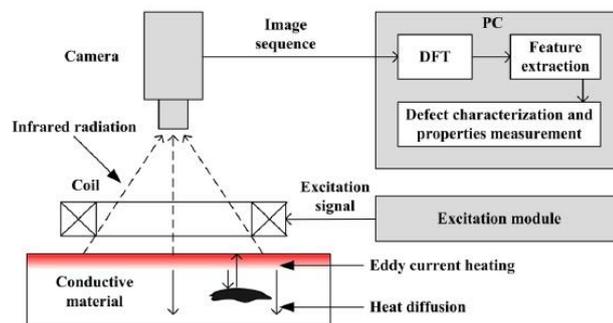


Figura 19-Schema del test di Induction Thermography (da testo [15])

I più comuni metodi di sollecitazione sono l'eccitazione pulsata (Pulsed) e l'eccitazione modulata (Lock-In). Un'ulteriore tecnica, nota come Pulsed Phase Thermography, combina i vantaggi di entrambi i metodi sopra citati, permettendo di ottenere non solo immagini termiche di ampiezza ma anche di fase.

Secondo lo studio riportato in [16], il meccanismo fisico responsabile del riscaldamento nella Eddy Current Pulsed Thermography può essere suddiviso in due fenomeni distinti: il riscaldamento per effetto Joule dovuto alle correnti indotte e la diffusione di calore. Una volta separati, tali fenomeni possono essere utilizzati per rilevare anomalie del componente analizzato e per prevedere eventuali variazioni delle proprietà elettromagnetiche del materiale. Grazie al metodo SCBSS (*single channel blind source separation*) e analizzando il transitorio termico, è possibile distinguere i due fenomeni poiché giocano un ruolo differente nelle diverse fasi del riscaldamento. Durante l'eccitazione pulsata, il riscaldamento per effetto Joule è massimo mentre la diffusione di calore ha una minima influenza a causa della breve durata di tale fase; successivamente il contributo fornito dall'effetto Joule raggiunge un minimo mentre quello della diffusione termica è massimo; infine, i due fenomeni fisici raggiungono l'equilibrio, provocando entrambi un effetto sul flusso termico.

### 1.3.2 Termografia attiva ottica

Tra le diverse tecniche di termografia attiva, una delle più utilizzate è quella ottica. Mediante l'utilizzo di una sorgente ottica di calore, come ad esempio lampade flash, lampade alogene o fascio laser, è possibile stimolare la risposta termica dell'oggetto ispezionato sfruttando l'effetto *fortotermico*. La luce rilasciata dalla sorgente è trasformata in energia termica, la quale attraversa la superficie del componente indagato e viaggia attraverso il materiale fino a raggiungere eventuali discontinuità sub-superficiali, dalle quali viene riflessa. Tali discontinuità sono responsabili di una riduzione della diffusione del calore e, di conseguenza, la loro presenza si manifesta sui risultati dell'analisi termografica. L'individuazione e la caratterizzazione dei difetti sub-superficiali non è semplice e immediata poiché fattori come la dimensione e la profondità del difetto, l'intensità della stimolazione e le performance della termocamera possono pregiudicarne la corretta rilevazione. Il riscaldamento superficiale non uniforme, inoltre, è una problematica spesso inevitabile e che può causare valutazioni errate, in quanto l'identificazione delle discontinuità avviene per confronto termico tra zone difettate e zone integre. La diffusione del calore nel corpo in direzione perpendicolare alla direzione di incidenza della sollecitazione, infine, è un fenomeno sempre presente che dipende dalle proprietà termiche del materiale e che può causare difficoltà nell'ispezione termografica. Per far fronte a tali problematiche e contrastarne l'effetto, uno dei principali obiettivi delle ricerche scientifiche incentrate sulla termografia a infrarosso è migliorare la visibilità dei difetti tramite tecniche di elaborazione dei risultati.

Come prima accennato, per individuare i difetti è necessario procedere con un'analisi comparativa nel dominio del tempo tra la temperatura rilevata in una posizione spaziale di interesse e la temperatura di un'area di fondo non danneggiata. Tale metodo, noto come *Absolute Temperature Contrast* (AC), permette di migliorare la visibilità dei difetti e di ricavare corrispondenti informazioni come la dimensione, la profondità e le proprietà termiche. La temperatura di contrasto può essere espressa, secondo quanto riportato nel testo [3], come:

$$T_{AC[ij]}(t) = T_{[ij]}(t) - T_s(t)$$

Dove l'indice  $s$  è relativo all'area di fondo non danneggiata e gli indici  $ij$  corrispondono alla posizione di ogni punto di interesse sul termogramma. Tale metodo è basato su due ipotesi: occorre conoscere correttamente la posizione dell'area di fondo priva di difetti e occorre che l'eccitazione termica sia uniforme. Per ovviare a tali ipotesi, quasi sempre non rispettabili nella pratica, è stata proposta una variazione del metodo AC nota come *Differential Absolute Contrast* (DAC), la cui accuratezza diminuisce all'aumentare dello

spessore del corpo analizzato. Tale tecnica suppone che l'intera superficie ispezionata si comporti come se fosse priva di difetti nell'istante  $t^*$ , compreso tra l'istante di lancio della stimolazione e l'istante di apparizione del primo difetto sul termogramma. In questo modo è possibile calcolare, dopo aver risolto l'equazione di diffusione del calore di Fourier, la temperatura di contrasto pur non conoscendo la corretta posizione dell'area di fondo priva di discontinuità. Sono molte le tecniche utilizzabili per migliorare la rilevazione dei difetti, ciascuna delle quali mostra prestazioni differenti in base alla modalità di eccitazione ottica. Per questo motivo si è deciso di approfondire le varie tecniche ideate nei seguenti paragrafi, dedicati alle diverse forme di stimolazione.

Un parametro tradizionalmente utilizzato per quantificare la performance della rilevazione dei difetti è il *Signal to Noise Ratio* (SNR), definito come il rapporto:

$$SNR = \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_N}{\sigma(x_N)} \quad (7)$$

Dove  $\bar{x}$  rappresenta il valore medio del parametro analizzato durante l'indagine termografica (ampiezza, fase etc) su un'area difettata  $D$  o su un'area non difettata  $N$ ; infine,  $\sigma(x_N)$  rappresenta la deviazione standard del parametro  $x$  sull'area priva di difetti. Il valore di SNR per un determinato difetto dipende fortemente dal modo in cui il segnale è definito.

La forma dell'eccitazione, la sua ampiezza, frequenza e durata sono di grande interesse poiché influenzano fortemente l'analisi termografica. La necessità di utilizzare una particolare forma di eccitazione dipende dalla natura del difetto e dal tipo di esperimento. Secondo quanto riportato in [3], le tecniche termografiche si differenziano in due principali categorie: analisi *Transitoria* e analisi *Stazionaria*. Nelle tecniche transitorie l'acquisizione dei dati avviene durante le fasi di riscaldamento o di raffreddamento del corpo sollecitato, prima che questo raggiunga la condizione stazionaria. Le tecniche stazionarie, invece, sono caratterizzate da onde di riscaldamento o di raffreddamento modulate ad una determinata frequenza e l'analisi viene eseguita quando la temperatura del corpo ha raggiunto una condizione di stazionarietà.

### 1.3.2.1 Pulsed e Step Heating Thermography

La tecnica della *Pulsed Thermography*, nota anche come *Transient Thermography*, prevede la stimolazione della superficie del campione tramite un impulso di breve durata, emesso da una sorgente ad alta potenza come le lampade flash. La durata dell'impulso deve essere stabilita in base alle proprietà termofisiche del materiale e del difetto che si desidera indagare. Dopo aver colpito la superficie del campione, il fronte termico viaggia attraverso il materiale fino a raggiungere eventuali zone difettate e in seguito viene riflesso verso la superficie, dove viene registrato dalla termocamera. La rilevazione della variazione di temperatura avviene in seguito al termine dell'impulso, ovvero durante la fase di raffreddamento in condizioni transitorie. In caso di assenza di discontinuità, si noterebbe una variazione uniforme di temperatura della superficie; nel caso in cui fossero presenti dei difetti allora ognuno si manifesterebbe tramite un incremento o una riduzione localizzata di temperatura rispetto alle zone integre. I profili termici superficiali delle zone difettata e non-difettata divergerebbero in un determinato istante, correlato alla profondità del difetto. Il gradiente di temperatura superficiale rilevato con questa tecnica, tuttavia, non dipende solo dalla presenza di difetti ma anche da variazioni locali di emissività e da un riscaldamento non uniforme.

In teoria, la Pulsed Thermography utilizza come forma di eccitazione l'impulso di Dirac ovvero un impulso di area unitaria così breve da non poter essere distinto, da nessuna attrezzatura, da un impulso di più breve durata. La soluzione della forma unidimensionale dell'equazione di diffusione di Fourier per un corpo semi-infinito sollecitato superficialmente da un impulso di Dirac è esprimibile come:

$$T_{s-inf}(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4\alpha t}\right)$$

In cui  $\frac{Q}{\rho c}$  è l'intensità dell'impulso,  $T_{s-inf}$  corrisponde all'evoluzione temporale della temperatura in un punto del corpo,  $T_0$  è la temperatura ambiente iniziale,  $e = \sqrt{\rho k c}$  è la effusività termica. In superficie, per  $z = 0$ , la soluzione può essere scritta come:

$$T_{s-inf}(0, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (8)$$

Di conseguenza, è possibile affermare che la temperatura superficiale di un corpo semi-infinito omogeneo e opaco decresce nel tempo con pendenza  $\frac{1}{\sqrt{t}}$ . L'andamento della

temperatura nel tempo in seguito ad un impulso di Dirac è rappresentato in scala doppio-logaritmica nella figura 20, pubblicata in [17].

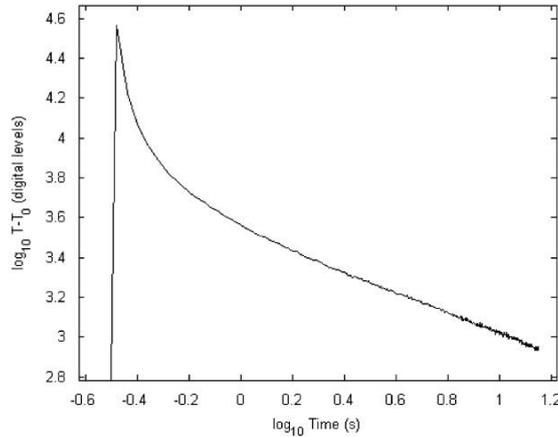


Figura 20-Decadimento della temperatura nel tempo in seguito ad un impulso di Dirac (da testo [17])

Come è possibile notare dalla figura 20, il decadimento si stabilizza su un gradiente costante dato dalla relazione  $T \propto t^{-0.5}$  così come previsto. La parte iniziale dell'esperimento, tuttavia, mostra un tasso di decadimento rapido e variabile a causa del bagliore proveniente dalle lampade.

Considerando un corpo di spessore uniforme finito, invece, la pubblicazione [3] riporta la soluzione dell'equazione di Fourier in superficie (8) nella seguente forma:

$$T_{plate}(0, t) = T_0 + \frac{Q}{\rho c L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 F_0) \right] \quad (8')$$

Dove  $F_0 = \frac{\alpha t}{L^2}$  è il numero di Fourier,  $L$  è lo spessore del componente, il termine tra parentesi rappresenta il contributo dovuto alle riflessioni di calore tra la superficie sollecitata e la superficie posteriore del componente.

Nella pratica non è possibile produrre un impulso di Dirac ideale quindi vengono utilizzati impulsi più lunghi, noti come *long pulse*, la cui durata dipende dalle caratteristiche del materiale: breve sollecitazione per materiali ad alta conducibilità termica e viceversa. Come dimostrato in [5], una volta individuata la durata di sollecitazione necessaria affinché il calore possa attraversare tutto lo spessore del componente, eccitare il corpo con una durata superiore non fornisce un miglioramento dei risultati. L'intensità del *long pulse*, invece, deve essere stabilita in base alla profondità che si desidera ispezionare: la

rilevazione di difetti profondi necessita di una maggiore quantità di energia incidente. La figura 21, pubblicata in [4], mostra la configurazione per un esperimento di Pulsed Thermography.

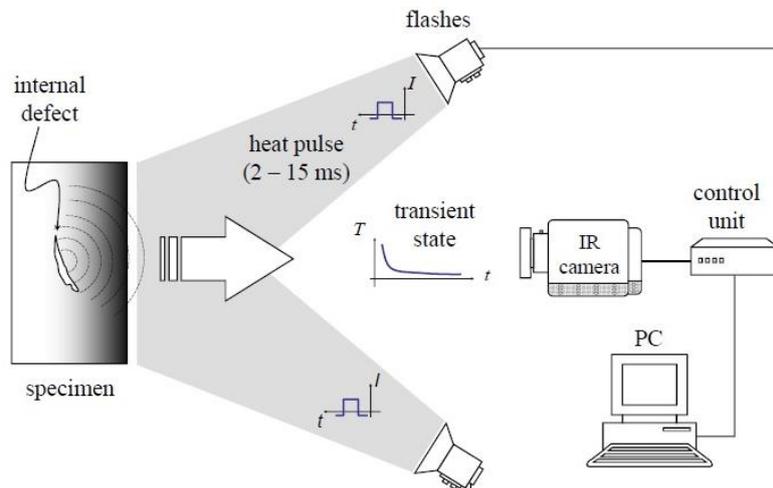


Figura 21-Configurazione sperimentale per Pulsed Thermography (da testo [4])

Spesso in letteratura la tecnica *Long Pulsed* viene associata alla *Step Heating Thermography*, la quale prevede il riscaldamento del campione per un lungo periodo di tempo. A differenza della modalità *Long Pulsed* che osserva il decadimento della temperatura al termine dell'eccitazione, la *Step Heating* prevede l'acquisizione delle immagini termiche anche mentre il campione è sollecitato quindi sia durante la fase di riscaldamento che durante quella di raffreddamento.

La tecnica ottica Pulsed Thermography è rapida e semplice da utilizzare, tuttavia è soggetta a numerose problematiche tra cui riscaldamento non uniforme, emissività superficiale non omogenea e riflessioni della sollecitazione nell'ambiente circostante. Per compensare questi fenomeni, ridurre il rumore di fondo e ottenere valutazioni dei difetti qualitativamente e quantitativamente affidabili, sono stati ideati numerosi metodi di post-processamento dei risultati grezzi ottenuti dalle analisi. Alcuni esempi delle tecniche che forniscono buoni risultati nel caso della Long Pulsed/Step Heating Thermography sono riportati qui di seguito. Tutti questi metodi migliorano la visibilità dei difetti, tuttavia alcune anomalie possono restare ambigue a causa delle loro ridotte dimensioni o della loro elevata profondità, di gravi fenomeni di sollecitazione non uniforme o di scadenti performance della termocamera.

- Cold Image Subtraction (CIS)

Il metodo CIS, riportando quanto descritto in [5], ha l'obiettivo di ridurre l'impatto di fenomeni costanti come riflessioni nell'ambiente, riscaldamento residuo proveniente dalle lampade o riflessioni della termocamera. Tali problematiche non variano nel tempo e si manifestano anche prima del riscaldamento, motivo per cui è possibile registrare alcune immagini "fredde", calcolarne la media e sottrarla alle immagini ottenute durante l'effettiva analisi.

- Pulse Phase Thermography (PPT)

La tecnica PPT, secondo quanto riportato in [3, 18], utilizza la Trasformata di Fourier per trasformare la risposta termica (curva di decadimento) di ogni pixel dal dominio del tempo al dominio della frequenza.

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \exp\left(\frac{-i2\pi kn}{N}\right) = Re_n + iIm_n$$

Dove:  $T(k)$  rappresenta la temperatura di un determinato pixel nella  $k$ -esima immagine della sequenza;  $n$  rappresenta il numero del pixel considerato;  $N$  rappresenta il numero di frame totali, i quali sono distanziati tra loro di un intervallo  $\Delta t$ . La frequenza di acquisizione dei dati  $\frac{1}{\Delta t}$  svolge un ruolo fondamentale nell'efficienza della tecnica PPT poiché un'errata scelta del range di frequenze  $\left[0 \div \frac{1}{\Delta t}\right]$  potrebbe pregiudicare la rilevazione di difetti nell'intervallo di profondità in cui sono presenti.

I termini  $Re_n$  e  $Im_n$  corrispondono rispettivamente alla parte reale e alla parte immaginaria della trasformazione. I moduli dell'ampiezza e del ritardo di fase per il  $n$ -esimo pixel dell'immagine possono essere calcolati come:

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right)$$

Entrambe le immagini di ampiezza e fase possono essere utilizzate per caratterizzare i difetti. Le immagini di fase, nello specifico, risentono meno delle riflessioni ambientali, delle variazioni di emissività e degli effetti della geometria superficiale rispetto alle immagini grezze ottenute dall'analisi. Nonostante questi interessanti vantaggi, occorre considerare che: la tecnica PPT necessita di esaminare l'intera sequenza acquisita per individuare l'immagine più adatta alla rilevazione dei difetti; il rumore è piuttosto notevole; la trasformata di Fourier opera sulla base di funzioni sinusoidali quindi il suo utilizzo potrebbe non essere la scelta migliore per rappresentare il transitorio termico in una prova di Long Pulsed Thermography.

- Thermal Signal Reconstruction (TSR)

Riportando quanto pubblicato nei testi [5, 18], la tecnica TSR linearizza la risposta termica nel tempo di ogni pixel trasformandola nel dominio logaritmico. La funzione polinomiale che si ottiene a partire dalla soluzione (8) e utilizzando la regressione ai minimi quadrati può essere espressa come:

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \dots + a_n \ln^n(t)$$

I coefficienti della funzione polinomiale  $a_i$  possono essere memorizzati al posto della sequenza originale, ottenendo un'importante riduzione dei dati memorizzati. Si è scoperto che l'utilizzo di una funzione di quinto o sesto grado è sufficiente a ridurre notevolmente il rumore e a consentire quindi una migliore rilevazione di difetti piccoli e profondi. Inoltre, spesso si analizzano la prima, la seconda e la terza derivata rispetto al tempo della funzione polinomiale ottenuta poiché le corrispondenti immagini sono maggiormente sensibili alla presenza di difetti sub-superficiali rispetto alle immagini grezze rilevate dalla termocamera. La tecnica TSR presenta anche alcuni svantaggi: non è in grado di eliminare il rumore dovuto a fenomeni costanti; la tecnica TSR deriva dall'equazione di diffusione del calore monodimensionale quindi potrebbe fornire risultati non ottimali in caso di test di lunga durata, in cui la diffusione laterale diventa predominante.

- Principal Component Analysis (PCA)

Il metodo PCA, secondo quanto riportato in [3, 18], è basato sulla *Singular Value Decomposition* del segnale di temperatura rilevato. Tale tecnica riduce il numero di dimensioni dei dati termici da tre (spazio in due dimensioni e tempo) a due; il suo obiettivo, infatti, è ricostruire l'immagine termica in una matrice  $A$  di dimensioni  $M \times N$  in cui ogni colonna rappresenta l'evoluzione temporale di un certo pixel. Utilizzando autovalori e autovettori, la matrice  $A$  può essere decomposta; la matrice di covarianza  $S$  può essere espressa come:

$$S = (A - A_{mean})(A - A_{mean})^T = U\Gamma V^T$$

In cui  $U$  e  $V$  rappresentano le matrici contenenti i vettori singolari sinistro e destro di  $S$ , mentre  $\Gamma$  è una matrice diagonale contenente le radici quadrate degli autovalori non nulli di  $S^T$ . La matrice  $U$  contiene un set di funzioni rappresentanti le variazioni spaziali, la matrice  $V^T$  contiene le informazioni temporali quindi può essere utilizzata per stimare la profondità delle discontinuità. La tecnica PCA presenta alcuni pregi ma anche alcuni difetti, infatti è in grado di rimuovere il rumore dovuto a fenomeni costanti ma fornisce risultati influenzati dal riscaldamento non omogeneo.

La ricerca condotta in [18] sui patch in materiale composito utilizzati per le riparazioni di strutture metalliche, ha confrontato le performance delle tecniche PPT, TSR e PCA nella rilevazione di disaccoppiamenti e delaminazioni. Comparando le dimensioni effettive dei difetti con le valutazioni quantitative ottenute dai tre metodi, è stato dimostrato che l'errore prodotto dalla tecnica TSR è inferiore a quello generato dalle altre. Inoltre, è stato osservato che l'output ottenuto con il metodo PCA fornisce informazioni più accurate sulla dimensione dei difetti rispetto a quello generato dalla tecnica PPT. Per tutti i tre metodi utilizzati, tuttavia, i maggiori errori si sono manifestati durante la rilevazione dei difetti più piccoli e profondi.

- Correlation Function of Contrast (CFC)

Basata sulla teoria della conduzione del calore e sull'analisi di correlazione, la tecnica CFC è stata introdotta dalla pubblicazione [19]. Rispetto ai già esistenti metodi AC basati sul confronto tra le temperature, la CFC effettua la correlation analysis sulla evoluzione del contrasto termico. Per comprenderne il funzionamento è prima necessario analizzare la risposta termica di un corpo soggetto a Step Heating, risolvendo l'equazione di diffusione del calore monodimensionale durante la fase di riscaldamento.

$$T_s(t) = T_0 + \frac{2q}{e} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \left[ 1 + 2\sqrt{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} ierfc\left(\frac{mL_s}{\sqrt{kt}}\right) \right]$$

$$T_d(t) = T_0 + \frac{2q}{e} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \left[ 1 + 2\sqrt{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} ierfc\left(\frac{mL_d}{\sqrt{kt}}\right) \right]$$

In cui:  $T_s(t)$  rappresenta l'evoluzione termica dell'area di fondo;  $T_d(t)$  rappresenta l'evoluzione termica di un difetto;  $ierfc$  è l'integrale della funzione di errore complementare  $erfc$ ;  $T_0$  è la temperatura iniziale del campione prima del riscaldamento;  $q$  è l'intensità della sollecitazione;  $L_s$  è lo spessore del campione;  $L_d$  è lo spessore residuo del materiale nella regione difettata. Ottenute le espressioni dell'andamento termico, è possibile calcolare l'evoluzione del contrasto termico tra zona difettata e regione di fondo integra:

$$C_d(n) = T_d(n) - T_s(n) = \frac{2q\sqrt{nt_s}}{e} \sum_{m=1}^{\infty} 2 \left[ ierfc\left(\frac{mL_d}{\sqrt{knt_s}}\right) - ierfc\left(\frac{mL_s}{\sqrt{knt_s}}\right) \right]$$

Dove:  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  è la lunghezza della sequenza termografica acquisita;  $t_s$  è l'intervallo di tempo compreso tra due termogrammi successivi. Osservando il grafico in figura 22, pubblicato in [19] e tracciato in caso di diffusione del calore solo in direzione longitudinale, è possibile notare che il contrasto termico tra difetto e regione di fondo aumenta monotonicamente nel tempo durante la fase di riscaldamento. Negli esperimenti con sollecitazioni di lunga durata, la diffusione

del calore in direzione perpendicolare a quella del segnale termico può assumere un ruolo importante causando una decrescita del contrasto termico in uno specifico istante di tempo. Per questo motivo, le performance della tecnica CFC sono leggermente dipendenti dalla lunghezza della sequenza termica.

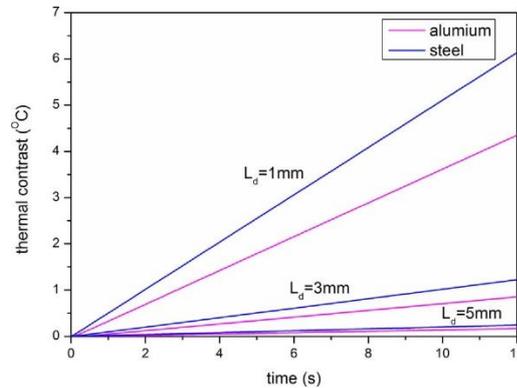


Figura 22-Evoluzione del contrasto termico nel tempo (da testo [19])

Come è possibile notare, più un difetto è profondo, più i valori del contrasto termico sono vicini allo zero. Inoltre, se il punto ispezionato appartiene alla regione non difettata allora il contrasto termico assume valore nullo. Per tale ragione, spesso i difetti profondi possono essere nascosti del rumore presente nei risultati termografici reali, scambiati per zone appartenenti alla regione di fondo e quindi non identificati. Per risolvere tale inconveniente e identificare segnali con una forma nota coperti dal rumore, viene utilizzata la funzione di correlazione tra due sequenze temporali della medesima lunghezza  $M$ .

$$CF_{xy}(\tau) = \langle x(n), y(n - \tau) \rangle = \sum_{n=1}^M x(n)y(n - \tau)$$

Dove:  $\tau$  è il tempo di ritardo di  $y(n)$  ed è noto come *lag time*;  $x(n)$  e  $y(n)$  sono le due sequenze temporali;  $CF_{xy}$  è la funzione di correlazione, la quale esprime quanto i due segnali sono simili nel tempo e la quale raggiunge un valore massimo (segnali maggiormente simili) ad uno specifico lag time noto come  $\tau_{peak}$ . Nel caso di due segnali monotonicamente crescenti, la  $CF_{xy}$  è massima quando il *lag time* è nullo quindi  $\tau_{peak} = 0$ . Al contrario, la funzione di correlazione tra una sequenza random (come il rumore) e un segnale monotonicamente crescente assume un andamento stocastico con massimo quasi certamente in  $\tau_{peak} \neq 0$ . Nel caso di una segnale affetto da rumore (media del rumore nulla) ma caratterizzato da una componente monotonicamente crescente e di una sequenza monotonicamente

crescente, la funzione di correlazione presenta molto probabilmente un massimo in  $\tau_{peak} = 0$ .

Sulla base di tali osservazioni è stata ideata la tecnica CFC la quale permette di determinare, grazie al valore assunto da  $\tau_{peak}$ , se un segnale affetto da rumore contiene o meno una componente monotonicamente crescente. Se  $\tau_{peak}$  della funzione di correlazione in un determinato pixel tra l'evoluzione del contrasto termico in quel pixel affetta da rumore e un segnale di riferimento monotonicamente crescente (retta per l'origine) è pari a  $\tau_{peak} = 0$ , allora l'evoluzione del contrasto termico presenta una componente monotonicamente crescente. Di conseguenza, sulla base di quanto osservato nella figura 22, se la funzione di correlazione presenta  $\tau_{peak} = 0$  allora è stata calcolata in un pixel appartenente ad un difetto. Utilizzando i valori di  $\tau_{peak}$  calcolati per ogni pixel, è possibile costruire una nuova immagine in cui difetti e regione di fondo appaiono ben distinti e identificati da diversi colori. La figura 23, pubblicata in [19], mostra schematicamente il principio di funzionamento della metodologia. In tale testo, inoltre, è stato dimostrato che la tecnica CFC è in grado di rilevare i difetti più velocemente e più chiaramente rispetto alla PCA.

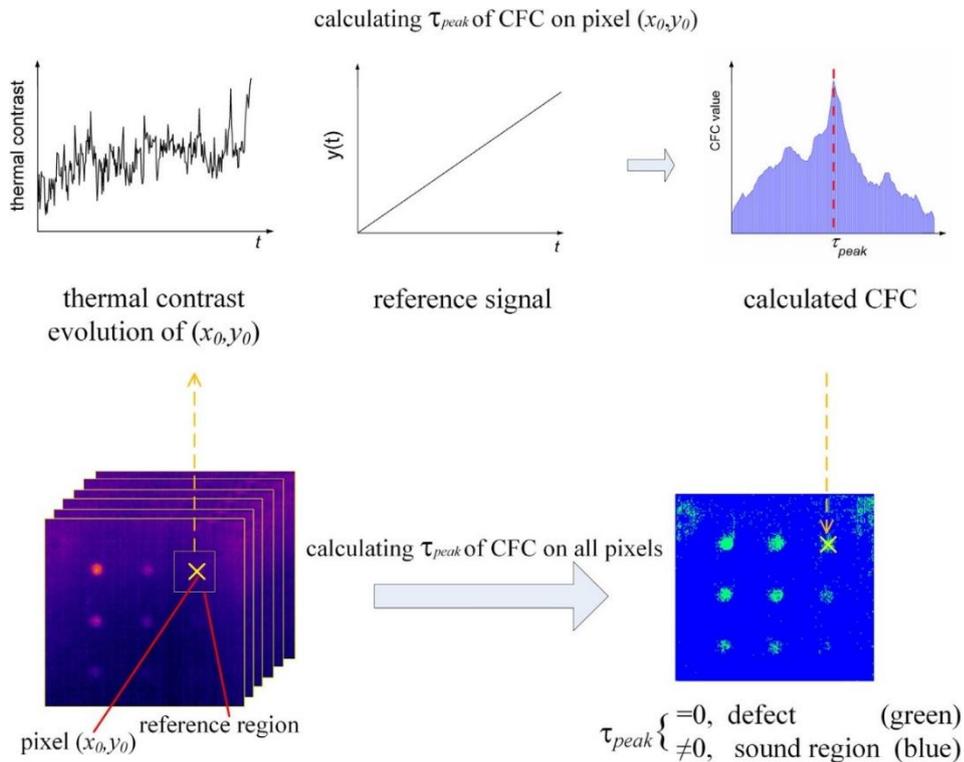


Figura 23-Metodo di post-processing CFC (da testo [19])

### 1.3.2.2 Lock-In Thermography

La tecnica termografica Lock-In, nota anche come *Phase Sensitive Modulated Thermography*, è stata introdotta da Busse nella pubblicazione [9] come evoluzione della Photothermal Radiometry. Tale metodologia prevede la stimolazione ottica del campione tramite un'onda modulata, ovvero un'onda generalmente sinusoidale caratterizzata da una specifica frequenza modulata  $f$  e una determinata ampiezza. Il tempo di esposizione alla sollecitazione periodica è di minimo un ciclo affinché la temperatura del campione possa raggiungere il regime stazionario, fase di interesse della tecnica Lock-in. L'eccitazione ottica armonica attraversa l'aria fino a raggiungere la superficie del campione, dove dà origine ad un'onda termica che propaga nel materiale fino al raggiungimento di eventuali discontinuità. Le superfici dei difetti, infatti, si comportano come barriere alla propagazione dell'onda termica, la quale viene riflessa verso la superficie del campione dove interagisce con l'onda termica originale e dove viene rilevata dalla termocamera. L'onda rilevata presenta un'ampiezza differente e un ritardo di fase rispetto all'eccitazione di input, tuttavia è caratterizzata dalla medesima forma e frequenza. L'obiettivo della tecnica Lock-In, di conseguenza, è di monitorare la dipendenza temporale tra il segnale di riferimento fornito dalla sorgente eccitatrice e il segnale di output rilevato dalla termocamera. La figura 24, pubblicata in [4], mostra la configurazione sperimentale di una prova Lock-In.

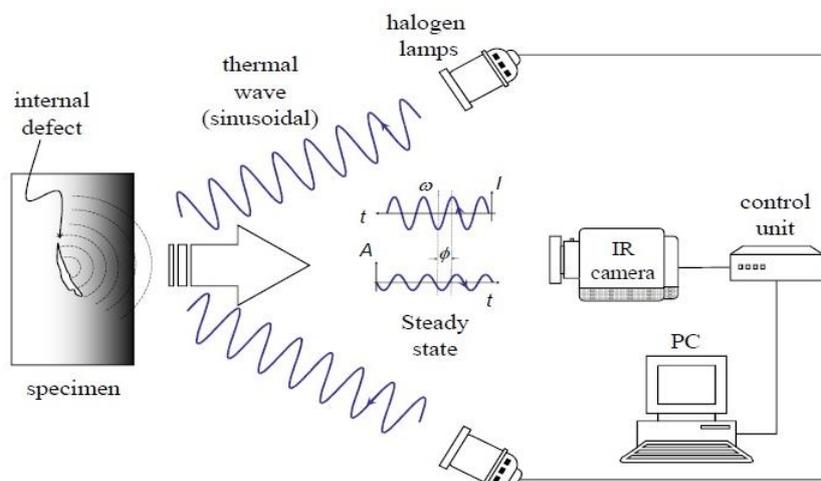


Figura 24-Configurazione sperimentale Lock-In Thermography (da testo [4])

Tramite adeguate tecniche di post-processing è possibile estrarre dalle sequenze termiche registrate le informazioni di ampiezza dell'onda termica risultante e di ritardo di fase tra la suddetta onda di uscita e il segnale di sollecitazione in ingresso per ogni pixel. I valori ottenuti dall'analisi sono elaborati in un'immagine di ampiezza e un'immagine di fase

tramite le quali è possibile identificare e caratterizzare eventuali difetti. I parametri dell'onda di uscita, infatti, sono differenti per zone danneggiate e integre a causa delle loro diverse proprietà termiche. La generazione di sole due immagini da dover indagare è uno dei vantaggi della tecnica Lock-In rispetto alla Pulsed, la quale necessita l'analisi dei dati rilevati in più frame della sequenza termografica registrata. Confrontando brevemente le due tecniche termografiche Lock-In (LT) e Pulsed (PT), i testi [4, 9, 17] hanno riportato le seguenti osservazioni:

- La tecnica LT utilizza onde con potenza inferiore rispetto a quella fornita durante le prove PT, evitando un eccessivo riscaldamento del campione.
- Le variazioni di emissività superficiale, le riflessioni nell'ambiente circostante e il riscaldamento non uniforme non hanno effetto sull'immagine di fase ottenuta con tecnica LT, spesso preferita rispetto all'immagine di ampiezza. Al contrario, tali fenomeni influiscono sui risultati ottenuti tramite tecnica PT rendendo necessario l'utilizzo di tecniche di post-processing.
- L'immagine di fase ottenuta tramite tecnica LT è relativa ad una specifica frequenza di eccitazione e ad una specifica profondità ispezionata, quindi conoscendo sia il valore della fase rappresentato sull'immagine che il valore della frequenza è possibile determinare la profondità del difetto. Al contrario, nella tecnica PT, la determinazione della profondità del difetto non è così semplice poiché è correlata all'istante in cui si manifesta il contrasto termico.
- Nella tecnica PT l'impulso distribuisce la sua energia su un ampio spettro di frequenze tra cui la maggior parte non fornisce alcun contributo nella rilevazione di difetti profondi. Di conseguenza, la sollecitazione in tali frequenze riscalda il campione senza fornire informazioni di interesse.
- La tecnica LT concentra tutta l'energia in una specifica frequenza, la quale influenza la risposta di fase in corrispondenza di difetti posizionati ad una specifica profondità; per tale motivo, è necessario eseguire più test a differenti frequenze di eccitazione e sceglierne di volta in volta il corretto valore al fine di ispezionare l'intero intervallo di profondità di interesse.
- La durata del test LT dipende dalla frequenza dell'eccitazione infatti per rilevare difetti profondi occorre scegliere basse frequenze, causando un notevole aumento della durata della prova. Inoltre, affinché la temperatura del campione possa raggiungere il regime stazionario, occorre un periodo di stabilizzazione. Al contrario, la prova PT è molto rapida.
- Entrambe le tecniche LT e PT possono fornire ottimi risultati nella rilevazione dei difetti, tuttavia le loro prestazioni sono variabili in base alla struttura ispezionata. Nel caso dell'ispezione di un campione in fibra di carbonio rinforzata, ad esempio, è stato dimostrato nel testo [4] che il diagramma di fase ottenuto tramite metodo

PPT permette di rilevare un maggior numero di difetti rispetto al diagramma di fase ottenuto con una prova LT. Ispezionando invece timoni di aeromobili, è stato dimostrato nel testo [4] che la tecnica LT permette un'analisi migliore rispetto alla tecnica PT.

La sorgente eccitatrice utilizzata nei test con tecnica Lock-In può essere un laser che sollecita il campione un punto per volta. La scelta di tale fonte comporta alcuni vantaggi, tra cui: la sorgente di calore è precisamente posizionata rispetto al campione grazie alla sua direzionalità; può essere collocata anche a grande distanza grazie alle sue ridotte perdite di energia. La modalità *point-by-point* comporta, tuttavia, un notevole svantaggio ovvero un tempo di analisi molto elevato, soprattutto nel caso di campioni di grandi dimensioni e di scelta di una bassa frequenza del segnale di ingresso. Il tempo necessario totale è dato dal numero di pixel da ispezionare moltiplicato per la durata di almeno un periodo della sollecitazione armonica. Al fine di accelerare la prova, secondo quanto riportato in [9], è possibile utilizzare una tecnica di misurazione in parallelo mediante l'impiego di una sorgente eccitatrice estesa come una lampada alogena. Tale sorgente sollecita contemporaneamente tutti i punti del campione, mentre ogni pixel della termocamera si comporta come un rilevatore di onda termica.

Indipendentemente dalla sorgente scelta, la caratteristica della tecnica Lock-In è l'utilizzo di un'eccitazione termica armonica la cui forma è stata rappresentata in [20] come segue:

$$q_0(t) = \frac{q_{max}}{2}(1 - \cos(2\pi ft))$$

In cui:  $q_0(t)$  rappresenta la densità di flusso termico;  $q_{max}$  è il massimo dell'onda di flusso termico;  $f$  è la frequenza modulata dell'eccitazione. La sollecitazione può essere suddivisa in due componenti: un flusso termico costante  $\frac{q_{max}}{2}$  che produce un incremento di temperatura; una sollecitazione armonica  $\frac{q_{max}}{2} \times \cos(2\pi ft)$  che causa una risposta termica armonica modulata.

Considerando il corpo come opaco, omogeneo e infinitamente esteso in direzione perpendicolare alla sollecitazione, è possibile risolvere l'equazione di Fourier (6) in flusso unidimensionale ottenendo la risposta termica in condizioni stazionarie e transitorie. La soluzione in condizioni stazionarie può essere espressa come:

$$T(z, t)_s = A_s \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \exp\left[i(2\pi ft) - \frac{z}{\mu}\right] \quad (9)$$

In cui:  $T(z, t)_s$  rappresenta la distribuzione armonica di temperatura in condizioni stazionarie,  $A_s$  è l'ampiezza dell'armonica;  $\mu$  è la lunghezza di diffusione termica, la quale può essere espressa come riportato in (10).

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (10)$$

In cui:  $\alpha$  è la diffusività termica ed  $f$  è la frequenza di modulazione dell'onda. Come riportato in [5], la lunghezza di diffusione  $\mu$  è direttamente correlata alla profondità ispezionabile. Quest'ultima, infatti, è pari al prodotto tra  $\mu$  e una costante di valore compreso nel range  $[1,5 \div 2]$ . Come è possibile notare dalla formula (10), l'unico parametro della tecnica Lock-In che influenza la profondità di indagine è la frequenza della sollecitazione modulata di ingresso: per alti valori di frequenza è possibile ispezionare solo ridotte profondità; per bassi valori di frequenza, la sollecitazione penetra in profondità nel materiale consentendo l'identificazione di difetti profondi.

Considerando la componente costante della sollecitazione termica, è possibile ottenere l'espressione (11) dell'evoluzione della temperatura in condizioni transitorie:

$$T(z, t)_T = T_{am} + \Delta T \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (11)$$

In cui:  $T(z, t)_T$  rappresenta la distribuzione di temperatura in condizioni transitorie;  $T_{am}$  è la temperatura ambiente;  $\tau$  è la time constant; la variazione  $\Delta T$  può essere espressa come  $\Delta T = \frac{q_{max}}{2} \times R_{th}$ ;  $R_{th}$  è la resistenza termica del materiale del campione. La time constant può essere definita come:

$$\tau = \rho c R_{th} \quad (12)$$

La figura 25, pubblicata in [20], mostra le fasi transitoria e stazionaria dell'evoluzione termica per due differenti valori delle costanti di tempo. L'evoluzione termica complessiva può essere espressa come la somma delle componenti transitoria e stazionaria:

$$T(z, t) = T(z, t)_T + T(z, t)_s \quad (13)$$

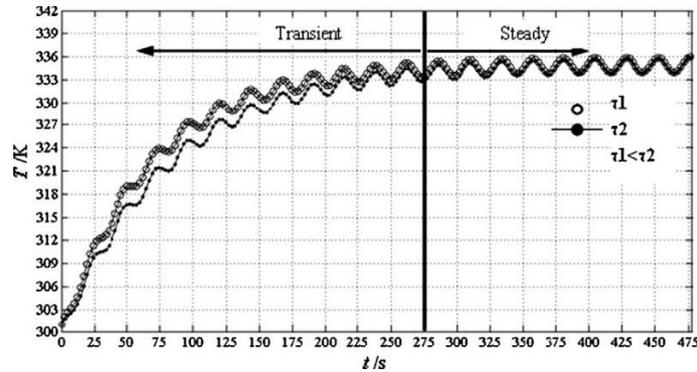


Figura 25-Evoluzione termica al variare della time constant (da testo [20])

L'evoluzione fino ad ora espressa matematicamente corrisponde nella pratica all'onda termica emessa dal campione sollecitato e rilevata dalla termocamera. Per identificare eventuali difetti rispetto al materiale circostante integro, è necessario analizzare ed elaborare la risposta del campione in ogni pixel tramite metodi di processamento distinti in [20] in due categorie: tecniche di calcolo di ampiezza e fase del segnale di output; time constant method per l'analisi della fase transitoria.

