POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

STUDIO DELL'APPLICABILITÀ DEL SNR NELL'ANALISI TERMOGRAFICA ATTIVA PER LA CARATTERIZZAZIONE DI MATERIALI E DIFETTI NEL CASO DI ACCIAIO E LEGA DI ALLUMINIO

Relatrici

prof.ssa Raffaella Sesana

prof.ssa Francesca Curà

Candidato

Luca Andrea Corica

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Introduzione 6

Analisi Bibliografica 9

Termografia Attiva 9

Termografia "*Pulsed*" 11

Analisi del fenomeno 12

Velocità di propagazione di un'onda termica 14

Elaborazione del segnale 16

Calcolo del rapporto segnale-rumore 21

Termografia "*Lock-in*" 24

Analisi del fenomeno 24

Elaborazione del segnale 26

Calcolo del rapporto segnale-rumore 28

Metodi di miglioramento dei dati termografici per il calcolo del SNR 30

Procedura di analisi 37

Strumentazione 37

La termocamera 39

Il laser 41

Il software per l'analisi del termogramma 41

Descrizione e parametri delle prove 42

Elaborazione dei risultati 45

Calcolo SNR 48

Rappresentazione dei risultati ottenuti 50

Confronto e analisi dei risultati 54

Metodo di confronto 54

Elenco dei confronti 55

Anomalie 55
Acciaio non verniciato (spessore 10,4 mm) 56
Alluminio non verniciato 59
Alluminio verniciato (spessore 2,5 mm) 61
Confronto e analisi 63
Acciaio non verniciato (2,5/10,4 mm) 63
Acciaio verniciato (2,5/10,4 mm) 64
Acciaio verniciato/non verniciato (2,5 mm) 64
Acciaio verniciato/non verniciato (10,4 mm) 65
Alluminio non verniciato (2,5/10,4 mm) 66
Alluminio verniciato (2,5/10,4 mm) 66
Alluminio verniciato/non verniciato (2,5 mm) 67
Alluminio verniciato/non verniciato (10,4 mm) 67
Acciaio/alluminio non verniciati (2,5 mm) 68
Acciaio/alluminio non verniciati (10,4 mm) 68
Acciaio/alluminio verniciati (2,5 mm) 69
Acciaio/alluminio verniciati (10,4 mm) 69
Conclusioni 71
Bibliografia 74

Introduzione

Oggigiorno, la termografia attiva sta diventando una tecnica non-distruttiva conveniente e affidabile per la caratterizzazione e la valutazione dei difetti di una varietà di materiali, strutture e componenti grazie alla sua applicabilità senza contatto, in *real-time* e alla sua capacità di stimare i difetti sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Tuttavia, la presenza di rumore ambientale, di una scarsa risoluzione spaziale o di un riscaldamento non uniforme del provino possono causare alcune difficoltà per il rilevamento e la caratterizzazione dei difetti. Lo studio, la messa a punto e l'ottimizzazione di vari metodi che permettano di elaborare il segnale, possono consentire di risolvere questo tipo di problematiche.

Il presente lavoro esplora la possibilità di utilizzare il rapporto segnale-rumore (SNR) per la caratterizzazione dei materiali, ma anche come possibilità di ricerca di difetti, in campioni di acciaio e alluminio. Nella ricerca sono state utilizzate le immagini termografiche di provini sollecitati termicamente con impulsi laser. Le immagini sono state acquisite attraverso una telecamera infrarossi, e successivamente elaborate tramite la trasformata di Fourier e altri algoritmi. Queste elaborazioni hanno permesso di estrarre le immagini di ampiezza e fase delle sequenze termiche registrate. Infine, è stato proposto un metodo innovativo per il calcolo del SNR utilizzando i dati forniti dalle varie prove.

Il lavoro ha seguito gli stessi step dei capitoli che seguono, in particolare, è stato fatto preventivamente uno studio preliminare delle tecniche termografiche (in particolare, termografia *pulsed* e *lock-in*) applicate a materiali metallici e polimerici. Si è poi spostata l'attenzione sul *Signal to Noise Ratio* (SNR) come metodo di trattamento dei dati estratti dalle prove termiche, ai fini di ricerca di difetti. A questo punto è stato ideato un modo per riuscire ad applicare il SNR sulle prove eseguite in laboratorio su diversi materiali e in diverse condizioni, per poi fare un confronto dei risultati per indagarne il comportamento.

Analisi Bibliografica

Termografia Attiva

Le tecniche di controllo non distruttivo (NDT) rappresentano oggigiorno un mezzo indispensabile per il controllo dei componenti e possono essere di ausilio anche alla fase di progettazione.

Ognuna di queste tecniche (raggi X, microonde, ultrasuoni, correnti parassite, ecc.) ha propri vantaggi e limitazioni. Gli elenchi delle tecniche di NDT sono in continuo aumento, in quanto c'è una costante ricerca per lo sviluppo di metodi che garantiscano miglioramenti in termini di qualità e produttività. In questo contesto, la termografia a infrarossi (IRT) gioca un ruolo importante grazie alla sua applicabilità senza contatto, in real-time e alla sua capacità di stimare i difetti sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo.

La IRT è una tecnica di misura ottica, in rapida evoluzione con lo sviluppo di rivelatori ad alta risoluzione spaziale e sensibilità, e a una sempre maggiore potenza di calcolo. Questa tecnica utilizza una telecamera a infrarossi per generare e analizzare una mappa termica basata sul principio che tutti gli oggetti al di sopra dello zero assoluto (-273 °C) emettono energia infrarossa. La radiazione emessa da un oggetto è percepita dalla

telecamera a infrarossi (IR) e trasformata in un segnale elettronico, che viene poi elaborato per produrre un'immagine termica.

