

La termografia attiva applicata allo studio della corrosione nei materiali metallici:  
un caso studio

*Original*

La termografia attiva applicata allo studio della corrosione nei materiali metallici:  
un caso studio / Sesana, Raffaella; Francesca, Cura; Corsaro, Luca; Santoro, Luca; Marguerite Dugand, Marie. -  
ELETTRONICO. - 1:(2022), pp. 1-8. ( Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica 2022  
Verona (It) 19-21 ottobre 2022).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2972525 since: 2022-10-21T14:24:02Z

*Publisher:*

AIPND

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in  
the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# La termografia attiva applicata allo studio della corrosione nei materiali metallici: un caso studio

Raffaella Sesana<sup>1\*</sup>, Francesca Curà<sup>1</sup>, Luca Corsaro<sup>1</sup>, Luca Santoro<sup>1</sup>, Marie Marguerite Dugand<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DIMEAS, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, To Italy

<sup>2</sup>CRF - Materials Engineering Methods & Tools, E/E & Multifunctional Materials - Opto-Electronic & Glazing, C.so Settembrini 40, 10235 Turin – Italy

\*autrice presentante

## Abstract

Questo lavoro riguarda lo studio dei difetti distribuiti sulle superfici metalliche. Una situazione tipica è rappresentata dalla corrosione dovuta ad effetti ambientali in lamiere o in tubazioni. In quest'ultimo caso, in cui tipicamente la corrosione ha luogo all'interno e l'individuazione e la quantificazione dello stato di corrosione è difficile con metodi non distruttivi, lo sviluppo di tecniche alternative risulta particolarmente importante.

Il presente lavoro riporta i risultati di un'analisi di applicabilità della tecnica termografica attiva a lamiere di acciaio, una descrizione della procedura di misura e del conseguente trattamento dei dati termici acquisiti.

I risultati hanno mostrato che è possibile individuare una correlazione tra i parametri di misura e il livello di corrosione.

**Keywords:** corrosione, termografia attiva

## 1. Introduzione

La corrosione è un fenomeno chimico che si manifesta nei materiali metallici causando il deterioramento della loro superficie e della loro microstruttura, oltre a una corrispondente perdita di materiale. La rilevazione dei danneggiamenti corrosivi è oggetto di numerosi studi poiché presenta alcune difficoltà: le superfici corrose possono essere nascoste alla vista, non sono uniformi e i metodi di rilevazione frequentemente utilizzati spesso forniscono informazioni qualitative.

Obiettivo di questo lavoro è la caratterizzazione della corrosione su superfici non in vista e la corrispondente quantificazione. La tecnica utilizzata è la termografia attiva in riflessione con sorgente eccitante di tipo ottico, una sorgente laser, nelle modalità di eccitazione *Step Heating* (o *Pulsed*) e *Lock-In*. Le prove sperimentali sono state eseguite secondo diverse configurazioni di durata e potenza dell'impulso. I provini analizzati erano caratterizzati da corrosione di diversa entità.

## 2. Materiali e metodi

Le analisi sono state eseguite presso i laboratori *Opto-electronic & Glazing* del Centro Ricerche Fiat S.C.p.A. di Torino. I campioni sono stati ottenuti da lamiere con spessore nominale iniziale di 0,8 mm in acciaio all'alluminio calmato a grana fine (Tabella 1), preparati mediante permanenza in cella salina per diversi periodi di tempo (2, 4 e 6 settimane), lasciando una superficie esposta all'attacco degli agenti salini e l'altra protetta.

In Figura 1 sono riportate le foto della superficie dei provini esposta alla corrosione per i diversi periodi di permanenza in cella salina.

La temperatura della cella è stata costante e pari a 35°C, umidità relativa satura, soluzione al 5% ci NaCl, pH compreso tra 6,5÷7,2, concentrazione salina nell'intervallo 4,5÷5,5 e misurata con rifrattometro.