- Fourier Transforms Method (FTM)

Il metodo FTM è uno strumento molto utilizzato per il calcolo dell'ampiezza e dell'angolo di fase della risposta termica in quanto, rispetto ad altri metodi in seguito descritti, può essere utilizzato per tutte le possibili forme d'onda ed è in grado di ridurre il rumore nel segnale. La trasformata di Fourier della sequenza termografica registrata può essere espressa come:

$$F_k(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ F_n(x, y) \exp\left(-i \frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \text{Re}(F_k(x, y)) + i \text{Im}(F_k(x, y))$$

In cui:  $F_k(x, y)$  è la trasformata di Fourier della sequenza registrata  $F_n(x, y)$  nel punto di coordinate  $(x, y)$ ;  $N$  è il numero di frame acquisiti per ogni periodo Lock-In;  $k$  è la frequenza digitale e il suo valore è  $k = 1, 2 \dots N$ . I valori di ampiezza e angolo di fase dell'onda termica ricostruita alla frequenza di Lock-In  $f$  sono esprimibili come:

$$A(x, y) = \sqrt{[\text{Re}(F_k(x, y))]^2 + [\text{Im}(F_k(x, y))]^2}$$

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_k(x, y))}{\text{Re}(F_k(x, y))}\right)$$

- Four-Point Correlation Method (FPCM)

Il metodo FPCM permette di semplificare e velocizzare notevolmente la ricostruzione del segnale; l'ampiezza e la fase del segnale termico, infatti, possono essere calcolate a partire dalle misurazioni di temperatura superficiale in soli quattro punti equidistanti nel tempo durante un ciclo di modulazione. Tale metodo presenta tuttavia degli svantaggi: è applicabile solo nel caso di sollecitazioni sinusoidali e risente del rumore. I valori di ampiezza e fase dell'onda termica in un determinato punto ispezionato possono essere espressi come:

$$A(x, y) = \sqrt{[S_1(x, y) - S_3(x, y)]^2 + [S_2(x, y) - S_4(x, y)]^2}$$

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{S_1(x, y) - S_3(x, y)}{S_2(x, y) - S_4(x, y)}$$

In cui:  $S_i(x, y)$  con  $i = 1, 2, 3, 4$  rappresentano i valori, equidistanti tra loro nel tempo durante un ciclo di eccitazione, rilevati dalla termocamera in corrispondenza delle coordinate  $(x, y)$ . La ragione per la quale la fase, a differenza dell'ampiezza, non risente dell'illuminazione non uniforme o delle variazioni di emissività risiede proprio nella forma dell'espressione della fase. La frazione, infatti, ha l'effetto di annullare l'influenza di fenomeni potenzialmente disturbanti.

- Digital Cross-Correlation Method (DCCM)

Il metodo DCCM è stato sviluppato a partire dal metodo FPCM con l'obiettivo di ridurre il rumore da cui quest'ultimo è affetto. A tal fine, il DCCM analizza l'intera sequenza di dati valutando punti equidistanti nel tempo in più periodi di eccitazione. All'aumentare del *correlation time*, ovvero dell'intervallo di tempo processato, generalmente l'accuratezza di ampiezza e fase del segnale ricostruito aumentano e il rumore si riduce causando di conseguenza una migliore qualità dell'analisi. Occorre tener presente, tuttavia, che il trattamento di una elevata quantità di dati risulta molto oneroso e in alcuni casi potrebbe non portare ad una più elevata qualità del segnale. Nella pubblicazione [7] sono state ricavate le espressioni della varianza dell'ampiezza e della fase del segnale di risposta del materiale sollecitato in funzione del *correlation time*.

$$Var(A) \approx 2 \frac{\sigma_T^2}{N}$$

$$Var(\varphi) \approx \frac{2}{N} \left( \frac{\sigma_T^2}{\mu_r^2} \right)$$

In cui:  $Var(A)$  rappresenta la varianza dell'ampiezza del segnale;  $Var(\varphi)$  rappresenta la varianza della fase;  $\sigma_T$  indica il NETD (*Noise Equivalent Temperature Detectivity*) dello strumento di rilevazione termografica utilizzato;  $\mu_r$  è un termine correlato all'intensità di temperatura misurata;  $N$  è un termine direttamente proporzionale alla durata di ispezione con metodo DCCM. Come è possibile notare dalle equazioni e come ci si aspettava, le varianze di ampiezza e fase diminuiscono all'aumentare dell'intervallo di tempo processato. Occorre sottolineare, tuttavia, che la varianza della fase mostra anche una dipendenza dall'ampiezza del segnale termico registrato. Tale concetto si traduce nell'osservazione che le aree del campione che ricevono un maggiore flusso termico esibiscono una risposta di fase più chiara.

- Digital Lock-In Correlation Method (DLICM)

Il metodo DLICM basa il suo funzionamento sull'analisi di una correlazione sincrona tra l'onda termica rilevata e una funzione armonica di riferimento. È un metodo a banda stretta poiché considera solo l'armonica fondamentale dell'onda termica, la quale racchiude tutte le informazioni rilevanti, e sopprime tutte le armoniche superiori. Le seguenti equazioni riportano le funzioni seno/coseno di riferimento e le componenti dell'onda termica in fase con le funzioni seno/coseno, secondo uno schema di correlazione a due canali.

$$c(n)^{0^\circ} = 2\sin\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \quad n = 1, 2, \dots, N$$

$$c(n)^{-90^\circ} = 2\cos\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \quad n = 1, 2, \dots, N$$

$$S^{0^\circ} = \frac{c_s}{P_s N} \sum_{i=1}^{P_s} \sum_{n=1}^N \left[ F_{i,n}(x, y) \times 2\sin\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \right]$$

$$S^{-90^\circ} = \frac{c_s}{P_s N} \sum_{i=1}^{P_s} \sum_{n=1}^N \left[ F_{i,n}(x, y) \times (-2)\cos\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \right]$$

In cui:  $c(n)^{0^\circ}$  è la funzione di riferimento in seno;  $c(n)^{-90^\circ}$  è a funzione di riferimento in coseno;  $S^{0^\circ}$  è la componente dell'onda termica in fase con il seno;  $S^{-90^\circ}$  è la componente del segnale termico in fase con il coseno;  $F_{i,n}(x, y)$  rappresenta l'onda termica registrata in uno specifico punto;  $c_s$  è un fattore di scala;  $P_s$  è il numero di periodi di sollecitazione modulata. I valori di ampiezza e fase del segnale di risposta ricostruito possono essere calcolati come segue:

$$A(x, y) = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{-90^\circ})^2}$$

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{S^{-90^\circ}}{S^{0^\circ}}\right)$$

- Time Constant Method (TCM)

Il metodo TCM è stato introdotto nella pubblicazione [20] al fine di analizzare, diversamente dai metodi fino ad ora descritti, solo la fase transitoria dell'evoluzione termica. Tale tecnica non è incentrata sul calcolo di valori di fase e di ampiezza, ma di un parametro dato dal rapporto tra il periodo di modulazione e la time constant espressa in (12). Per ricavare l'espressione matematica di tale parametro è necessario ricorrere ai valori di temperatura superficiale (ovvero in  $z = 0$ ) negli istanti  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + T_e$ ,  $t = t_0 + 2T_e$ , i quali possono essere calcolati applicando l'equazione (13). Il parametro  $T_e$  rappresenta il periodo di modulazione, ovvero l'inverso della frequenza di Lock-In. Effettuando la differenza tra le temperature superficiali calcolate negli istanti indicati e semplificando i termini legati alla temperatura ambiente e alla temperatura nella fase stazionaria, è possibile ottenere:

$$\Delta T(0, T_e) = T(0, t_0 + T_e) - T(0, t_0) = \Delta T e^{-\frac{t_0}{\tau}} - \Delta T e^{-\frac{t_0 + T_e}{\tau}}$$

$$\Delta T(0, 2T_e) = T(0, t_0 + 2T_e) - T(0, t_0) = \Delta T e^{-\frac{t_0}{\tau}} - \Delta T e^{-\frac{t_0 + 2T_e}{\tau}}$$

$$\Delta^2 T(0, T_e) = \Delta T(0, 2T_e) - \Delta T(0, T_e) = \Delta T e^{-\frac{t_0}{\tau}} e^{-\frac{T_e}{\tau}} - \Delta T e^{-\frac{t_0}{\tau}} e^{-\frac{T_e}{\tau}} e^{-\frac{T_e}{\tau}}$$

In cui:  $\Delta T(0, T_e)$  è la differenza di temperatura in un periodo di modulazione;  $\Delta T(0, 2T_e)$  è la differenza di temperatura in due periodi di modulazione;  $\tau$  è la time constant. L'indicazione grafica delle differenze di temperatura calcolate in fase transitoria è rappresentata in figura 26.

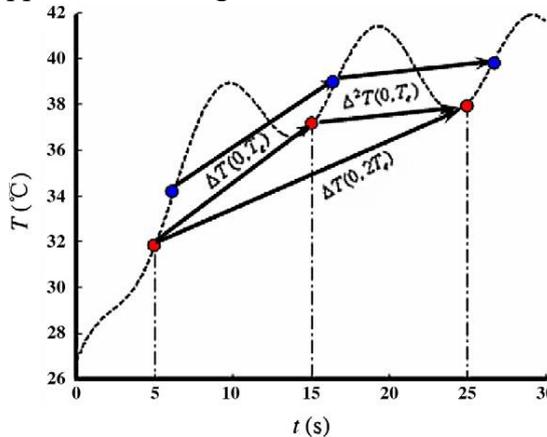


Figura 26-Rappresentazione grafica del metodo TCM (da testo [20])

Svolgendo il logaritmo delle precedenti espressioni, è possibile ottenere:

$$\begin{aligned} \ln[\Delta T(0, T_e)] &= \ln \Delta T - \frac{t_0}{\tau} + \ln \left( 1 - e^{-\frac{T_e}{\tau}} \right) \\ \ln[\Delta^2 T(0, T_e)] &= \ln \Delta T - \frac{t_0}{\tau} - \frac{T_e}{\tau} + \ln \left( 1 - e^{-\frac{T_e}{\tau}} \right) \end{aligned}$$

Calcolando, infine, la differenza tra le due equazioni è possibile esplicitare l'espressione matematica del parametro di interesse del metodo TCM:

$$\frac{T_e}{\tau} = \ln[\Delta T(0, T_e)] - \ln[\Delta^2 T(0, T_e)]$$

Il rapporto tra il periodo di modulazione e la time constant della temperatura superficiale durante la fase transitoria può essere utilizzato per identificare eventuali difetti sub-superficiali presenti nel materiale ispezionato con tecnica termografica Lock-In.

La ricerca pubblicata in [20] ha realizzato un confronto tra le performance dei metodi di processamento del segnale termico appena descritti. Indagando una lastra in acciaio forata, è stato riscontrato che i risultati ottenuti con metodo FTM hanno una migliore capacità di rilevazione dei difetti rispetto alle immagini fornite dalle tecniche FPCM e DLICM. Sia le immagini di ampiezza che le immagini di fase costruite con tecnica FTM, infatti, mostrano una maggiore differenza tra le zone difettate e le zone integre rispetto agli altri due metodi, facilitando così la rilevazione dei difetti. Anche i risultati ottenuti con tecnica TCM si sono dimostrati in grado di aumentare notevolmente la visibilità dei difetti; tuttavia, è stato riscontrato che aumentando la frequenza di modulazione il rapporto SNR si riduce. I rapporti SNR di ampiezza, fase e costante di tempo sono parametri fondamentali per valutare le prestazioni dei metodi di rilevazione dei difetti e possono essere espressi come:

$$SNR(Am) = \frac{\overline{Am_D} - \overline{Am_N}}{\sigma(Am_N)}$$

$$SNR(Ph) = \frac{\overline{Ph_D} - \overline{Ph_N}}{\sigma(Ph_N)}$$

$$SNR(\tau) = \frac{\overline{\tau_D} - \overline{\tau_N}}{\sigma(\tau_N)}$$

In cui:  $SNR(Am)$  rappresenta il rapporto SNR nelle immagini di ampiezza;  $SNR(Ph)$  rappresenta il rapporto SNR nelle immagini di fase;  $SNR(\tau)$  è il rapporto SNR delle immagini di time constant ottenute con tecnica TCM;  $\overline{Am}_D$ ,  $\overline{Ph}_D$ ,  $\overline{\tau}_D$  indicano rispettivamente i valori medi di ampiezza, fase e time constant in corrispondenza dei difetti;  $\overline{Am}_N$ ,  $\overline{Ph}_N$ ,  $\overline{\tau}_N$  indicano rispettivamente i valori medi di ampiezza, fase e time constant nelle zone integre;  $\sigma(Am_N)$ ,  $\sigma(Ph_N)$ ,  $\sigma(\tau_N)$  rappresentano rispettivamente i valori di deviazione standard di ampiezza, fase e time constant nelle regioni non difettate. Confrontando i valori di SNR di ampiezza e fase per le tecniche FTM, FPCM e DLICM e di time constant per la tecnica TCM ad una bassa frequenza di modulazione, si è ottenuto il grafico riportato in figura 27. Occorre specificare che tale analisi è stata condotta applicando i metodi di processamento durante la fase transitoria dell'evoluzione termica.

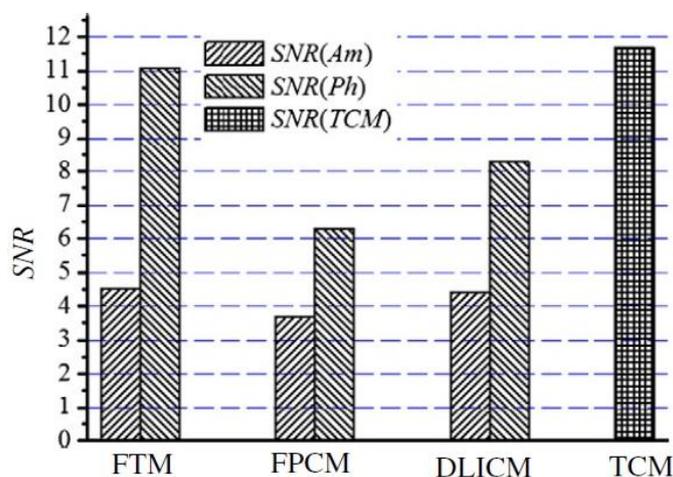


Figura 27-Confronto tra valori di SNR per differenti metodi di processamento (da testo [20])

Osservando il grafico è possibile riscontrare che in generale le immagini di ampiezza sono caratterizzate da un valore SNR inferiore rispetto alle immagini di fase, così come previsto. La tecnica FPCM fornisce i valori più bassi di SNR poiché calcola i valori di ampiezza e fase nell'ipotesi di regime stazionario della risposta termica e considera la risposta in fase transitoria come rumore. In compenso, il metodo FPCM richiede il minor tempo di processamento rispetto a tutte le altre tecniche. Il metodo TCM può fornire il valore più alto di rapporto SNR rispetto agli altri metodi se applicato con bassa frequenza di modulazione. Inoltre, il tempo computazionale necessario per il processamento con tecnica TCM è superiore a quello della tecnica FPCM ma inferiore a quello delle tecniche FTM e DLICM.

### 1.3.2.3 Problema inverso per la caratterizzazione dei difetti

L'analisi delle immagini termografiche ottenute tramite gli algoritmi di processamento dell'evoluzione termica registrata permette di identificare eventuali difetti presenti nel materiale ispezionato. Per caratterizzare tali difetti, ovvero determinarne dimensione, profondità e proprietà termofisiche, è necessario risolvere quello che è noto come problema inverso della diffusione del calore. La pubblicazione [21] espone nel dettaglio il processo di risoluzione del problema inverso applicato all'immagine di fase ottenuta dall'analisi di un campione difettato con tecnica termografica Lock-In. Per determinare la dimensione e la profondità di un difetto, così come le sue proprietà termofisiche, è necessario minimizzare la funzione obiettivo, la quale è espressa come:

$$F_{Ph}(p^{defect}) = \sum_{j=1}^N \left[ Ph(y_j, 0, f, p^{defect}) - Ph(y_j, 0, f)_{LIT} \right]^2 \quad (14)$$

Il problema di minimizzazione della funzione obiettivo, la cui risoluzione permette di caratterizzare il difetto, può essere esplicitato come una funzione di costo:

$$\min[F_{Ph}(p^{defect})] = \min \left\{ \sum_{j=1}^N \left[ Ph(y_j, 0, f, p^{defect}) - Ph(y_j, 0, f)_{LIT} \right]^2 \right\}$$

In cui:  $F_{Ph}(p^{defect})$  è la funzione obiettivo;  $Ph(y_j, 0, f, p^{defect})$   $j = 1, 2, \dots, N$  rappresenta il ritardo di fase dell'onda termica calcolato applicando il problema diretto ad una soluzione stimata;  $Ph(y_j, 0, f)_{LIT}$   $j = 1, 2, \dots, N$  rappresenta il ritardo di fase rilevato sperimentalmente con tecnica Lock-In alla frequenza di modulazione  $f$  nella stessa posizione  $y_j$  in cui è stato risolto numericamente il problema diretto; il vettore  $p^{defect}$  contiene tutte le caratteristiche geometriche e termofisiche del difetto che si desidera ricavare.

$$p^{defect} = \begin{bmatrix} k \\ c \\ D \\ H_D \end{bmatrix}$$

In cui:  $k$  rappresenta la conducibilità termica;  $c$  indica la capacità termica;  $D$  rappresenta la dimensione del difetto;  $H_D$  rappresenta la profondità del difetto.

Osservando l'espressione della funzione obiettivo (14) è possibile notare che per risolvere il problema inverso è necessario confrontare i risultati ottenuti da una prova sperimentale Lock-In e dalla risoluzione matematica del problema diretto.

- Problema diretto di diffusione del calore

Il problema diretto consiste nella risoluzione numerica dell'equazione di Fourier (6) generalmente tramite metodo FEM, al fine di determinare la componente oscillatoria dell'evoluzione termica durante una prova termografica Lock-In simulata. L'ispezione con tecnica Lock-In prevede la stimolazione del campione tramite un'eccitazione periodica modulata esprimibile come la somma di due termini:

$$q(t) = q_{tem} + q_{osc}(t)$$

In cui:  $q_{tem}$  rappresenta la componente temporale, costante, dell'eccitazione;  $q_{osc}(t)$  indica la componente oscillatoria del flusso incidente. Di conseguenza la temperatura superficiale del campione ispezionato può essere espressa come la somma di due corrispondenti contributi:

$$T(x, y, 0, t) = T_{tem}(x, y, 0, t) + T_{osc}(x, y, 0, t)$$

La temperatura totale in superficie  $T(x, y, 0, t)$  può essere calcolata risolvendo numericamente l'equazione di Fourier (6) applicando la sollecitazione totale  $q(t)$  e considerando le opportune condizioni al contorno e condizioni iniziali. La componente temporale di variazione di temperatura  $T_{tem}(x, y, 0, t)$  può essere calcolata numericamente dall'equazione di Fourier (6) considerando la sola componente temporale di eccitazione  $q_{tem}$  e le opportune condizioni al contorno e condizioni iniziali.

È importante sottolineare che la formulazione dell'equazione di Fourier e le rispettive condizioni al contorno e condizioni iniziali includono sia i parametri geometrici che le proprietà termofisiche del difetto indagato.

Infine, la componente oscillatoria dell'onda termica in superficie può essere calcolata sottraendo la componente temporale alla temperatura totale. Tale componente oscillatoria corrisponde nella pratica all'onda termica registrata dalla termocamera durante una reale prova Lock-In. Per questo motivo, a partire da  $T_{osc}(x, y, 0, t)$ , è possibile ottenere i valori di fase e ampiezza dell'onda termica in ogni punto del campione modellato.

- Prova sperimentale

Per ottenere l'onda termica di risposta del materiale sollecitato sperimentalmente, ovvero la componente oscillatoria della temperatura, è necessario sottrarre alla temperatura superficiale la componente temporale della temperatura. Tale componente  $T_{tem}$  può essere ottenuta eseguendo una regressione polinomiale nella variabile tempo con il metodo dei minimi quadrati:

$$T_{tem}(t) = \sum_{m=0}^M a_m t^m$$

Ottenuta l'onda termica di output, è possibile calcolare il valore di ritardo di fase per ogni pixel ispezionato.

Il flow-chart rappresentante il processo di risoluzione del problema inverso per la determinazione delle caratteristiche geometriche del difetto è mostrato in figura 28.

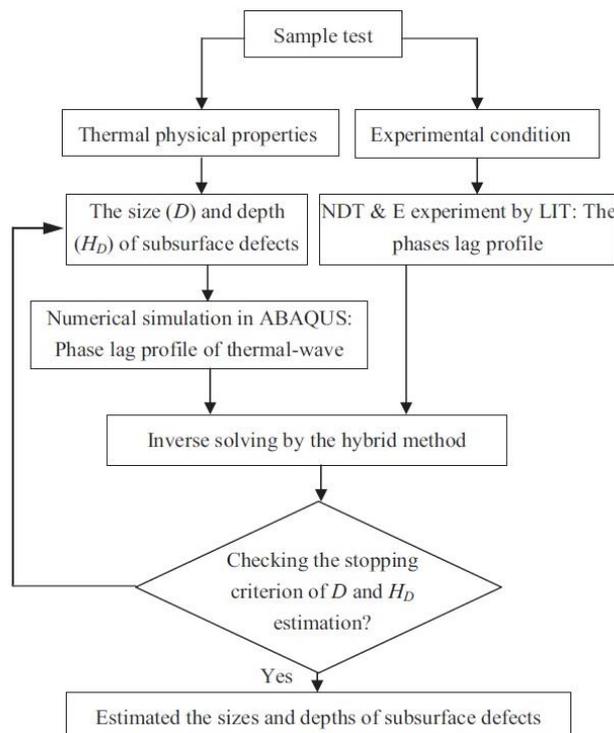


Figura 28-Flow chart per la stima delle caratteristiche geometriche di un difetto (da testo [21])

Per avviare il processo di minimizzazione della funzione obiettivo (14) è necessario partire dal confronto tra il risultato sperimentale ottenuto dalla prova Lock-In e una soluzione ipotetica del problema diretto generata arbitrariamente. Tale scelta è necessaria poiché le caratteristiche ignote del difetto compaiono nella formulazione matematica del problema di diffusione del calore, rendendolo irrisolvibile. Il processo di ottimizzazione può considerarsi concluso se una delle tre seguenti condizioni risulta soddisfatta: si è raggiunto il valore desiderato della funzione obiettivo; la funzione obiettivo non mostra un miglioramento con il procedere delle iterazioni; si è raggiunto il numero massimo di iterazioni stabilito all'inizio del processo di minimizzazione. Al termine del processo si ottiene una stima delle caratteristiche geometriche del difetto e delle proprietà termofisiche con un errore generalmente molto contenuto.

La risoluzione del problema inverso può risultare spesso piuttosto complicata, come nel caso della caratterizzazione di un danno da corrosione di una superficie non esposta alla vista. Alcuni ricercatori, così come menzionato in [3], hanno sviluppato una soluzione del problema inverso applicato ai risultati sperimentali di una prova termografica in modalità Pulsed. Sono state riscontrate, tuttavia, alcune criticità nella ricostruzione delle caratteristiche della superficie corrosa dovute a: la tecnica Pulsed ha capacità di rilevazione dei difetti decrescente all'aumentare della profondità; spesso viene trascurata la diffusione del calore in direzione perpendicolare rispetto alla direzione di sollecitazione; i difetti da corrosione vengono spesso approssimati come fori dal fondo piatto e dalla forma regolare. In realtà, le superfici corrose sono caratterizzate da una geometria complessa e trascurare la diffusione laterale del calore durante la risoluzione del problema inverso può causare significativi errori nella stima delle caratteristiche del difetto.

## Capitolo 2

### Materiali e Metodi

Il secondo capitolo di questa tesi è suddiviso in tre principali paragrafi, ognuno dei quali è caratterizzato da un differente obiettivo. Il primo paragrafo ha lo scopo di esporre brevemente le caratteristiche del fenomeno fisico della corrosione, le metodologie attualmente impiegate per limitarne l'insorgenza, l'impatto economico che tale fenomeno ha in ambito industriale e infine le tecniche adottate per rilevare e caratterizzare i danni da corrosione. Il secondo paragrafo ha l'obiettivo di riportare nel dettaglio le caratteristiche della strumentazione utilizzata nel corso del lavoro sperimentale condotto presso il Centro Ricerche Fiat. Nello specifico: è esposto il principio di funzionamento della *camera salina* e sono riportati i parametri normati della prova di corrosione; è spiegato il procedimento attuato al fine di misurare lo spessore residuo dei campioni corrosi tramite il *microscopio ottico metallografico rovesciato*, di cui sono citate le caratteristiche; sono riportate le caratteristiche della strumentazione *multiDES system laser* impiegata per condurre le prove di termografia attiva. Infine, nel terzo paragrafo è esposto nel dettaglio il procedimento seguito durante le analisi termografiche ed è riportato l'elenco dei parametri utilizzati per le diverse prove condotte.

#### 2.1 La corrosione

*“Corrosion can be defined as a chemical or electrochemical reaction between a material, usually a metal, and its environment that produces a deterioration of the material and its properties”.*

La definizione sopra citata, pubblicata in [23], può essere approfondita definendo la corrosione come un fenomeno naturale in grado di portare via gradualmente il materiale che ne è affetto a causa dell'interazione tra il metallo stesso e l'ambiente che lo circonda. È importante sottolineare che il comportamento di un materiale rispetto al fenomeno della corrosione dipende strettamente dall'ambiente al quale è sottoposto, così come la corrosività di un ambiente dipende dal materiale ad esso esposto. Secondo quanto riportato in [23], i fattori che definiscono un ambiente sono: lo stato fisico; la composizione chimica in termini di componenti e concentrazione; la temperatura; la

velocità del flusso, nel caso in cui la soluzione fosse in movimento; le eventuali sollecitazioni meccaniche che l'ambiente esercita sul materiale.

Così come precedentemente citato, tutti i processi corrosivi coinvolgono reazioni elettrochimiche. La figura 29, pubblicata in [24], illustra una semplice cella elettrochimica costituita da due elettrodi, ovvero un *anodo* e un *catodo*, connessi fisicamente tra loro e immersi in un mezzo conduttivo definito *elettrolita*.

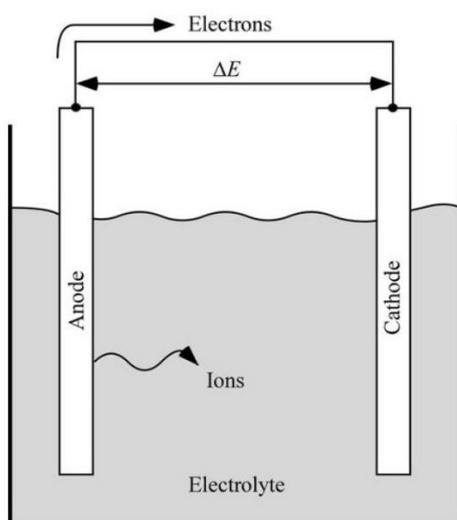
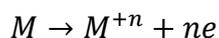


Figura 29-Rappresentazione schematica di una cella elettrochimica (da testo [24])

Riportando quanto spiegato in [24], nel tempo l'anodo si consuma, si corrode, poiché i suoi atomi rilasciano elettroni trasformandosi in ioni che vengono dispersi nell'elettrolita. Gli elettroni liberati vengono trasportati verso il catodo formando un circuito elettrico in cui si manifesta una differenza di potenziale  $\Delta E$  tra anodo e catodo. Nel caso in cui i due elettrodi nella cella siano costituiti da metalli differenti, il metallo che andrà incontro alla corrosione costituendo l'anodo è il metallo con maggiore propensione all'ossidazione, ovvero al rilascio di elettroni. Il parametro che permette di prevedere quale metallo costituirà l'anodo è il *potenziale di elettrodo*, il quale è definito come la differenza di potenziale tra l'elettrodo di interesse e un elettrodo di riferimento, come ad esempio l'elettrodo standard di idrogeno con potenziale di elettrodo nullo per convenzione. Poiché tale parametro è funzione del potere ossidante dell'elettrolita ma anche della composizione chimica dell'elettrodo di interesse, è possibile classificare gli elementi metallici in una scala elettrochimica: i metalli nobili come il rame e l'oro sono caratterizzati da un potenziale di elettrodo elevato quindi sono molto resistenti alla corrosione; al contrario, il magnesio e l'alluminio ad esempio sono caratterizzati da un valore negativo di tale parametro quindi andranno facilmente incontro all'ossidazione.

In alcuni casi non è necessaria la presenza di due elettrodi differenti poiché un solo elettrodo a contatto con un elettrolita è sufficiente a generare una cella elettrochimica. Questo è il caso, ad esempio, del ferro immerso nell'acido cloridrico o dell'acciaio immerso in acqua areata; in tali casi le reazioni anodica e catodica avvengono nella stessa posizione fisica.

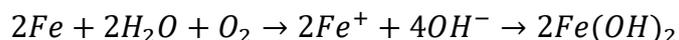
Indipendentemente dalla configurazione della cella elettrochimica e dalla posizione in cui avvengono le reazioni, secondo quanto riportato in [24], le reazioni anodica e catodica devono verificarsi simultaneamente e alla stessa velocità. La forma generale della reazione anodica per un metallo  $M$  può essere espressa come segue:



In cui  $n$  rappresenta il numero di elettroni prodotti durante la reazione di ossidazione. La reazione catodica, al contrario, è una reazione di riduzione in cui gli elettroni vengono "consumati"; le possibili reazioni catodiche che si possono verificare durante la corrosione di un metallo sono state elencate in [24] e qui di seguito riportate:

- Evoluzione dell'idrogeno:  $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$
- Riduzione dell'ossigeno (soluzione acida):  $O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$
- Riduzione dell'ossigeno (soluzione neutra o basica):  $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$
- Riduzione di uno ione metallico:  $M^{3+} + e \rightarrow M^{2+}$
- Deposizione metallica:  $M^{n+} + ne \rightarrow M$

Considerando ad esempio la corrosione dell'acciaio in acqua areata, ovvero acqua ricca di ossigeno poiché esposta all'atmosfera, la reazione complessiva generata dalla somma delle reazioni anodica e catodica può essere espressa come:



L'idrossido ferroso generato è tuttavia instabile quindi ossida in idrossido ferrico, noto comunemente come *ruggine*. Tale fenomeno può essere ulteriormente accentuato in caso di presenza di un sale disciolto nell'acqua areata, come il cloruro di sodio. Gli ioni di sodio e cloro, infatti, aumentano la conducibilità elettrica dell'elettrolita favorendo il trasferimento di elettroni e quindi incrementando la velocità di corrosione.

La corrosione, secondo quanto riportato in [23], si può manifestare in molte forme differenti quindi è importante classificarle in base a tre principali fattori:

- Meccanismo di corrosione: può coinvolgere reazioni chimiche o elettrochimiche;

- Natura dell'ambiente corrosivo: l'ambiente può essere liquido/umido o secco; in quest'ultimo caso, la corrosione avviene a causa della reazione con gas ad alta temperatura;
- Aspetto del metallo corrosivo: la corrosione può essere uniforme sull'intera superficie del metallo o può essere localizzata in piccole aree. In base alla morfologia dell'attacco è possibile identificare otto forme di corrosione in acqua: corrosione uniforme; *pitting*; corrosione nelle fessure; corrosione galvanica; corrosione-erosione; corrosione intergranulare; dissoluzione preferenziale o *dealloying*; frattura assistita dall'ambiente, la quale comprende la tensocorrosione e l'infragilimento da idrogeno. La figura 30, pubblicata in [23], mostra uno schema delle più comuni forme di corrosione.

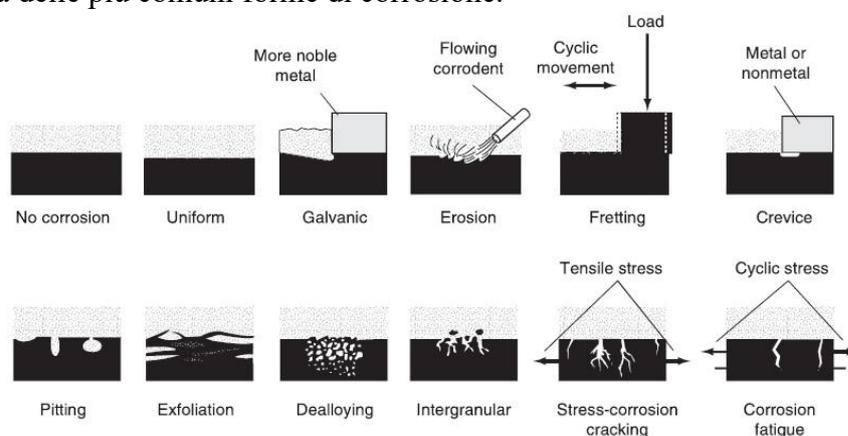


Figura 30-schema delle più comuni forme di corrosione (da testo [24])

Il fenomeno della corrosione può provocare ingenti danni negli impianti industriali, tra i quali i più esposti sono le centrali elettriche, le industrie del petrolio e del gas o gli impianti dedicati ai processi chimici. Tali danni possono innescare una serie di effetti, elencati in [23] e qui riportati: sostituzione dell'attrezzatura corrosa; *over-design* per consentire la corrosione; manutenzione preventiva; arresto dell'impianto a causa di un guasto da corrosione; perdita di efficienza; perdita di prodotti di valore; danneggiamento dell'attrezzatura adiacente a quella interessata dal guasto; problemi di sicurezza poiché i danni da corrosione possono provocare incendi, esplosioni e rilascio di sostanze tossiche o inquinanti. Le conseguenze dei danni da corrosione hanno un elevato impatto sociale ed economico sulle aziende che ne sono affette, motivo per il quale è necessario prevenire e successivamente identificare e caratterizzare l'eventuale insorgenza di tale fenomeno. Secondo quanto riportato in [3], nel 2018 si è stimato che circa  $2 \cdot 10^{12}$  sono stati spesi nelle industrie di tutto il mondo per la gestione della corrosione e che circa  $7 \cdot 10^9$  sono

stati spesi nella valutazione dei danni da corrosione, di cui circa l'81,9% solo nelle industrie di petrolio e gas. Le attività che vengono svolte al fine di controllare il fenomeno della corrosione possono essere suddivise in due principali categorie: le prime si occupano dell'attenuazione e della prevenzione dell'evento; le seconde si occupano della misurazione della corrosività dell'ambiente e della velocità del fenomeno e della identificazione e caratterizzazione dei danni da corrosione.

Secondo quanto riportato in [23], i metodi appartenenti alla prima categoria e maggiormente utilizzati per la gestione preventiva della corrosione sono:

- Selezione del materiale  
Così come già indicato, i metalli e le leghe hanno differenti caratteristiche di resistenza alla corrosione in base alla loro composizione chimica e all'ambiente a cui sono esposti. La velocità dell'attacco corrosivo può essere espressa come:

$$velocità\ della\ corrosione \approx \frac{corrosività\ dell'ambiente}{resistenza\ alla\ corrosione\ del\ metallo}$$

Una volta stabilita una velocità del fenomeno ritenuta accettabile, è necessario individuare la più corretta ed economica possibile combinazione tra corrosività dell'ambiente e resistenza del metallo.

- Rivestimenti  
I rivestimenti per la protezione dalla corrosione hanno l'obiettivo di isolare il metallo sottostante dall'ambiente corrosivo e possono essere suddivisi in due categorie principali: metallici e non metallici.  
I rivestimenti metallici prevedono l'utilizzo di un metallo più nobile, ovvero più resistente alla corrosione, rispetto al metallo su cui sono posti al fine di proteggerlo; un esempio di tale soluzione è l'acciaio stagnato. In alternativa, il metallo della copertura può essere più attivo, ovvero meno resistente, rispetto al metallo base. In questo modo il rivestimento diventa un anodo sacrificale, ossia si corrode in modo preferenziale rispetto al sottostrato che deve proteggere. Un esempio di tale metodo è l'acciaio galvanizzato, in cui lo zinco sacrificale si corrode proteggendo l'acciaio.  
I rivestimenti non metallici includono smalti in porcellana, rivestimenti in vetro o altre coperture in ceramica resistenti alla corrosione.
- Inibitori  
Molte specie chimiche, come i cromati, i silicati e le ammine organiche, sono in grado di inibire la corrosione agendo sul processo anodico o catodico, bloccando la corrente di elettroni o favorendo la formazione di pellicole protettive sulla superficie del metallo note come *strato di passivazione*.

- **Protezione catodica**  
La protezione catodica ha l'obiettivo di arrestare la corrosione invertendo la direzione della corrente elettrica, ovvero forzando il flusso di elettroni ad entrare nel metallo che si desidera proteggere. In questo modo si genera una reazione catodica lì dove precedentemente avveniva una reazione anodica. Tale forma di protezione può essere applicata tramite due diverse modalità: è possibile utilizzare una sorgente di potenza esterna che impone alla corrente elettrica di fluire nella direzione opposta rispetto a quella che seguirebbe naturalmente; in alternativa, è possibile ricorrere ad un accoppiamento galvanico che comporta l'utilizzo di un anodo sacrificale, ad esempio in magnesio o zinco, il quale si corrode al posto del metallo che si desidera proteggere.
- **Design**  
Il rispetto di alcuni accorgimenti durante il design di un componente può comportare una notevole riduzione dell'insorgenza della corrosione. Tale fenomeno si manifesta spesso in fessure, interstizi e zone "morte" in cui l'ambiente risulta maggiormente corrosivo, motivo per il quale la minimizzazione di tali aree durante il processo di design può rivelarsi utile nella prevenzione alla corrosione.

In seguito all'applicazione dei sopra elencati metodi di mitigazione e prevenzione del fenomeno corrosivo, è necessario valutarne l'efficacia tramite il monitoraggio dei componenti di interesse. Le tecniche maggiormente utilizzate per la caratterizzazione dei danni da corrosione sono state pubblicate in [3] e qui di seguito riportate:

- **Chimica analitica**  
Il metodo chimico ha l'obiettivo di verificare l'eventuale presenza di un ambiente corrosivo tramite la misurazione di specifici parametri. È una tecnica spesso utilizzata poiché semplice ed economica, tuttavia fornisce informazioni solo riguardo l'ambiente (metodo indiretto), occorre molto tempo per ottenere i risultati di laboratorio ed è necessario un arresto dell'impianto per poter effettuare le misurazioni.
- **Perdita di peso/equilibrio**  
Tale tecnica ha lo scopo di misurare l'eventuale perdita di peso ed insorgenza di squilibri nel componente di interesse. È un metodo off-line che consente di valutare quantitativamente il danno corrosivo (metodo diretto) e può essere utilizzato per qualsiasi tipo di ambiente, tuttavia è applicabile solo per un danneggiamento di tipo uniforme, può andare incontro ad errori in caso di elevate velocità di corrosione localizzate e infine richiede l'arresto dell'impianto per poter effettuare l'analisi.