Come mostrato nella figura 1, esistono diversi tipi di approcci termografici che possono essere classificati in base alla procedura di prova, l'origine della fonte di eccitazione, ecc. Sulla base della procedura sperimentale, la termografia può essere classificata in termografia attiva e passiva. La termografia passiva non richiede alcuna sorgente esterna per eccitare termicamente il provino in quanto si trova ad una temperatura diversa rispetto all'ambiente a seguito di stress meccanici o di altro tipo. Al contrario, la termografia attiva utilizza una fonte esterna di riscaldamento per produrre contrasto termico nella regione di interesse. In base al modo in cui i campioni vengono eccitati, la termografia attiva può essere ulteriormente classificata come termografia lock-in (LIT), termografia pulsata (PT), vibro-termografia (VT) e termografia a gradino (SHT).

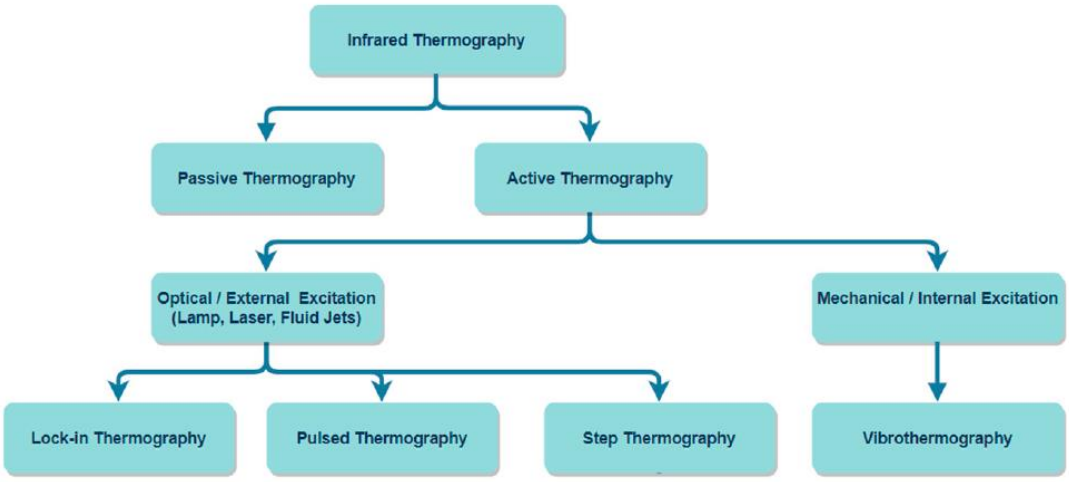


Figura 1: schema delle tipologie di termografia a infrarossi.

PT e LIT sono i due metodi maggiormente utilizzati. In entrambe le tecniche, l'energia trasmessa al campione si propaga attraverso il materiale, poi viene osservata la risposta termica registrata dalla telecamera IR per rivelare la presenza del difetto. L'esperimento può essere eseguito in due modi distinti: in modalità di trasmissione, nella quale la telecamera IR e la sorgente di eccitazione sono tenuti in posizione opposta rispetto al campione in esame, mentre in modalità riflessione, la telecamera a infrarossi e la sorgente sono situate nella stessa posizione rispetto al campione.

Inoltre, varie tecniche di elaborazione e filtraggio possono essere utilizzate per ottenere ulteriori informazioni sui difetti, come piccole discontinuità interne e caratteristiche del materiale.

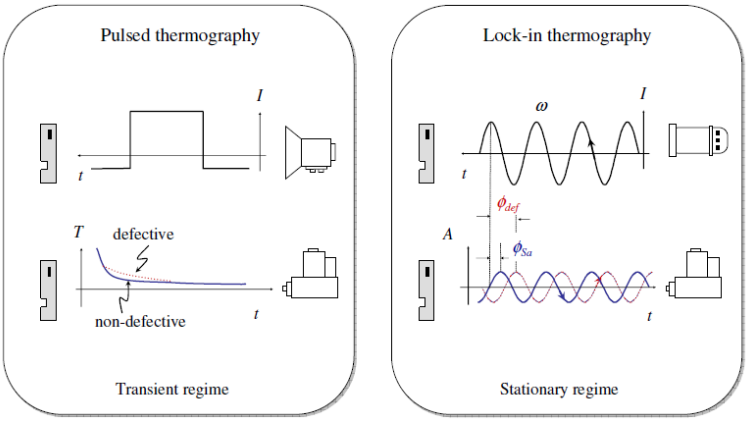


Figura 2: differenze tra termografia pulsed e lock-in.

Termografia "*Pulsed*"

La "*pulsed thermography*" (PT) è uno degli approcci basato sulla diffusione termica in regime transitorio. La superficie del campione è sottoposta ad un breve impulso di calore utilizzando una fonte di energia intensa, come flash fotografici. Una volta che la radiazione entra in contatto con la superficie del provino, si genera un fronte termico che viaggia dalla superficie attraverso il campione. Con il passare del tempo, la temperatura della superficie diminuirà uniformemente per un pezzo senza difetti interni. Al contrario, le discontinuità sub-superficiali (ad es. porosità, delaminazioni, rottura delle fibre, inclusioni, ecc.) possono essere considerate come resistenze al flusso di calore che producono modelli di temperatura anomali sulla superficie e che possono essere rilevati con una telecamera a infrarossi[1]. Inoltre, a causa dei fenomeni fisici coinvolti durante l'ispezione, i segnali acquisiti dalla telecamera IR sono quasi sempre influenzati da riflessioni esterne e variazioni di emissività locale. Mentre il riscaldamento non uniforme della superficie, dovuto alla configurazione delle sorgenti di irradiazione termica/ottica, e le perdite termiche ai bordi del materiale rappresentano ulteriori vincoli nella capacità di rilevamento, limitando considerevolmente i risultati dell'ispezione. La ridotta risoluzione spaziale (che colpisce i difetti più piccoli) e i limiti di rilevamento (che

interessano i difetti più profondi) sono tra gli effetti collaterali più importanti. Per questo motivo, i segnali termografici devono essere elaborati al fine di migliorare - qualitativamente e quantitativamente - le caratteristiche delle immagini termiche.
L'elaborazione del segnale costituisce un passo importante nella catena dell'analisi dell'immagine termica, specialmente quando è richiesta la caratterizzazione dei difetti. Molte delle tecniche di elaborazione dei segnali utilizzate oggi si basano sulla soluzione unidimensionale della legge di Fourier sulla conduzione del calore.