Tabella 1.: composizione iniziale dei provini, % in peso

| C      | Mn     | Ph      | S       | Al      |
|--------|--------|---------|---------|---------|
| ≤ 0.08 | ≤ 0.50 | ≤ 0.025 | ≤ 0.020 | ≥ 0.015 |

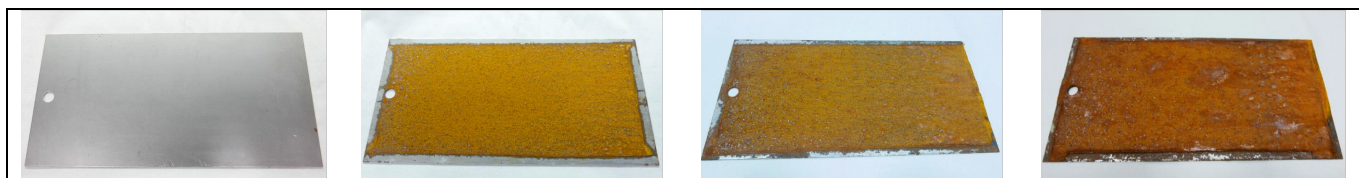


Figura 1: campioni di lamiera: da sinistra a destra 0, 2, 4 e 6 settimane in cella salina

Le analisi con termografia attiva sono state condotte utilizzando il MultiDES System, di Diagnostic Engineering Solutions S.r.l. Il sistema è costituito da quattro elementi principali (Figura 2): (1) unità centrale, con PC e centralina elettronica di controllo che consente di generare differenti forme d'onda di eccitazione e di acquisire i dati termografici dalla termocamera con software ResearchIR Max; (2) Sistema laser (YLP-V2 Series 1mJ energy Pulsed Iiterbium Fiber Laser), con torcia laser, generatore laser, testa di scansione, beam expander e stativo; (3) Sistema termocamera, con termocamera FLIR X6540sc con sensore di tipo raffreddato e stativo; (4) box con tende protettive.