- Metodo elettro-chimico  
L'obiettivo di tale metodo è la misurazione della variazione della corrente di elettroni e del potenziale di elettrodo di un anodo accelerato rispetto ad un anodo di riferimento, costituito dallo stesso materiale o da un materiale diverso rispetto a quello accelerato. Tale tecnica diretta ed on-line consente di misurare la perdita di metallo e il corretto valore della velocità di corrosione, ma non è in grado di valutare velocità localizzate, non è applicabile in ambienti non conduttivi e richiede l'arresto dell'impianto per poter essere applicata.
- Resistenza elettrica  
La tecnica della resistenza elettrica ha lo scopo di misurare l'incremento di resistenza dovuto alla riduzione della sezione della sonda a causa della corrosione. È un metodo diretto ed on-line che permette di misurare la perdita di metallo, tuttavia manifesta una bassa sensibilità ai cambiamenti repentini del fenomeno corrosivo e fornisce risultati inaffidabili nella fase terminale di vita della sonda.
- Metodi di analisi non distruttivi (NDT)  
Appartengono a tale categoria metodi come l'*Ultrasonic Testing*, l'*Eddy Current Testing* e l'*Infrared Thermography*, tecnica cardine del presente lavoro di tesi. L'obiettivo di tali metodi è misurare le variazioni dell'energia emessa dal componente di interesse a causa di discontinuità, tra cui anche le variazioni di spessore dovute ai danni da corrosione. Come già indicato, le tecniche non distruttive sono dirette, on-line, generalmente non necessitano il contatto con il componente da ispezionare e non intrusive poiché non richiedono di arrestare l'impianto per poter essere applicate.

Grazie ai numerosi vantaggi che le tecniche non distruttive offrono, queste sono sempre più impiegate nei processi di monitoraggio dei fenomeni corrosivi e di caratterizzazione dei danni esistenti. Nella maggior parte delle ricerche scientifiche condotte riguardo l'applicazione della Infrared Thermography (IRT) al danneggiamento corrosivo, i danni da corrosione sono stati considerati equivalenti a variazioni di spessore molto estese o localizzate, assimilabili a fori dal fondo piatto. Di conseguenza, il principale obiettivo dell'analisi è individuare la riduzione relativa di spessore, la quale è esprimibile come:

$$\delta = \frac{\Delta L}{L} \quad (15)$$

Tale riduzione di spessore può essere correlata all'*absolute temperature contrast* (AC), ovvero alla variazione di temperatura superficiale nel tempo tra un'area danneggiata ( $d$ ) e un'area integra ( $nd$ ):

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{nd}(t)$$

Indipendentemente dall'estensione del difetto, il testo [25] ha riportato le ipotesi su cui si basa la rilevazione di un danno corrosivo nascosto tramite la tecnica IRT applicata ad un metallo, nello specifico in modalità *Pulsed/Long Pulsed*. Tali ipotesi sono:

- Diffusione del calore nel componente per conduzione;
- Stimolazione tramite flusso termico uniforme o localizzato della superficie frontale del campione, ovvero della superficie non corrosa esposta alla vista;
- Entrambe le superfici del componente, sia quella frontale non corrosa che quella posteriore corrosa, scambiano calore con l'ambiente; nella maggior parte dei casi, tuttavia, si considerano accettabili condizioni adiabatiche;
- Condizioni adiabatiche all'interfaccia tra il metallo ed eventuali gas occlusi nei difetti;
- Variazioni delle proprietà termiche del materiale di interesse, a causa delle reazioni chimiche di corrosione, considerate trascurabili;
- Assimilazione dei difetti corrosivi a fori dal fondo piatto.

Approfondendo quanto già mostrato in figura 9, nel caso di corrosione uniforme estesa su un'ampia superficie è possibile considerare la diffusione del calore come monodimensionale (1D). Tale ipotesi può essere applicata, secondo quanto riportato in [25], nel caso in cui la dimensione caratteristica del difetto (diametro  $D$ ) sia almeno sei volte maggiore dello spessore  $L$  di un componente in acciaio o diciassette volte maggiore dello spessore di un componente in lega di alluminio. Considerando la soluzione monodimensionale (8') dell'equazione di Fourier di diffusione del calore in un corpo di spessore finito sottoposto ad un impulso di Dirac, nella pubblicazione [25] è stato diagrammato l'andamento del parametro  $\frac{T}{W'} = \frac{T\rho cL}{Q}$  in funzione del numero di Fourier  $F_0 = \frac{\alpha t}{L^2}$  e della riduzione di spessore relativa. Tale grafico è riportato in figura 31.

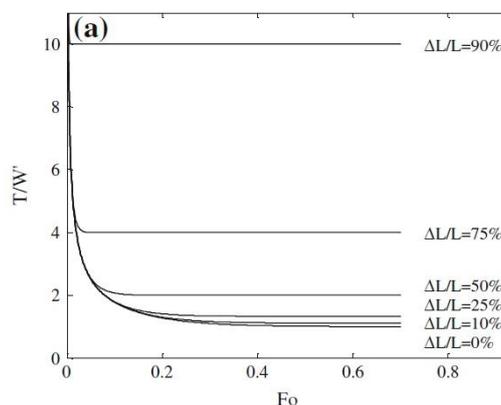


Figura 31-evoluzione della temperatura superficiale normalizzata (da testo [25])

Come è possibile osservare dalla figura 31, l'evoluzione della temperatura superficiale nel tempo mostra un andamento differente al variare della riduzione relativa di spessore del componente, ovvero della gravità del danneggiamento corrosivo. In [25] è stata definita la *general sensitivity of material loss*  $S_L$ , ovvero la sensibilità relativa alla riduzione di spessore. Nel caso specifico della sollecitazione *Pulsed* e della soluzione (8') dell'equazione di Fourier, tale fattore può essere espresso come:

$$S_L^{Dirac} = \frac{\Delta T/T}{\Delta L/L} = -1 + 4\pi^2 F_0 \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2 \pi^2 F_0}}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 F_0}} \approx -1$$

Commentando la precedente definizione e osservando il segno negativo della sensibilità, è possibile affermare che ad ogni 1% di incremento di temperatura superficiale corrisponde circa un 1% di riduzione di spessore tra l'area danneggiata e l'area integra. Per concludere la trattazione del caso monodimensionale è necessario calcolare la soluzione del problema inverso, ovvero stimare la riduzione relativa di spessore a partire dai dati termici acquisiti. Secondo quanto riportato nei testi [25-26], il parametro  $\delta$  in caso di diffusione del calore 1D in presenza di un difetto corrosivo molto esteso può essere espresso come:

$$\delta_{plate}^{1D}(t) = 1 - \frac{T_{nd}(t)}{T_a(t)} = \frac{C_{run}}{1 + C_{run}}$$

In cui  $C_{run} = \frac{\Delta T(t)}{T_{nd}(t)}$  è noto come *running temperature contrast*. Considerando la stima della riduzione di spessore, ottenuta tramite il calcolo del parametro  $\delta_{plate}^{1D}$ , il testo [26] ha riportato nel grafico in figura 32 l'evoluzione nel tempo della temperatura superficiale (linea tratteggiata) in seguito ad un impulso di Dirac e la corrispondente stima calcolata (linea continua) della riduzione di spessore.

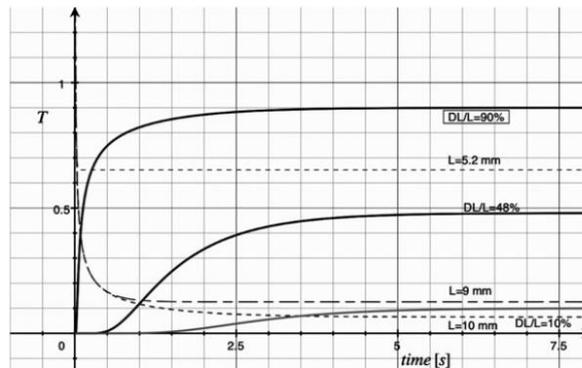


Figura 32-temperatura superficiale vs stima della riduzione di spessore (da testo [26])

Come è possibile notare, la stima del danneggiamento corrosivo dipende dall'istante di osservazione quindi è possibile calcolare anche l'accuratezza della stima in funzione del tempo. Nel testo [25] è stato pubblicato il grafico in figura 33, raffigurante l'andamento dell'accuratezza  $\mu$  in funzione del numero di Fourier.

$$\mu = \frac{\delta_{plate}^{1D}(t)}{\Delta L/L}$$

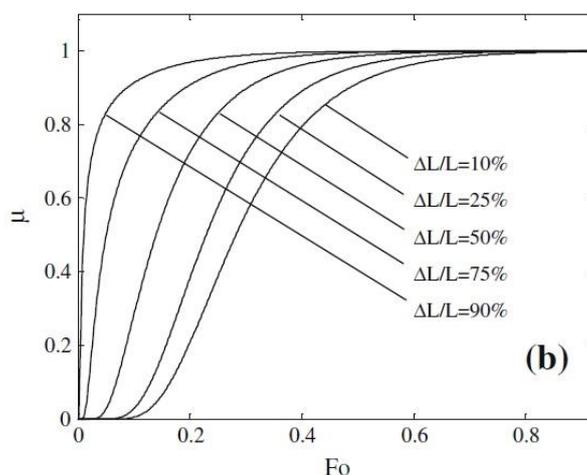


Figura 33-accuratezza della stima della riduzione di spessore nel tempo (da testo [25])

Osservando il grafico è possibile notare che, in ipotesi di processo adiabatico e diffusione del calore monodimensionale, l'accuratezza nella rilevazione di difetti corrosivi nascosti aumenta nel tempo.

Nel caso di difetti di dimensione ridotta, così come mostrato in figura 9, la diffusione del calore in direzione perpendicolare alla direzione di sollecitazione provoca una riduzione del segnale termico di risposta nel tempo. In tale caso occorrerebbe utilizzare un modello di diffusione del calore bidimensionale (2D) o tridimensionale (3D) per poter analizzare il fenomeno. Secondo quanto riportato in [25], tuttavia, è possibile stimare la riduzione di spessore provocata da un danno di dimensioni ridotte tramite la soluzione del problema come se fosse 1D e tramite l'utilizzo di un coefficiente numerico  $\eta(D/L)$ . Tale coefficiente è calcolabile sperimentalmente ed è dipendente dal rapporto geometrico tra l'approssimativa estensione laterale del difetto  $D$  e lo spessore nominale del campione  $L$ . Il testo [25] ha pubblicato il grafico in figura 34, rappresentante l'andamento del parametro  $\eta$  calcolato sperimentalmente rispetto al rapporto  $D/L$ . Come è possibile notare, all'aumentare dell'estensione  $D$  del difetto, il parametro  $\eta$  tende ad assumere valore unitario riducendo il problema 3D a un problema 1D.

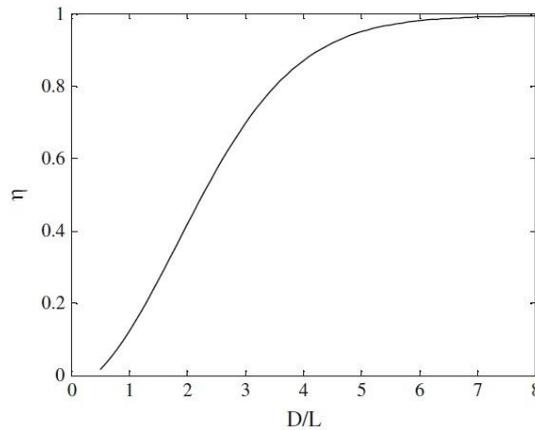


Figura 34-coefficiente di correzione del problema 3D (da testo [25])

La stima della riduzione dello spessore in corrispondenza di difetti corrosivi di estensione ridotta può essere espressa come:

$$\delta^{3D} = \frac{\delta^{1D}(F_0 = 0.68)}{\eta(D/L)}$$

In cui  $F_0 = 0.68$  corrisponde all'istante di osservazione, stabilito in modo tale che sia sufficiente a consentire il raggiungimento di un segnale termico elevato, ma non superiore all'istante in cui i difetti di dimensioni ridotte iniziano a non essere più identificabili a causa della dispersione del calore in direzione trasversale.

In [25], infine, è riportato un procedimento alternativo per il quale è possibile stimare la riduzione dello spessore in corrispondenza di difetti limitatamente estesi grazie all'utilizzo di un'equazione ottenuta sperimentalmente:

$$\delta^{3D} = A \cdot \exp \left[ B \left( \frac{D_{app}}{L} \right) + C \sqrt{\frac{D_{app}}{L}} + D \right]$$

In cui  $D_{app}$  rappresenta l'estensione apparente del difetto,  $L$  indica lo spessore nominale del campione non corrosivo ed infine i parametri  $A, B, C, D$  sono stati calcolati sperimentalmente in funzione del massimo valore registrato di  $C_{run}$ . Tale metodo consente di stimare la riduzione di spessore nei casi 3D di diffusione del calore con un'accuratezza superiore al 80%.

## 2.2 La strumentazione

L'analisi del fenomeno della corrosione mediante tecnica termografica attiva ottica è stata eseguita presso i laboratori *Opto-electronic & Glazing* del Centro Ricerche Fiat S.C.p.A. di Torino. La ricerca sperimentale è stata condotta ispezionando campioni corrosi in camera salina per differenti periodi di tempo, in modo tale da ottenere diversi gradi di danneggiamento. I campioni che sono stati sottoposti ad attacco corrosivo e successivamente analizzati hanno spessore nominale pari a 0,8 mm e sono costituiti da acciaio all'alluminio calmato a grana fine, i cui principali elementi di lega sono riportati nella seguente tabella 3 in termini di percentuali in massa del prodotto:

Tabella 3-composizione chimica dell'acciaio utilizzato

Carbonio	Manganese	Fosforo	Zolfo	Alluminio
$\leq 0.08$	$\leq 0.50$	$\leq 0.025$	$\leq 0.020$	$\geq 0.015$

Prima di inserire i provini in camera salina, una delle due superfici di ogni campione è stata ricoperta da nastro adesivo isolante al fine di consentire l'attacco corrosivo solo sulla superficie opposta non protetta. Le figure 35, 36, 37, 38 mostrano le superfici anteriore (dopo aver rimosso il nastro isolante) e posteriore dei campioni analizzati, caratterizzati da un differente grado di danneggiamento. Nello specifico, in figura 35 è mostrato il campione non corrosivo, in figura 36 è rappresentato il campione sottoposto ad ambiente corrosivo in camera salina per 2 settimane, in figura 37 è mostrato il campione corrosivo per 4 settimane in camera salina ed infine in figura 38 è rappresentato il campione sottoposto all'ambiente corrosivo per 6 settimane.

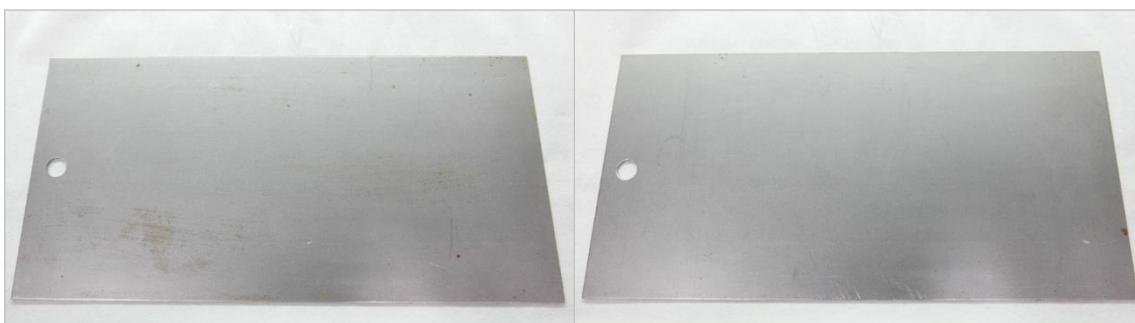


Figura 35-superfici anteriore (sx) e posteriore (dx) del campione non corrosivo

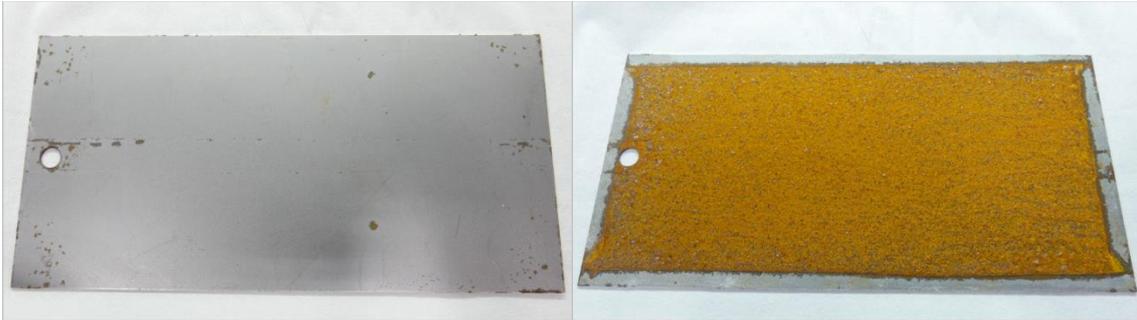


Figura 36-superfici anteriore (sx) e posteriore (dx) del campione corroso per 2 settimane in camera salina

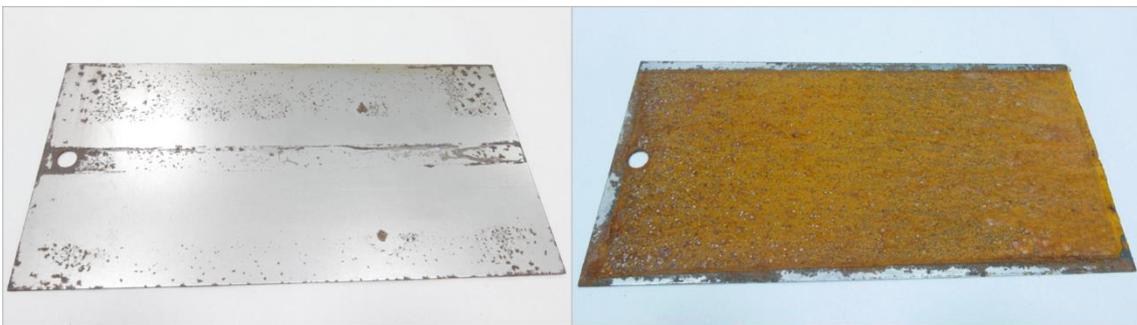


Figura 37-superfici anteriore (sx) e posteriore (dx) del campione corroso per 4 settimane in camera salina



Figura 38-superfici anteriore (sx) e posteriore (dx) del campione corroso per 6 settimane in camera salina

## 2.2.1 La camera salina

La prova di corrosione in nebbia salina è una delle prove di corrosione descritte dalla Norma Fiat 50180 del Fiat Group Automobiles, le quali hanno lo scopo di “*simulare, in tempi sufficientemente brevi, effetti della stessa natura di quelli riscontrabili su materiali, rivestimenti, particolari e componenti durante l’esercizio su autoveicolo in ambienti*”

*corrosivi*”. Il grado di severità di ciascuna prova è funzione dell’aggressività del mezzo corrosivo prescelto e della durata della prova. Nel caso della prova in nebbia salina, il mezzo corrosivo è costituito da una soluzione di acqua e cloruro di sodio. L’elemento principale della strumentazione è costituito dalla cabina, mostrata in figura 39.



Figura 39-camera salina

La cabina costituisce la vera e propria camera salina poiché al suo interno viene nebulizzata una soluzione aggressiva al fine di corrodere i campioni di interesse. È internamente rivestita da materiale inerte, all’esterno è ricoperta da uno strato coibente ed è caratterizzata da un coperchio a tenuta stagna. La temperatura dell’ambiente al suo interno è controllata da un riscaldatore in modo da assumere un valore costante pari a 35°C e l’umidità relativa è impostata da un saturatore di umidità ad un valore pari al 95% ÷ 98%, anche se in realtà si raggiungono condizioni di saturazione.

Il procedimento seguito per l’esecuzione della prova di nebbia salina prevede diversi passaggi di seguito elencati:

- Il primo passo consiste nella preparazione della soluzione salina, la quale viene ottenuta miscelando acqua e il 5% di cloruro di sodio in un fusto di grandi dimensioni. Dopo aver agitato la soluzione, è necessario farla decantare per uno o due giorni al fine di permettere il completo scioglimento del sale.
- È importante eseguire l’analisi del pH della soluzione ottenuta, il quale deve assumere un valore compreso nell’intervallo 6,5 ÷ 7,2. Nel caso in cui il valore

misurato fosse al di fuori dell'intervallo consentito dalla norma, allora occorrerebbe eseguire delle azioni correttive: in caso di  $\text{pH} < 6,5$  allora sarebbe necessario aggiungere della soda caustica alla soluzione; in caso di  $\text{pH} > 7,2$  sarebbe necessario fornire dell'acido cloridrico. È inoltre di grande importanza valutare la concentrazione salina della soluzione ottenuta tramite l'utilizzo di un rifrattometro. Tale parametro deve essere compreso, secondo quanto indicato dalla norma, nell'intervallo  $4,5 \div 5,5$ .

- Successivamente la soluzione viene trasferita nel serbatoio della cabina e riscaldata tramite un riscaldatore fino alla temperatura di  $50^{\circ}\text{C}$ .
- Tramite un ugello diffusore, la soluzione viene nebulizzata all'interno della camera salina dove raggiunge una temperatura di  $35^{\circ}\text{C}$ . Poiché è necessario evitare l'impatto diretto del getto sui pezzi esposti, il flusso viene orientato verso il fondo della cabina da cui viene reindirizzato verso la rastrelliera contenente i campioni e verso il coperchio della cabina. Raggiunto il coperchio, il flusso viene nuovamente guidato verso il fondo della cabina in modo da ottenere una distribuzione uniforme della soluzione in tutta la camera.
- L'ultimo passaggio consiste nell'analisi del flusso raccolto dal pluviometro posto sulla rastrelliera. Tale strumento è costituito da un imbuto di vetro e ha lo scopo di valutare la portata di soluzione salina, la quale viene impostata tramite un apposito flussimetro. Secondo quanto indicato dalla norma, la portata deve essere compresa nell'intervallo  $1 \div 2 \text{ ml/h}$ . Infine, occorre valutare il  $\text{pH}$  e la concentrazione salina della soluzione raccolta al fine di verificare la corrispondenza con i valori misurati prima della nebulizzazione e il rispetto dei valori forniti dalla norma.

### 2.2.2 Il microscopio ottico metallografico rovesciato

Le analisi micrografiche delle lamiere corrose in camera salina sono state eseguite presso il laboratorio *Microscopy* del Centro Ricerche Fiat, al fine di valutare la variazione dello spessore residuo dei campioni corrosi rispetto al campione non corrosivo. Le misurazioni sono state effettuate tramite un microscopio ottico metallografico rovesciato Reichert-Jung MeF3 M.1, mostrato in figura 40. Tale strumento è dotato di una macchina fotografica  $4'' \times 5''$  incorporata nello stativo e di un sistema per la riflessione di figure lineari sia in fase di osservazione che con l'uso della macchina fotografica. Per tutti i possibili ingrandimenti regolabili sullo strumento, il sistema di riflessione consente di proiettare delle barre di misurazione e relative cifre in qualunque punto entro il formato dell'immagine. Grazie a tale funzione è possibile misurare lo spessore residuo del

campione analizzato con precisione sufficientemente alta. In tabella 4 sono riportati alcuni dati ottici riguardo l'osservazione con oculare e l'osservazione con macchina fotografica.

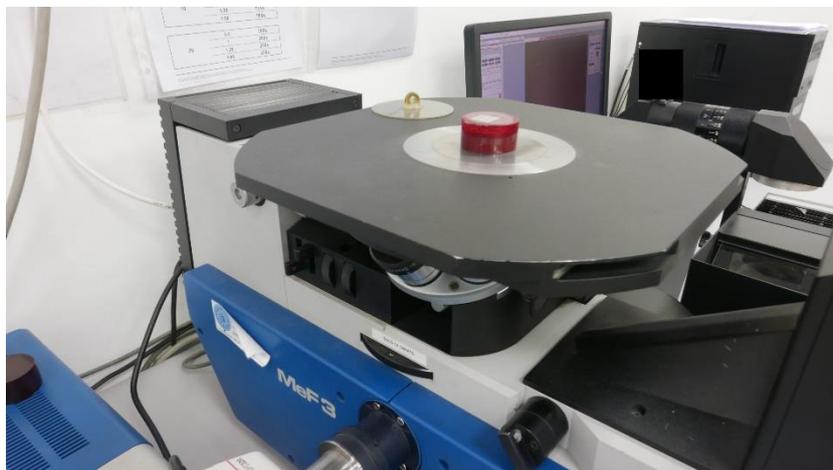


Figura 40-microscopio ottico metallografico rovesciato

Tabella 4-parametri dell'osservazione con oculare e con camera fotografica

	Variatore di ingrandimenti	0,8x/1x/1,25x/1,6x
Osservazione Oculare 10x	Ingrandimento	16x ÷ 1600x
	Campo oggetto	15mm ÷ 0,15mm
Camera fotografica 4"x5"	Scala immagine	12,8:1 ÷ 1280:1
	Campo oggetto	12mm ÷ 0,12mm

Per poter eseguire l'analisi micrografica dei campioni corrosi, è prima necessario rimuovere lo strato di ossido e ricavare da ogni campione di interesse una piccola porzione di lamiera con dimensioni compatibili con la strumentazione. Tale piccola sezione del campione viene inoltre inglobata in resina fenolica tramite una inglobatrice a caldo al fine di ottenere formelle di diametro pari a 25mm, 40mm o 50mm in base alle dimensioni della porzione. In figura 41 sono mostrate le formelle ottenute a partire dai campioni corrosi per 2 settimane e 4 settimane in camera salina. L'inglobatrice a caldo permette di inglobare i campioni di interesse in resina fenolica tramite un procedimento della durata massima di 11 minuti in cui viene applicata una pressione compresa tra 75 bar e 225 bar e una temperatura di 180°C. La resina è generalmente di colore rosso per i componenti in acciaio e trasparente per i componenti in alluminio o per i quali si sospettano eventuali svergolamenti a causa dell'elevata pressione esercitata.

Successivamente le formelle vengono lucidate tramite un macchinario semiautomatico o un macchinario automatico, il quale consente di effettuare la lucidatura con della carta abrasiva, con un panno o con della pasta abrasiva.

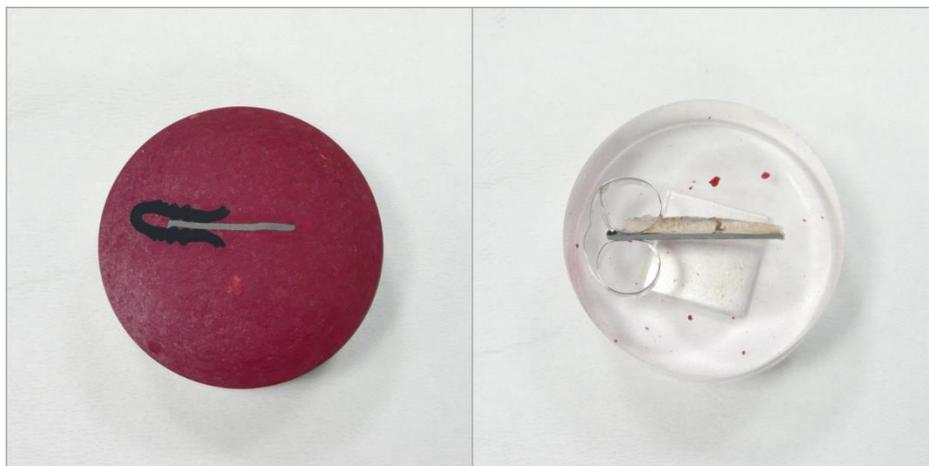


Figura 41-formelle ottenute dai campioni corrosi per 2 settimane (sx) e 4 settimane (dx) in camera salina

Una volta ottenute le formelle lucidate, è possibile procedere con l'analisi micrografica al microscopio ottico metallografico rovesciato. Il campione viene appunto rovesciato sul piano di osservazione affinché risulti sempre a fuoco e può essere ispezionato con diversi ingrandimenti. Tramite l'utilizzo di un righello interno tarato, la cui immagine viene proiettata su quella del campione analizzato, è infine possibile misurare lo spessore della lamiera in più punti con l'obiettivo di fornire un intervallo di spessori residui rilevati.

### 2.2.3 MultiDES System Laser

Le prove sperimentali di termografia attiva sono state condotte utilizzando il *MultiDES System*, un sistema ideato e prodotto dall'azienda Diagnostic Engineering Solutions S.r.l. per l'esecuzione delle analisi termografiche su materiali di diversa natura. Tale sistema, secondo quanto riportato nel manuale DES [27], si presenta in diverse configurazioni in base alla sorgente di eccitazione ottica scelta. Possono essere impiegate le lampade alogene, la torcia flash o il laser; nel corso della ricerca sperimentale presentata in questo lavoro di tesi, è stata utilizzata una sorgente laser in fibra. Il MultiDES System Laser è costituito da quattro elementi principali, mostrati in figura 42 e di seguito elencati.

- Unità centrale, la quale è costituita da: un PC industriale, un monitor, tastiera e mouse, una centralina elettronica di controllo. La centralina elettronica, nello specifico, consente di generare differenti forme d'onda di eccitazione e di acquisire i dati termografici registrati dalla termocamera.
- Sottosistema laser, il quale comprende: la torcia laser, il generatore laser, la testa di scansione, il beam expander e lo stativo.
- Sottosistema termocamera, il quale è composto dalla termocamera e dallo stativo.
- Cabina laser, ovvero un box dotato di tende protettive a norma.



*Figura 42-strumentazione MultiDES System Laser*

Nei seguenti paragrafi sono riportate nel dettaglio le caratteristiche della termocamera e del relativo software di gestione FLIR ResearchIR Max, della sorgente laser e del relativo software progettato per il suo controllo MultiDES R3.0 ed infine del software di analisi dei dati termografici IRTA.

### 2.2.3.1 La termocamera

Nel corso delle prove sperimentali è stata utilizzata una termocamera FLIR X6540sc con sensore di tipo raffreddato ad alte prestazioni. Lo strumento in questione è mostrato in figura 43 e le sue caratteristiche sono elencate in tabella 5.



Figura 43-termocamera FLIR X6540sc (da manuale FLIR [28])

Tabella 5-caratteristiche termocamera FLIR X6540sc (da manuale FLIR [28])

Rilevatore	Cooled Indium Antimonide (InSb)
Intervallo spettrale	1,5 ÷ 5,1 $\mu\text{m}$
Pitch	15 $\mu\text{m}$
Thermal Sensitivity	< 25 mK (18 mK typical)
Intervallo standard di temperatura	5°C ÷ 300°C
Accuratezza	$\pm 1^\circ\text{C}$ oppure $\pm 1\%$ del valore letto
Campo di vista con lente	11°x8,8°
Integration Time	160 ns ÷ 20000 $\mu\text{s}$
Frame rate (full frame)	125 Hz
Dimensione immagine max (full frame)	640x512 pixel
Frame rate max (subwindow)	4011 Hz
Dimensione subwindow (per frame rate max)	64x8 pixel
Image data	14 bit

Lo scopo della termocamera è di rilevare e registrare la radiazione infrarossa emessa dal campione sollecitato tramite eccitazione laser. La termocamera avvia l'acquisizione grazie ad un controllo trigger generato dal modulo laser, con cui lo strumento è sincronizzato, in modo tale da rilevare i dati termografici per tutta la durata della stimolazione. Per la gestione della termocamera è stato utilizzato il software ResearchIR Max, proprietario dell'azienda FLIR. Quest'ultimo consente di stabilire i parametri fondamentali della registrazione termografica e successivamente di visualizzare la sequenza memorizzata, raffigurante la variazione nel tempo del parametro termico. Le principali funzioni di tale software di gestione sono di seguito elencate:

- Dopo aver avviato il software e collegato la termocamera, è possibile impostare i parametri della registrazione tramite la funzione *Record Setting*. Tali parametri sono ad esempio il nome del file, la durata della sequenza registrata espressa in

secondi e il massimo numero di frame memorizzabili. Quest'ultimo parametro deve essere stabilito in base alle direttive del software di analisi dei risultati, ovvero del software di post-processamento IRTA.

- Al fine di ottenere un parametro termico registrato quanto più possibile corrispondente alla temperatura, è possibile definire i parametri del corpo analizzato, dell'ambiente in cui si svolge la prova e degli elementi ottici esterni. Riguardo i primi, è possibile fornire i valori dell'emissività, della distanza tra la termocamera e il corpo ed infine della temperatura riflessa; riguardo i secondi, possono essere indicati i valori della temperatura ambiente e dell'umidità relativa; infine è possibile stabilire la temperatura e il coefficiente di trasmissione degli elementi ottici esterni.
- Per selezionare la finestra di visualizzazione desiderata è necessario utilizzare la funzione *Camera Control-Window*, la quale consente di stabilire la dimensione e la posizione della regione di interesse su cui si vuole concentrare la registrazione. La dimensione della finestra selezionata influenza il massimo frame rate utilizzabile durante la registrazione, ovvero il massimo numero di frame rilevabili al secondo. Per poter indicare il valore scelto di frame rate inferiore o uguale al massimo e adeguato alla prova termografica che si sta conducendo, è necessario ricorrere alla funzione *Camera Control-Preset*. In tale sezione del software è possibile stabilire non solo il frame rate dell'acquisizione, ma anche l'integration time IT e i valori estremi dell'intervallo di temperatura/parametro termico rilevabile. Tali tre parametri sono correlati tra loro, infatti ad un ampliamento dell'intervallo termico rilevabile e ad un innalzamento del suo estremo superiore corrisponde una riduzione dell'IT e un aumento del massimo frame rate. È importante stabilire il corretto intervallo termico rilevabile al fine di evitare che il segnale registrato dalla termocamera vada in saturazione, ovvero che i suoi valori raggiungano livelli esterni all'intervallo selezionato. In tale caso la sequenza registrata sarebbe inutilizzabile ai fini dell'analisi termografica con metodi di post-processamento.
- Dopo aver impostato tutti i parametri elencati, è possibile procedere con la stimolazione del campione tramite sorgente laser. Grazie ad una sincronizzazione della termocamera con il modulo laser, la registrazione viene avviata automaticamente poco prima dell'emissione del fascio laser. Una volta ottenuta la sequenza registrata in formato ptw, è possibile osservarla nel software ResearchIR al fine di eseguire un'analisi qualitativa. In figura 44 è riportato un esempio di visualizzazione di una registrazione termografica. Sono stati selezionati due cursori, uno nella regione riscaldata dal laser e uno nella regione di fondo, le cui evoluzioni termiche sono riportate nel temporal plot sulla destra.

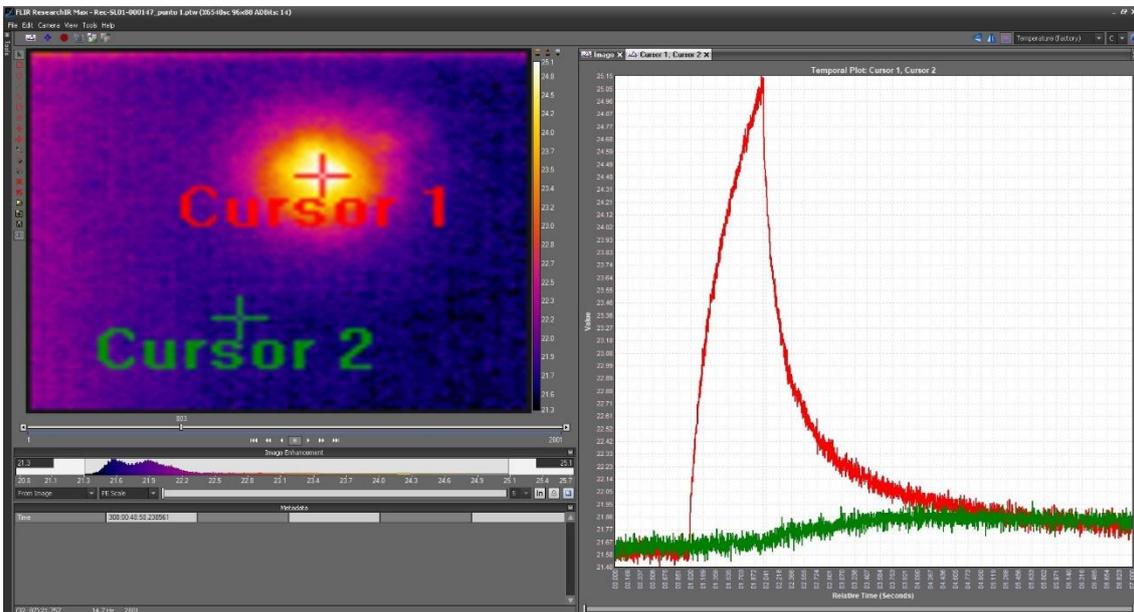


Figura 44-esempio di visualizzazione della sequenza termografica

### 2.2.3.2 Il modulo laser

La stimolazione ottica dei campioni durante le prove di termografia attiva è stata eseguita tramite un modulo laser dotato di una Laser Control Unit (LCU), un laser in fibra, una testa di scansione e un beam expander 2-8x. In tabella 6 sono elencate le caratteristiche della centralina elettronica LCU e del laser utilizzato, il quale è del tipo YLP-V2 Series 1mJ energy Pulsed Iiterbium Fiber Laser.

Tabella 6-caratteristiche del modulo laser (da manuale DES [27])

<i>Laser in fibra</i>	
Modello	YLP-V2-1-100-30-30
Potenza massima nominale	30 W
Dimensione del fascio	6 ÷ 9 mm
<i>Centralina elettronica LCU</i>	
Forma d'onda	impulso singolo / treno di impulsi
Ripetizioni	1 ÷ 65025
Durata dell'impulso	5 ms ÷ 10000 s (step 1 ms)
Modulazione di potenza	11 ÷ 100% (step 1%)

Per gestire il modulo laser nel corso delle prove sperimentali è stato utilizzato il software MultiDES R3.0, di proprietà dell'azienda DES. Tale software consente di verificare lo stato del sistema laser e di definire la forma e i parametri dell'onda di sollecitazione. Nello specifico, la sezione *L-H Setting* del programma è dedicata al controllo della sorgente di stimolazione laser ed è suddivisa in tre schede aventi funzioni differenti:

- Control

Così come indicato nel manuale [27], l'ambiente *Control* consente di impostare la modalità di avvio della registrazione termografica di competenza dalla termocamera, la quale può essere manuale o automatica con trigger. È inoltre possibile impostare il ritardo tra l'inizio dell'acquisizione e l'avvio della stimolazione laser, al fine di permettere alla termocamera di registrare già prima dell'inizio della sollecitazione termica. Nella scheda *Control* è anche possibile verificare lo stato del sistema tramite delle apposite spie, le quali indicano l'eventuale presenza di allarmi legate al modulo laser.

- Laser

Nella scheda *Laser* è possibile definire la frequenza del laser, la forma dell'onda di eccitazione e i parametri che la caratterizzano. Nel caso in cui si decidesse di utilizzare un singolo impulso o una sollecitazione a step, sarebbe necessario fornire la durata e la potenza percentuale della stimolazione. Un esempio di tale forma di eccitazione e dei parametri ad essa correlati è mostrato in figura 45 (sx). Nel caso in cui si decidesse di utilizzare un treno di impulsi, ovvero un'onda quadra, allora sarebbe necessario indicare il periodo ed il numero di impulsi, il numero di cicli ed infine la potenza percentuale della stimolazione. Un esempio di tale forma d'onda quadra è riportato in figura 45 (dx).

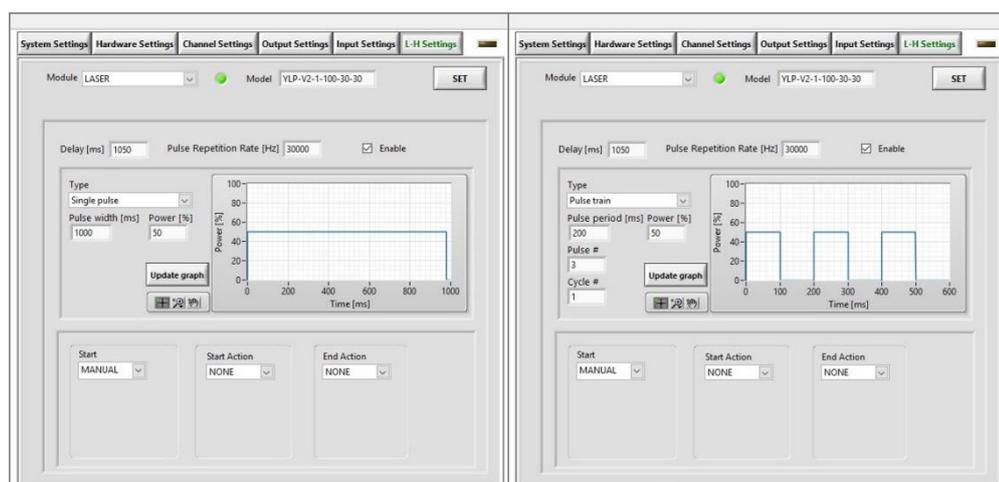


Figura 45-esempio di sollecitazione a step (sx) e ad onda quadra (dx)

- Head

L'ambiente *Head*, così come indicato nel manuale DES [27], consente di abilitare la movimentazione della testa di scansione e di impostare il tracciato che il fascio laser deve seguire durante la prova termografica, il quale viene definito punto per punto tramite l'ausilio di coordinate cartesiane.