Analisi del fenomeno

La figura 3 illustra il principio della PT in cui si utilizza un riscaldamento ad impulsi ad alta potenza per il campione in esame e la risposta del campione viene registrata con una telecamera IR. La durata dell'impulso dipende dalla conducibilità termica del campione in esame e va da 2 millisecondi a 10 millisecondi[2], rendendo la PT particolarmente vantaggiosa per la sua rapidità nei test. Non appena il campione viene eccitato e la sua superficie assorbe l'energia trasmessa, la temperatura aumenta quasi istantaneamente.
A causa della propagazione di un'onda termica all'interno del campione, la temperatura superficiale inizia subito a diminuire. Le imperfezioni possono essere osservate se vi è una differenza nella velocità di raffreddamento lungo la superficie del campione.

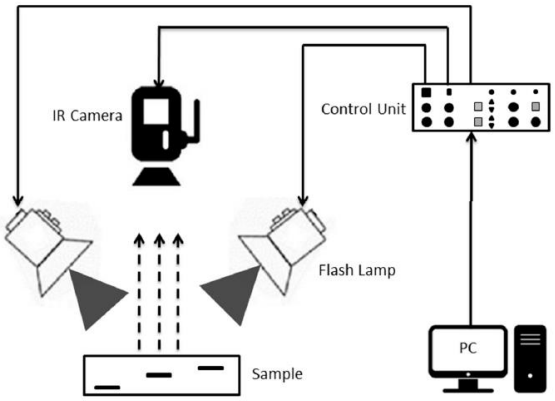


Figura 3: schema indicativo del sistema per l'acquisizione di immagini termografiche.

Il processo termico e la successiva analisi di PT sono descritti nella figura 3.
L'ispezione inizia a temperatura ambiente T_∞, da cui l'eccitazione termica viene applicata alla superficie del materiale. L'assorbimento di energia produce un rapido aumento (quasi istantaneo) della temperatura fino a T_{max}; comincia poi il processo di raffreddamento

indotto dallo scambio di calore (per convezione e irraggiamento) tra la superficie del materiale e l'ambiente, e anche dalla diffusione del calore attraverso il materiale. Dall'inizio del processo di raffreddamento (al momento t_0) viene effettuata l'acquisizione delle immagini termiche con una telecamera IR fino al momento t_f, in cui la presenza di effetti convettivi rendono più difficile la rilevazione di contrasti termici inerenti a difetti interni.

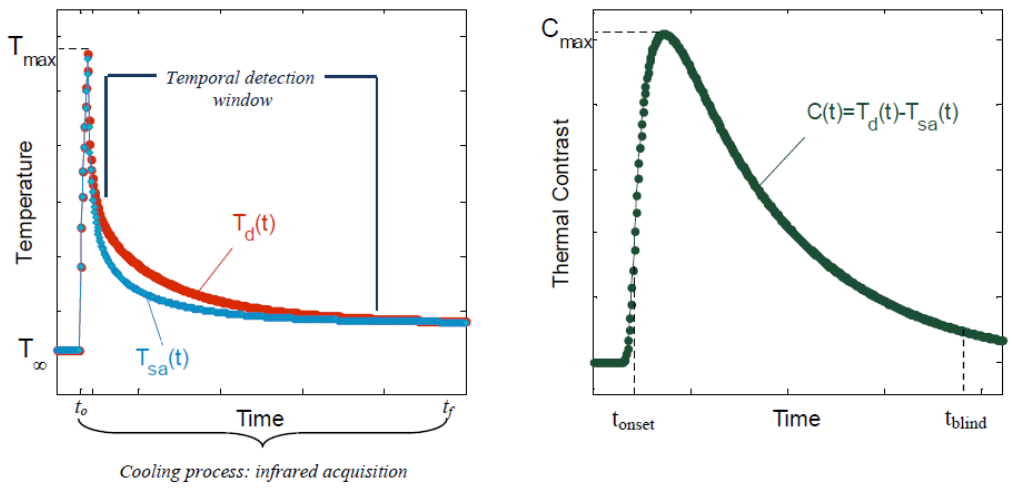


Figura 4: esempio di andamenti di temperatura e contrasto termico tra le zone difettive e non in un'analisi pulsed.

Come mostrato nella figura 4, le curve di raffreddamento di entrambe le aree - difettiva (T_d) e non (T_{sa}) - si comportano in modo simile all'inizio del processo. Una volta che il fronte termico raggiunge il difetto interno, l'accumulo di calore prodotto dalla regione difettosa origina un aumento di temperatura della zona superficiale soprastante il difetto. Questa differenza tra T_d e T_{sa} si verifica a t_{onset}, momento in cui comincia la finestra di rilevamento temporale, ossia l'intervallo di tempo in cui il difetto è visibile. La comparsa di t_{onset} e C_{max} dipendono dalle proprietà termiche del materiale e dalla profondità dei difetti. La determinazione del valore del contrasto termico massimo (C_{max}) è di importanza fondamentale per individuare la profondità dei difetti.

Per studiare fisicamente il fenomeno occorre risolvere la legge di Fourier sulla propagazione del calore per conduzione che, nel caso unidimensionale di un impulso termico (impulso di Dirac) in un solido isotropo semi-infinito, può essere espressa dalla seguente equazione[2]:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \tag{1}$$

dove T [K] rappresenta la temperatura al tempo t dopo il riscaldamento istantaneo, T_0 [K] la temperatura iniziale, Q [W/m^2] è il calore ceduto alla superficie del campione, $e = \sqrt{k\rho c_p}$ [J/(s$^{1/2}$m^{2}K)] è l'effusività termica del materiale nei confronti dell'ambiente circonstante, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ [m^2/s] è la diffusività termica del materiale in esame con k [W/(mK)] conducibilità termica, ρ [kg/m^3] densità e c_p [J/(kgK)] calore specifico.
In superficie (z = 0 mm), l'equazione 1 può essere riscritta nel modo seguente:

$$T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \tag{2}$$

Velocità di propagazione di un'onda termica

Le onde termiche che si sviluppano nel solido non possono essere considerate vere e proprie onde, in quanto non è presente alcun trasporto di energia. Ciò nonostante, queste onde hanno la stessa espressione matematica di onde altamente smorzate[3].
Per questo motivo è possibile fornire un metodo per determinare la velocità di propagazione di un'onda termica.
Nei solidi con una velocità di propagazione delle onde di temperatura relativamente bassa, dispositivi tradizionali come le termocoppie possono essere sufficienti per rilevarne la velocità. Tuttavia, per il trasferimento di energia ad alta velocità, come quella nei metalli, la frequenza di risonanza dell'onda termica potrebbe essere utilizzata per evitare il tempo di risposta insufficiente.
Per un mezzo solido soggetto ad eccitazione, occorre, in primo luogo, calcolare la frequenza di risonanza dell'onda di temperatura (Ω_{max}) che è stata determinata dallo studio di D. Y. Tzou con la seguente espressione[4]:

$$\Omega^*_{max} = \sqrt{\omega^*_n\sqrt{\omega^*_n + 2} - 1} \qquad con\ \omega^*_n > 0.6436 \tag{3}$$

dove il pedice "*max*" è stato aggiunto a Ω^* per indicare che $\Omega_{max}{}^*$ è la frequenza di eccitazione esterna che massimizza l'ampiezza $|A_\Omega|$ delle oscillazioni. L'equazione 3

relaziona la frequenza di eccitazione (Ω_{max}^*) con la frequenza naturale (ω_n^*) delle onde termiche.

La modalità di eccitazione desiderata, in particolare il numero modale n, va selezionata in questa fase, in quanto aiuta a determinare un intervallo approssimativo delle frequenze di oscillazione della fonte di calore che producono il fenomeno di risonanza. L'equazione 3 può quindi essere usata per mettere in relazione la frequenza di risonanza con la velocità dell'onda termica, secondo la sua espressione inversa:

$$\omega_n^* = \sqrt{\sqrt{{\Omega_{max}^*}^4 + 2{\Omega_{max}^*}^2 + 2} - 1} \qquad con\ \Omega_{max}^* = \Omega_{max}/f \tag{4}$$

Considerando quindi l'espressione della frequenza naturale[4] ω_n^* e sostituendo, si ottiene:

$$[\alpha(n\pi/L)^2]\tau + 1 = \sqrt{{\Omega_{max}^*}^4\tau^4 + 2{\Omega_{max}^*}^2\tau^2 + 2} \tag{5}$$

nella quale la frequenza critica (f) è stata sostituita dal reciproco del tempo di rilassamento ($1/\tau$). A questo punto è possibile riscrivere l'equazione attraverso un'equazione algebrica del quarto ordine da risolvere in τ:

$${\Omega_{max}^*}^4\tau^4 + \left[2{\Omega_{max}^*}^2 - (n\pi/L)^4\alpha^2\right]\tau^2 - [2\alpha(n\pi/L)^2]\tau + 1 = 0 \tag{6}$$

Il suo valore dipende dalla frequenza di risonanza Ω_{max}, dalla lunghezza del solido unidimensionale L, dal numero modale dell'eccitazione n e dalla diffusività termica α. Generalmente, è necessaria una soluzione numerica per risolvere questa equazione.
In base al valore calcolato di τ, la velocità dell'onda termica C può essere determinata come[4]:

$$C = \sqrt{\alpha/\tau} \tag{7}$$

Il vantaggio di questo approccio sta nel fatto che il risultato non dipende dalla risposta a breve termine dei dispositivi per rilevare l'arrivo di segnali termici. Tuttavia, ci sarebbe

un altro problema tecnico da superare. L'ostacolo potenziale risiede nella frequenza dell'eccitazione applicata, cioè occorre che sia sufficientemente elevata da portare le onde termiche alla risonanza (la frequenza richiesta è vicina alla frequenza naturale dell'onda di temperatura). Inoltre, secondo il vincolo dell'equazione 3, l'eccitazione deve avere una frequenza modale superiore a *0,6436f*. Come stima, per produrre risonanza termica nei metalli in condizioni normali, il valore minimo della frequenza applicata è dell'ordine dei giga o dei terahertz. In una simile gamma di alte frequenze è necessario l'uso di infrarossi o anche del laser ottico.

Elaborazione del segnale

Durante l'analisi quantitativa e qualitativa dei difetti, risulta fondamentale avere un parametro che permetta di determinare quanto sia forte (o debole) il segnale di un difetto, e quindi la sua visibilità, ma anche per misurare la validità di un metodo di elaborazione del segnale.

Uno dei possibili parametri, utile a quantificare il segnale effettivo della misurazione depurandolo dal rumore di fondo, è il "*SIGNAL TO NOISE RATIO*" (SNR), ossia il rapporto segnale-rumore, che permette di ottenere un'indicazione più chiara delle zone effettivamente difettive rispetto alle zone in cui sono presenti segnali dovuti a disturbi, indicate come zone di rumore ("sound region"), e che inoltre può riferirsi all'immagine termica delle fasi, delle ampiezze o delle temperature. Questo metodo permette inoltre di ottenere risultati ottimali anche da misurazioni termiche soggette a oscillazioni dovute alla non-uniformità del materiale, alle variazioni ambientali o a un riscaldamento non uniforme.

Un altro parametro che permette di quantificare la visibilità di un difetto è il "contrasto termico assoluto" (ΔT), indicato (figura 4) come:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_{sa}(t) \tag{8}$$

dove $T_d(t)$ e $T_{sa}(t)$ sono, rispettivamente, l'evoluzione della temperatura nelle zone difettive e in quelle non-difettive.

Tuttavia, uno dei lati negativi dell'utilizzo dell'equazione 8 è la necessità di stabilire un punto (o una regione) di riferimento come zona priva di difetti. Nella maggior parte dei

casi, il calcolo di $\Delta T(t)$ differisce in funzione della localizzazione della regione non difettosa, principalmente a causa degli effetti del riscaldamento non uniforme. Per evitare questi inconvenienti, T_d e T_{sa} possono essere calcolati come segue[5]:

$$T_d = \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} \frac{T(i,j)_d}{n_x \cdot n_y} \tag{9}$$

$$T_{sa} = \sum_{i=1}^{nx} \sum_{j=1}^{ny} \frac{T(i,j)_{sa}}{n_x \cdot n_y} \tag{10}$$

In queste equazioni, T_d e T_{sa} corrispondono, rispettivamente, ai segnali delle regioni difettive e non, e sono calcolati come valore medio sull'intera regione considerata.