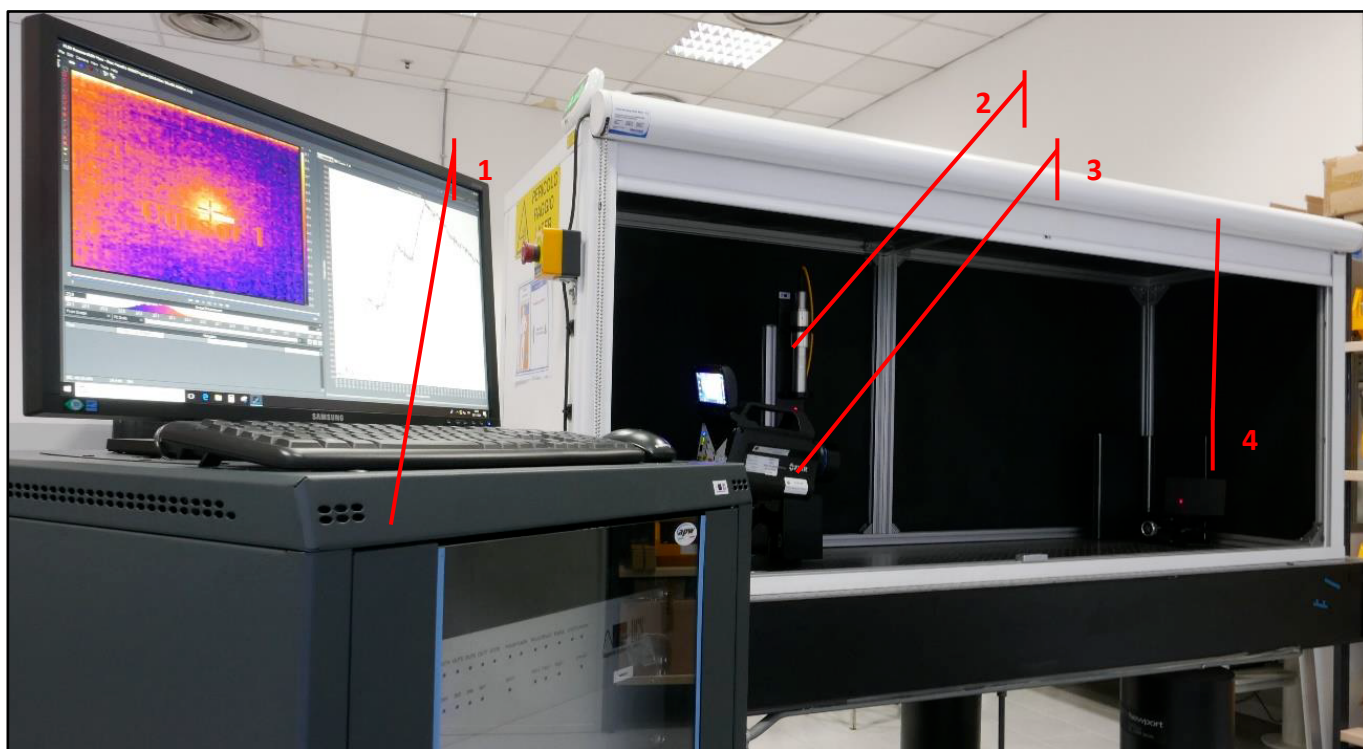


Figura 2: sistema sperimentale per prove in termografia attiva

### 2.1. Modalità lock in

Le prove termografiche in modalità *Lock-In* sono state condotte sollecitando i campioni tramite un treno di 3 impulsi di onde quadre, acquisendo 108 frame per ogni impulso, (324 frame a periodo). In Tabella 2 sono riportati i parametri di eccitazione e acquisizione sui vari provini. In particolare, nella prima colonna si ha il nome della prova, nella seconda il grado di corrosione  $c$ , misurato in settimane in cella salina, nella terza il periodo dell'impulso  $T$  in ms, nella quarta la percentuale di potenza massima dell'impulso laser  $P$  utilizzata, nella quinta la frequenza di acquisizione  $f_a$  in Hz e infine, nell'ultima colonna, la durata della registrazione  $d$  in s.

Tabella 2. Parametri di eccitazione e di acquisizione in configurazione Lock in

| Prova | $c$ [settimane] | $T$ [ms] | $P$  | $f_a$ [Hz] | $d$ [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      |

I termogrammi sono stati elaborati e, per ciascun pixel per ogni sequenza di frame, sono stati estratti gli spettri in ampiezza e fase. Su tali immagini sono state isolate ROI (Region Of Interest) di tipo lineare di lunghezza pari a 70 pixel e aventi area di 4 pixel, passanti e centrate sul punto di massima ampiezza della prima armonica. Tale area corrisponde alla zona del campione sollecitata dal fascio laser.

L'analisi si è limitata alla prima armonica in quanto, per questa serie di risultati, il rapporto segnale/rumore è risultato più favorevole. I valori di ampiezza e fase acquisiti in corrispondenza delle ROI lineari e di area sono stati importati su fogli di calcolo e quindi elaborati, al fine di confrontare i risultati ottenuti per i diversi provini a pari condizioni di sollecitazione termica.

Per ogni provino e per ogni configurazione di prova sono state replicate 9 misure e per ogni parametro di elaborazione è stata calcolata la media su 9 valori. Inoltre, per migliorare la qualità dei risultati, è stata calcolata per ogni profilo termico la media dei valori rappresentanti il rumore, ovvero dei valori rilevati in corrispondenza della regione esterna all'area di misura. Tale media della fase rumore è stata quindi sottratta ai valori di fase acquisiti tramite ROI lineare all'interno della suddetta regione.

### 2.2. Procedura di analisi Step Heating

Le prove eseguite in modalità *Step Heating* sono state condotte riscaldando i campioni mediante sollecitazioni con una singola onda quadra di durata e potenza variabili.

Per tutte le prove sperimentali sono stati utilizzati la medesima durata della registrazione e la medesima frequenza di acquisizione, nello specifico, tutte le registrazioni hanno una durata di 7 secondi con frequenza di acquisizione pari a 400 Hz. Le sequenze sono costituite da circa 2800 frame.

Per ogni analisi sono state analizzate la fase di riscaldamento e di raffreddamento, la cui durata è stata calcolata proporzionalmente a quella della fase di riscaldamento. In Tabella 3 sono riportati i parametri di eccitazione e acquisizione.

Le prime cinque colonne della Tabella 3 riportano dati analoghi a quanto mostrato in Tabella 2, nelle colonne 5 e 6 sono riportate rispettivamente le durate in frame del periodo di riscaldamento  $d_h$  e di raffreddamento  $d_c$ .