Dopo aver configurato il sistema fornendo al software tutti i parametri di cui necessita e dopo aver verificato il corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza, è possibile avviare la stimolazione laser e armare i canali trigger tramite l'apposito tasto *Play*.

### 2.2.3.3 IRTA Software

L'analisi dei dati termografici acquisiti dalla termocamera è stata effettuata tramite il software IRTA (InfraRed Thermography Analysis) di proprietà della DES. Così come riportato nel manuale [27], il software è in grado di importare, trasformare in formato *irt* e successivamente indagare le sequenze in formato *seq*, *ptw* e *fcf* generate da qualsiasi termocamera FLIR. È importante sottolineare che le sequenze *ptw* possono essere importate solo se il numero totale di frame è inferiore a 3000, motivo per il quale tale parametro deve essere indicato al software di gestione della termocamera ResearchIR. Il software di post-processamento IRTA è costituito da differenti moduli in base alla tecnica di indagine termografica che è stata adottata nel corso della prova sperimentale; nello specifico, i dati analizzabili possono essere stati ottenuti tramite indagine Lock-In, Transient (Pulsed o Step Heating) o TSA. La sequenza *ptw* importata viene trasformata in una sequenza di immagini termografiche, ciascuna delle quali corrisponde ad un frame della registrazione originale e in ciascuna delle quali ad ogni pixel è associato il corrispondente valore del parametro termico rilevato dalla termocamera. Grazie ai pulsanti Play/Pause è possibile riprodurre l'intera sequenza generata; grazie invece al contatore e alla barra dei frame è possibile visualizzare il termogramma corrispondente ad un singolo frame di interesse e passare agevolmente da un termogramma all'altro. Il software IRTA consente inoltre di tracciare ed osservare l'evoluzione del parametro termico nel tempo in corrispondenza di uno specifico pixel della finestra di visualizzazione tramite lo strumento *Spot Track*. Analizzando la traccia temporale ottenuta è possibile stabilire precisamente il frame in corrispondenza del quale il campione ha iniziato a rispondere alla sollecitazione o in corrispondenza del quale il parametro termico ha raggiunto il valore massimo.

Le prove sperimentali eseguite nel corso dell'attività di ricerca presentata in questo lavoro di tesi sono state condotte con sollecitazioni in modalità Lock-In e Step Heating. Per tale

motivo, le analisi successivamente effettuate tramite software IRTA sulle sequenze registrate sono state impostate con tecniche Lock-In e Transient. Di seguito sono riportate le caratteristiche del procedimento che occorre seguire e dei risultati ottenuti da tali due metodologie di analisi.

- Lock-In Analysis tramite software IRTA

Nel caso di sollecitazione in modalità Lock-In, l'onda termica eccitatrice è un'onda quadra che genera una risposta termica del materiale della tipologia mostrata nella scheda in basso della figura 46. In tale immagine è riportata la traccia temporale (spot track) del parametro termico, valutato in corrispondenza del pixel posto al centro dell'area sollecitata dal laser tramite un'onda costituita da tre impulsi.

Dopo aver osservato lo spot track e la sequenza di termogrammi e dopo aver individuato il frame in corrispondenza del quale si manifesta la prima risposta del materiale, è necessario calcolare il numero totale di frame da sottoporre all'analisi Lock-In. Per poter ottenere tale valore è sufficiente moltiplicare il numero di impulsi dell'onda eccitatrice per il periodo di ciascun impulso e infine per il frame rate di acquisizione della termocamera. L'analisi Lock-In deve quindi essere impostata specificando: il primo frame dell'intervallo da analizzare, corrispondente a quello in cui si manifesta la prima risposta del materiale alla sollecitazione; l'ultimo frame dell'intervallo, ottenuto sommando al primo il numero totale dei frame di interesse. La finestra di analisi Lock-In del software IRTA richiede inoltre di specificare la frequenza di modulazione dell'onda quadra di sollecitazione. È stata scelta tale forma poiché l'analisi condotta sulla risposta del materiale ad un'onda quadra permette di effettuare un'analisi multi-frequenziale, ovvero di ottenere con un'unica prova informazioni riguardo più armoniche. Oltre all'armonica principale (I) caratterizzata da una frequenza pari a quella di eccitazione, il software calcola automaticamente le informazioni della terza (III) e della quinta armonica (V), le quali sono caratterizzate da frequenza pari a tre volte e cinque volte la frequenza della prima. La finestra di analisi Lock-In del software è mostrata nella scheda sulla destra della figura 46.

Avviando l'analisi, il software genera sei diverse immagini: tre immagini di ampiezza, una per ciascuna delle tre armoniche indagate; tre immagini di fase, una per ognuna delle tre armoniche analizzate. Le immagini in questione, come già spiegato nel primo Capitolo, riportano pixel per pixel i valori dell'ampiezza o della fase dell'onda termica di risposta del materiale alla sollecitazione. Le immagini generate dal software possono, infine, essere valutate quantitativamente selezionando delle opportune ROI (Region of Interest) lineari o di area in corrispondenza delle quali rilevare i valori assunti dall'ampiezza o dalla fase. Nello specifico, selezionando una ROI lineare è possibile estrapolare il profilo dei

valori di ampiezza o fase tracciato in corrispondenza dei pixel attraversati dalla ROI; selezionando un'area di interesse, invece, è possibile acquisire il valore medio, la deviazione standard ed i valori minimo e massimo assunti dall'ampiezza o dalla fase all'interno della ROI selezionata.

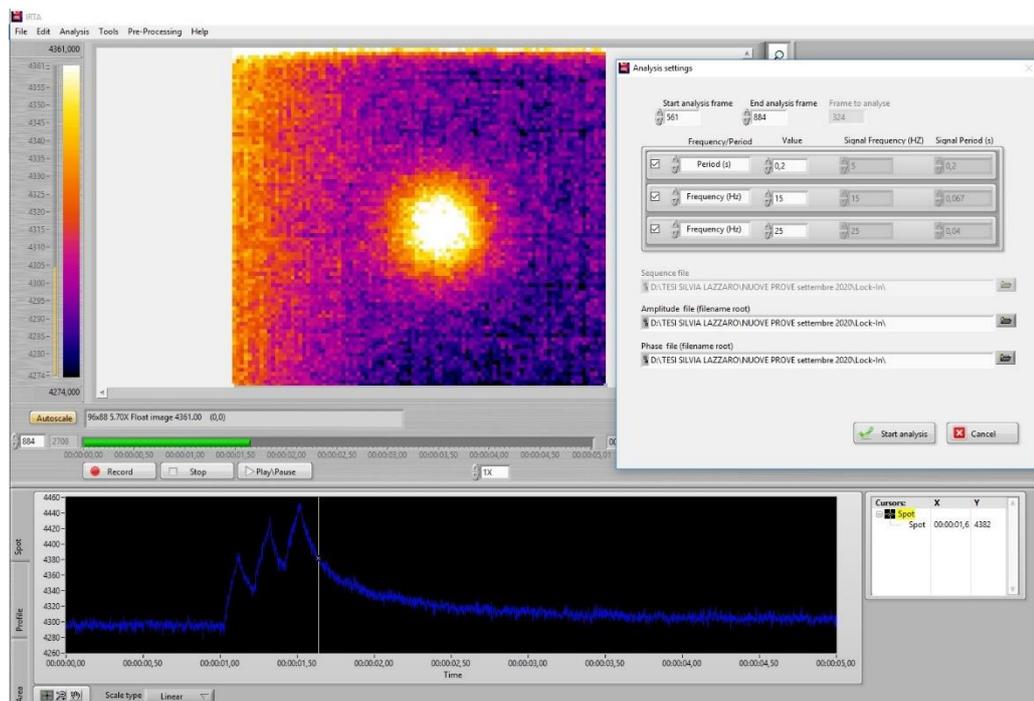


Figura 46-esempio di analisi Lock-In su software IRTA

- Transient (Cooling) Analysis tramite software IRTA  
 Nel caso di sollecitazione in modalità Pulsed o Step Heating, il software IRTA dispone di un'apposita finestra di analisi Cooling la quale fornisce risultati sulla base di un doppio metodo di post-processamento. Dopo aver analizzato la sequenza dei termogrammi e lo spot track, la cui forma tipica è riportata nella finestra in basso della figura 47, è possibile stabilire l'intervallo dei frame che si desidera analizzare. Tramite questa metodologia di indagine è consentito ispezionare qualsiasi intervallo, come ad esempio la fase di riscaldamento del campione sollecitato o la fase di raffreddamento in seguito alla sospensione dell'eccitazione laser. Senza alcun vincolo imposto dal software, è necessario fornire alla scheda di analisi solo il frame iniziale e il frame finale dell'intervallo di interesse. Un esempio della finestra di analisi Cooling del software IRTA è riportato in figura 47.

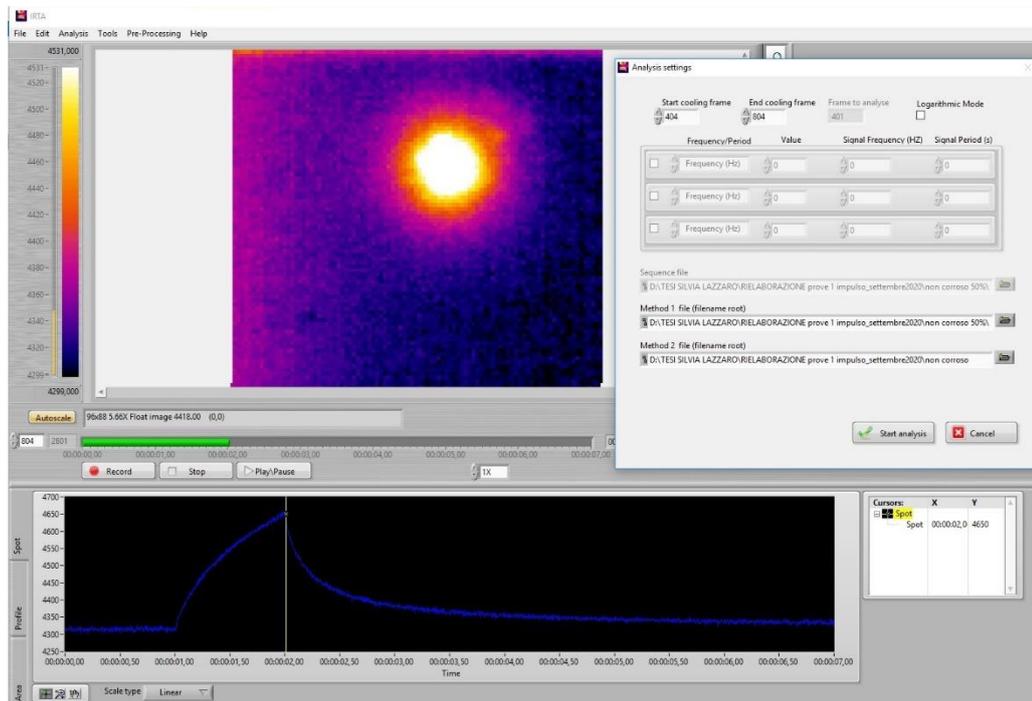
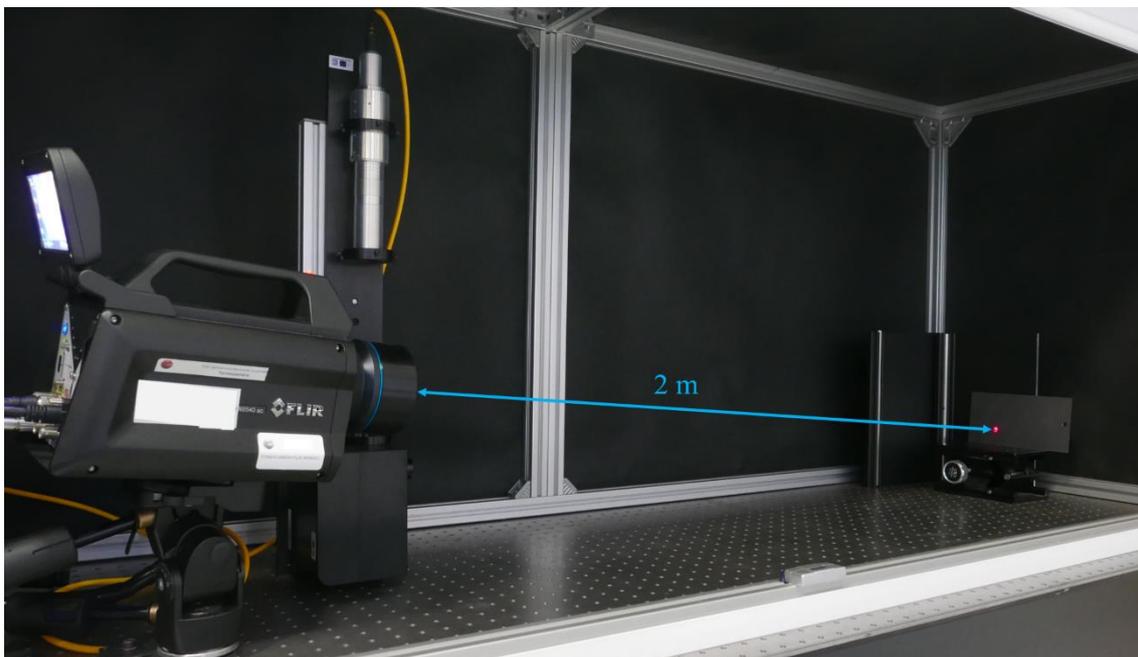


Figura 47-esempio di analisi Cooling su software IRTA

Dopo aver avviato l'analisi, il software genera due immagini ottenute tramite due differenti algoritmi di post-processamento della sequenza termografica. Tali immagini forniscono informazioni quantitative pixel per pixel, le quali possono essere estrapolate selezionando delle opportune ROI lineari o di area in corrispondenza delle quali acquisire i relativi valori numerici generati dal software. Nello specifico, il metodo 1 di elaborazione calcola per ogni pixel la pendenza della corrispondente curva di evoluzione termica nel tratto di riscaldamento o raffreddamento analizzato; il metodo 2 calcola invece il coefficiente di determinazione  $R^2$  della curva di evoluzione termica nell'intervallo di frame elaborato.

## 2.3 La procedura sperimentale

Le prove sperimentali di termografia attiva condotte con l'ausilio della strumentazione DES sono state eseguite in riflessione, ovvero posizionando la sorgente di eccitazione laser e la termocamera dalla stessa parte rispetto al campione ispezionato. Nello specifico, si è deciso di sollecitare ed analizzare la superficie non corrosa della lamiera, opposta a quella corrosa ed indicata come anteriore nelle figure 35-38. In figura 48 è mostrata la configurazione sperimentale adottata nel corso delle diverse prove eseguite.



*Figura 48-configurazione sperimentale adottata nel corso delle prove*

Il primo passo della procedura di prova consiste nel corretto posizionamento del campione rispetto alla sorgente di eccitazione e alla termocamera. Tramite il puntatore rosso del laser è possibile stabilire con buona precisione in quale area si desidera che il fascio laser colpisca la superficie. Nello specifico, è necessario selezionare un'area di interesse dall'aspetto quanto più possibile omogeneo e privo di punti corrosi. Occorre inoltre verificare che l'area selezionata per la sollecitazione laser sia contenuta all'interno della finestra di visualizzazione della termocamera. A tal fine è necessario connettere lo strumento di rilevazione al corrispondente software ResearchIR e osservare il posizionamento della finestra di visualizzazione, ovvero della regione in corrispondenza della quale la termocamera acquisisce i dati termografici. Poiché la dimensione della finestra può essere modificata manualmente, si è deciso di concentrare la registrazione su

una regione di dimensione ridotta rispetto alla finestra in full frame. Tale scelta comporta un conseguente aumento del massimo frame rate utilizzabile durante l'acquisizione termografica. In figura 49 sono mostrati la finestra di visualizzazione, il valore di integration time IT e l'intervallo rilevabile di temperatura apparente utilizzati per tutte le prove sperimentali effettuate. Riguardo il frame rate di acquisizione, il suo valore è stato stabilito di prova in prova nel rispetto del valore massimo indicato in figura 49.

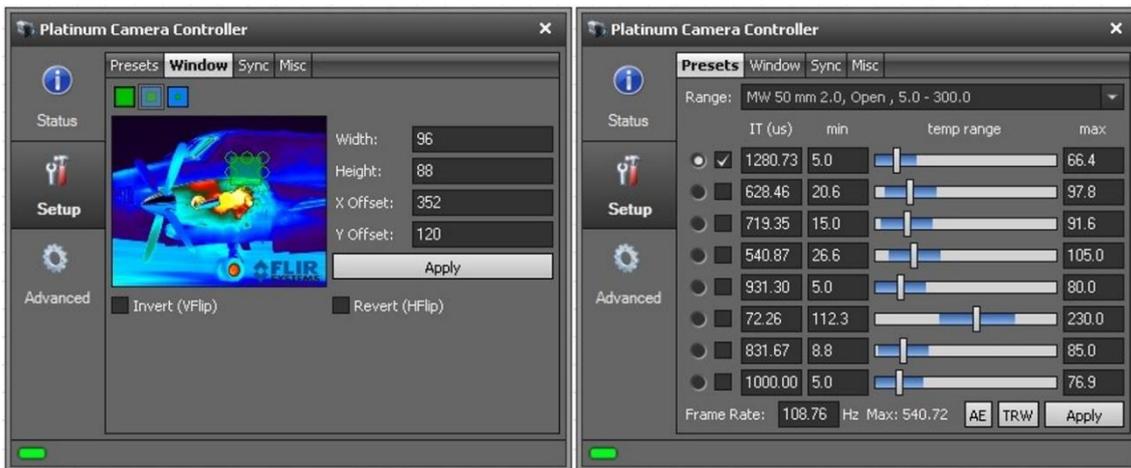


Figura 49-finestra di visualizzazione e parametri di acquisizione

Dal momento che le prove sperimentali condotte hanno lo scopo di effettuare una comparazione tra i risultati termografici ottenuti al variare dei parametri di sollecitazione e del grado di danneggiamento corrosivo, si è deciso di non convertire in temperatura il segnale termico espresso in unità di segnale. Per tale motivo, sono stati utilizzati i parametri forniti di default dal software ResearchIR per caratterizzare il corpo ispezionato, l'ambiente e gli elementi ottici esterni. I valori assunti da tali parametri sono riportati in tabella 7.

Tabella 7-parametri dell'oggetto, dell'ambiente e degli elementi ottici esterni

Emissività dell'oggetto	1.00
Distanza tra oggetto e termocamera	2.000 m
Temperatura riflessa dall'oggetto	20.0 °C
Temperatura ambiente	20.0 °C
Umidità relativa dell'ambiente	30.0 %
Temperatura degli elementi ottici	20.0 °C
Coefficiente di trasmissione degli elementi ottici	1.00

A parità di grado di corrosione e di parametri di sollecitazione, sono state indagate tre diverse aree di ogni campione in modo da individuare e scartare i risultati corrispondenti a zone caratterizzate da disomogeneità del danneggiamento corrosivo. Per ognuna delle tre aree, sono state effettuate tre ripetizioni di analisi al fine di escludere errori legati a problemi della strumentazione. Per ogni campione e per ogni tipo di sollecitazione sono state quindi effettuate nove prove sperimentali, i cui risultati sono stati mediati per poter caratterizzare il grado di danneggiamento corrosivo uniforme.

Le analisi termografiche sono state condotte con due diverse modalità di sollecitazione, ovvero con tecnica Lock-In e con tecnica Step-Heating. Di seguito sono riportati i parametri di sollecitazione utilizzati nelle diverse prove e le caratteristiche delle analisi condotte tramite software IRTA.

### 2.3.1 Procedura di analisi Lock-In

Le prove termografiche in modalità Lock-In sono state condotte sollecitando i campioni tramite un treno di impulsi, ovvero un'onda quadra. Secondo quanto riportato nel manuale [27], il numero di impulsi di cui è costituita l'onda e il frame rate di acquisizione della termocamera devono essere scelti in modo da ottimizzare il rapporto SNR: maggiori sono il numero di impulsi ed il frame rate, maggiore è il rapporto SNR. In base all'esperienza degli ingegneri dell'azienda DES, la scelta ottimale prevede l'utilizzo di 3 impulsi e di circa 100 frame acquisiti per ogni impulso. Tale combinazione dei parametri di prova consente di ottenere un efficiente valore di rapporto SNR e una quantità di dati rilevati e memorizzati non eccessiva. Nel corso delle analisi effettuate si è deciso di acquisire 108 frame per ogni impulso, per un totale di 324 frame rilevati durante la sollecitazione con onda quadra costituita da tre impulsi. Sulla base di tale osservazione, è possibile calcolare per ogni prova Lock-In il necessario frame rate della termocamera tramite la seguente equazione.

$$FrameRate \left[ \frac{\text{frame}}{\text{s}} \right] \cdot Periodo_{impulso} [\text{s}] \cdot 3_{impulsi} = 324 [\text{frame}]$$

In tabella 8 sono riportati i parametri dell'onda quadra eccitatrice e della registrazione termografica per tutte le prove eseguite sui campioni non corrosi (0 settimane di permanenza in camera salina) o corrosi con nebbia salina per 2, 4 o 6 settimane.

Tabella 8-parametri delle prove Lock-In

Nome della prova	Grado di corrosione [settimane]	Periodo dell'impulso [ms]	Potenza percentuale dell'impulso	Frame rate [Hz]	Durata della registrazione [s]
A	0, 2, 4, 6	200	100%	540	5
B	0, 2, 4	200	50%	540	5
C	0, 2, 4	200	25%	540	5
D	0, 2, 4	2000	25%	54	10
E	0, 2, 4	1000	25%	108	10

In seguito alla stimolazione del campione, la procedura di prova sperimentale prevede l'analisi qualitativa della sequenza registrata dalla termocamera al fine di individuare eventuali anomalie. In figura 50 è mostrato un esempio di visualizzazione della sequenza tramite software ResearchIR; sono stati selezionati due cursori in corrispondenza dei quali è stata valutata l'evoluzione termica tramite il *temporal plot*.

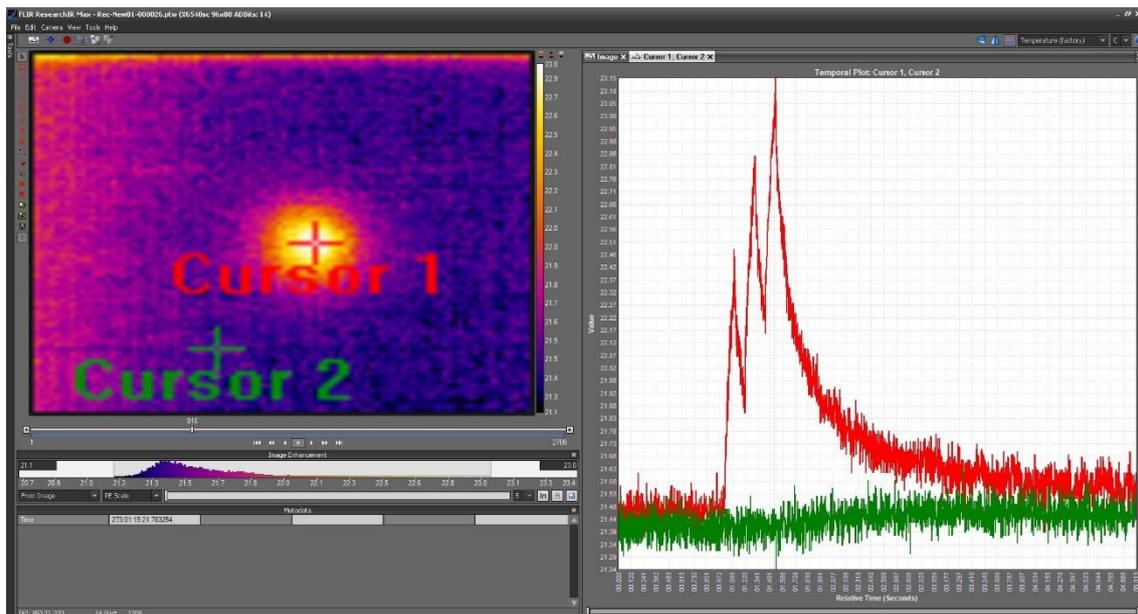


Figura 50-esempio di visualizzazione della sequenza termografica in una prova Lock-In

Per ottenere valori quantitativi confrontabili tra le diverse prove a partire dalle sequenze termografiche registrate, è stata utilizzata la finestra di analisi Lock-In del software IRTA. A tal fine è necessario impostare il primo e l'ultimo frame dell'intervallo da analizzare, il quale ha un'estensione di 324 frame, e la frequenza di modulazione dell'onda quadra,

pari all'inverso del periodo dell'impulso. Al termine dell'analisi il software genera sei immagini, ovvero tre immagini di ampiezza e tre immagini di fase, dalle quali è possibile estrarre i valori numerici di ampiezza o fase associati ad ogni pixel. Si è deciso di selezionare, a tal fine, delle ROI lineari e di area in base al seguente criterio:

- La ROI lineare tracciata sull'immagine di ampiezza ha una lunghezza di 70 pixel ed è posizionata in modo tale da attraversare il pixel caratterizzato dal massimo valore di ampiezza della prima armonica. Tale valore massimo del profilo di ampiezza ottenuto è inoltre collocato in corrispondenza del trentacinquesimo pixel appartenente alla ROI. In figura 51 è mostrato un esempio di immagine di ampiezza della prima armonica generata dall'analisi e di profilo dei valori in corrispondenza della ROI lineare tracciata.

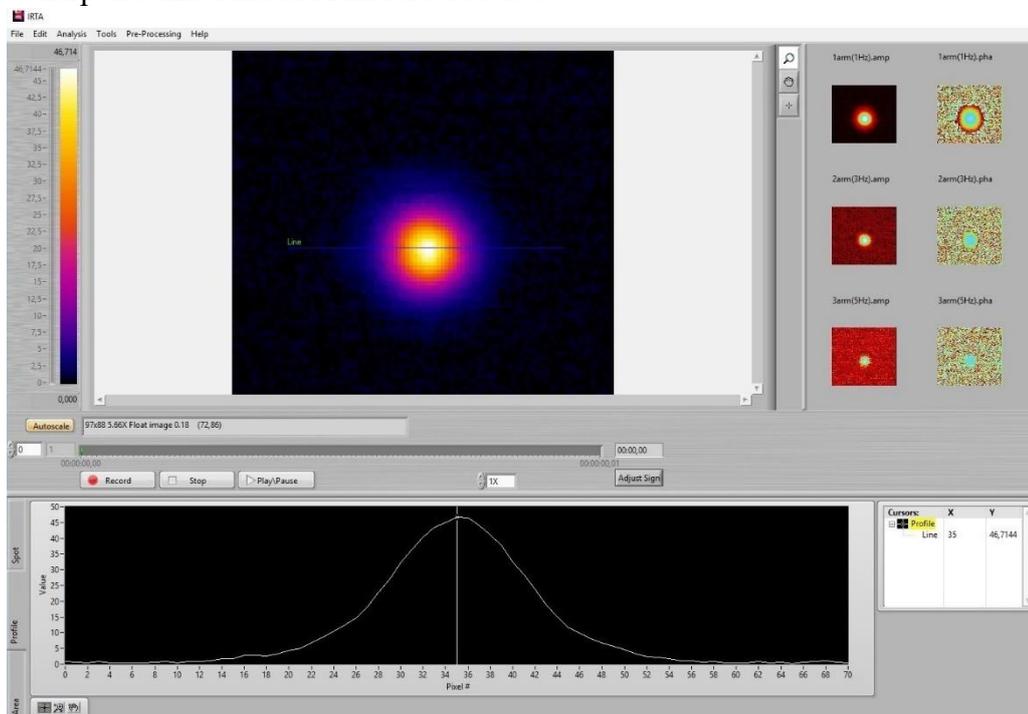


Figura 51-ROI lineare applicata all'immagine di ampiezza della prima armonica

Riguardo la ROI lineare selezionata sull'immagine di fase, si è deciso di impostare una lunghezza di 70 pixel e di posizionarla in modo tale che il suo trentacinquesimo pixel coincida con il centro dell'aureola tipicamente presente nelle immagini di fase della prima armonica. Tale area circolare corrisponde alla zona del campione sollecitata dal fascio laser. In figura 52 è mostrato un esempio di immagine di fase della prima armonica e di profilo dei valori in corrispondenza della ROI lineare selezionata.

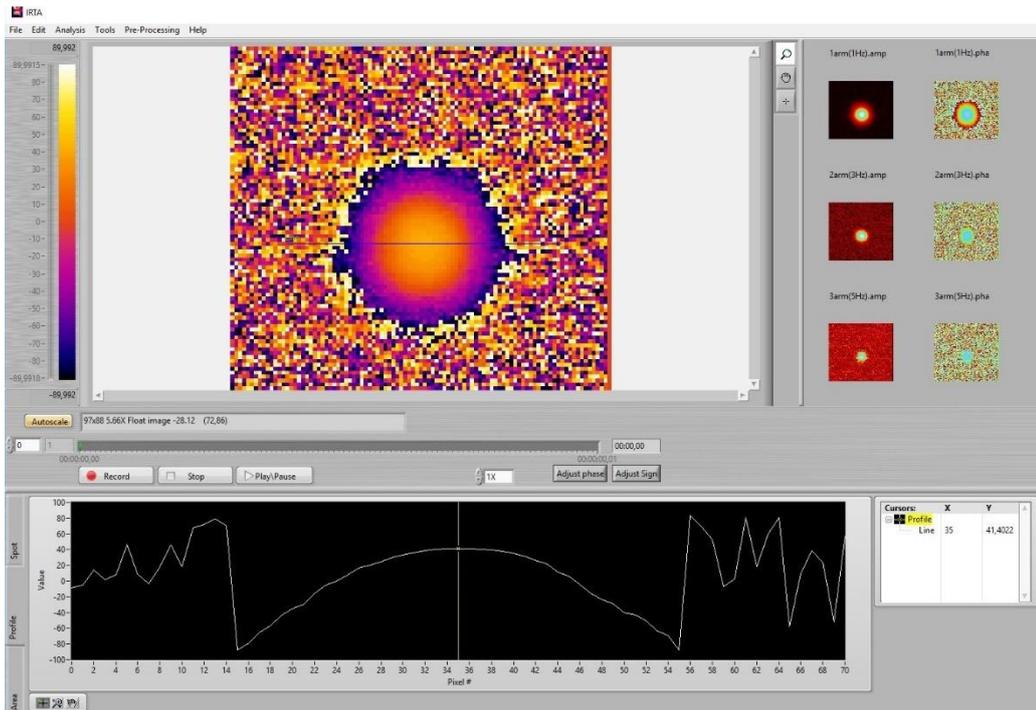


Figura 52-ROI lineare applicata all'immagine di fase della prima armonica

- Si è deciso di selezionare una ROI di area per indagare solo l'immagine di ampiezza della prima armonica. Tale regione è stata impostata con dimensione di 4x4 pixel ed è stata posizionata in modo tale da essere caratterizzata dal massimo valore medio possibile. Un esempio di tale scelta di ROI è riportato in figura 53.

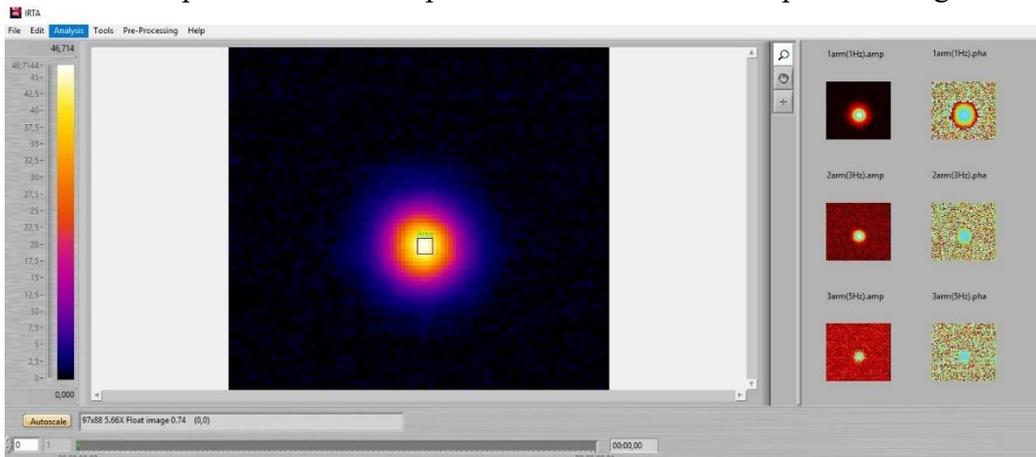


Figura 53-ROI di area applicata all'immagine di ampiezza della prima armonica

Durante l'estrapolazione dei valori della fase, in alcuni casi è stato necessario utilizzare la funzione *Adjust phase* del software IRTA per eliminare salti presenti nel profilo tracciato. Tale funzione somma  $90^\circ$  al valore ottenuto dall'analisi Lock-In al fine di compensare il dislivello che si può genericamente manifestare quando si utilizza una funzione tangente. In figura 54 è mostrato un esempio del confronto tra i profili di fase della seconda armonica ottenuti prima e dopo l'applicazione della funzione *Adjust phase*.

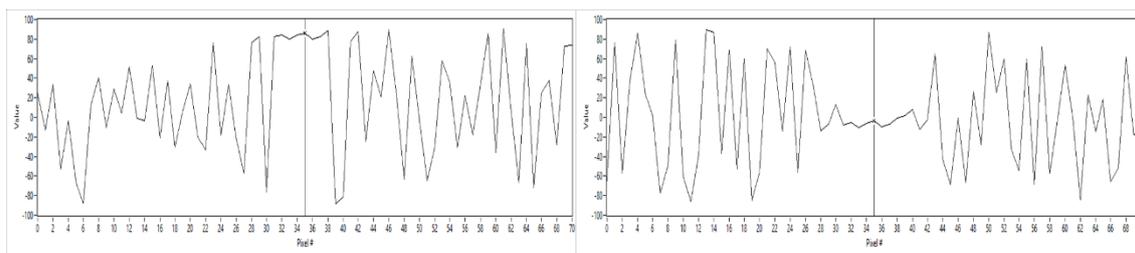


Figura 54-profilo di fase prima (sx) e dopo (dx) l'applicazione della funzione *adjust phase*

L'ultimo passo della procedura di analisi Lock-In consiste nell'elaborazione dei risultati tramite software Excel. I valori di ampiezza e fase acquisiti in corrispondenza delle ROI lineari e di area sono stati importati su fogli di calcolo e manipolati in modo tale da poter effettuare i confronti mostrati nel Capitolo 3. Per ogni campione, sollecitato con una specifica combinazione dei parametri di prova, è stata calcolata la media tra i risultati di nove analisi (tre replicazioni, ognuna con tre ripetizioni). I valori mediati ottenuti sono stati messi a confronto in modo tale da poter comparare le risposte termiche dei campioni, caratterizzati da differente grado di danneggiamento corrosivo, a parità di parametri della sollecitazione. È importante sottolineare che riguardo l'elaborazione della fase della prima armonica si è deciso di calcolare per ogni profilo la media dei valori rappresentanti il rumore, ovvero dei valori rilevati in corrispondenza della regione esterna all'areola centrale. Tale media del rumore è stata quindi sottratta ai valori di fase acquisiti tramite ROI lineare all'interno della suddetta regione circolare.

### 2.3.2 Procedura di analisi Step Heating

Le prove termografiche eseguite in modalità Step Heating sono state condotte stimolando i campioni mediante sollecitazioni a gradino di durata e potenza variabili. Per tutte le prove sperimentali si è deciso di impostare la medesima durata della registrazione e il medesimo frame rate, dal momento che non è stata fornita alcuna indicazione riguardo l'ottimizzazione del rapporto SNR. Nello specifico, tutte le registrazioni acquisite dalla termocamera hanno una durata di 7 secondi e il frame rate è stato posto pari a 400 Hz in

modo tale da ottenere sequenze costituite da circa 2800 frame, numero inferiore al limite massimo di 3000 frame imposto dal software IRTA. Per ogni analisi si è deciso di indagare sia la fase di riscaldamento, di durata pari al periodo della sollecitazione, che il periodo di raffreddamento, la cui durata è stata calcolata proporzionalmente a quella della fase di riscaldamento. In tabella 9 sono riportati i parametri delle prove eseguite sui campioni non corrosi e corrosi per 2, 4 o 6 settimane in nebbia salina.

Tabella 9-parametri delle prove Step Heating

Nome della prova	Grado di corrosione [settimane]	Durata dell'impulso [ms]	Potenza percentuale dell'impulso	Durata del periodo di riscaldamento [frame]	Durata del periodo di raffreddamento [frame]
F	0, 2, 4, 6	1000	100%	401	1500
G	0, 2, 4	1000	50%	401	1500
H	0, 2, 4	1000	25%	401	1500
L	0, 2, 4	200	100%	81	300
M	0, 2, 4	500	100%	201	750

Terminata la stimolazione del campione tramite fascio laser e conclusa la registrazione termografica, quest'ultima può essere analizzata qualitativamente tramite software ResearchIR al fine di rilevare eventuali anomalie. Un esempio di visualizzazione della sequenza registrata durante una prova Step Heating è mostrato in figura 44.

Per ottenere valori numerici confrontabili tra le diverse prove, è stata utilizzata la finestra di analisi Cooling del software IRTA. Indicando il frame iniziale e il frame finale dell'intervallo che si desidera indagare, il software genera due immagini ottenute ciascuna con un differente metodo di post-processamento della sequenza termografica analizzata. Per poter estrapolare i valori numerici correlati a determinati pixel di interesse, è stato necessario selezionare delle ROI lineari e di area in base ai seguenti criteri:

- Si è deciso di creare una ROI lineare della lunghezza di 95 pixel al fine di analizzare i risultati ottenuti lungo tutta l'estensione della finestra di visualizzazione. Tale linea è stata inoltre collocata in modo tale da attraversare il centro della regione circolare tipicamente presente nelle immagini generate da entrambi i metodi di elaborazione. L'area circolare appena menzionata corrisponde alla regione del campione sollecitata tramite il fascio laser. Nelle figure 55 e 58 sono mostrati due esempi di ROI lineari tracciate sulle immagini create con metodo 1 durante la fase di riscaldamento e con metodo 2 durante la fase di raffreddamento. Nelle medesime immagini, inoltre, sono mostrati i profili dei valori associati ai pixel appartenenti alle ROI selezionate.

- Le ROI di area sono state impostate con dimensione 20x20 pixel e si è deciso di collocarle in posizione centrale rispetto all'area circolare colpita dalla sollecitazione. Le figure 56 e 57 mostrano due esempi di ROI quadrate selezionate sulle immagini generate dal metodo 2 durante la fase di riscaldamento e dal metodo 1 durante la fase di raffreddamento.