Per migliorare la ricerca di difetti è sempre consigliabile processare le immagini termiche grezze per riuscire a migliorare i suddetti parametri. Le tecniche di elaborazione del segnale maggiormente utilizzate, basate sulla legge di Fourier, sono[5]: *Thermographic Signal Reconstruction* (TSR), *Pulsed Phase Thermography* (PPT) e *Differential Absolute Contrast* (DAC).
È di particolare interesse determinare le capacità di rilevamento di ciascuna tecnica, consentendo in questo modo risultati più affidabili quando si esegue un'ispezione in ambito di PT.

<u>*Thermographic Signal Reconstruction* (TSR)</u>
Come suggerisce il nome, il TSR è basato sull'uso di una funzione polinomiale di basso ordine per ricostruire - o adattare - la curva di evoluzione di temperatura ottenuta dall'ispezione in PT. Supponendo che il decadimento della temperatura di una regione priva di difetti si comporti in modo simile alla soluzione dell'equazione 1D di Fourier di conduzione del calore (secondo l'equazione 11), l'evoluzione della temperatura di un'area non difettosa può essere scritta in forma logaritmica come[5]:

$$\ln(T - T_0) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) \tag{11}$$

dove T_0 è la temperatura iniziale mentre T è l'evoluzione della temperatura nel tempo, Q è l'energia termica ceduta attraverso l'eccitazione esterna, e è l'effusività termica del materiale e t è la variabile temporale. Dall'equazione 11 è possibile modellare l'evoluzione della temperatura di una zona priva di difetti come una linea retta con pendenza pari a 1/2. Questo comportamento lineare e a pendenza fissa è indipendente dalle proprietà termiche e dal flusso di calore applicato (secondo termine dell'equazione 11). Ovviamente, le regioni difettive si discosteranno dalla linearità.

Shepard ha proposto di utilizzare una funzione polinomiale di grado-m per approssimare la dipendenza logaritmica dal tempo dei dati termografici. Questa funzione polinomiale può essere scritta come[5]:

$$\ln(T - T_0) = a_0 + a_1 \ln t + a_2[\ln t]^2 + \cdots + a_n[\ln t]^n \qquad (12)$$

dove T è l'evoluzione della temperatura nel tempo, a_0, a_1, …, a_n sono i coefficienti polinomiali. In questo tipo di analisi, il polinomio di quinto o sesto ordine risulta efficace nella riduzione del rumore, mentre il grado è stato valutato ottimale fino al nono ordine[2]. Inoltre, sia la derivata prima logaritmica della temperatura rispetto al tempo ($dln(T)/dln(t)$), che la derivata seconda ($d^2ln(T)/dln^2(t)$), migliorano la rilevabilità dei difetti e il loro SNR (come si può vedere dalla figura sottostante)[2].