Tabella 3. Parametri di eccitazione e di acquisizione in configurazione *Step Heating*.

| Prova | $c$ [settimane] | $T$ [ms] | $P$  | $d_h$ [frame] | $d_c$ [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           |

Sono state utilizzate ancora ROI lineari e di area. Le prime hanno lunghezza di 95 pixel, sono centrate e attraversano il centro della regione circolare sollecitata tramite il fascio laser. Le ROI di area hanno dimensione 20x20 pixel e sono centrate al centro della regione sollecitata dal fascio laser. Anche in questo caso i dati sono stati elaborati tramite analisi in fase ed ampiezza e mediante foglio di calcolo ed è stata calcolata la media dei risultati ottenuti da 9 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.

### 3. Risultati

In Figura 3 sono mostrate le immagini di alcuni campioni corrosi inglobati in resina, nelle quali è possibile apprezzare la struttura a bassa densità della superficie corrosa. La misura dello spessore è calcolata in modo indicativo come la media delle sequenze di picchi e valli della superficie, rilevato mediante microscopio ottico e riportato in Tabella 4, al variare del livello di corrosione.

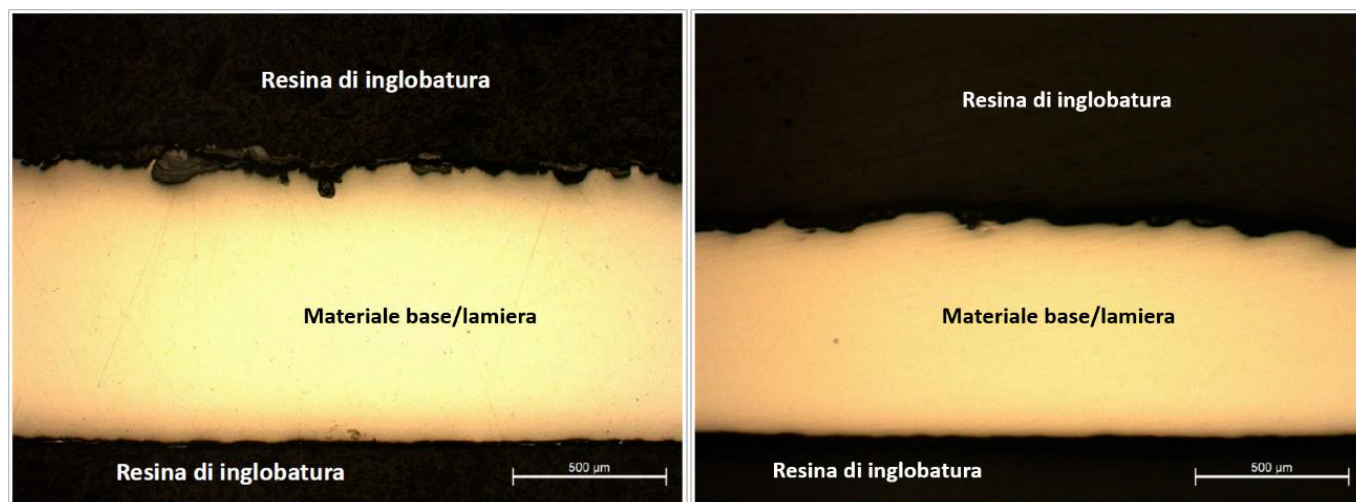


Figura 3. Sezioni di campioni corrosi inglobati in resina

Tabella 4: spessore del provino al variare del livello di corrosione

| $c$ [settimane] | spessore del materiale [mm] |
|-----------------|-----------------------------|
| 0               | 0,76 ÷ 0,90                 |
| 2               | 0,72 ÷ 0,95                 |
| 4               | 0,60 ÷ 0,76                 |

Nelle figure seguenti sono riassunti alcuni risultati ottenuti per le condizioni di prova più significative. Le figure da 4 a 6 sono riferite alle prove *Lock-In*, mentre da 7 a 9 sono riferite alle prove in configurazione *Step Heating*.

In Figura 4, è riportata l'ampiezza della prima armonica termica per le prove in configurazione *Lock-In*, A ed E. Per entrambe le configurazioni, le curve blu corrispondono alla condizione non corrosa, le curve arancioni e grigie sono invece riferite alla condizione corrosa per 2 e 4 settimane in cella salina rispettivamente.