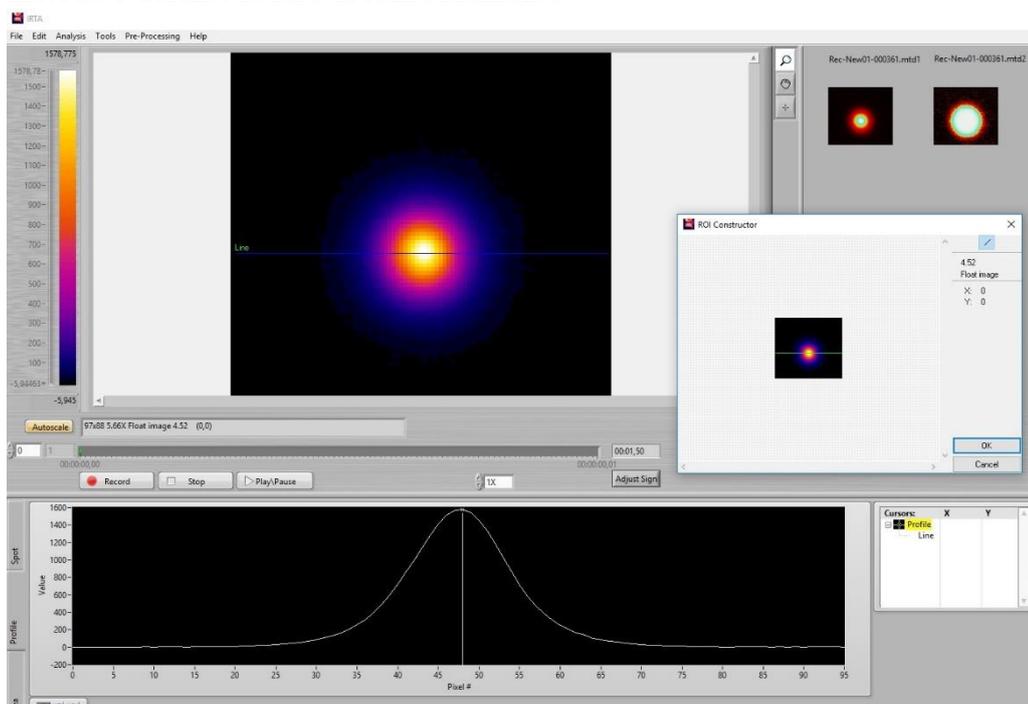


Figura 55-ROI lineare applicata all'immagine ottenuta con metodo 1 durante il riscaldamento

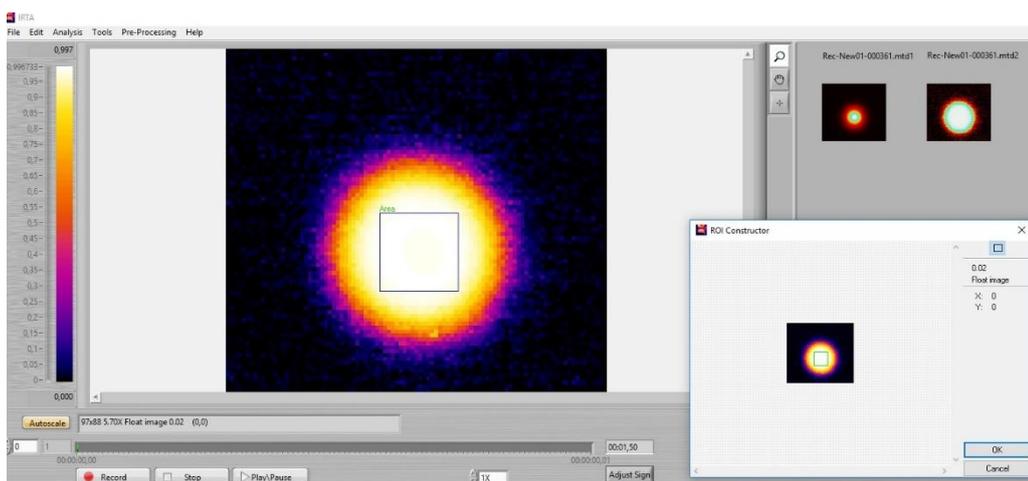


Figura 56-ROI di area applicata all'immagine ottenuta con metodo 2 durante il riscaldamento

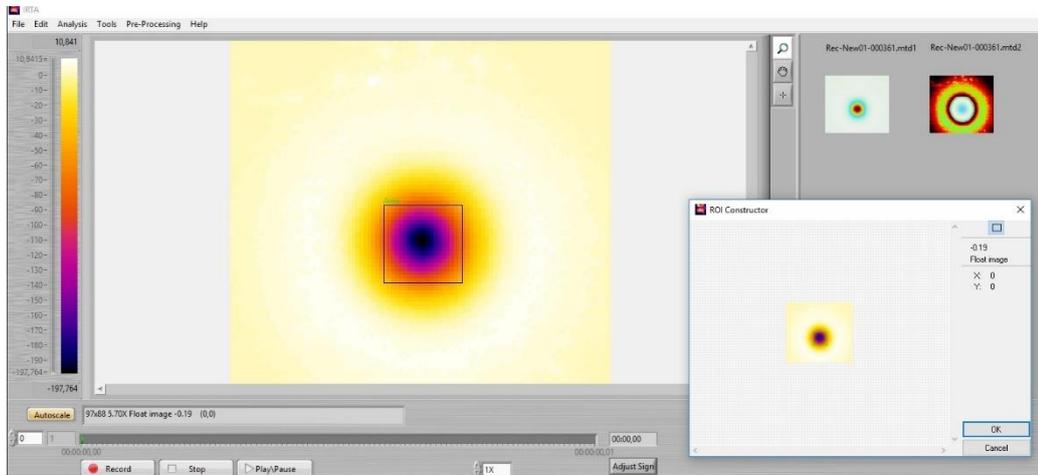


Figura 57-ROI di area applicata all'immagine ottenuta con metodo 1 durante il raffreddamento

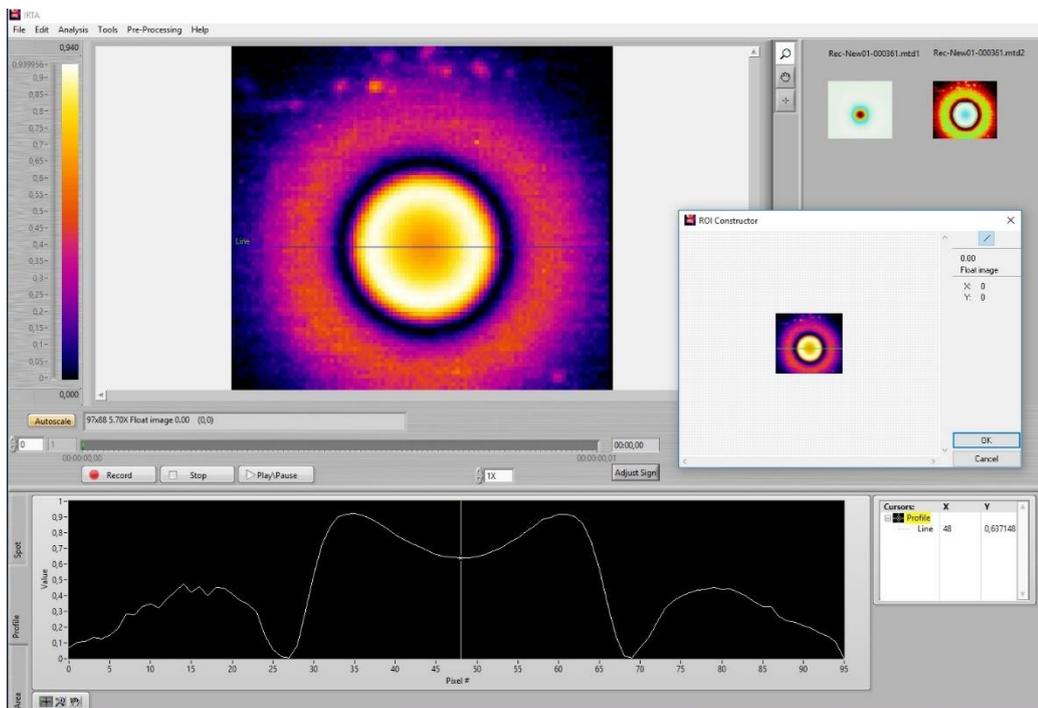


Figura 58-ROI lineare applicata all'immagine ottenuta con metodo 2 durante il raffreddamento

L'ultimo passo della procedura di analisi prevede l'elaborazione dei valori estrapolati dalle immagini tramite software Excel. È stata calcolata la media dei risultati ottenuti da nove prove per ogni campione a parità dei parametri di sollecitazione; tali risultati

comprendono i valori numerici associati ai pixel appartenenti alle ROI lineari e i valori medio, minimo, massimo e deviazione standard per i pixel contenuti nelle ROI di area. Infine, sono stati eseguiti gli appropriati confronti tra i risultati ottenuti dai campioni con differente grado di danneggiamento corrosivo a parità di parametri di sollecitazione. Tali comparazioni sono riportate nel Capitolo 3.

## Capitolo 3

### Risultati e Commenti

Il terzo capitolo di questa tesi ha lo scopo di mostrare e commentare i risultati sperimentali ottenuti dall'analisi micrografica e dall'analisi termografica dei campioni ispezionati. Il primo paragrafo riporta gli esiti delle misurazioni dello spessore residuo delle lamiere corrose eseguite tramite il microscopio ottico metallografico rovesciato. Il secondo paragrafo, invece, riguarda le analisi condotte con tecnica termografica attiva e mostra i risultati ottenuti dall'elaborazione dei valori forniti dal software IRTA.

#### 3.1 Risultati dell'analisi micrografica

Le valutazioni dello spessore residuo delle lamiere corrose sono state eseguite presso il laboratorio Microscopy utilizzando il microscopio ottico metallografico rovesciato. Le formelle mostrate in figura 41, le quali inglobano porzioni ricavate dalle lamiere, sono state ispezionate utilizzando lenti con ingrandimento x50, x100 e x200 al fine di misurare lo spessore del materiale metallico base e di osservare la morfologia del profilo della superficie corrosa. In figura 59 è mostrato un confronto tra le immagini ottenute con ingrandimento x50 del campione corrosa per due settimane (sinistra) e del campione corrosa per quattro settimane (destra) in camera salina.

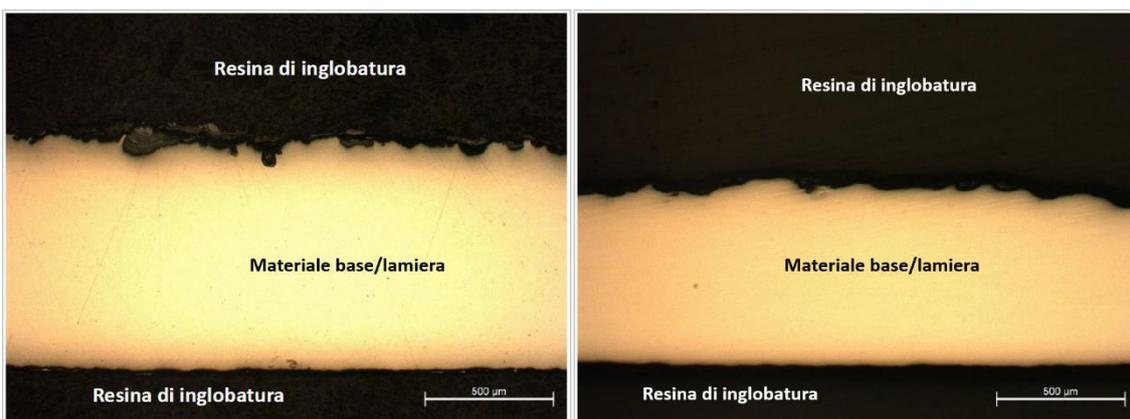


Figura 59-immagini micrografiche con ingrandimento x50

In figura 60 è mostrato un confronto tra le immagini ottenute con ingrandimento x200, al fine di osservare nel dettaglio il profilo della superficie danneggiata dei campioni sottoposti a nebbia salina per due settimane (sinistra) e quattro settimane (destra).

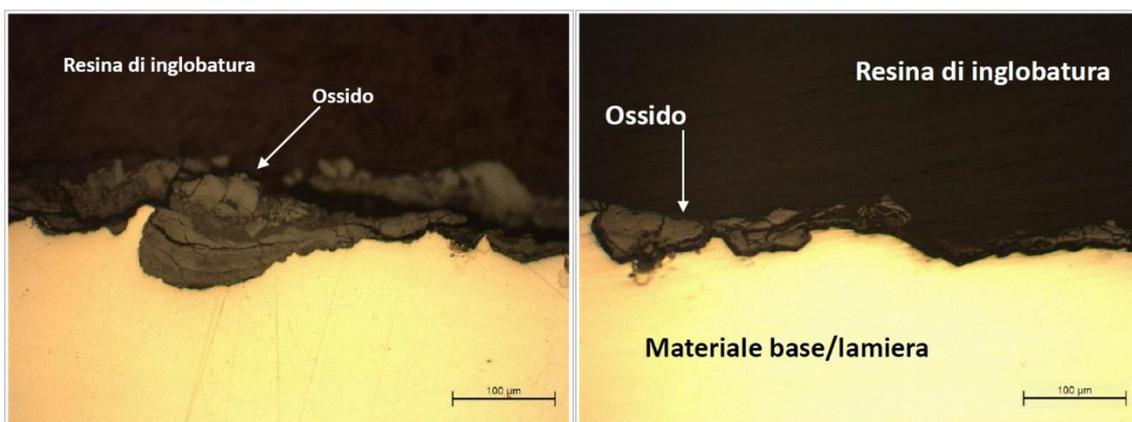


Figura 60-immagini micrografiche con ingrandimento x200

Tramite l'ausilio di una barra di misurazione proiettata sulle immagini micrografiche, è stato valutato lo spessore della regione di colore chiaro indicata come *Materiale base/lamiera* nelle figure 59-60. Tale regione corrisponde alla porzione del campione corrosivo ancora costituita dall'acciaio della lamiera originaria, ovvero alla porzione sottostante lo strato di ossido formatosi a causa del fenomeno corrosivo superficiale. Per ogni formella è stato misurato lo spessore in corrispondenza di cinque punti della lamiera, al fine di ottenere un intervallo caratterizzante il campione sottoposto ad un determinato grado di attacco corrosivo. In tabella 10 sono riportati i risultati dell'analisi micrografica dello spessore.

Tabella 10-intervallo di spessori del materiale base/lamiera

Grado di danneggiamento corrosivo	Intervallo di spessori del materiale base
Non corrosivo	0,76 ÷ 0,90 mm
Due settimane in camera salina	0,72 ÷ 0,95 mm
Quattro settimane in camera salina	0,60 ÷ 0,76 mm

Lo spessore della lamiera non corrosa, nominalmente pari a 0,80 mm, è stato valutato in cinque punti del campione tramite l'ausilio di un *Micrometro Palmer*.

Come previsto teoricamente, è possibile notare che lo spessore rilevato del materiale base si riduce all'aumentare del grado di danneggiamento poiché il fenomeno della corrosione causa il deterioramento e la trasformazione in ossido dell'acciaio superficiale esposto all'atmosfera corrosiva.

## 3.2 Risultati dell'analisi termografica

Le prove sperimentali di termografia attiva, condotte con l'ausilio del MultiDES System, sono state eseguite sollecitando in modalità Lock-In e Step Heating i campioni di interesse tramite una sorgente laser. Le sequenze termografiche registrate dalla termocamera sono state elaborate con il software di post-processamento IRTA, il quale ha consentito di ottenere immagini di ampiezza e fase per l'analisi Lock-In e immagini generate da due differenti algoritmi per l'analisi Transient legata alla sollecitazione Step Heating. Come già indicato nel Capitolo 2, tali immagini sono state indagate mediante delle ROI lineari e di area, grazie alle quali è stato possibile estrapolare i valori numerici generati dall'analisi e correlati ai pixel appartenenti alle suddette ROI. Tali risultati quantitativi sono stati successivamente elaborati tramite il software Excel al fine di effettuare le opportune comparazioni tra i valori acquisiti al variare dei parametri di sollecitazione e al variare del grado di danneggiamento corrosivo. Nel presente paragrafo sono riportati alcuni dei confronti effettuati tra i risultati delle analisi termografiche estrapolati dalle ROI lineari; in Appendice, invece, sono riportati i confronti sia tra i restanti risultati correlati alle ROI lineari, sia tra i valori estrapolati tramite le ROI di area.

### 3.2.1 Risultati dell'analisi Lock-In

Le analisi Lock-In sono state condotte sollecitando i campioni di interesse mediante un'onda quadra costituita da tre impulsi, al fine di ottenere con un'unica prova informazioni riguardo la prima, la terza e la quinta armonica dell'onda termica di risposta del materiale. Nel presente paragrafo sono riportati i confronti tra i valori acquisiti dalle immagini di ampiezza e fase dell'armonica principale, ritenuta la più significativa e la meno affetta da rumore. In Appendice, invece, sono mostrati i confronti tra i risultati relativi alla terza e alla quinta armonica.

Riprendendo quanto già indicato in tabella 8, le prove sperimentali in modalità Lock-In sono state eseguite sulla base di cinque differenti combinazioni dei parametri caratterizzanti l'onda quadra eccitatrice; le condizioni di prova sono riassunte in tabella 11. Per ogni tipologia di prova sperimentale e per ogni campione ispezionato, sono stati analizzati tre differenti punti (punti 1, 2, 3) della lamiera al fine di verificare l'omogeneità del danneggiamento corrosivo superficiale. Per ogni punto, inoltre, sono state effettuate tre ripetizioni (ripetizioni *a*, *b*, *c*) della prova al fine di individuare possibili errori dovuti

alla strumentazione. Di conseguenza per ogni condizione di prova e per ogni campione ispezionato sono state effettuate nove analisi, i cui risultati sono stati opportunamente mediati. In figura 61 è mostrato, a titolo di esempio, il confronto tra i nove profili di ampiezza e fase della prima armonica rilevati tramite ROI lineari dalle immagini generate dalle nove analisi effettuate. Come indicato nel Capitolo 2, le ROI lineari sono state selezionate di lunghezza pari a 70 pixel e posizionate in base ai seguenti criteri: nel caso dell'immagine di ampiezza, è stata posizionata in modo tale che il massimo valore di ampiezza calcolato sia collocato in corrispondenza del trentacinquesimo pixel della ROI; nel caso dell'immagine di fase, è stata posizionata in modo tale che il suo trentacinquesimo pixel coincida con il centro dell'area circolare tipicamente presente in questo tipo di immagini.

Tabella 11-parametri dell'onda quadra utilizzata per le prove Lock-In

Nome della prova	Grado di corrosione	Periodo dell'onda	Potenza del laser
A	0, 2, 4, 6 settimane	200 ms	100%
B	0, 2, 4 settimane	200 ms	50%
C	0, 2, 4 settimane	200 ms	25%
D	0, 2, 4 settimane	2000 ms	25%
E	0, 2, 4 settimane	1000 ms	25%

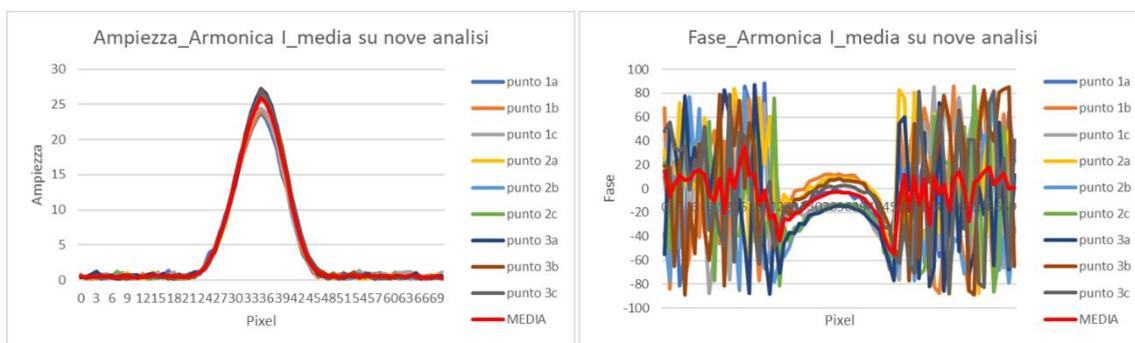


Figura 61-media tra i risultati di ampiezza e fase generati da nove analisi e rilevati lungo ROI lineari

Gli andamenti di ampiezza e fase ottenuti dalla media tra i nove profili sono stati in seguito messi a confronto al variare del grado di danneggiamento corrosivo e dei parametri dell'onda quadra eccitatrice.

Nelle figure 62-66 sono mostrate le comparazioni tra i profili di ampiezza dell'armonica principale al variare della severità del danneggiamento e a parità di condizioni di prova.

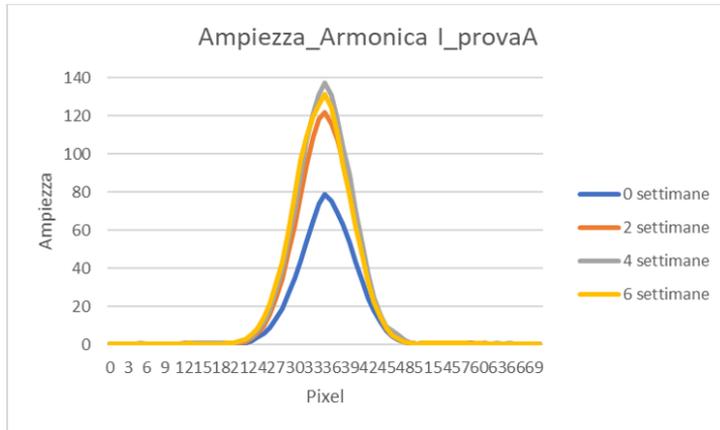


Figura 62-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

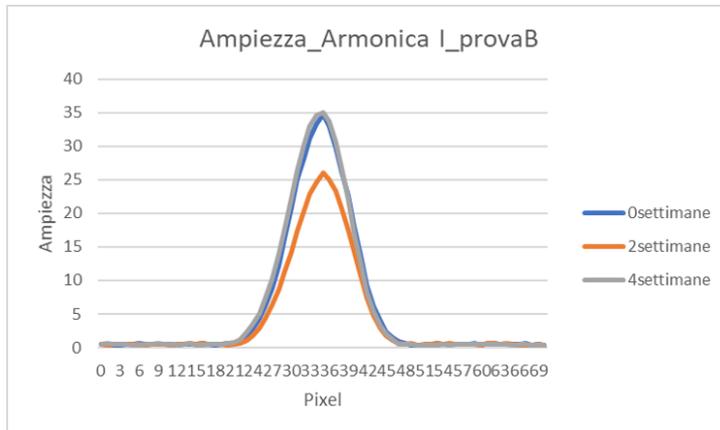


Figura 63-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

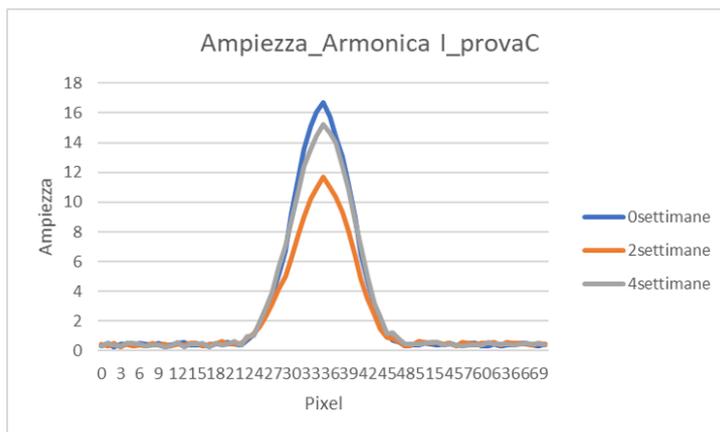


Figura 64-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

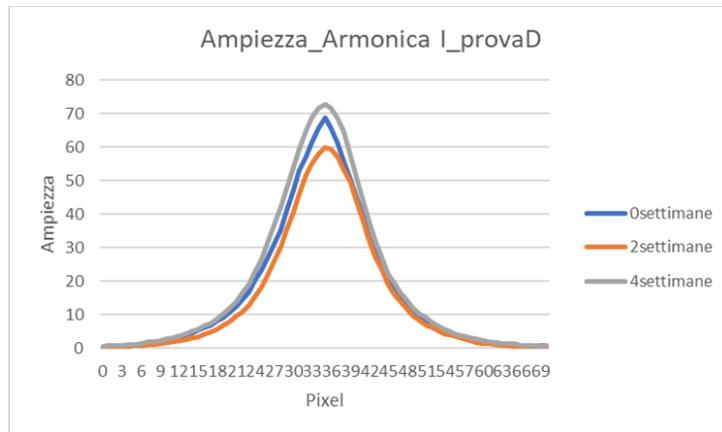


Figura 65-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

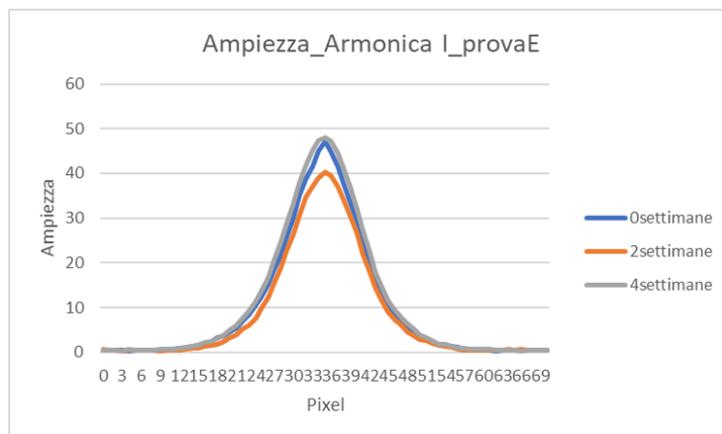


Figura 66-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

Come è possibile notare, la massima ampiezza della prima armonica presenta valori crescenti all'aumentare del grado di danneggiamento corrosivo nel caso delle condizioni di prova A. Tale osservazione non risulta verificata per la lamiera sottoposta a nebbia salina per 6 settimane, probabilmente a causa di un'anomalia del campione. Osservando la sua superficie corrosa, infatti, sono stati rilevati dei cristalli di sale che potrebbero aver interferito con il processo di corrosione in camera salina e con la misura termografica. Nel caso delle condizioni di prova B, C, D ed E, è possibile osservare che i valori di ampiezza massima per i campioni non corrosi e corrosi per 4 settimane risultano tra loro paragonabili e superiori al valore massimo rilevato per il campione corrosi per 2 settimane. Tali considerazioni manifestano la necessità di utilizzare potenze elevate (prova A) durante le prove Lock-In al fine di ottenere una correlazione tra i risultati termografici e il grado di danneggiamento.

Come è possibile notare, per le figure 62-66 si è deciso di non utilizzare la stessa scala di misura al fine di consentire una più accurata osservazione del confronto tra i valori di ampiezza al variare del grado di danneggiamento. Nelle figure 67-69 sono mostrate, con la medesima scala, le comparazioni tra i profili di ampiezza al variare dei parametri dell'onda di eccitazione e a parità di corrosione.

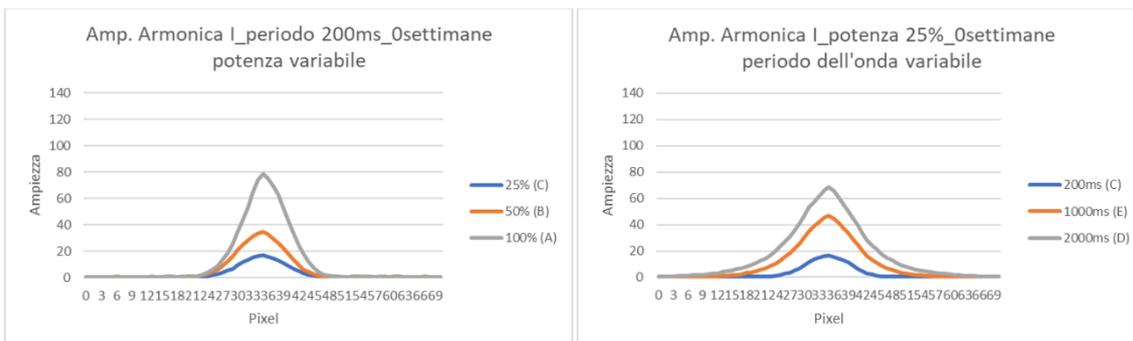


Figura 67-Ampiezza della prima armonica per il campione non corrosivo

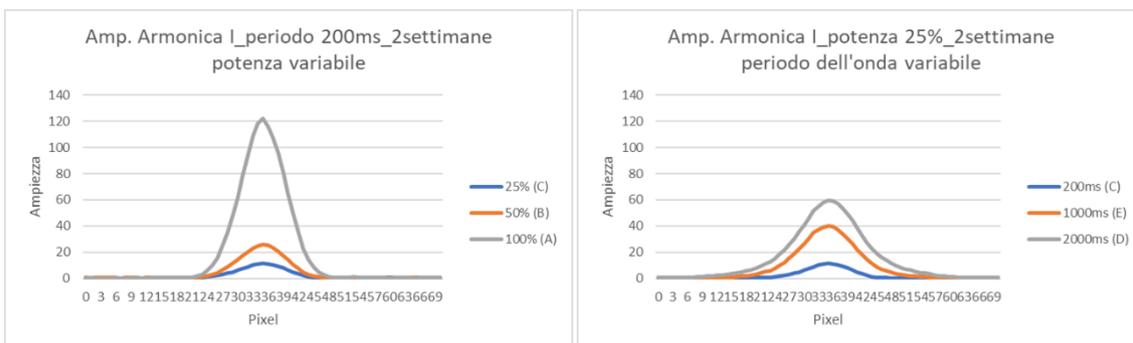


Figura 68-Ampiezza della prima armonica per il campione corrosivo 2 settimane

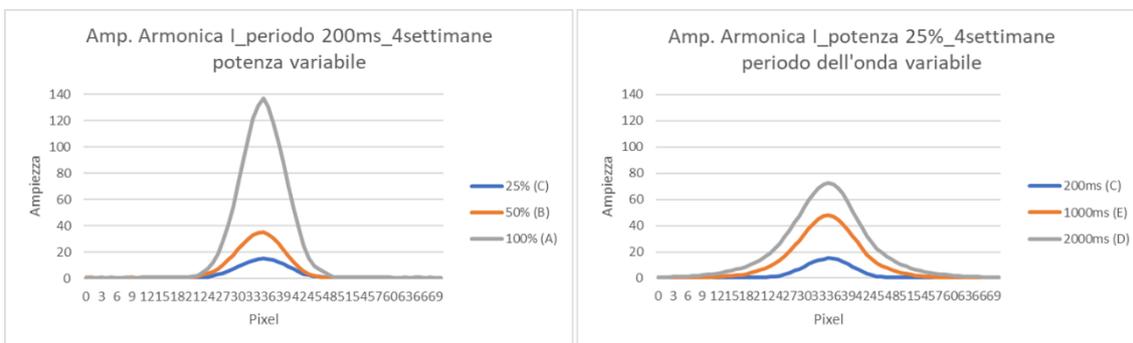


Figura 69-Ampiezza della prima armonica per il campione corrosivo 4 settimane

Come è possibile notare, la condizione di prova A consente di ottenere i massimi valori di ampiezza per tutti i campioni ispezionati poiché è caratterizzata dalla massima potenza del laser. Le prove in condizioni C, al contrario, sono responsabili dei minimi valori di ampiezza rilevati poiché associano un breve periodo dell'onda quadra ad una bassa potenza del laser.

In figura 70 sono mostrati i massimi valori rilevati dell'ampiezza della prima armonica al variare del periodo dell'onda eccitatrice e della potenza del laser. I punti individuati sul diagramma cartesiano sono stati congiunti tramite rette di regressione o funzioni polinomiali le cui equazioni sono riportate in figura.

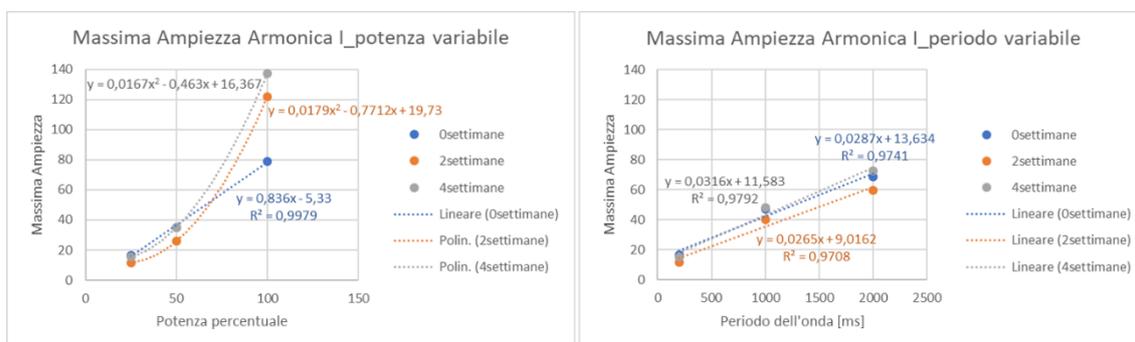


Figura 70-Andamenti delle massime ampiezze al variare della potenza del laser e del periodo dell'onda

Per il campione non corrosivo, l'andamento della massima ampiezza al variare della potenza e del periodo risulta assimilabile ad una retta con buona approssimazione, fornita dal coefficiente di determinazione  $R^2$ . Per i campioni corrosivi, invece, l'andamento della massima ampiezza al variare della potenza risulta approssimabile da una funzione quadratica, mentre l'andamento al variare del periodo dell'onda risulta assimilabile ad una retta. I grafici in figura 70 permettono di osservare che i campioni non corrosivo e corrosivi manifestano un comportamento differente al variare della potenza del laser; la maggiore discordanza si verifica in corrispondenza della combinazione di parametri A, ovvero delle condizioni di prova caratterizzate dal 100% di potenza.

Terminata l'osservazione dei profili di ampiezza, sono di seguito riportati i risultati relativi alla fase della prima armonica. Nelle figure 71-75 sono mostrati i confronti tra i profili di fase al variare del grado di danneggiamento corrosivo e a parità di condizioni di sollecitazione. È importante sottolineare che i profili rappresentati sono stati normalizzati rispetto al rumore, ovvero rispetto ai valori acquisiti tramite la ROI lineare in corrispondenza dei pixel esterni all'area circolare presente sull'immagine di fase. La media calcolata tra i valori costituenti il rumore è stata sottratta ai valori di fase rilevati all'interno dell'area circolare, la quale coincide con la regione sollecitata dal fascio laser.

Per chiarezza di rappresentazione grafica, invece, è stato assegnato valore della fase pari al rumore medio in corrispondenza di tutti i pixel esterni alla zona centrale di interesse.

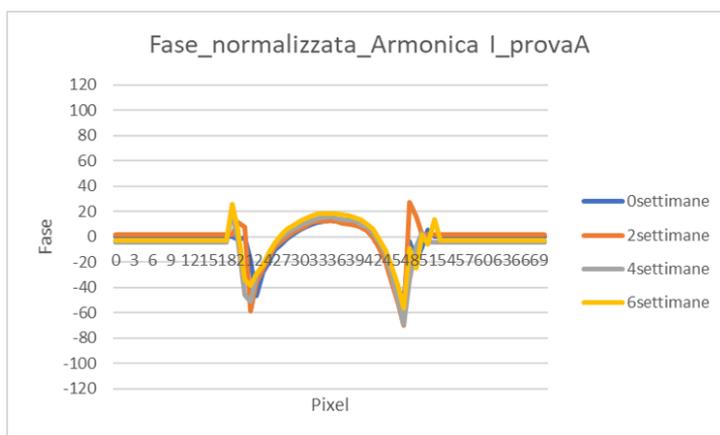


Figura 71-Fase della prima armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

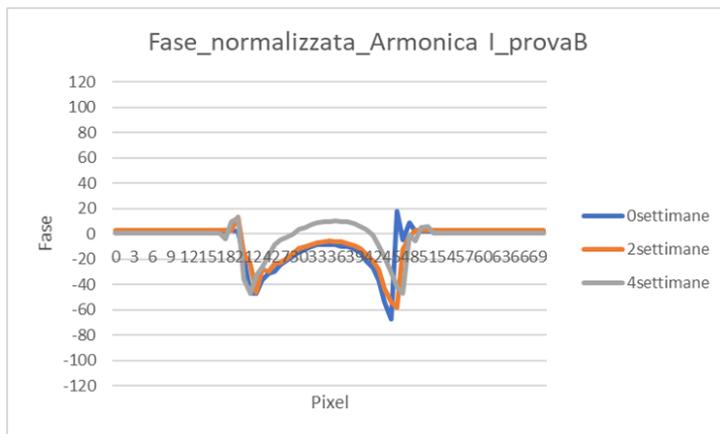


Figura 72-Fase della prima armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

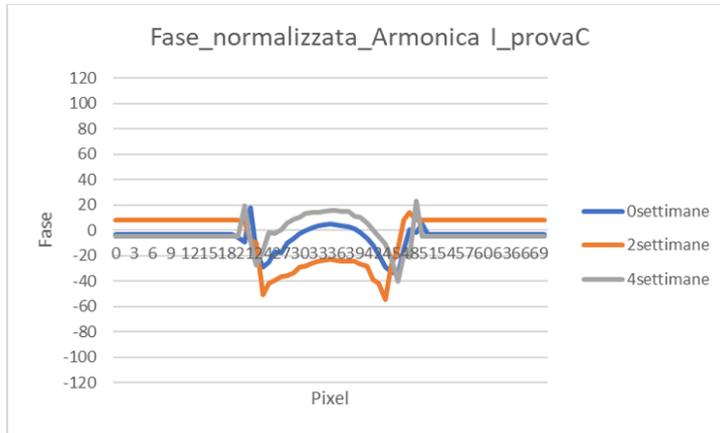


Figura 73-Fase della prima armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

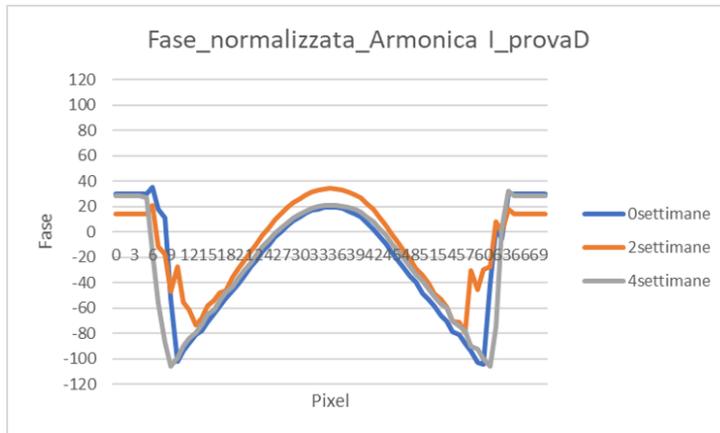


Figura 74-Fase della prima armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

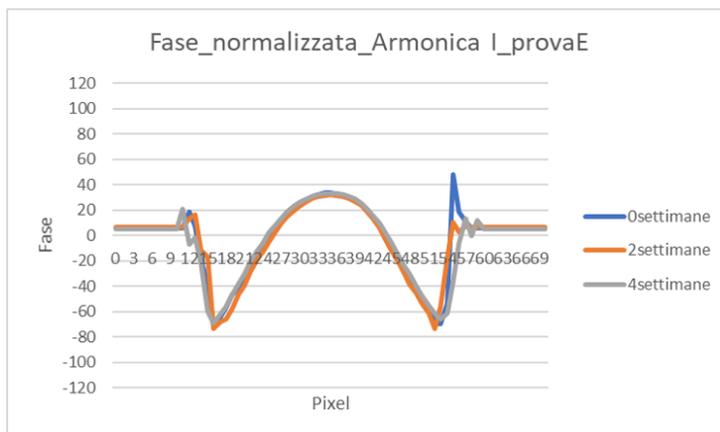


Figura 75-Fase della prima armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

Come è possibile osservare, i profili di fase normalizzata assumono valori simili per i differenti gradi di corrosione nelle condizioni di prova A, D ed E, ovvero per elevate potenze del laser o per elevati periodi dell'onda eccitatrice. Il parametro di maggiore interesse ricavabile dai profili mostrati nelle figure 71-75 non è costituito dal valore massimo della fase, ma dall'estensione dell'area centrale corrispondente alla zona circolare termicamente eccitata. In figura 76 è mostrato un esempio di misurazione della larghezza della suddetta area e sono riportati i valori di estensione misurati a parità di condizioni di prova e al variare del grado di danneggiamento corrosivo.