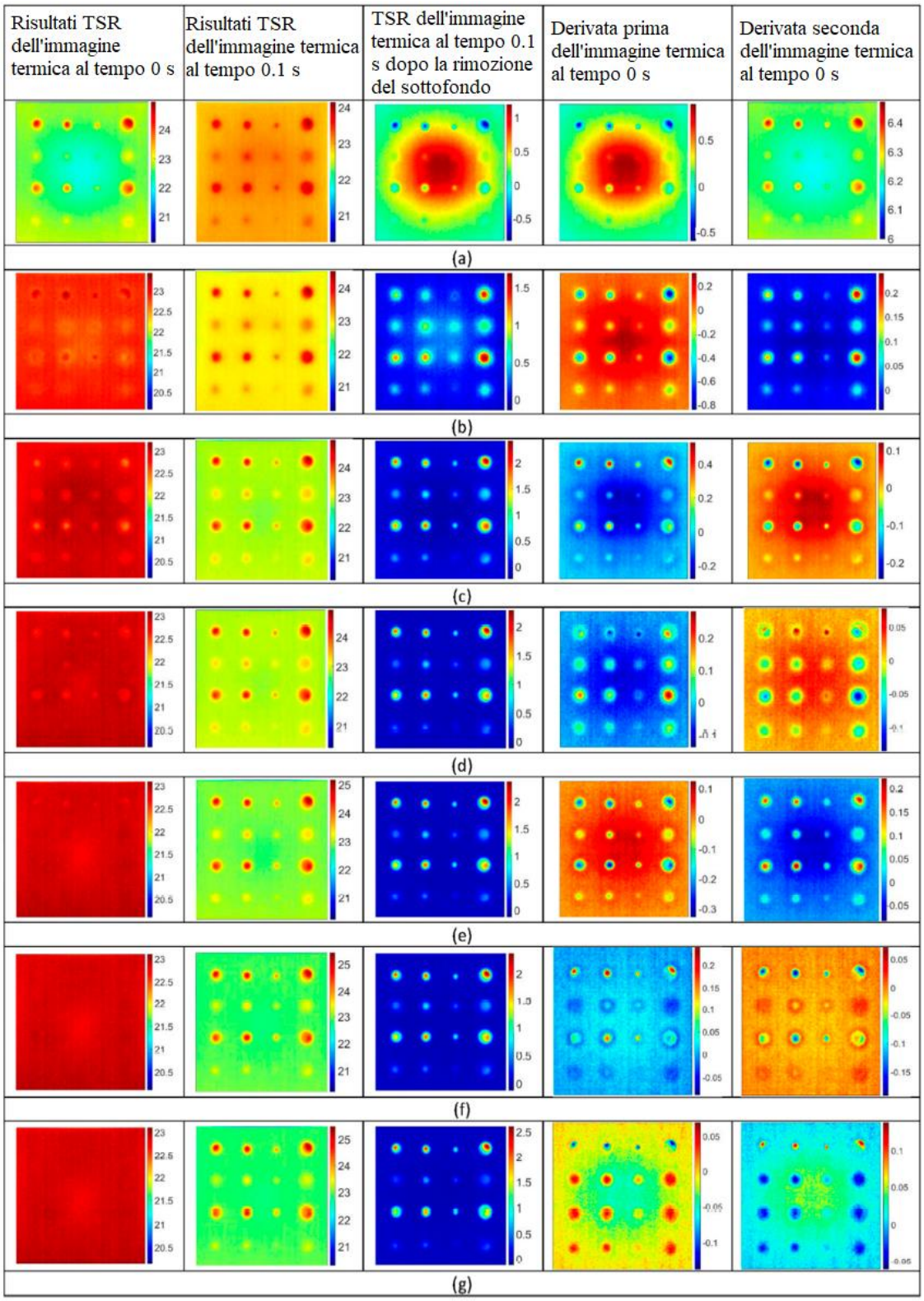


Figura 5: esempio risultato metodo TSR su un campione con diversi difetti.

Vi sono miglioramenti significativi nei risultati ottenuti mediante l'applicazione del TSR, quali: riduzione del rumore ad alta frequenza, compressione dei dati (da N a m+1 immagini), aumento della risoluzione temporale e spaziale[5].

Pulsed Phase Thermography (PPT)

Nella PPT, viene applicata la trasformata discreta di Fourier per trasferire i dati delle immagini termografiche dal dominio del tempo (temperatura-tempo) a quello della frequenza (ampiezza-frequenza) per ogni pixel, espressa dalla seguente equazione[2]:

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t)\, exp\left(\frac{j2\pi nk}{N}\right) = Re_n + Im_n \tag{13}$$

dove *Re* e *Im* sono, rispettivamente, la parte reale e immaginaria della serie di trasformate F_n, N è il numero di immagini termiche e Δt è l'intervallo di campionamento.

Da questa definizione è possibile ottenere la componente della fase (Φ) con l'equazione seguente:

$$\Phi_n = \text{atan}\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \tag{14}$$

Fisicamente, la diffusione del calore dalla superficie nel solido può essere intesa in termini di propagazione di onde termiche all'interno del solido stesso. Le diverse componenti di frequenza subiranno una diversa attenuazione, aumentando o diminuendo la penetrazione di ciascuna delle onde termiche. È a causa di questa dualità tra il problema transitorio e armonico che PPT è considerato come il collegamento tra termografia pulsata e lock-in.

Ci sono due aspetti che rendono PPT una tecnica di elaborazione funzionale che ha vantaggi rispetto ad altre; uno di essi è che la fase che è meno influenzata da riflessioni ambientali, variazioni di emissività e riscaldamento non uniforme presenti nelle immagini termiche grezze. L'altro aspetto riguarda l'applicazione ad altri tipi di segnali che non seguono la soluzione dell'equazione di Fourier unidimensionale, aumentando le sue capacità di sondare la presenza di difetti più profondi. Nonostante questi vantaggi, i dati di fase in PPT sono molto sensibili al rumore ad alta frequenza.

Differential Absolute Contrast (DAC)

Il DAC è una delle prime tecniche sviluppate in alternativa ai classici calcoli di contrasto termico e a tutti i problemi intrinseci che questo comporta (riscaldamento non uniforme, variazioni di emissività e riflessioni ambientali). Sulla base della soluzione dell'equazione

del calore di Fourier unidimensionale, questo metodo individua la temperatura T_{sa}, al tempo t, calcolata localmente supponendo che, sulle prime immagini, tutti i punti si comportino come un'area sonora. Pertanto, i dati termografici ottenuti da un esperimento PT possono essere approssimati alla soluzione 1D dell'equazione del calore attraverso la seguente espressione[5]:

$$\Delta T_{DAC} = T(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \tag{15}$$

Il primo passo nell'implementazione del metodo DAC è quello di definire t' come un dato istante di tempo tra il momento in cui viene applicata l'eccitazione termica (t_0) e quello preciso in cui il primo punto difettoso appare sul termogramma.
È importante sottolineare che l'equazione 15 è una buona approssimazione nei momenti iniziali, ma al trascorrere del tempo, diverge dal caso di solido semi-infinito.

Calcolo del rapporto segnale-rumore

La validità di tutte e tre le tecniche di elaborazione è stata valutata in termini di rilevabilità dei difetti e SNR.
Secondo Chung et al.[2], il cui studio ha valutato i risultati migliori ottenuti utilizzando ciascuna delle tecniche in termini di rilevabilità dei difetti, l'immagine termica grezza (a 0.1 s) è riuscita a rilevare la metà dei difetti; il TSR (all'ottavo grado polinomiale) ha permesso di rilevare tutti i difetti, anche i più piccoli; mentre attraverso la PPT (alla frequenza di 0.8 Hz) sono stati rilevati 14 su 16 difetti.

Il rapporto segnale-rumore (SNR) è una misura fisica della sensibilità di un sistema di *imaging*. In questo lavoro questa variabile è usata anche per determinare le prestazioni di ciascuna delle tecniche di elaborazione del segnale precedentemente discusse. Da questa quantificazione è anche possibile determinare quale tecnica di lavorazione è più adatta ad ogni situazione, in base a: proprietà termiche del materiale, profondità del difetto e dimensione. Generalmente, il SNR può essere calcolato usando la seguente espressione[5]:

$$SNR = \frac{P_S^2}{P_N^2} \tag{16}$$

dove P_S e P_N sono le ampiezze del segnale e del rumore rispettivamente. Il segnale può essere un contrasto termico, di fase, o una qualsiasi delle grandezze ottenute quando si eseguono prima e seconda derivata su dati di temperatura. L'ampiezza del segnale è calcolata usando le equazioni 9 e 10, mentre il rumore è determinato dalla varianza sull'intera regione difettosa. Il SNR può essere espresso anche in decibel:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right)^2 = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \tag{17}$$

In altri casi, per calcolare il *Peak Signal to Noise Ratio* (rapporto tra segnale di picco e rumore: PSNR), l'ampiezza del segnale e il rumore devono essere misurati alla sua potenza massima C_{max}. Pertanto, il PSNR in decibel può essere espresso come segue:

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} C_{max} - 20 \cdot \log_{10} \sigma_{C_{max}} \tag{18}$$

La selezione di C_{max} riguarda un particolare difetto. La profondità, la dimensione e il metodo utilizzato come tecnica di elaborazione determineranno il momento in cui si arriva al picco del segnale.