Gli stessi valori sono riportati in Figura 5 in funzione della potenza del laser e della durata dell'impulso, con gli stessi riferimenti dei colori al livello di corrosione.

In Figura 6 è riportata la distanza tra i picchi (curva blu) e le valli (curva arancione) per la prima armonica sempre per le prove in configurazione A ed E, calcolate in numero di pixel, in funzione del livello di corrosione.

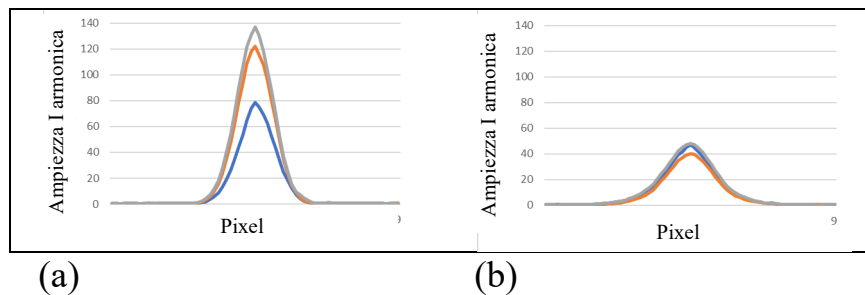


Figura 4. Prove Lock in: ampiezza della prima armonica lungo la ROI lineare per le prove A (a) ed E (b) (blu  $c=0$ , arancio  $c=2$  settimane, grigio  $c=4$  settimane).

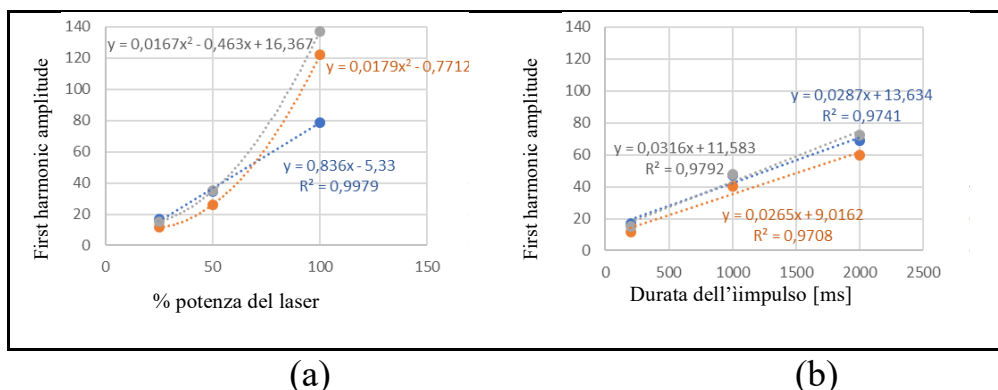
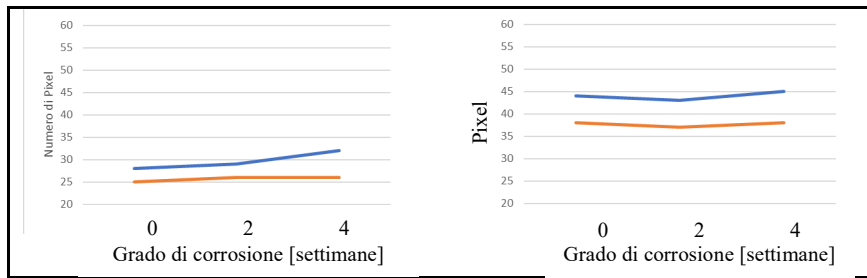


Figura 5. Prove Lock in: ampiezza massima della prima armonica in funzione della potenza (a) e della durata dell'impulso (b) (blu  $c=0$ ,  $c=2$  settimane, grigio  $c=4$  settimane).