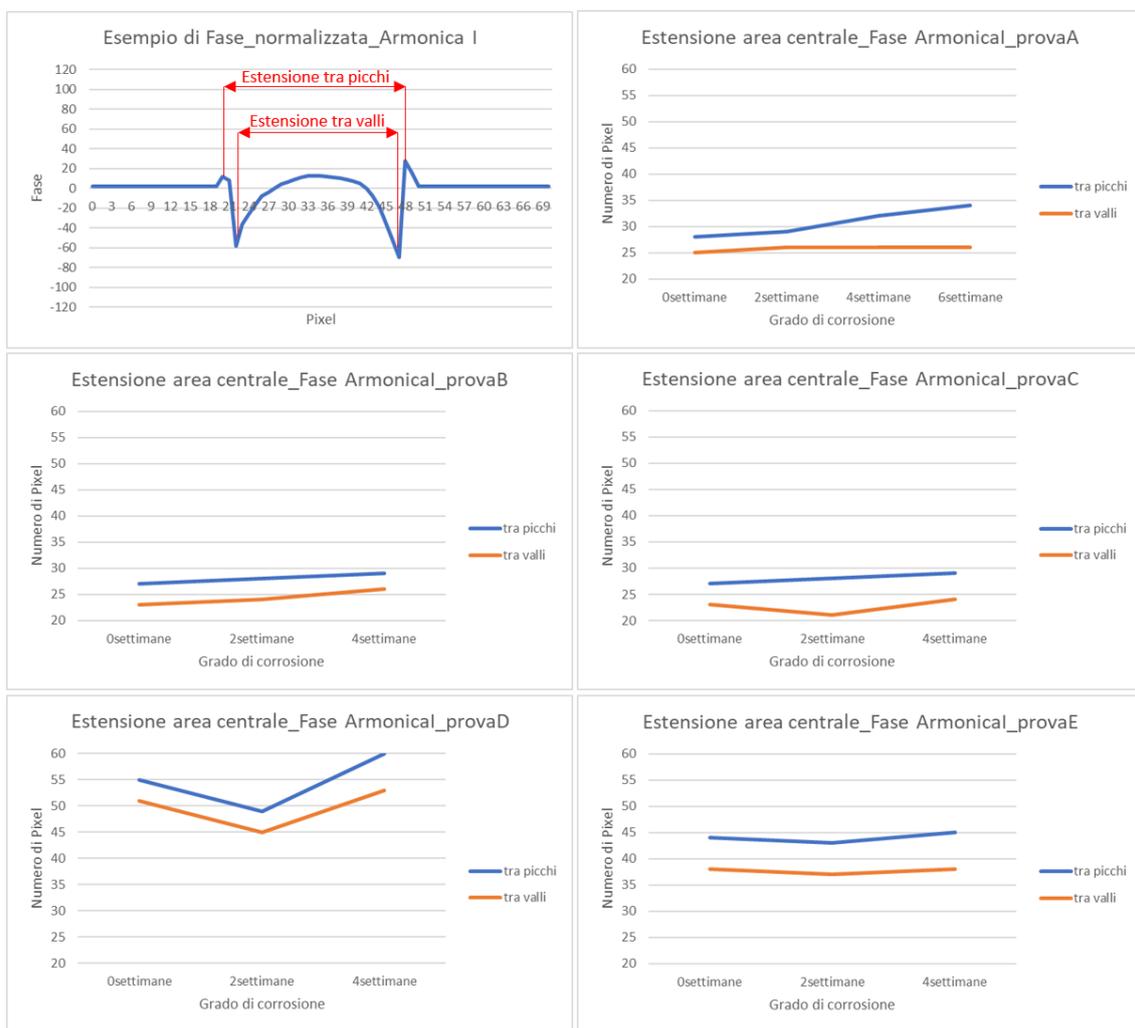


Figura 76-estensione dell'area centrale del profilo di fase per differenti condizioni di prova (A: 200ms, 100%; B: 200ms, 50%; C:200ms, 25%; D: 2000ms, 25%; E: 1000ms, 25%)

Come è possibile notare osservando la figura 76, l'estensione dell'area centrale del profilo di fase assume valori crescenti all'aumentare della severità del danneggiamento corrosivo

nel caso delle condizioni di prova A e B, le quali sono caratterizzate da alti valori di potenza del laser. Utilizzando bassi valori di potenza, come per le condizioni di prova C, D ed E, è stata rilevata una larghezza dell'area centrale inferiore per il campione corroso 2 settimane rispetto ai campioni non corroso e corroso per 4 settimane. Tale osservazione conferma la necessità di utilizzare elevate percentuali della potenza del laser durante le analisi Lock-In al fine di ottenere una correlazione tra i risultati termografici e il grado di danneggiamento.

### 3.2.2 Risultati dell'analisi Step Heating

Le prove termografiche in modalità Step Heating sono state eseguite stimolando i campioni di interesse mediante sollecitazioni a gradino di durata e potenza variabili. Sono state utilizzate cinque combinazioni dei parametri caratterizzanti l'eccitazione laser; tali condizioni di prova sperimentale, precedentemente menzionate in tabella 9, sono riassunte in tabella 12.

*Tabella 12-parametri della sollecitazione utilizzata per le prove Step Heating*

Nome della prova	Grado di corrosione	Durata del gradino	Potenza del laser
F	0, 2, 4, 6 settimane	1000 ms	100%
G	0, 2, 4 settimane	1000 ms	50%
H	0, 2, 4 settimane	1000 ms	25%
L	0, 2, 4 settimane	200 ms	100%
M	0, 2, 4 settimane	500 ms	100%

Le sequenze termografiche registrate dalla termocamera sono state processate con due differenti metodi tramite il software IRTA. Per ogni prova sperimentale analizzata, ciascun algoritmo di elaborazione ha fornito un'immagine in cui ad ogni pixel è associato un valore numerico estrapolabile tramite ROI. Nello specifico, il primo metodo (MTD1) calcola per ogni pixel la pendenza della retta di regressione della relativa curva di riscaldamento/raffreddamento; il secondo metodo (MTD2) valuta per ogni pixel della finestra di visualizzazione il coefficiente di determinazione  $R^2$ , il cui valore indica quanto la curva di riscaldamento/raffreddamento sia ben approssimata dalla rispettiva retta di regressione. Ognuna delle due immagini generate dal software per ogni prova è stata indagata tramite una ROI lineare e una di area. La ROI lineare, i cui risultati sono mostrati in questo paragrafo, è stata selezionata di lunghezza pari a 95 pixel e posizionata in modo da attraversare l'area circolare corrispondente alla regione sollecitata dal laser.

Per ogni prova sperimentale è stato analizzato sia il tratto di riscaldamento che il tratto di raffreddamento della curva del parametro termico registrato dalla termocamera in funzione del tempo. La durata della fase di raffreddamento processata è stata selezionata proporzionalmente alla durata della fase di riscaldamento. In figura 77 è mostrato un esempio della curva del parametro termico in funzione del tempo e delle relative fasi di riscaldamento/raffreddamento analizzate.

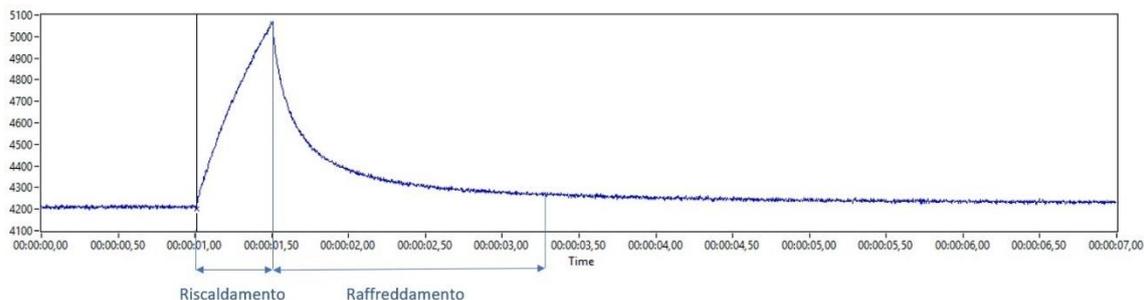


Figura 77-fasi di riscaldamento e raffreddamento per le condizioni di prova M (durata sollecitazione 500ms)

Per ogni combinazione dei parametri di prova e per ogni lamiera ispezionata, sono stati analizzati tre differenti punti (punti 1, 2, 3) del campione al fine di verificare l'omogeneità della corrosione superficiale. Per ogni punto, inoltre, sono state effettuate tre ripetizioni della prova (ripetizioni a, b, c) al fine di individuare eventuali malfunzionamenti della strumentazione. Di conseguenza per ogni condizione di sollecitazione e per ogni grado di danneggiamento corrosivo sono state effettuate nove analisi, i cui risultati generati dal software IRTA sono stati mediati. Nelle figure 78-79 sono riportati degli esempi dei nove profili estrapolati tramite ROI lineari dalle immagini generate dai MTD1 e MTD2, i quali sono stati applicati alle fasi di riscaldamento e raffreddamento delle nove prove.

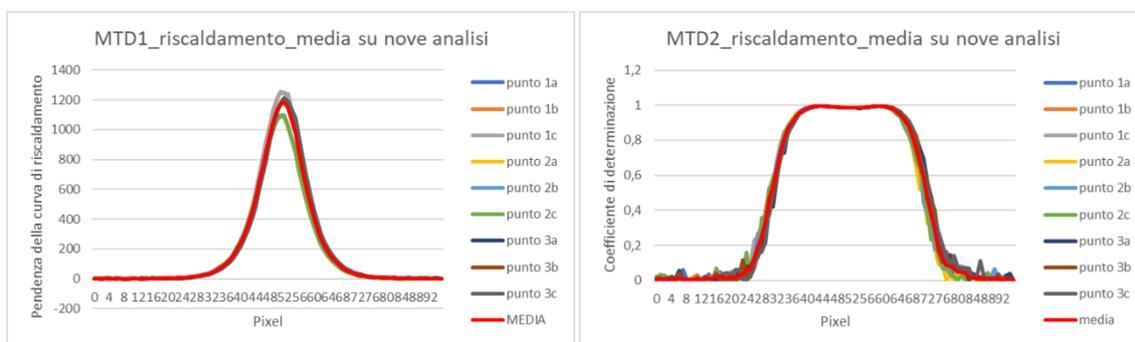


Figura 78-media tra i risultati di MTD1 e MTD2 applicati a nove analisi durante la fase di riscaldamento

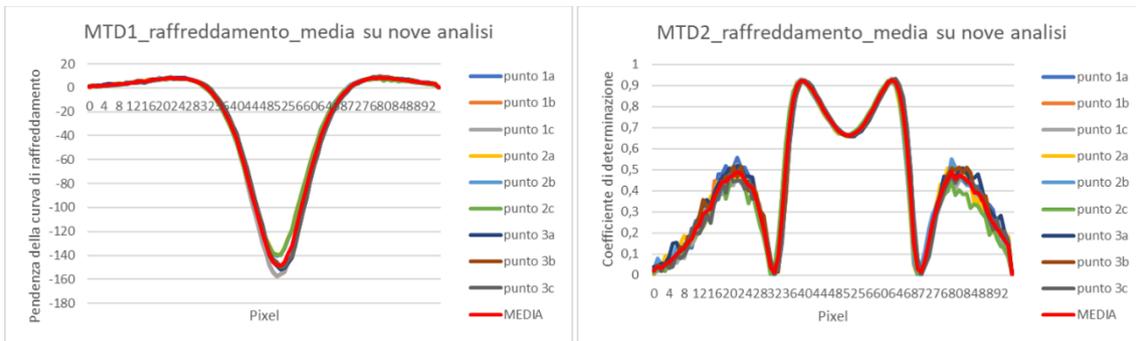


Figura 79-media tra i risultati di MTD1 e MTD2 applicati a nove analisi durante la fase di raffreddamento

I profili ottenuti dalla media tra i risultati delle nove analisi sono stati messi a confronto al variare del grado di corrosione e al variare dei parametri della sollecitazione laser.

### 3.2.2.1 Analisi della fase di riscaldamento

Nel presente paragrafo sono riportati i confronti tra i risultati ottenuti dai MTD1 e MTD2, i quali sono stati impiegati nell'analisi della fase di riscaldamento.

Le figure 80-84 mostrano le comparazioni tra i profili dei valori generati dal MTD1 al variare della severità del danneggiamento corrosivo e a parità dei parametri di sollecitazione. Occorre sottolineare che i profili rappresentati, ottenuti dalla media dei valori rilevati tramite le ROI lineari, sono stati traslati lungo l'asse delle ascisse in modo tale che tutti assumessero un valore simile (pari a circa 10) in corrispondenza del pixel 17. Tale operazione è stata effettuata al fine di consentire un più semplice confronto visivo tra le estensioni dell'area centrale al variare del grado di danneggiamento corrosivo.

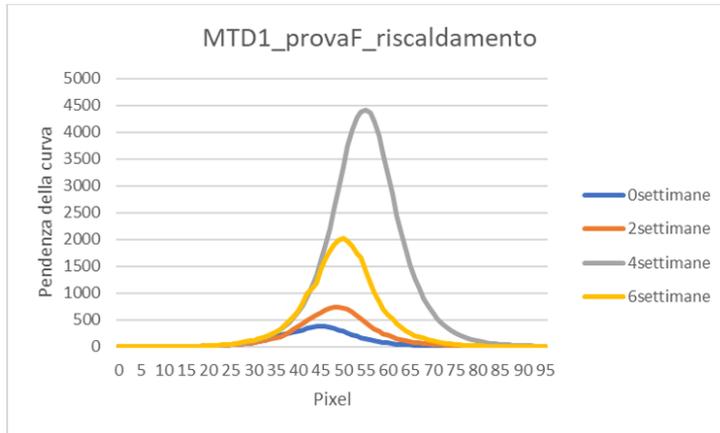


Figura 80-Pendenza della curva di riscaldamento in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%)

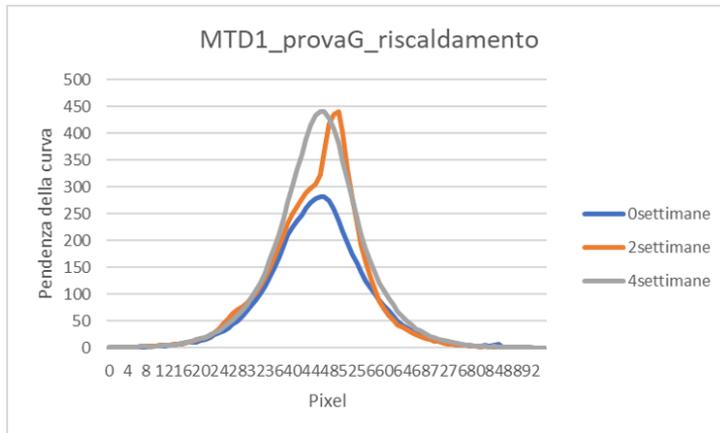


Figura 81-Pendenza della curva di riscaldamento in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%)

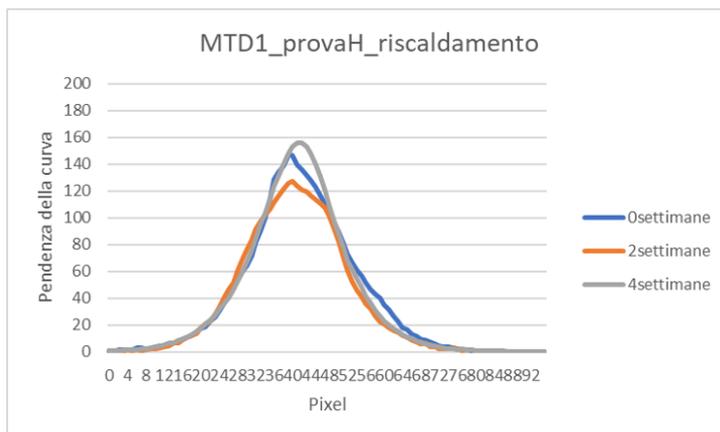


Figura 82-Pendenza della curva di riscaldamento in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%)

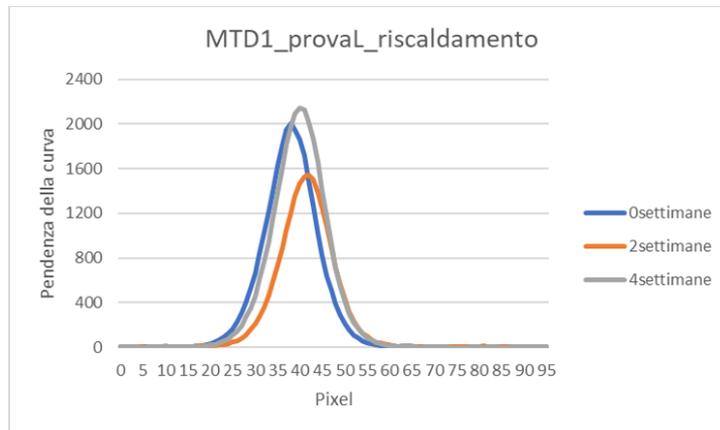


Figura 83-Pendenza della curva di riscaldamento in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%)

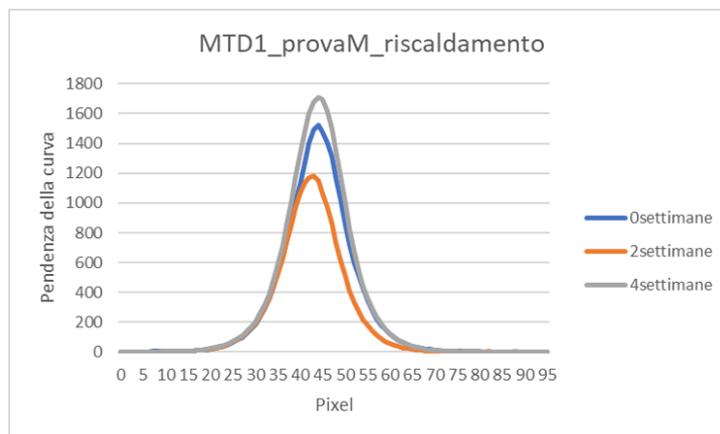


Figura 84-Pendenza della curva di riscaldamento in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%)

Come è possibile notare, la massima pendenza della retta di regressione della curva di riscaldamento assume valori crescenti all'aumentare del danneggiamento corrosivo nelle condizioni di prova F e G, ovvero per elevati valori della potenza del laser e della durata della sollecitazione. Tale osservazione non risulta verificata nel caso del campione corrosivo per 6 settimane in nebbia salina, probabilmente a causa dei cristalli di sale presenti sulla sua superficie, i quale potrebbero aver alterato il processo di corrosione e i risultati delle misure termografiche. Nelle condizioni di prova H, L ed M, la massima pendenza della curva assume un valore inferiore per il campione corrosivo per 2 settimane rispetto ai campioni non corrosivo e corrosivo per 4 settimane in nebbia salina. I confronti mostrati nelle figure 80-84 testimoniano la necessità di associare elevate potenze del laser ad elevate durate della sollecitazione per poter ottenere una correlazione tra i risultati termografici e la severità del danneggiamento corrosivo.

Le figure 80-84 sono caratterizzate da differenti scale di misura per consentire una migliore osservazione delle differenze tra i profili al variare del grado di corrosione. Le seguenti figure 85-87 mostrano, a parità di scala, i confronti tra i profili ottenuti con MTD1 al variare dei parametri di sollecitazione e a parità di danneggiamento.

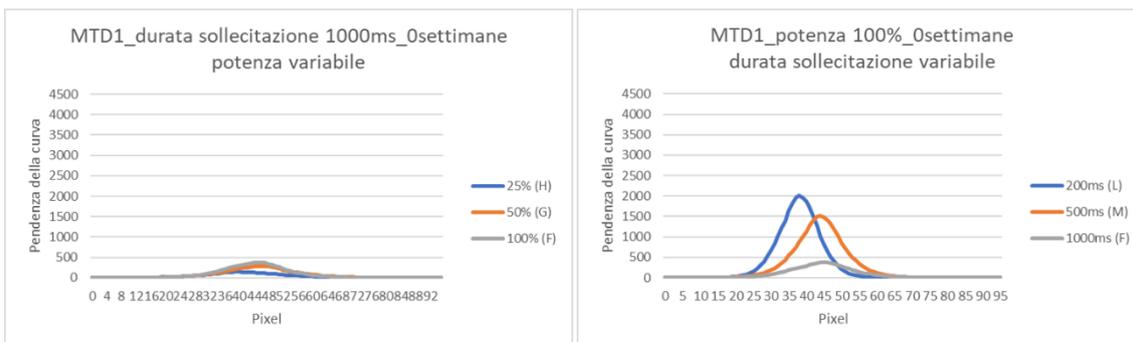


Figura 85-Pendenza della curva di riscaldamento per il campione non corrosivo

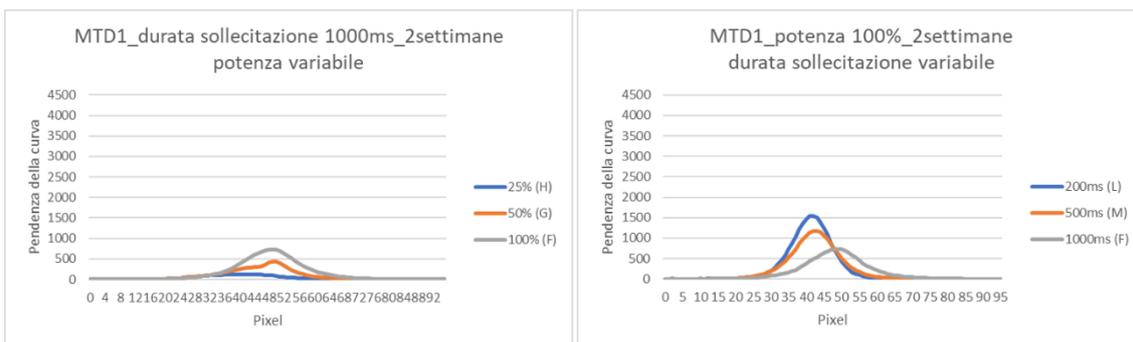


Figura 86-Pendenza della curva di riscaldamento per il campione corrosivo per 2 settimane

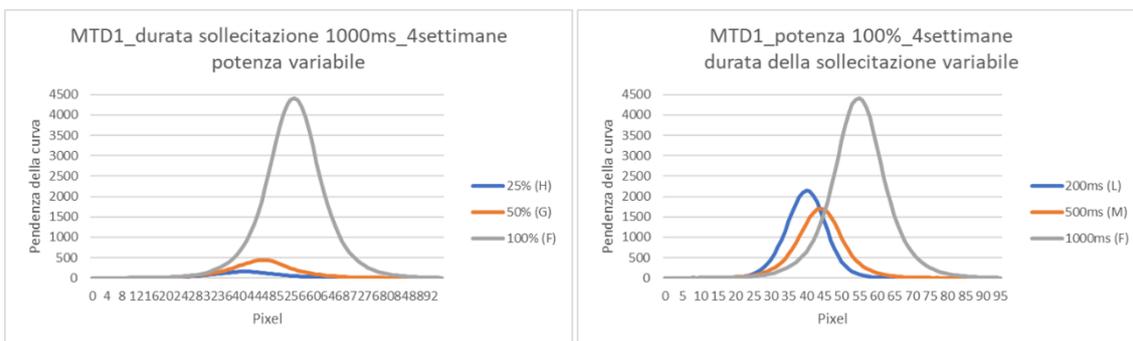


Figura 87-Pendenza della curva di riscaldamento per il campione corrosivo per 4 settimane

Come è possibile notare, il massimo valore della pendenza della curva di riscaldamento viene raggiunto in condizioni di prova L per il campione non corrosivo e per il campione corrosivo per 2 settimane. Tale tipologia di sollecitazione associa la più elevata potenza della sorgente laser alla più breve durata del gradino; di conseguenza la retta di regressione della curva risulta caratterizzata da elevata pendenza. Il campione corrosivo per 4 settimane manifesta, invece, un comportamento differente poiché il massimo valore di pendenza della curva di riscaldamento viene raggiunto in condizioni di prova F, ovvero con la massima durata della sollecitazione e la massima potenza del laser.

I valori massimi di pendenza delle curve di riscaldamento sono stati riportati su un diagramma cartesiano al fine di valutarne la dipendenza dai parametri di sollecitazione. In figura 88 è mostrato il confronto tra tali valori massimi al variare della potenza del laser e della durata del gradino. I punti individuati sul diagramma cartesiano sono stati inoltre collegati tra loro tramite rette di regressione o funzioni polinomiali le cui equazioni sono mostrate in figura.

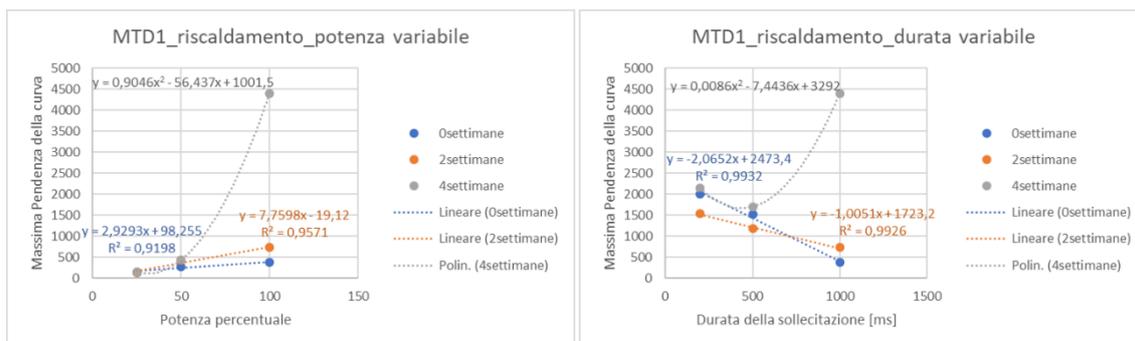


Figura 88-Andamenti delle massime pendenze al variare dei parametri della sollecitazione

Come è possibile notare, i campioni non corrosivo e corrosivo per 2 settimane mostrano un comportamento simile tra loro e un andamento approssimabile da una retta al variare della potenza del laser e della durata del gradino. Il campione corrosivo per 4 settimane, invece, necessita l'utilizzo di una funzione quadratica per congiungere i valori di massima pendenza al variare dei parametri della sollecitazione.

Per concludere l'analisi dei valori generati tramite il MTD1, è stata calcolata l'estensione dell'area centrale dei profili rilevati. A tal fine è stata tracciata una retta orizzontale di riferimento in ciascuna delle figure 80-84, con ordinata pari al 20% del massimo valore raggiunto dalla curva più bassa rappresentata nella medesima figura. L'estensione dell'area centrale è stata misurata valutando l'intersezione tra la retta di riferimento e i profili. In figura 89 è mostrato un esempio della procedura di misura della larghezza dell'area centrale e sono riportati i valori di estensione valutati per tutte le prove.

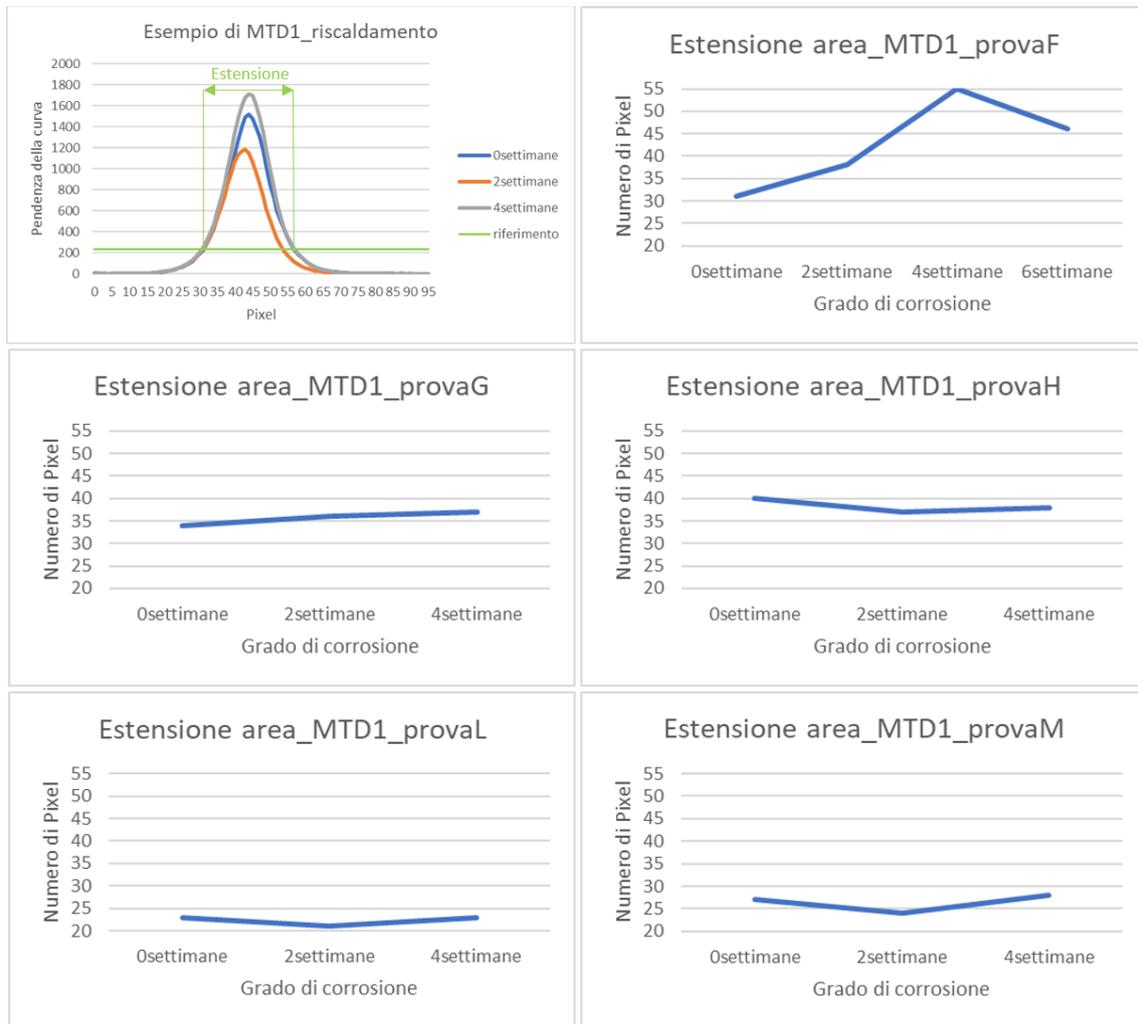


Figura 89-estensione dell'area centrale del profilo di pendenza per differenti condizioni di prova (F: 1000ms, 100%; G: 1000ms, 50%; H: 1000ms, 25%; L: 200ms, 100%; M: 500ms, 100%)

Come è possibile notare, l'estensione dell'area centrale assume valori crescenti nelle condizioni di prova F e G all'aumentare della severità del danneggiamento, ad eccezione del campione corroso per 6 settimane. Tale osservazione conferma la necessità di associare elevate potenze del laser ad elevate durate della sollecitazione per ottenere una correlazione tra i risultati termografici e il grado di corrosione.

Conclusa l'analisi dei valori forniti dal MTD1, sono di seguito riportati i risultati relativi al secondo metodo di analisi (MTD2). Nelle figure 90-94 sono mostrati i confronti tra i profili ottenuti dalla media tra i valori acquisiti tramite ROI lineari. Occorre sottolineare che i profili rappresentati sono stati traslati lungo l'asse delle ascisse in modo tale che tutti assumessero un valore simile (pari a circa 0,1) in corrispondenza del pixel 11.

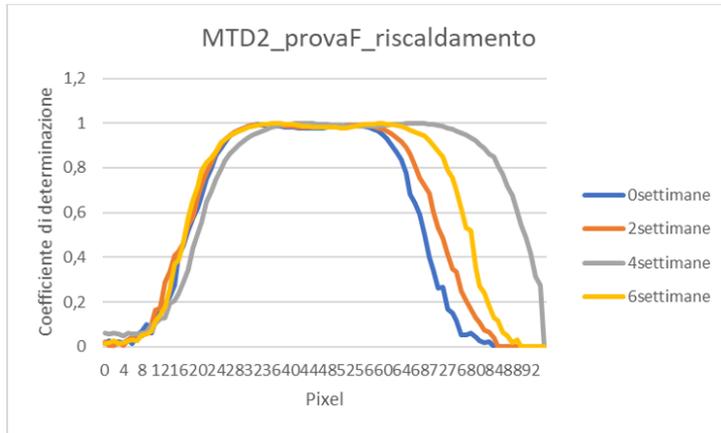


Figura 90-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%)

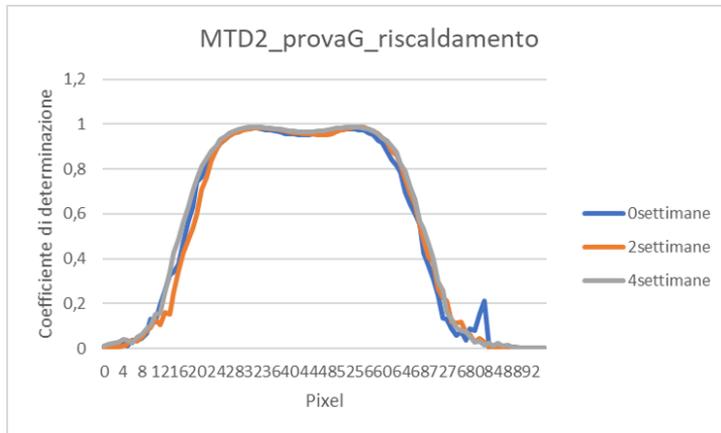


Figura 91-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%)

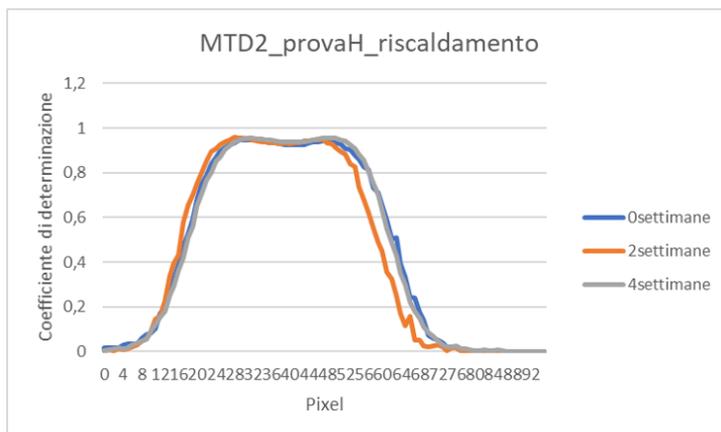


Figura 92-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%)

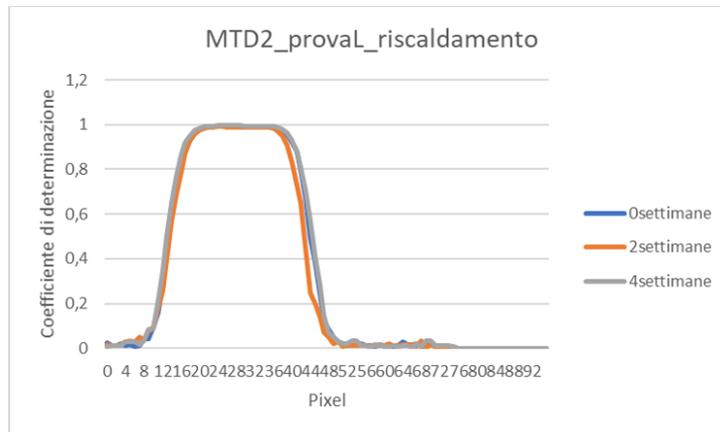


Figura 93-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%)

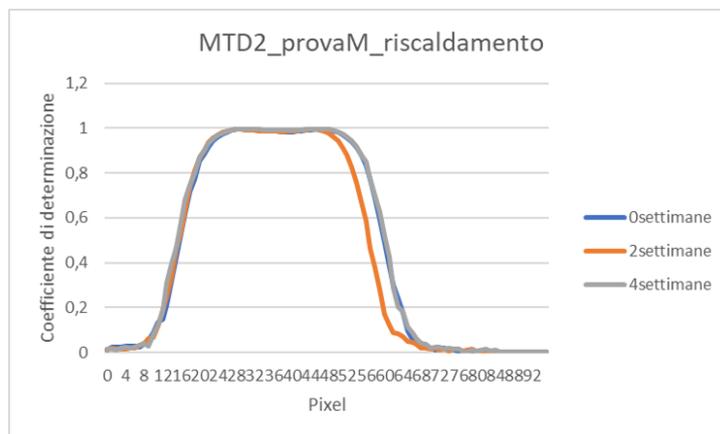


Figura 94-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%)

Ponendo a confronto i profili mostrati nelle figure 90-94 non sono riscontrabili elevate differenze in termini di valore massimo raggiunto del coefficiente di determinazione al variare del grado di danneggiamento corrosivo. È possibile notare, tuttavia, che i più elevati valori massimi del coefficiente  $R^2$  sono stati calcolati per le prove F, L ed M, le quali sono caratterizzate dal massimo valore di potenza del laser.

Il parametro di maggiore interesse ricavabile dalle figure 90-94 è l'estensione dell'area centrale: per ogni profilo è stata misurata la distanza tra l'undicesimo pixel e l'intersezione tra il profilo in questione e una retta orizzontale di riferimento con ordinata di valore pari a 0,27. In figura 95 è mostrato un esempio della procedura di misura della larghezza dell'area centrale e sono riportati i valori di estensione valutati per tutte le prove effettuate.

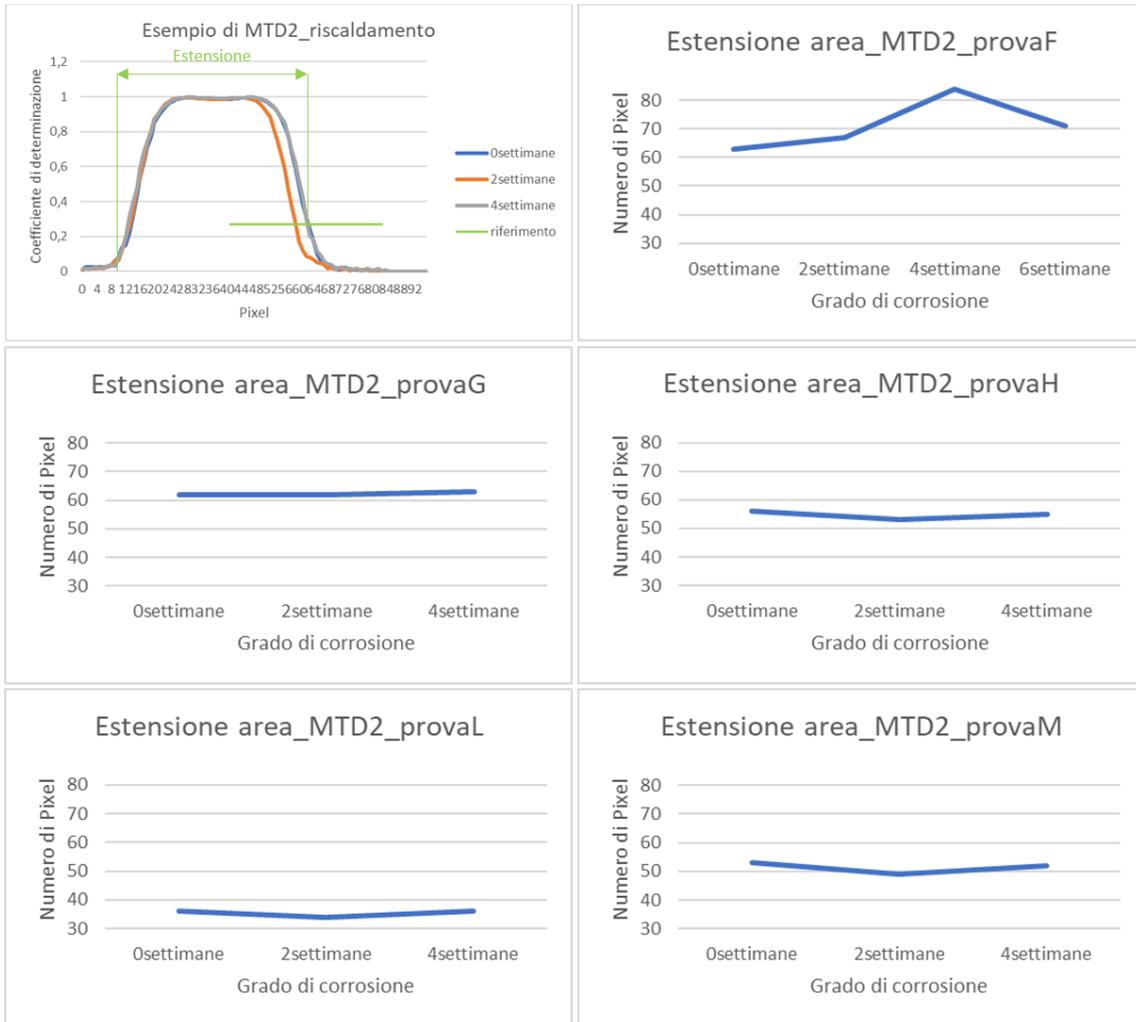


Figura 95-estensione dell'area centrale del profilo del coefficiente di determinazione per differenti condizioni di prova (F: 1000ms, 100%; G: 1000ms, 50%; H: 1000ms, 25%; L: 200ms, 100%; M: 500ms, 100%)

Come è possibile notare, l'estensione dell'area centrale assume un valore crescente all'aumentare della severità del danneggiamento nelle condizioni di prova F e G, ad eccezione del campione corrosivo per 6 settimane. Tale osservazione conferma la necessità di utilizzare elevate potenze del laser al fine di ottenere una correlazione tra i risultati termografici e il grado di corrosione.