Il modo più utilizzato per calcolare il SNR prevede, invece, che siano considerate due regioni (4x4 pixel, secondo Chung et al.[2]), una al centro del difetto (DROI) e l'altra nella zona di rumore adiacente ("sound region": SROI); il rapporto segnale-rumore viene poi calcolato tramite l'espressione seguente[2]:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 * \log_{10}\left(\frac{|DROI_{mean} - SROI_{mean}|}{\sigma}\right) \qquad [dB] \tag{19}$$

dove $DROI_{mean}$, $SROI_{mean}$ e σ rappresentano, rispettivamente, la media aritmetica della variabile termica considerata nella zona difettiva, la media nella zona senza difetti e la deviazione standard nella zona sana.

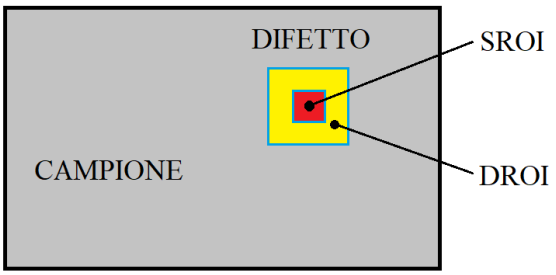


Figura 6: indicazione delle zone di segnale (SROI) e di rumore (DROI)

I risultati hanno dimostrato che tutte e tre le tecniche di elaborazione del segnale hanno migliorato notevolmente il SNR, rispetto all'immagine termica grezza. Tuttavia, la variabilità dei risultati, considerando diversi fotogrammi o istanti di tempo, potrebbe essere uno svantaggio per il TSR.

La PPT, invece, risulta molto sensibile alla profondità dei difetti e ha fornito il migliore SNR per i difetti più piccoli e più profondi. Tuttavia, i risultati ottenuti con la PPT sono anche difficili da valutare talvolta, in quanto fornisce risultati diversi nei diversi spettri di frequenza.

Termografia "*Lock-in*"

La "*lock-in thermography*" (LIT) è utilizzata come controllo non-distruttivo per la ricerca di difetti sub-superficiali in metalli, isolanti e materiali compositi.
Essa è basata sulla propagazione di onde termiche periodiche all'interno del materiale generate da una fonte esterna (laser, induttori, lampade, ecc.).

Analisi del fenomeno

Durante la fase di riscaldamento, l'eccitazione termica esterna provocherà un aumento della temperatura media nel campione, oltre la componente periodica, per cui la temperatura in ogni punto del solido sarà[3]:

$$T(x,t) = T_{amb} + T_{dc}(x) + T_{ac}(x,t) \tag{20}$$

dove T_{dc} è l'aumento di temperatura rispetto all'ambiente indipendente dal tempo, T_{ac} è l'oscillazione periodica della temperatura con la stessa frequenza della fonte luminosa $T_{ac} = Re(\vartheta(x)e^{i\omega t})$ (è riportato l'esempio di un andamento della temperatura e della componente periodica nella figura 7).

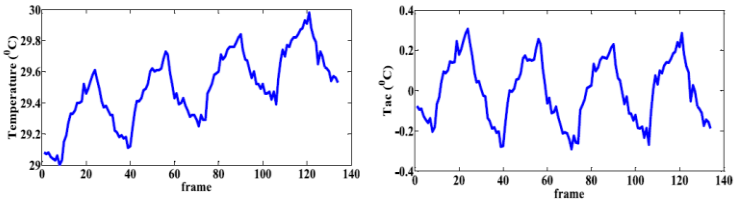


Figura 7: esempio dell'andamento della temperatura e della T_{ac} in un provino eccitato in maniera periodica.

La termografia lock-in (LIT) utilizza una camera a infrarossi per osservare la temperatura superficiale di una onda termica che si propaga nel materiale e ne produce l'immagine termica.
Le onde termiche sono riflesse dalle interfacce dei difetti presenti e l'interferenza tra l'onda in arrivo e quella riflessa interferiscono andando a cambiare la

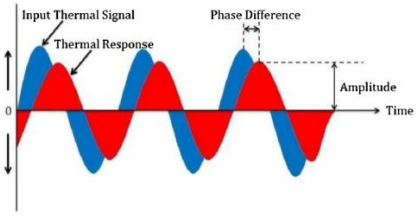
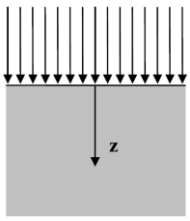


Figura 8: differenza di fase tra il segnale eccitante (input) e quello di risposta.

fase e l'ampiezza rispetto all'segnale di input. La differenza di fase (viene in genere considerata rispetto alla variazione di ampiezza perché meno soggetta a disturbi esterni e disomogeneità del materiale) tra il segnale di riferimento e quello di risposta misurato viene valutata per ogni singolo pixel per ottenere l'immagine delle fasi.
Questa differenza di fase può essere utilizzata per determinare le proprietà del materiale, i difetti superficiali e per localizzare le zone con spessori diversi[6].

Per un provino piano, il campo di temperature generato da un'onda termica può essere espresso nel modo seguente[6]:

$$T_{z,t} = \cos[\omega t - \Phi(z)] = T_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \tag{21}$$



dove T_0 [°C] è la variazione iniziale di temperatura dovuta all'eccitazione termica, z [m] è la profondità del difetto, ω [rad/s] è la velocità angolare, λ [m] è la lunghezza d'onda termica, $A(z)$ è l'ampiezza dell'onda termica, $\Phi(z)$ è la variazione di fase dell'onda termica che attraversa il materiale e μ [m] è la lunghezza di diffusione termica, definita come la profondità alla quale l'ampiezza delle onde termiche viene smorzata di un fattore e (per cui alla profondità di circa 5μ l'oscillazione della temperatura sarà totalmente smorzata) ed è calcolata usando la formula:

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho c}} \tag{22}$$

dove k [W/m °C] è la conduttività termica, ω [rad/s] è la velocità angolare (=2πf), ρ [kg/m^3] è la densità del materiale mentre c [J/kg °C] è il calore specifico.