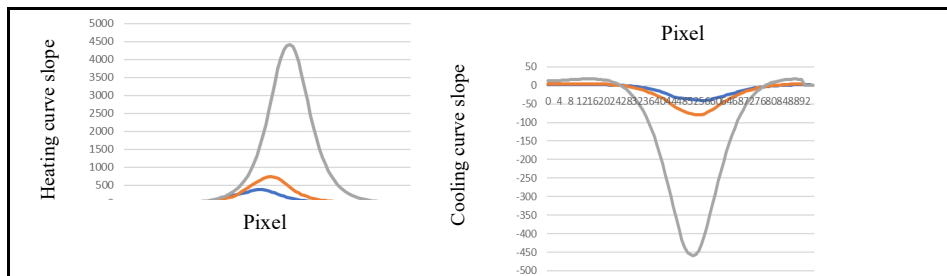


(a)

(b)

Figura 6. Prove Lock In: distanza di fase per la prima armonica in funzione del grado di corrosione: prova A (a) e prova E (b) (blu tra i picchi, arancio tra le valli).

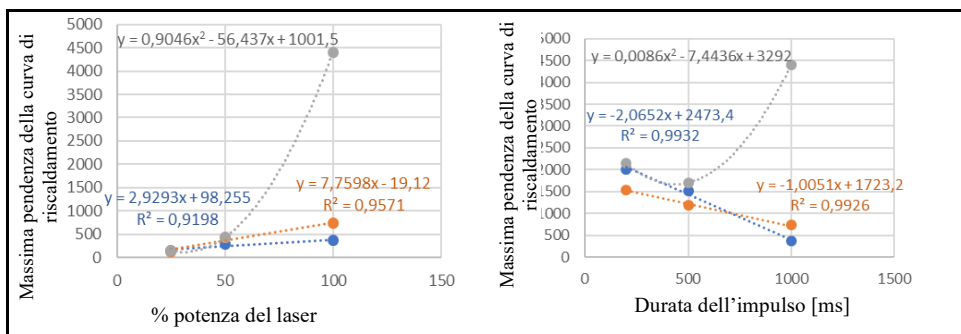
Per quanto riguarda i risultati ottenuti in configurazione *Step Heating*, in Figura 7 sono riportate le pendenze delle curve relative al riscaldamento e al raffreddamento per la prova in configurazione A. La pendenza massima delle curve di riscaldamento e di raffreddamento in funzione della potenza del laser e della durata dell'impulso sono riportate in Figura 8 e 9 rispettivamente.



(a)

(b)

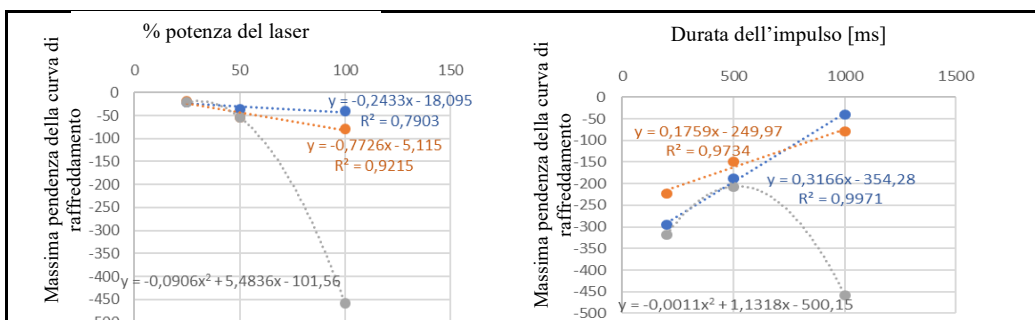
Figura 7. Prove Step Heating: pendenza massima della curva di riscaldamento (a) e di raffreddamento (b) per la prova F (blu  $c=0$ , arancio  $c=2$  settimane, grigio  $c=4$  settimane).



(a)

(b)

Figura 8. Prove Step Heating: pendenza massima della curva di riscaldamento in funzione della potenza (a) e della durata dell'impulso (b) (blu  $c=0$ , arancio  $c=2$  settimane, grigio  $c=4$  settimane).



---

(a)

(b)

Figura 9. Prove Step Heating: pendenza massima della curva di raffreddamento in funzione della potenza (a) e della durata dell'impulso (b) (blu  $c=0$ , arancio  $c=2$  settimane, grigio  $c=4$  settimane).