### 3.2.2.2 Analisi della fase di raffreddamento

Nel presente paragrafo sono riportati i confronti tra i risultati ottenuti dagli algoritmi MTD1 e MTD2, i quali sono stati impiegati nell'analisi della fase di raffreddamento.

Le figure 96-100 mostrano i confronti tra i profili ottenuti dalla media tra i valori acquisiti tramite ROI lineari dalle immagini generate dal MTD1 per ogni prova sperimentale. Tali comparazioni sono state effettuate al variare della severità del danneggiamento e a parità dei parametri della sollecitazione. Occorre sottolineare che i profili rappresentati sono stati traslati lungo l'asse delle ascisse in modo tale il loro primo valore negativo di trovasse sul pixel 26. Tale operazione è stata effettuata per consentire un immediato confronto visivo tra i minimi valori dalla pendenza delle curve di raffreddamento e tra le estensioni dell'area centrale al variare del grado di corrosione.

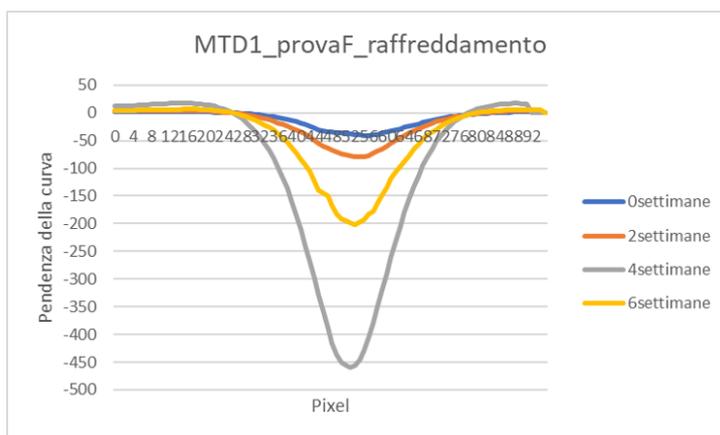


Figura 96-Pendenza della curva di raffreddamento in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%)

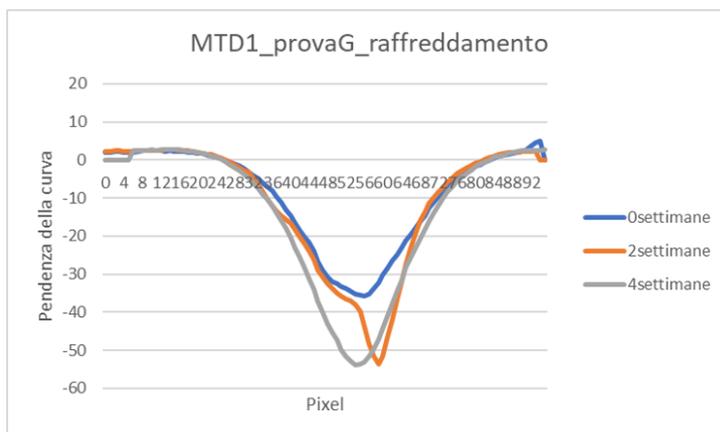


Figura 97-Pendenza della curva di raffreddamento in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%)

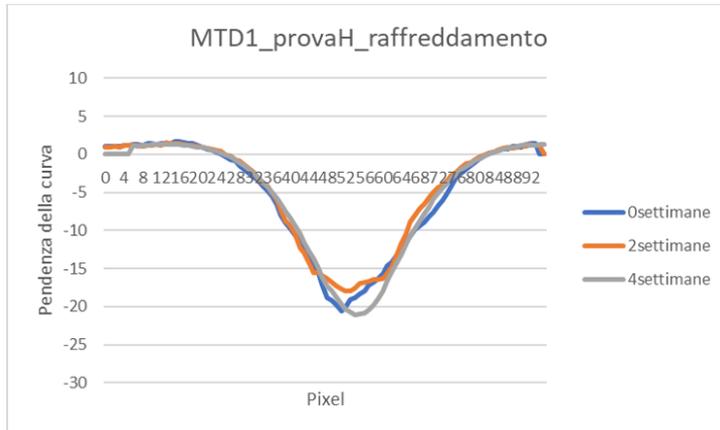


Figura 98-Pendenza della curva di raffreddamento in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%)

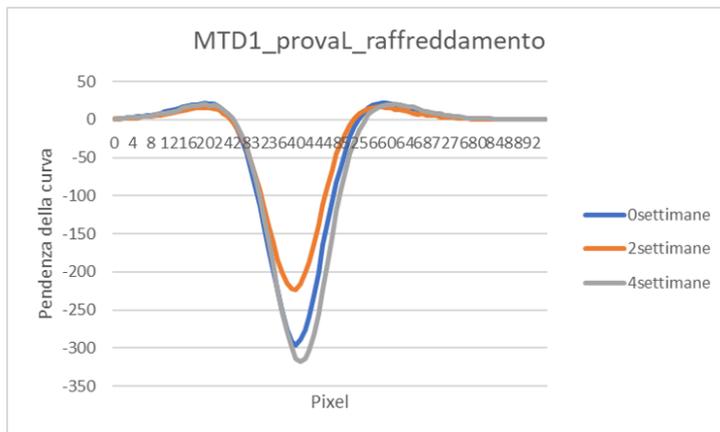


Figura 99-Pendenza della curva di raffreddamento in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%)

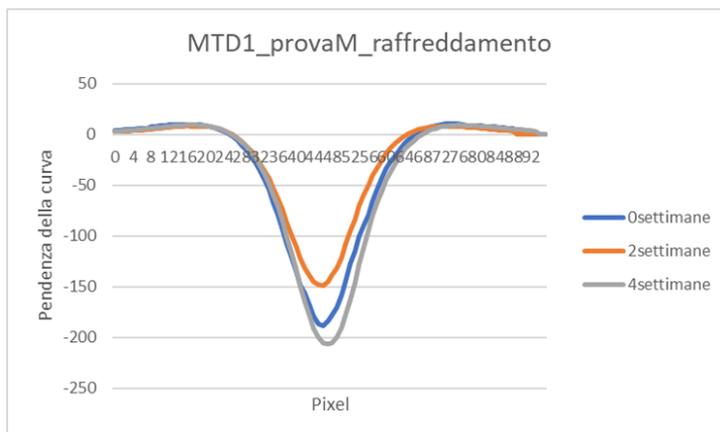


Figura 100-Pendenza della curva di raffreddamento in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%)

Come è possibile notare, la minima pendenza della retta di regressione della curva di raffreddamento assume valori decrescenti (crescenti in modulo) all'aumentare della severità del danneggiamento nelle condizioni di prova F e G. Tale osservazione non risulta verificata nel caso del campione corrosivo per 6 settimane, probabilmente a causa delle anomalie presenti sulla superficie della lamiera. Nelle condizioni di prova H, L ed M, le minime pendenze delle curve di raffreddamento dei campioni non corrosivo e corrosivo per 4 settimane raggiungono valori comparabili tra loro e minori della minima pendenza rilevata per il campione corrosivo per 2 settimane. Di conseguenza, per ottenere una correlazione tra i risultati termografici e il grado di corrosione è necessario utilizzare condizioni di prova caratterizzate da una elevata potenza del laser associata ad una elevata durata della sollecitazione.

Per le figure 96-100 si è deciso di non utilizzare la medesima scala di misura al fine di consentire una migliore osservazione dei confronti tra i profili dei valori di pendenza al variare del grado di danneggiamento. Nelle figure 101-103 sono mostrate, a parità di scala, le comparazioni tra i profili ottenuti con il MTD1 al variare delle condizioni di sollecitazione e a parità di corrosione.

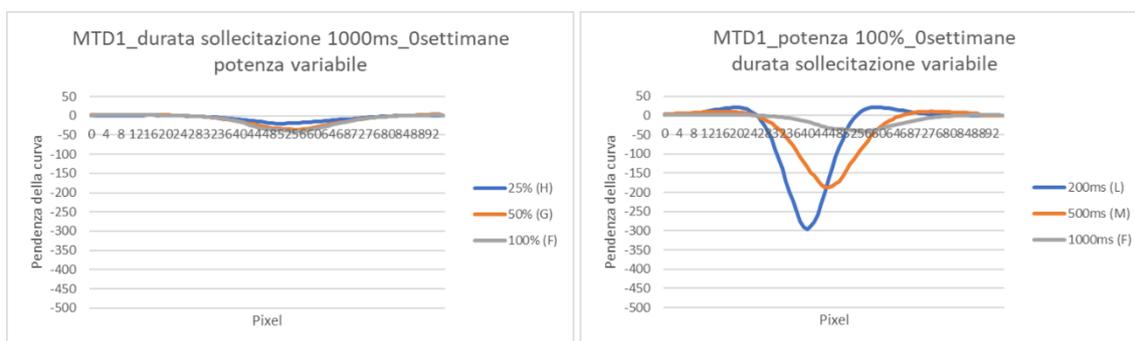


Figura 101-Pendenza della curva di raffreddamento per il campione non corrosivo

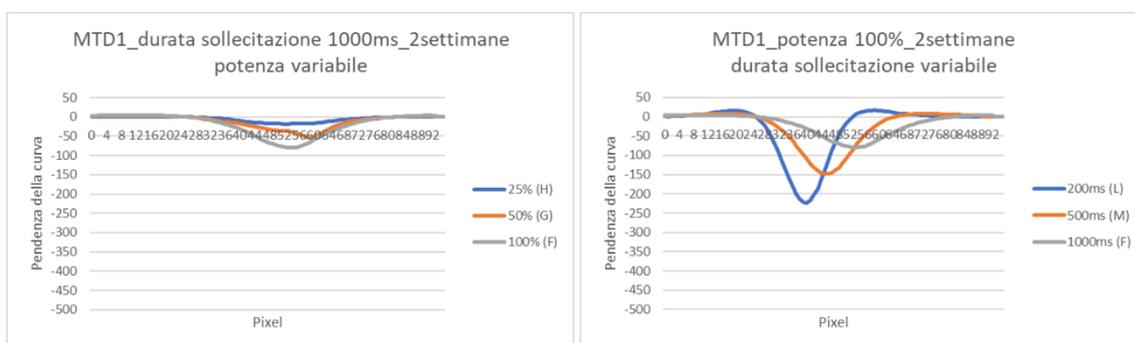


Figura 102-Pendenza della curva di raffreddamento per il campione corrosivo per 2 settimane

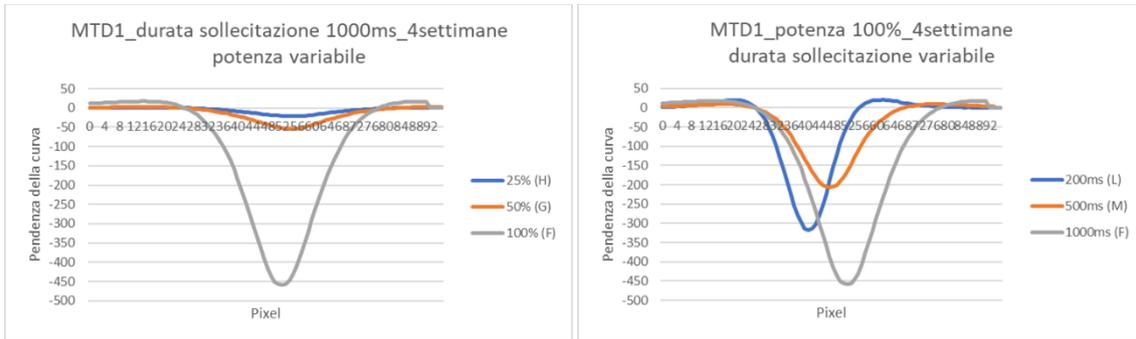


Figura 103-Pendenza della curva di raffreddamento per il campione corrosivo per 4 settimane

Come è possibile notare dalle figure 101-102, il minimo valore della pendenza della retta di regressione della curva di raffreddamento viene raggiunto nelle condizioni di prova L nel caso dei campioni non corrosivo e corrosivo per 2 settimane. Tale prova associa la massima potenza del laser alla minima durata della sollecitazione. La lamiera sottoposta a nebbia salina per 4 settimane, invece, mostra in figura 103 un comportamento differente poiché il minimo valore della pendenza viene raggiunto nelle condizioni F, le quali sono caratterizzate da massima durata e massima potenza della sollecitazione.

I minimi valori di pendenza rilevati dai profili mostrati nelle figure 101-103 sono stati riportati su un diagramma cartesiano al fine di individuarne la dipendenza dai parametri della sollecitazione. In figura 104 è mostrata la correlazione lineare o quadratica tra tali valori minimi e la potenza del laser o la durata del gradino.

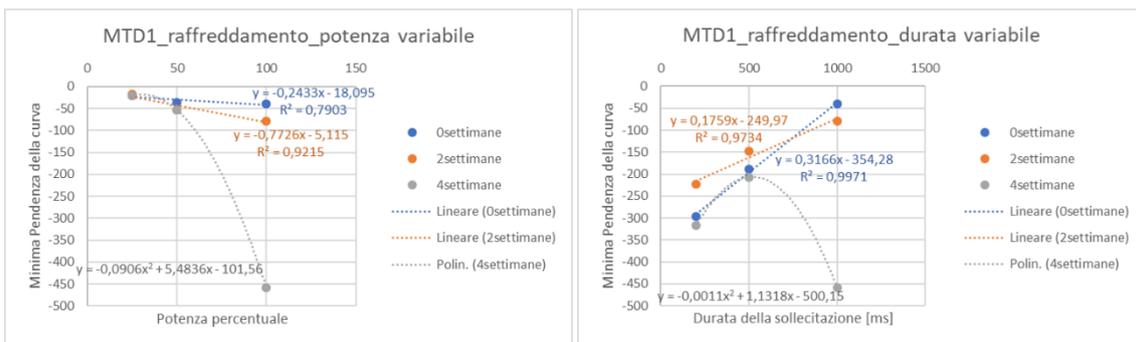


Figura 104-Andamenti delle minime pendenze al variare dei parametri della sollecitazione

È possibile notare che i campioni non corrosivo e corrosivo per 2 settimane manifestano un comportamento simile al variare dei parametri della sollecitazione. Per entrambi i campioni, infatti, è stato sufficiente utilizzare una funzione lineare per collegare i differenti punti individuati sul diagramma cartesiano. Per il campione corrosivo per 4

settimane è stata invece necessaria una funzione quadratica per rappresentare la dipendenza dai parametri della sollecitazione. La maggiore discordanza tra i comportamenti dei campioni è stata rilevata in corrispondenza della prova F, la quale associa la massima potenza del laser alla massima durata del gradino.

Per calcolare l'estensione dell'area centrale dei profili di pendenza, è stata tracciata una retta di riferimento su ognuna delle figure 96-100 con ordinata pari al 20% del minimo valore raggiunto dalla curva più alta rappresentata nella medesima figura. In figura 105 è mostrato un esempio della procedura di misura della larghezza dell'area centrale e sono riportati i valori di estensione valutati per tutte le prove sperimentali.

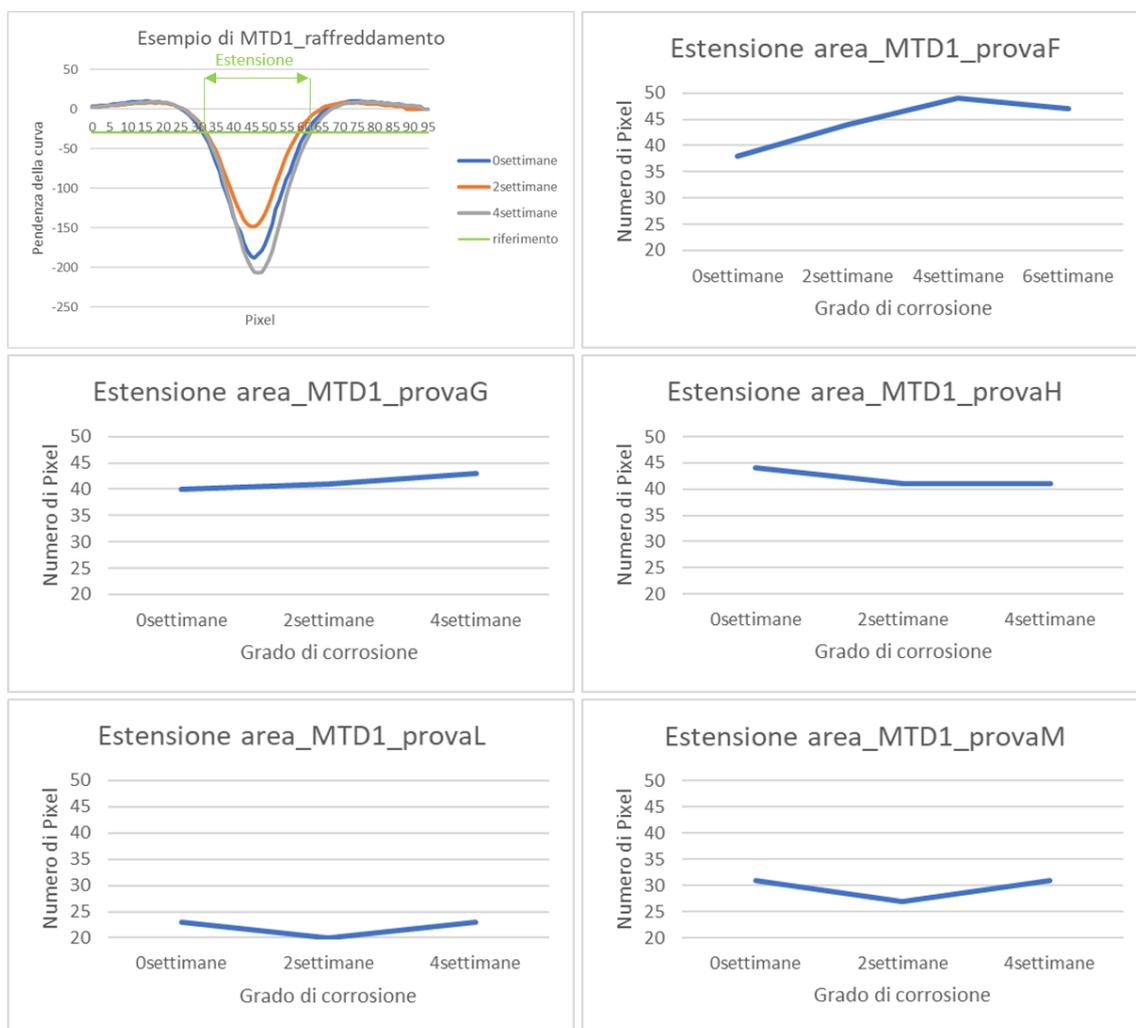


Figura 105-estensione dell'area centrale del profilo di pendenza per differenti condizioni di prova (F: 1000ms, 100%; G: 1000ms, 50%; H: 1000ms, 25%; L: 200ms, 100%; M: 500ms, 100%)

Come è possibile notare, l'estensione dell'area centrale assume valori crescenti all'aumentare del grado di danneggiamento corrosivo nel caso delle prove F e G, ad eccezione del campione corrosivo per 6 settimane. Tali prove sono caratterizzate da elevati valori di potenza e dalla massima durata della sollecitazione. Nelle condizioni di prova H, L ed M tale correlazione non è riscontrabile poiché l'estensione del profilo del campione corrosivo per 2 settimane risulta inferiore alle estensioni degli altri profili.

Terminata l'analisi dei risultati ottenuti tramite il primo algoritmo, nelle figure 106-110 sono riportati i confronti tra i profili dei valori generati dal MTD2 al variare del grado di corrosione e a parità di condizioni di prova sperimentale. Occorre sottolineare che i profili rappresentati sono stati traslati lungo l'asse delle ascisse affinché il loro primo valore prossimo allo zero si trovasse sul pixel 26.

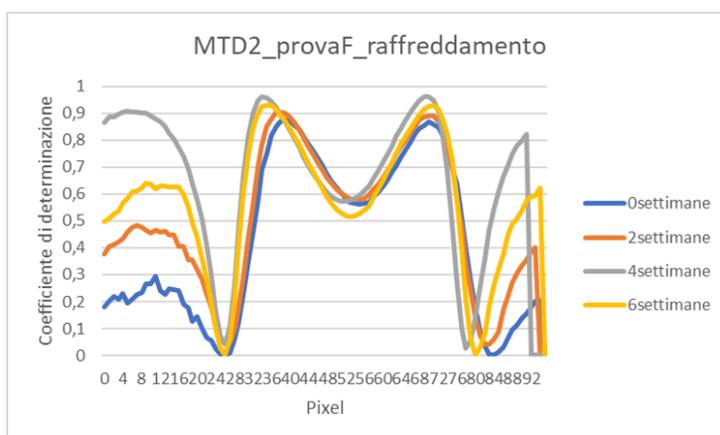


Figura 106-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%)

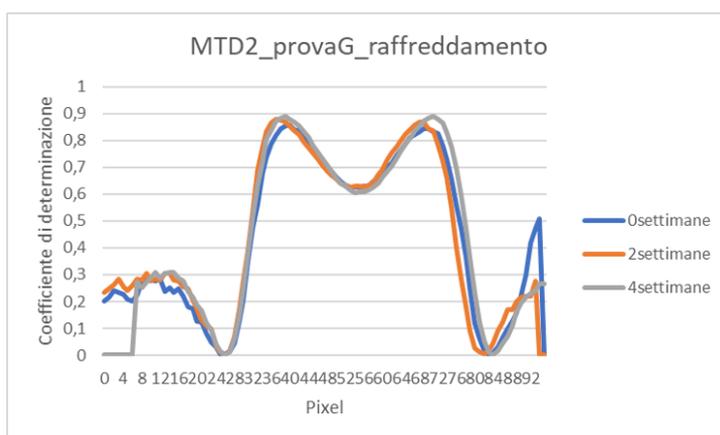


Figura 107-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%)

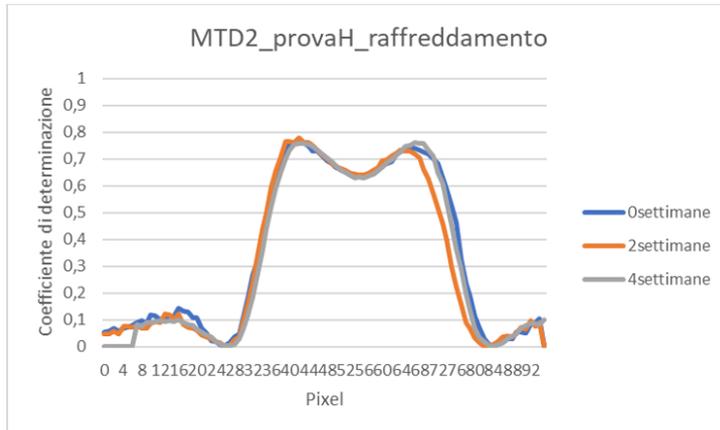


Figura 108-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%)

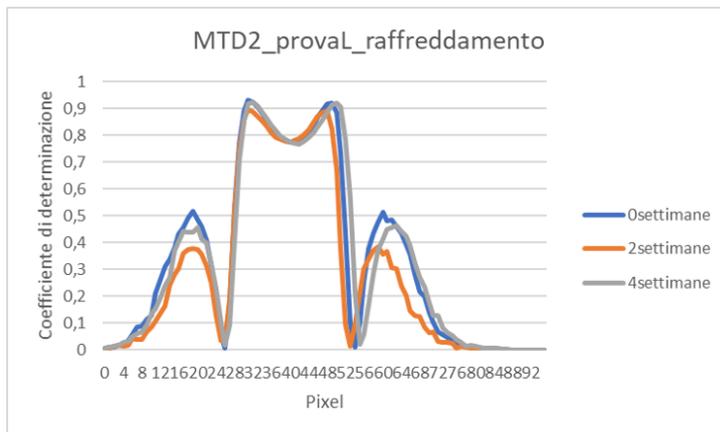


Figura 109-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%)

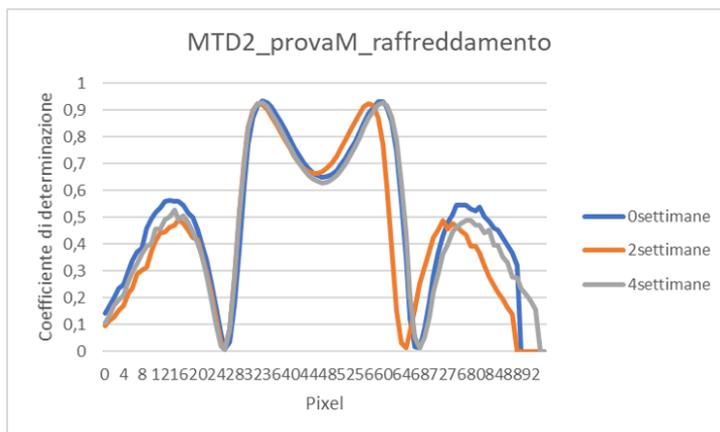


Figura 110-Coefficiente di determinazione in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%)

Come è possibile notare, il coefficiente di determinazione ottenuto dall'analisi del tratto di raffreddamento raggiunge i valori più elevati nelle condizioni di prova F, L ed M, le quali sono caratterizzate dalla massima potenza del laser.

Il parametro più interessante dei profili mostrati nelle figure 106-110 è l'estensione dell'area centrale, la quale è stata quantificata misurando la distanza tra i pixel corrispondenti ai valori di  $R^2$  prossimi allo zero. In figura 111 è mostrato un esempio della procedura di valutazione della larghezza dell'area centrale e sono riportati i valori delle estensioni misurate per tutte le prove.

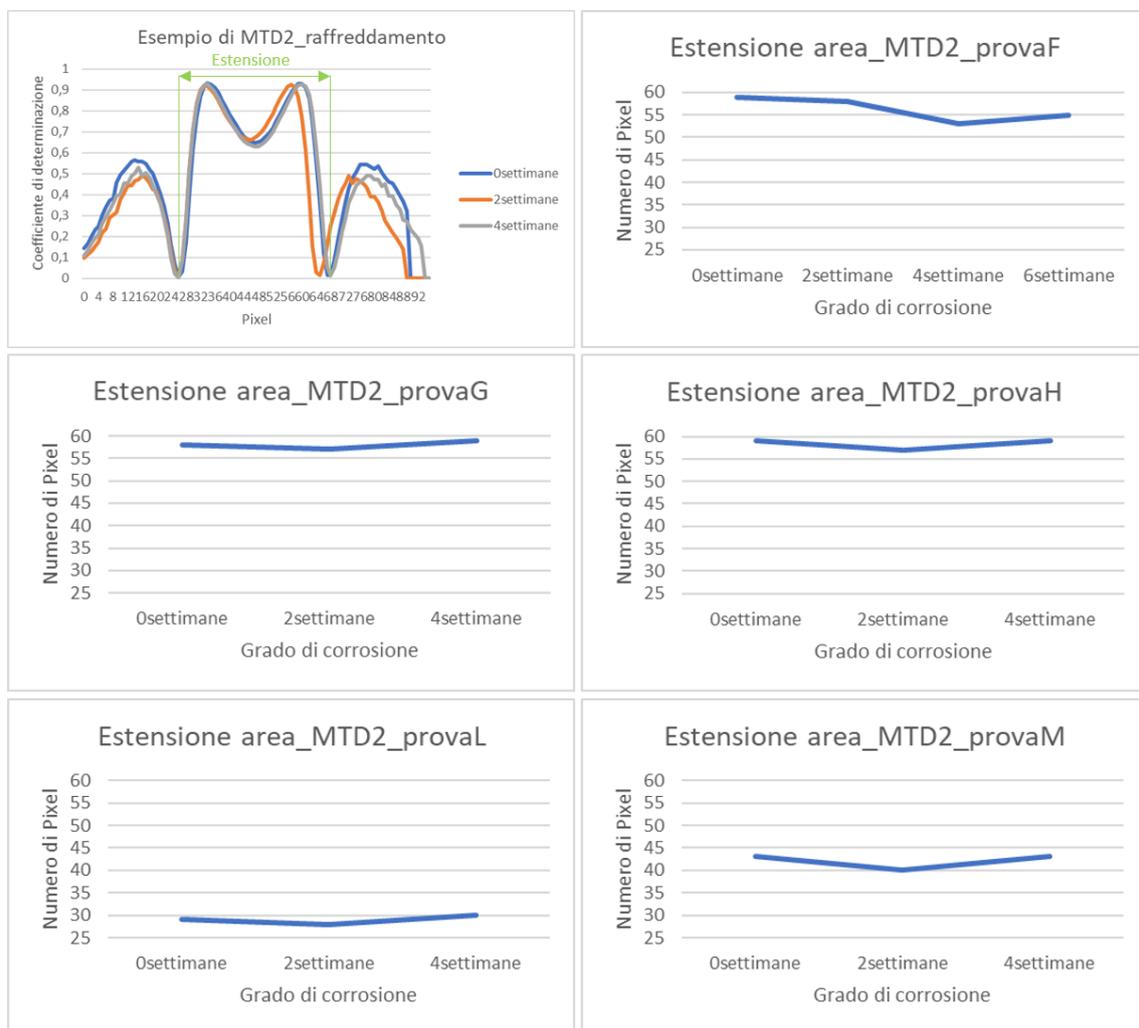


Figura 111-estensione dell'area centrale del profilo del coefficiente di determinazione per differenti condizioni di prova (F: 1000ms, 100%; G: 1000ms, 50%; H: 1000ms, 25%; L: 200ms, 100%; M: 500ms, 100%)

Osservando la figura 111 è possibile notare che l'estensione dell'area centrale del profilo del coefficiente di determinazione assume un valore decrescente all'aumentare del grado di danneggiamento corrosivo nelle condizioni di prova F. Tale osservazione non risulta verificata nel caso del campione corrosivo per 6 settimane, probabilmente a causa delle anomalie della superficie corrosa della lamiera. La correlazione appena osservata tra l'estensione dell'area centrale e la severità del danneggiamento non si verifica in tutte le altre condizioni di sollecitazione. Le prove F, G e H, caratterizzate dal massimo valore della durata del gradino, consentono inoltre di ottenere estensioni più elevate rispetto a quelle misurate nelle condizioni L ed M, caratterizzate da una minore durata della sollecitazione. I risultati mostrati in figura 111 confermano la necessità di stimolare i campioni di interesse per un lungo periodo di tempo tramite una sorgente ad elevata potenza al fine di individuare una correlazione tra i risultati delle analisi termografiche e la severità del danneggiamento corrosivo.

## Capitolo 4

### Conclusioni e Sviluppi futuri

La ricerca sperimentale, condotta presso il Centro Ricerche Fiat e descritta in questa tesi, ha consentito di individuare una metodologia di analisi dei fenomeni corrosivi tramite tecnica termografica attiva in riflessione. A tal fine, è stata valutata la risposta termica alla stimolazione laser di campioni in acciaio a differente grado di danneggiamento corrosivo superficiale prodotto in camera salina. Uno degli aspetti più innovativi della ricerca condotta è la configurazione sperimentale adottata, la quale ha previsto la stimolazione della superficie integra della lamiera indagata, opposta a quella corrosa di cui si desidera quantificare la severità del danneggiamento. Le prove sperimentali sono state eseguite nelle modalità Lock-In e Step Heating, variando di volta in volta i parametri della stimolazione. Nel caso delle analisi Lock-In, sono state valutate cinque combinazioni tra differenti valori di potenza del laser e di periodo dell'onda quadra eccitatrice; nel caso delle prove Step-Heating, sono state indagate altrettante combinazioni tra diversi valori di potenza della sorgente e di durata della stimolazione. Le risposte termiche dei campioni sollecitati nelle differenti condizioni di prova sono state rilevate tramite una termocamera e successivamente analizzate tramite il software di post-processamento IRTA. I risultati forniti dagli algoritmi di elaborazione sono stati posti a confronto al variare dei parametri della sollecitazione e al variare del grado di corrosione, al fine di individuare la procedura sperimentale più idonea alla caratterizzazione del danneggiamento. Per quantificare le differenze tra i campioni analizzati in termini di severità del fenomeno della corrosione, sono state valutate le variazioni dello spessore residuo delle lamiere tramite un microscopio ottico metallografico rovesciato.

Le analisi micrografiche hanno rilevato una progressiva riduzione dello spessore del materiale base all'aumentare del periodo di permanenza dei campioni in camera salina, dimostrando l'effettivo progredire del danneggiamento corrosivo. Sulla base di considerazioni teoriche, i difetti presenti in un materiale ne riducono la diffusività del calore causando una più intensa risposta termica, in seguito ad una sollecitazione, rispetto ad aree integre. Tale osservazione ha trovato riscontro nei risultati sperimentali ottenuti dalle analisi termografiche eseguite con specifiche combinazioni dei parametri della sollecitazione laser. Nel caso della tecnica Lock-In, è stato rilevato un incremento dei massimi valori di ampiezza, dell'onda termica di risposta del materiale, all'aumentare del grado di corrosione per la condizione di prova caratterizzata dalla massima potenza del laser e da breve periodo dell'onda eccitatrice. Tale correlazione, tra i risultati termografici e la severità del danneggiamento, è stata confermata anche dai valori di fase rilevati, i

quali hanno mostrato un'estensione crescente dell'area del campione termicamente eccitata all'aumentare del grado di corrosione nel caso di utilizzo di elevate potenze del laser. Le prove eseguite con bassi valori di potenza e differenti periodi dell'onda quadra eccitatrice hanno fornito risultati simili e non correlabili al crescente grado di danneggiamento, motivo per cui sono state ritenute non idonee alla caratterizzazione del fenomeno corrosivo. Tale selezione dei più adeguati parametri della sollecitazione trova riscontro teorico nell'osservazione che l'analisi termografica di materiali caratterizzati da bassa emissività, come gli acciai, necessita in genere di elevate potenze della sorgente termica. Riguardo le prove termografiche condotte in modalità Step Heating, le considerazioni sui risultati ottenuti dall'analisi della fase di riscaldamento sono state ritenute coerenti con quelle sui risultati ottenuti dall'analisi della fase di raffreddamento. In entrambi i casi, infatti, è stato riscontrato un incremento del modulo della pendenza della curva di riscaldamento/raffreddamento all'aumentare del grado di danneggiamento per le prove caratterizzate da elevata potenza del laser e da elevata durata della sollecitazione. Nel caso di utilizzo di ridotte potenze della sorgente o di brevi periodi di eccitazione, non sono state rilevate correlazioni tra i risultati termografici e la crescente severità del danneggiamento, probabilmente a causa dell'insufficiente energia termica fornita al materiale. Per tale motivo, le condizioni di prova appena citate sono state ritenute inefficaci ai fini dell'analisi del fenomeno della corrosione.

La ricerca sperimentale condotta costituisce la fase preliminare di un più ampio studio del fenomeno della corrosione tramite tecnica termografica. La selezione effettuata dei parametri di sollecitazione ritenuti più idonei, i risultati ottenuti e le considerazioni che sono state tratte aprono la strada a future ricerche. Sarà necessario, infatti, identificare la più corretta metodologia di indagine termografica di campioni corrosi verniciati e di componenti della scocca di un'automobile. Grazie a tali studi sperimentali sarà possibile applicare la tecnica termografica attiva in riflessione sul campo nelle industrie automobilistiche, consentendo di effettuare valutazioni di qualità rapide e non distruttive. L'identificazione di nuove metodologie di analisi e di nuovi ambiti di applicazione delle tecniche termografiche sono al centro dei più recenti studi. Le ricerche in tale ambito sono in continua evoluzione e l'attenzione a loro riservata è in crescente aumento grazie ai numerosi vantaggi che le tecniche non distruttive offrono.