Dall'analisi delle Figure 4, 5 e 6 relative ai risultati delle prove in configurazione Lock in, si osserva che le configurazioni di prova possono condizionare la sensibilità del metodo al rilievo del difetto distribuito e, quindi, vanno scelte accuratamente per individuare adeguatamente il livello di corrosione.

Dal punto di vista dell'ampiezza del segnale, la scelta della prima armonica si dimostra adeguata a rappresentare le condizioni di danneggiamento (Figura 4), ma l'identificazione più soddisfacente viene ottenuto quando la potenza del laser è massima (condizione A).

In Figura 5 questo risultato appare particolarmente evidente: una maggiore potenza del laser genera una maggiore ampiezza del segnale per tutti i livelli di corrosione.

Il livello dell'ampiezza della prima armonica è anche influenzato dalla durata dell'impulso (Figura 5), ma non appare così sensibile al livello di corrosione.

Per quanto riguarda la fase del segnale della prima armonica, in Figura 6, la distanza tra i picchi risulta essere un parametro più sensibile al livello di corrosione.

I risultati delle Figure 7, 8 e 9 relativi alle prove in configurazione *Step Heating* seguono la stessa logica, risultando fortemente sensibili alle configurazioni di prova, e soprattutto alla potenza del laser. I parametri di riferimento sono le pendenze delle curve di riscaldamento e raffreddamento che mostrano in entrambi i casi di evidenziare meglio l'effetto della corrosione per le maggiori potenze del laser (Figura 7, test F).

Per quanto riguarda le Figure 8 e 9 che riportano rispettivamente la pendenza massima delle curve di riscaldamento e di raffreddamento, possono essere tratti commenti analoghi in funzione della potenza del laser e della durata dell'impulso. Questi parametri influenzano fortemente la capacità del metodo di individuare la corrosione, mostrando che l'effetto della corrosione viene comunque identificato meglio variando la potenza della sorgente eccitante.

#### 4. Conclusioni

Obiettivo di questo lavoro è stata la verifica dell'applicabilità di una tecnica non distruttiva, la termografia attiva, per individuare e quantificare il livello di corrosione in lamiere di acciaio.

Sulla base dei risultati ottenuti, è possibile trarre alcune conclusioni.

La tecnica della termografia attiva in riflessione può essere utilizzata con successo per individuare la presenza di corrosione e per quantificare la corrispondente distribuzione dei difetti di tipo corrosivo, premesso che sia individuata una configurazione di prova adeguata. Questo requisito è strettamente correlato alle difficoltà e alle incertezze di misura legate alla non uniformità del processo corrosivo sul campione, disuniformità che genera dispersione del segnale a causa della densità variabile dello strato riflettente e della corrispondente variabilità delle superfici riflettenti.

Possibili sviluppi futuri riguardano l'ottimizzazione dei parametri di analisi e di eccitazione termica allo scopo di garantire la robustezza del metodo.

Non è stata ancora indagata l'efficacia della procedura per lamiere di diverso spessore.

## 5. Bibliografia

1. Doshvarpassanda, S., Wub, C., Wang X.: An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography. *Infrared Physics & Technology* 96, 366-389 (2019).
2. Osvald-Tranta B.: Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 16 (3-4), 276-300 (2019).
3. Ibarra-Castanedo C., Maldague X.: Pulsed Phase Thermography Reviewed. *QIRT Journal*, 1(1), 47-70 (2004).
4. Rajic N., Antolis C.: An investigation of noise performance in optical lock-in thermography. *Infrared Physics & Technology*, 87, 1-10 (2017).
5. Rajic N., Antolis C.: Optical Lock-in Thermography for Structural Health Monitoring – A Study into Infrared Detector Performance. *Procedia Engineering*, 188, 471 – 478 (2017).
6. Palumbo D., Cavallo P., Galietti U.: An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in GFRP materials. *NDT & E International*, 102, 254-263 (2019).
7. Liu B., Zhang H., Fernandes H., Maldague X.: Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP. *Sensors*, 16, 743 (2016).
8. Breitenstein O., Sturm S.: Lock-in thermography for analyzing solar cells and failure analysis in other electronic components. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, (2019).
9. Dugand et al.: Method for detecting corrosion on a surface not exposed, by means of thermographic analysis. Patent No.: US 10, 145,800 B1 (2018).