## Bibliografia

- [1] FLIR Systems: "ThermaCAM Researcher", User's Manual, Professional Edition Version 2.8 SR-1, 2004
- [2] Dugand et al.: "Method for detecting corrosion of a surface not exposed to view of a metal piece, by means of thermographic analysis", Patent No. US 10,145,800 B1
- [3] S. Doshvarpassand, C. Wu, X. Wang: "An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography", *Infrared Physics & Technology* 96 (2019) 366-389
- [4] W. Ben Larbi, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein, A. Bendada, X. Maldague: "Experimental Comparison of Lock-In and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials", Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Canada, 2010
- [5] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes, X. Maldague: "Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-In Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP", *Sensors* 2016, 16, 743; doi: 10.3390/s16050743
- [6] G. Fantoni, L.G. Merletti, A. Salerno "Stato dell'arte della termografia Lock-In applicata a componenti di elicottero: analisi termoelastica e rilevazione di difetti", Giornata di studio "Stato dell'innovazione del metodo Termografico nelle sue applicazioni industriali, civili e dei beni culturali", Padova, 1° ottobre 2018
- [7] N. Rajic, C. Antolis: "An investigation of noise performance in optical lock-in thermography", *Infrared Physics & Technology* 87 (2017) 1-10
- [8] R. Deboshree, T. Suneet: "Efficient SNR determination Algorithm for lock-in thermography defect detection and quantification", Centre for Applied in Electronics Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110016
- [9] D. Wu, G. Busse: "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials", *Rev. Gén. Therm.* (1998) 37, 693-703
- [10] C. Meola, G.M. Carlomagno: "Recent advantages in the use of infrared thermography", *Measurement Science and Technology* 15 (2004) R27-R58

- [11] O. Breitenstein, S. Sturm: “Lock-In thermography for analyzing solar cells and failure analysis in other electronic components”, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, DOI: 10.1080/17686733.2018.1563349
- [12] M. Calì, G. La Rosa, F. Lo Salvio, L. Maiolino: “Valutazione della propagazione di cricche in provini saldati con tecniche di emissione acustica e termografica”, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università di Catania
- [13] A.R. Urbanek, J. Bar: “Evaluation of the thermo-elastic behaviour of a high-alloyed steel by Fourier transformation based Lock-In thermography”, 10.21611/qirt.2018.127
- [14] Th. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert, G. Busse: “Thermography with excitation by elastic waves: comparison of techniques (pulse, burst, lockin)”, 10.21611/qirt.2002.003
- [15] Y. He, G. Y. Tian, M. Pan, D. Chen: “Eddy current pulsed phase thermography and feature extraction”, *Applied Physics Letters* 103, 084104 (2013)
- [16] A. Yin, B. Gao, G. Y. Tian, W. L. Woo, K. Li: “Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography”, *Journal of Applied Physics* 113, 064101 (2013)
- [17] S. Pickering, D. Almond: “Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques”, *NDT&E International* 41 (2008) 501-509
- [18] P. Daryabor, M.S. Safizadeh: “Comparison of three thermographic post processing methods for the assessment of a repaired aluminum plate with composite patch”, *Infrared Physics & Technology* 79 (2016) 58-67
- [19] C. Xu, J. Xie, W. Huang, G. Chen, X. Gong: “Improving defect visibility in square pulse thermography of metallic components using correlation analysis”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 103 (2018) 162-173
- [20] L. Junyan, W. Yang, D. Jingmin: “Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT”, *Infrared Physics & Technology* 53 (2010) 348-357
- [21] G. Jinlong, L. Junyan, W. Fei, W. Yang: “Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation the size and depth of subsurface defects of CFRP composite using lock-in thermography”, *Infrared Physics & Technology* 71 (2015) 439-447

- [22] D.P. Almond, S.G. Pickering: “An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit”, J. Appl. Phys. 111 (9) (2012) 093510
- [23] J.R. Davis: “Corrosion: Understanding the Basics”, number 06691G, ASM International (2000)
- [24] T.L. Anderson: “Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications”, CRC Taylor & Francis Group, (2005)
- [25] S. Marinetti, V. Vavilov: “IR thermographic detection and characterization of hidden corrosion in metals: General analysis”, Corrosion Science 52 (2010) 865-872
- [26] E. Grinzato, V. Vavilov, P.G. Bison, S. Marinetti: “Hidden corrosion detection in thick metallic components by transient IR thermography”, Infrared Physics & Technology 49 (2007) 234-238
- [27] Diagnostic Engineering Solutions S.r.l.: “MultiDES System Laser”, Manuale (2017)
- [28] FLIR: “X6540sc – X6550sc”, User Manual, DC084U, Version D (2013)
- [29] R. Nobile: lezioni del corso di “Progettazione Assistita e Meccanica Sperimentale: Termografia”, corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Università del Salento

# Appendice

## Risultati dell'analisi Lock-In

Valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo acquisiti tramite ROI di area (4x4 pixel) dalle immagini di ampiezza della prima armonica. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

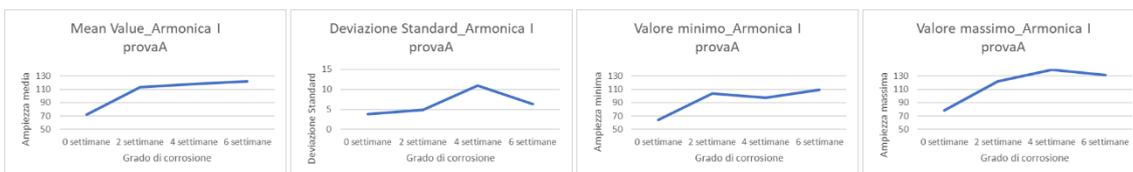


Figura 112-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

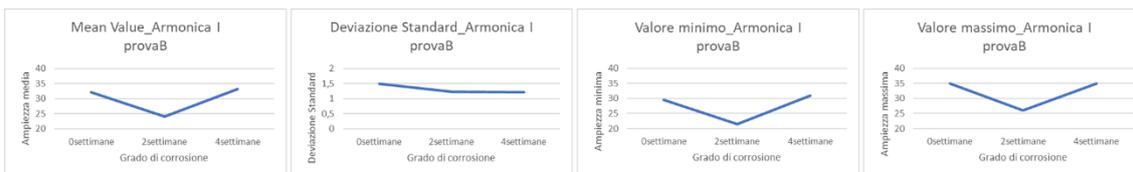


Figura 113-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

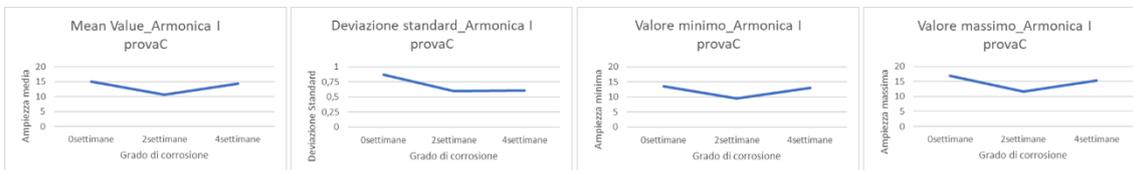


Figura 114-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

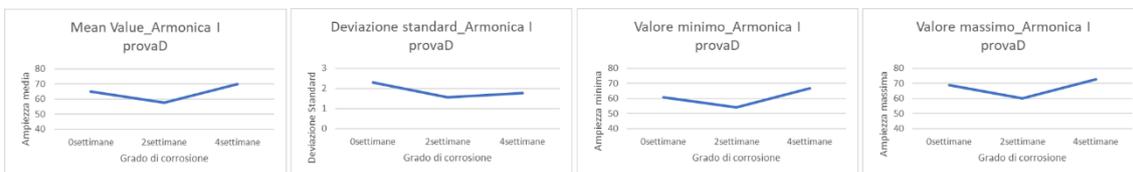


Figura 115-Ampiezza della prima armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

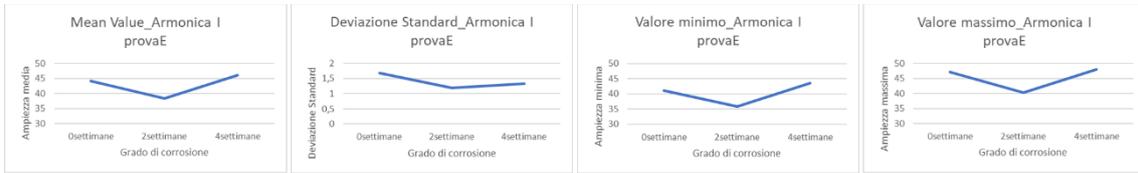


Figura 116-Amplitude della prima armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

Profilo di fase della prima armonica acquisito tramite ROI lineare (sinistra) e profilo di fase della prima armonica normalizzato a cui sono stati sommati  $90^\circ$  nella regione centrale (destra). Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

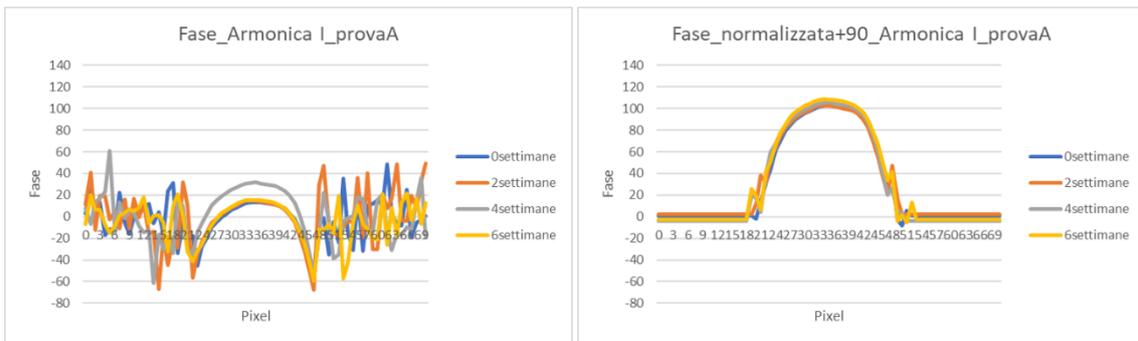


Figura 117-Fase della prima armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

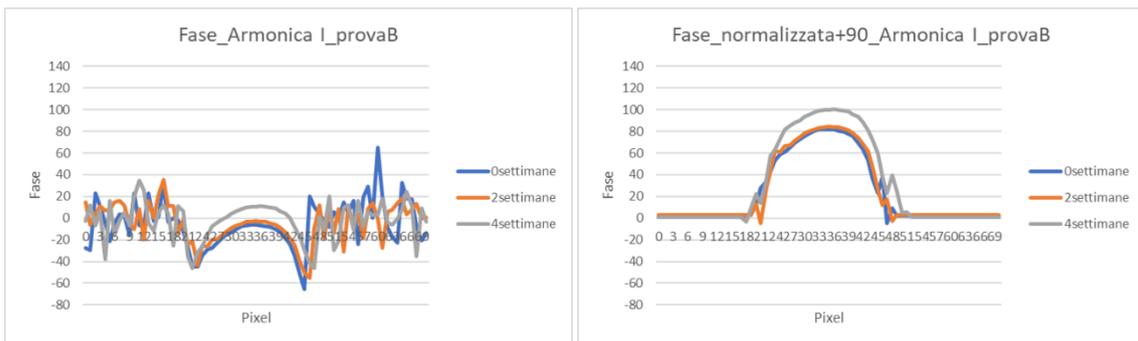


Figura 118-Fase della prima armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

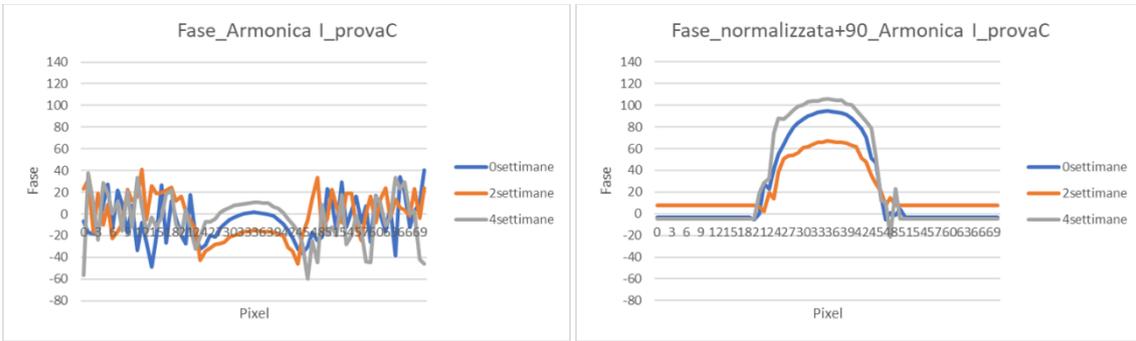


Figura 119-Fase della prima armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

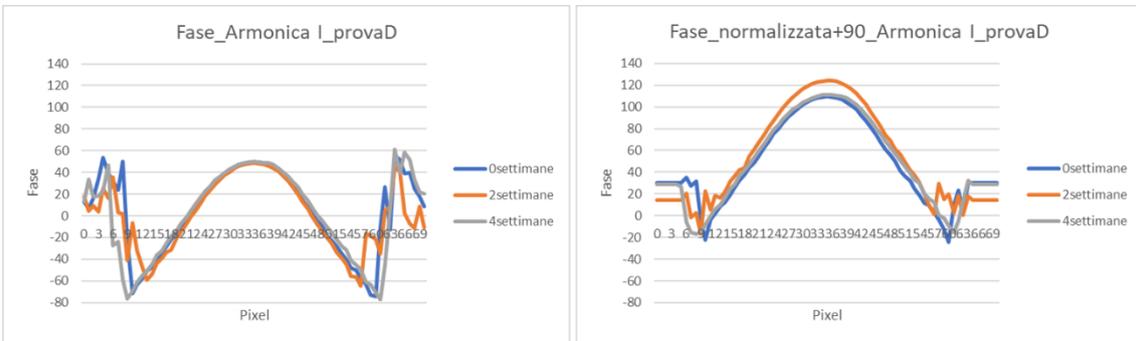


Figura 120-Fase della prima armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

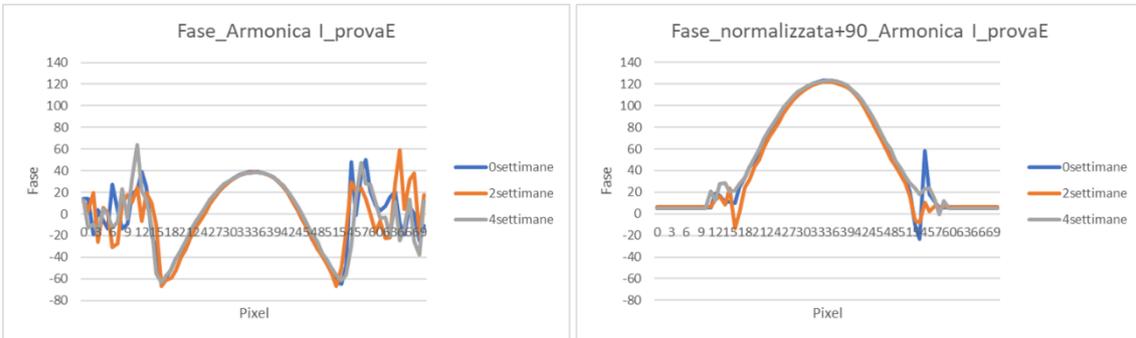


Figura 121-Fase della prima armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

Profili di ampiezza (sinistra) e fase (destra) della terza armonica acquisiti tramite ROI lineari. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

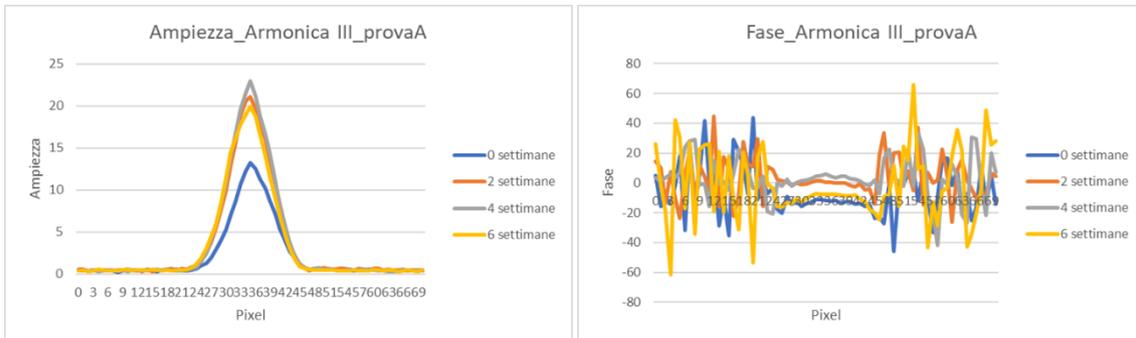


Figura 122-Ampiezza e fase della terza armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

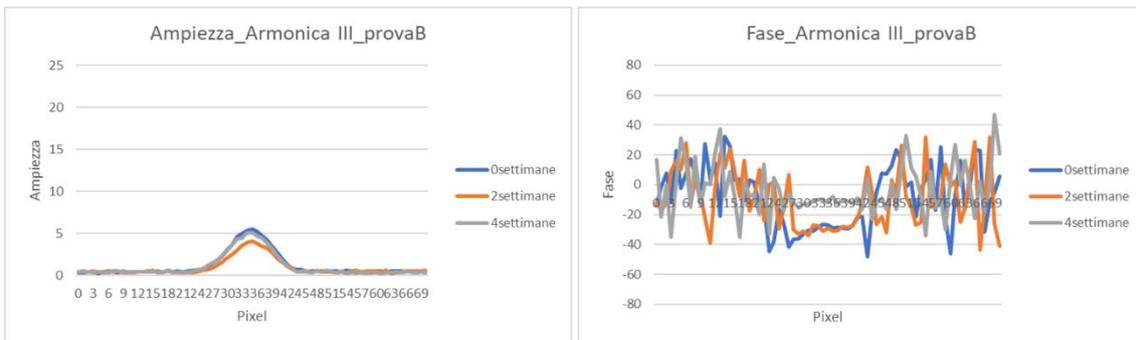


Figura 123-Ampiezza e fase della terza armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

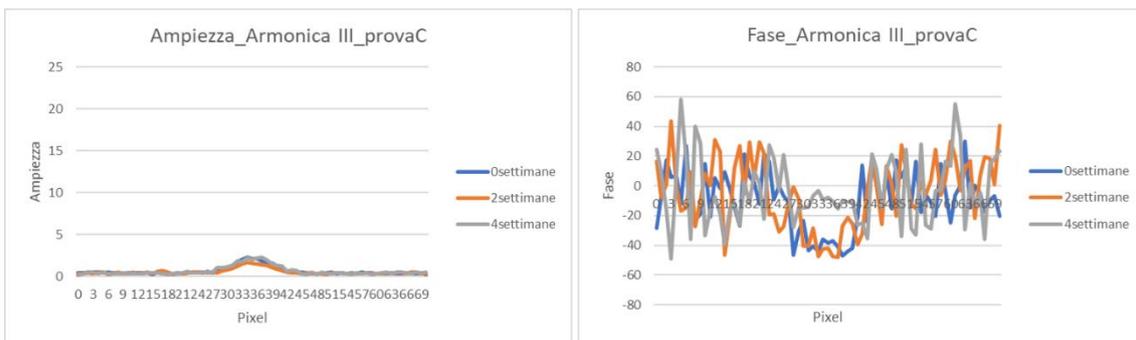


Figura 124-Ampiezza e fase della terza armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

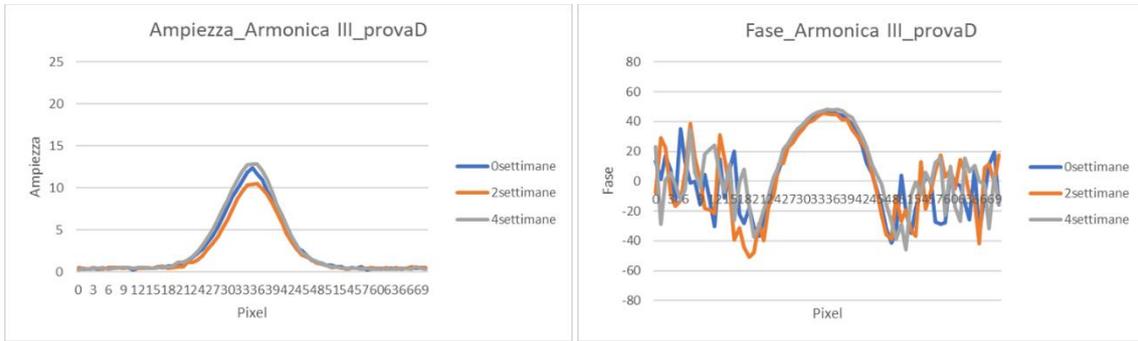


Figura 125-Ampiezza e fase della terza armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

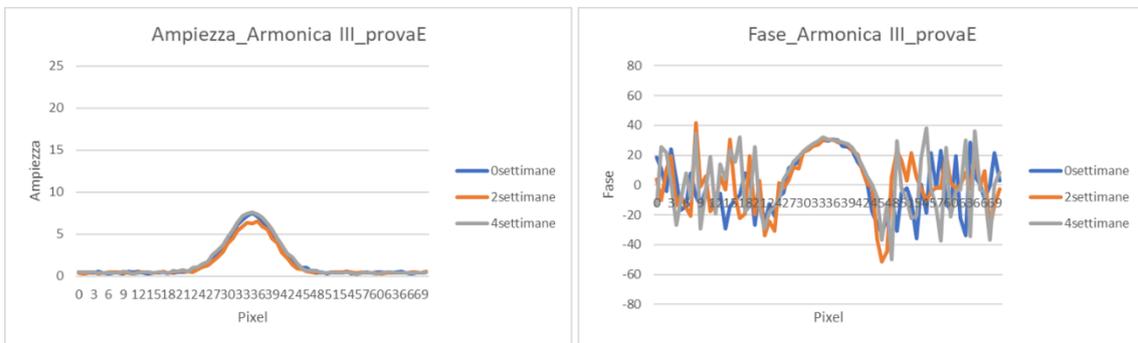


Figura 126-Ampiezza e fase della terza armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

Profili di ampiezza (sinistra) e fase (destra) della quinta armonica acquisiti tramite ROI lineari. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

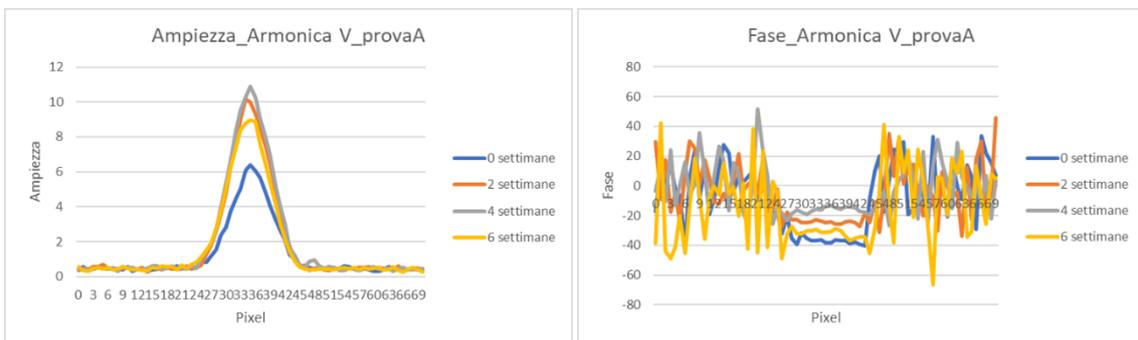


Figura 127-Ampiezza e fase della quinta armonica in condizioni di prova A (periodo 200ms, potenza 100%)

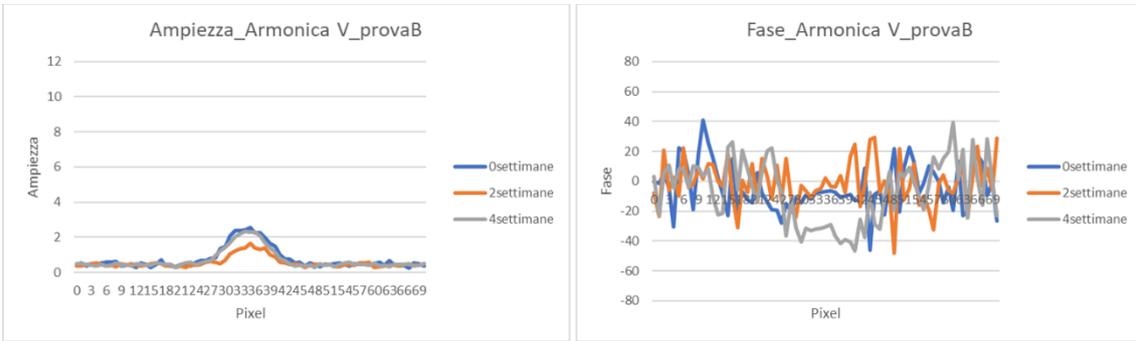


Figura 128-Ampiezza e fase della quinta armonica in condizioni di prova B (periodo 200ms, potenza 50%)

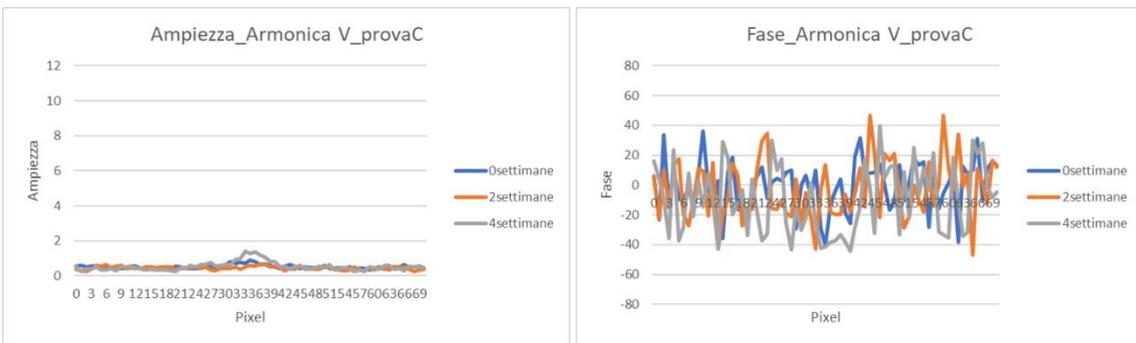


Figura 129-Ampiezza e fase della quinta armonica in condizioni di prova C (periodo 200ms, potenza 25%)

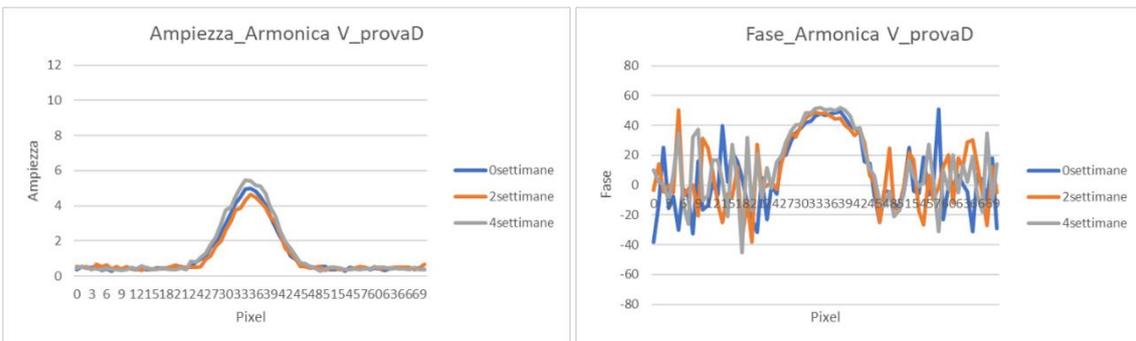


Figura 130-Ampiezza e fase della quinta armonica in condizioni di prova D (periodo 2000ms, potenza 25%)

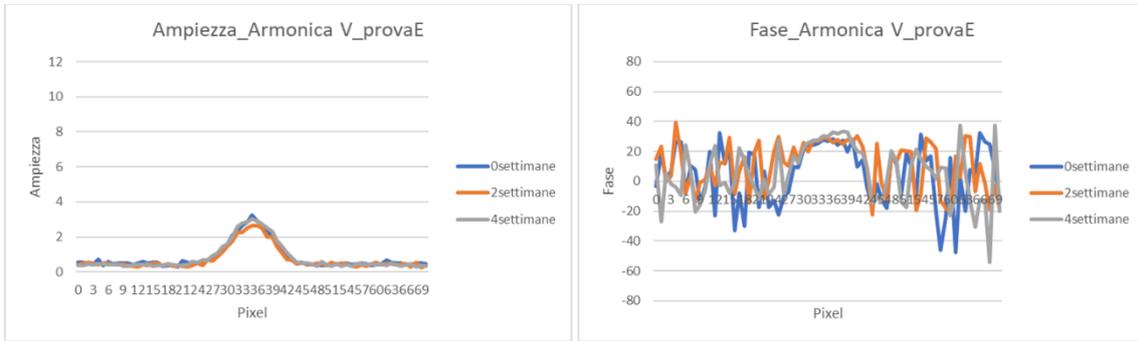


Figura 131-Ampiezza e fase della quinta armonica in condizioni di prova E (periodo 1000ms, potenza 25%)

## Risultati dell'analisi Step-Heating, fase di riscaldamento

Valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo acquisiti tramite ROI di area (20x20 pixel) dalle immagini generate dal MTD1 durante l'analisi della fase di riscaldamento. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

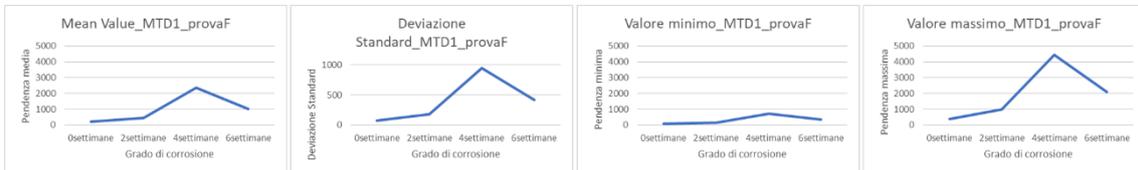


Figura 132-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%) - riscaldamento

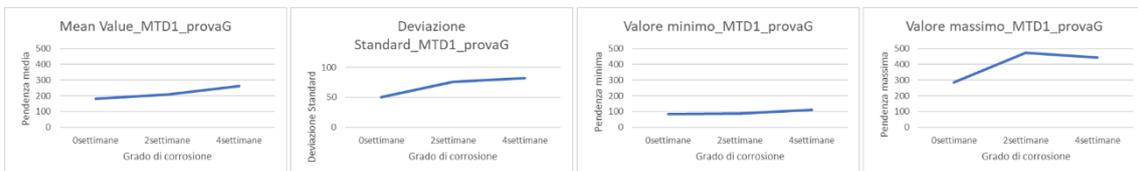


Figura 133-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova G (durata 100ms, potenza 50%) - riscaldamento

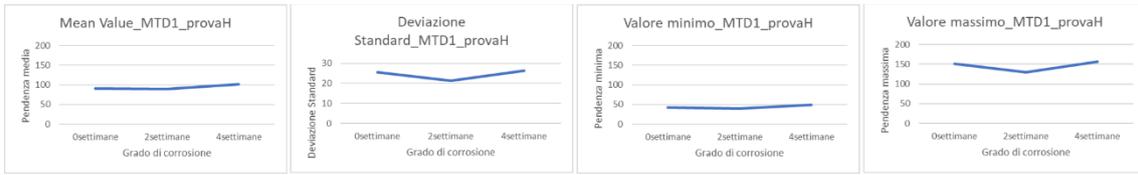


Figura 134-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%) - riscaldamento

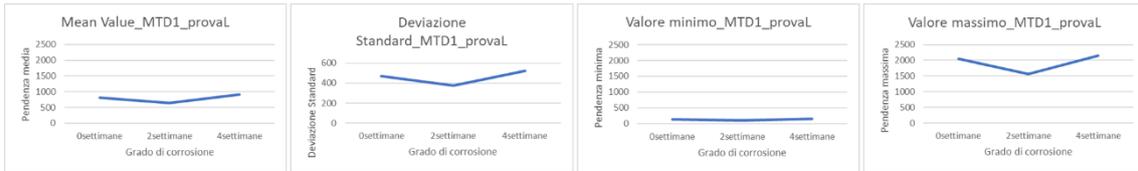


Figura 135-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%) - riscaldamento

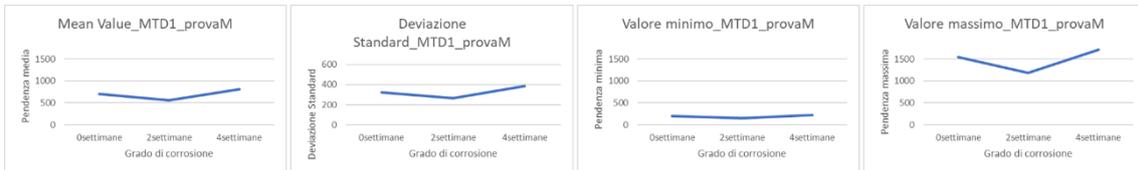


Figura 136-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%) - riscaldamento

Valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo acquisiti tramite ROI di area (20x20 pixel) dalle immagini generate dal MTD2 durante l'analisi della fase di riscaldamento. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.



Figura 137-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%) - riscaldamento

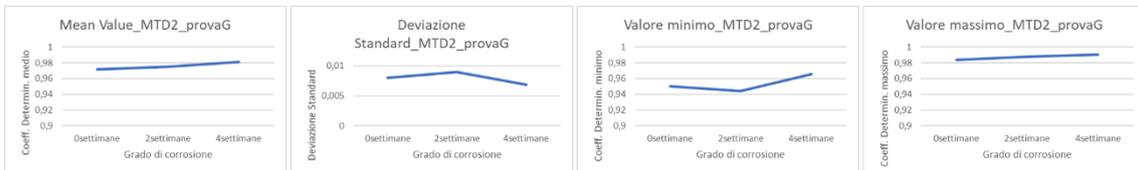


Figura 138-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%) - riscaldamento

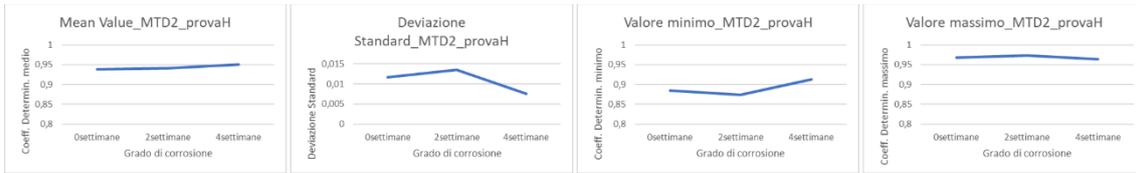


Figura 139-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%) - riscaldamento

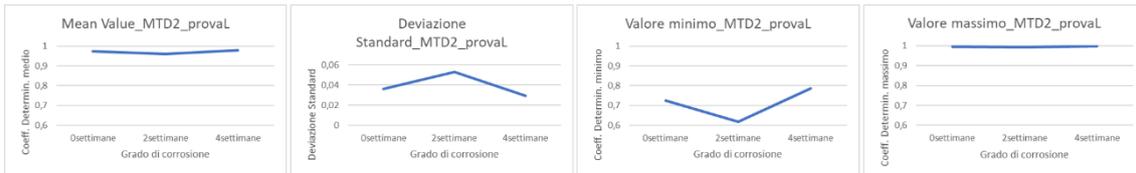


Figura 140-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%) - riscaldamento

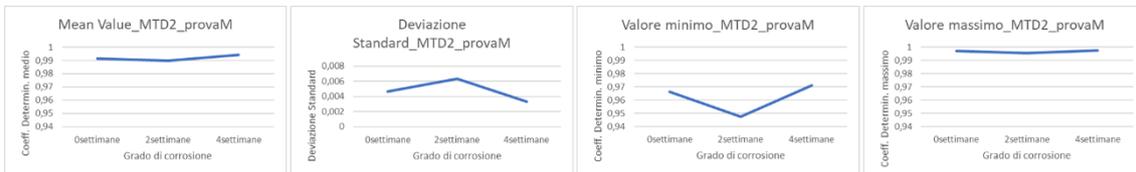


Figura 141-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%) - riscaldamento

## Risultati dell'analisi Step-Heating, fase di raffreddamento

Valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo acquisiti tramite ROI di area (20x20 pixel) dalle immagini generate dal MTD1 durante l'analisi della fase di raffreddamento. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

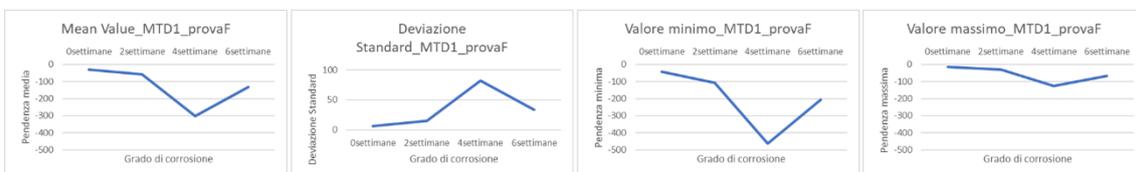


Figura 142-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%) - raffredd.

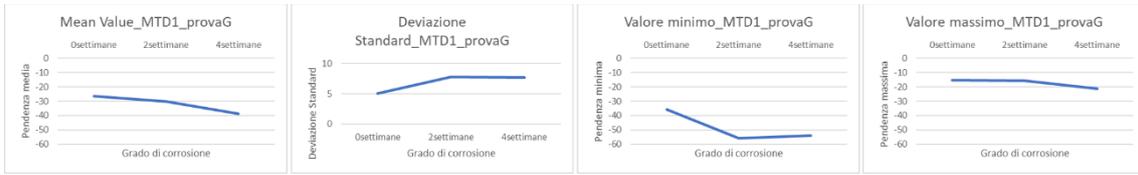


Figura 143-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%) – raffredd.



Figura 144-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%) – raffredd.

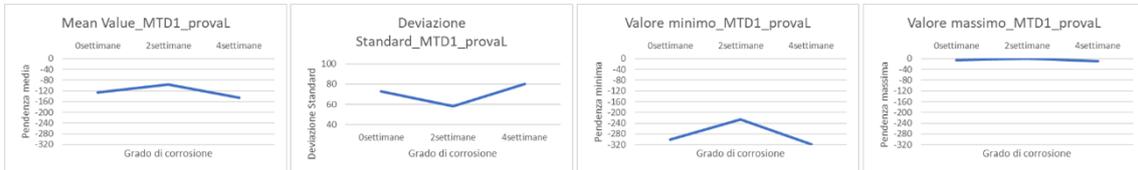


Figura 145-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%) – raffredd.

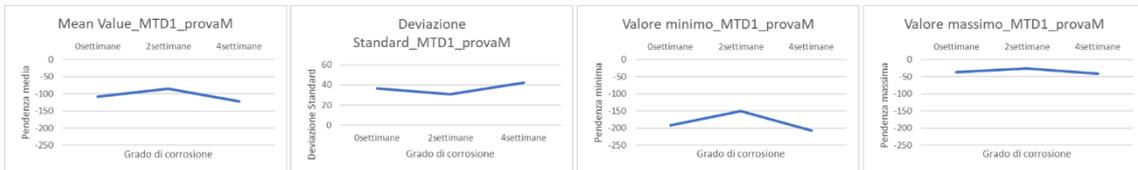


Figura 146-Valori generati dal MTD1 in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%) – raffredd.

Valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo acquisiti tramite ROI di area (20x20 pixel) dalle immagini generate dal MTD2 durante l'analisi della fase di raffreddamento. Confronto a parità di condizioni di prova e al variare del grado di corrosione.

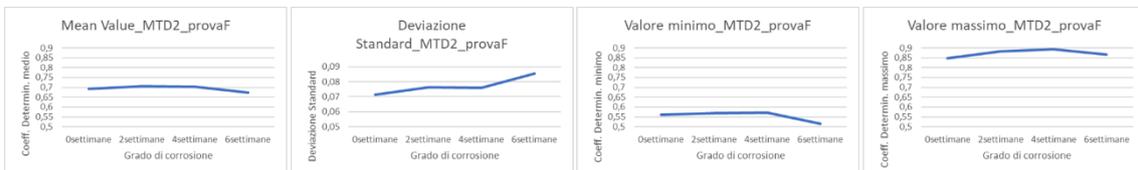


Figura 147-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova F (durata 1000ms, potenza 100%) – raffredd.

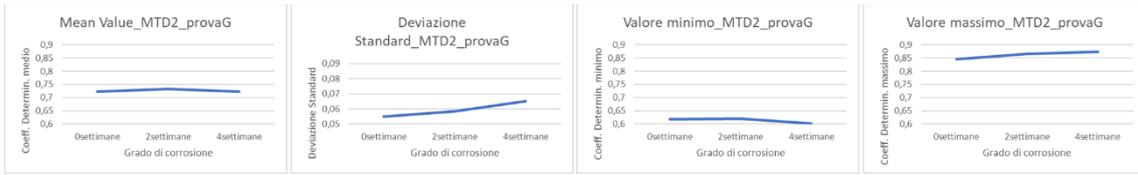


Figura 148-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova G (durata 1000ms, potenza 50%) – raffredd.

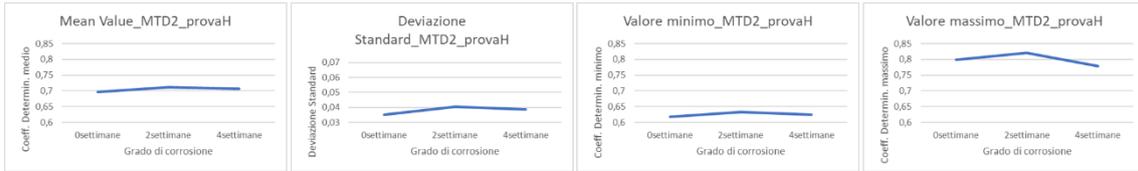


Figura 149-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova H (durata 1000ms, potenza 25%) – raffredd.

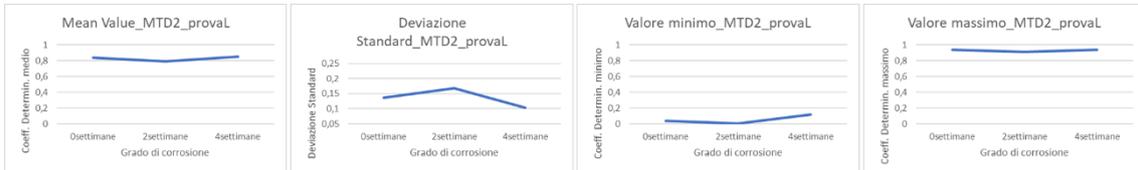


Figura 150-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova L (durata 200ms, potenza 100%) – raffredd.

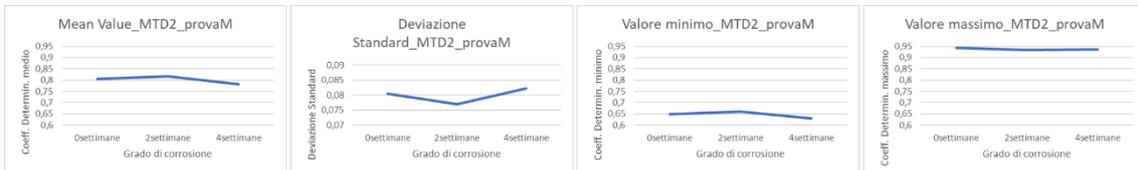


Figura 151-Valori generati dal MTD2 in condizioni di prova M (durata 500ms, potenza 100%) – raffredd.