Secondo quanto detto, si capisce che onde con più bassa frequenza raggiungono una maggiore profondità rispetto alle onde ad alta frequenza, per cui per la ricerca dei difetti è consigliato avere una frequenza di eccitazione tale che la lunghezza di diffusione termica corrispondente sia leggermente maggiore dell'ipotetica profondità dei difetti[6].

Tuttavia, si riscontrano problemi se si vuole indagare a profondità elevate e difficoltà nell'interpretazione dei risultati, il che rende difficile l'automazione della tecnica.

Elaborazione del segnale

Anche in questo caso, il parametro di riferimento per la stima della difettività di un campione (ma anche per valutare la funzionalità di un metodo di ricerca dei difetti) è il rapporto segnale-rumore. Il SNR viene calcolato per ogni pixel dell'immagine termica, che viene precedentemente processata utilizzando diversi metodi.

La telecamera infrarossi restituisce l'immagine dell'andamento della temperatura di ogni pixel durante tutto l'intervallo temporale della prova; questo tipo di misurazione è molto influenzata dai fattori esterni indicati prima.

Per questo motivo viene solitamente elaborata per passare dal dominio temporale a quello delle frequenze attraverso la trasformata di Fourier o alcune sue approssimazioni[7] quali:

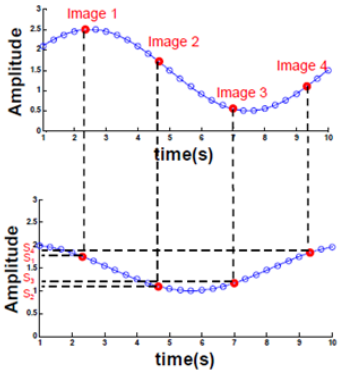
- la Trasformata Discreta di Fourier (DTF) dalla quale si ottiene la risposta in frequenza della temperatura superficiale del campione attraverso la seguente espressione:

$$f_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k * e^{-\frac{2\pi i}{N} jk} = Re_j + i * Im_j \qquad j = 0, \dots, n-1 \qquad (23)$$

dove i valori di *j* rappresentano gli incrementi del valore della frequenza, mentre *Re* e *Im* sono rispettivamente la parte reale e immaginaria della DTF, dalle quali si ricava quindi le due componenti di ampiezza e fase:

$$A_j = \sqrt{Re_j^2 + Im_j^2} \qquad \Phi_j = \operatorname{atan}\left(\frac{Im_j}{Re_j}\right) \qquad (24)$$

- l'Approssimazione Armonica che è un'approssimazione della trasformata di Fourier basata sull'idea che basta conoscere quattro valori equidistanti di temperatura di un singolo ciclo termico per ottenere fase e ampiezza delle oscillazioni (una maggior quantità di dati rende più preciso il risultato, quindi meno soggetto a rumore):

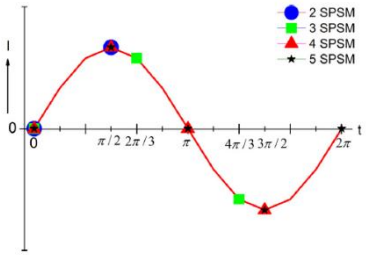


$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

$$\phi = \operatorname{atan}\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right)$$

È stato osservato che, in tutti i casi, l'algoritmo basato sulla trasformata discreta di Fourier fornisce dei risultati migliori di quello dell'approssimazione armonica[7].

Esiste inoltre un metodo analogo all'approssimazione armonica che permette di ottenere la mappa delle fasi attraverso una serie di immagini termografiche che differiscono tra loro di un valore noto di fase: il metodo *phase-shifting*[8], che si distingue in base al numero di immagini di temperatura utilizzate:



- *Two step phase-shifting method* (2 SPSM), che è il più semplice da utilizzare e necessita di sole due immagini termografiche, I_1 e I_2, con una differenza di fase di 90°. La fase viene calcolata attraverso la seguente espressione:

$$\Phi(x, y) = arctan\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \tag{25}$$

- *Three step phase-shifting method* (3 SPSM), che utilizza tre immagini termografiche, da I_1 a I_3, con una differenza di fase di 120°:

$$\Phi(x,y) = arctan\left(\sqrt{3}\left(\frac{I_3 - I_2}{2I_1 - I_2 - I_3}\right)\right) \tag{26}$$

- *Four step phase-shifting method* (4 SPSM), analogo all'approssimazione armonica, che necessita di quattro mappe di temperatura, da I_1 a I_4, con un *phase-shift* di 90° e fasi di riferimento di 0, π/2, π e 3/2 π:

$$\Phi(x,y) = arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right) \tag{27}$$

- *Five step phase-shifting method* (5 SPSM), che è una estensione del 4 SPSM alla quale si aggiunge una quinta immagine I_5 avente una fase di riferimento di 2π (sempre con un *phase-shift* di 90°), espressa come:

$$\Phi(x,y) = arctan\left(\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}\right) \tag{28}$$

Questo metodo offre vantaggi come velocità di utilizzo e accuratezza, inoltre risulta meno sensibile a variazioni di riflettività della superficie del campione e alla luce ambientale.

Calcolo del rapporto segnale-rumore

Una volta ottenute le immagini di ampiezza e fase della risposta in frequenza delle onde termiche all'interno del campione eccitato, in presenza di un sufficiente contrasto termico tra le zone difettive e quelle non difettive, è possibile utilizzare come parametro per individuare i difetti il rapporto segnale-rumore.

Come per il caso della PT, per determinare il valore del SNR nell'immagine della fase (solitamente utilizzata) o dell'ampiezza, vanno individuate due aree, una in corrispondenza del difetto e l'altra intorno a quest'ultimo ("sound area"), come indicato nella figura seguente.

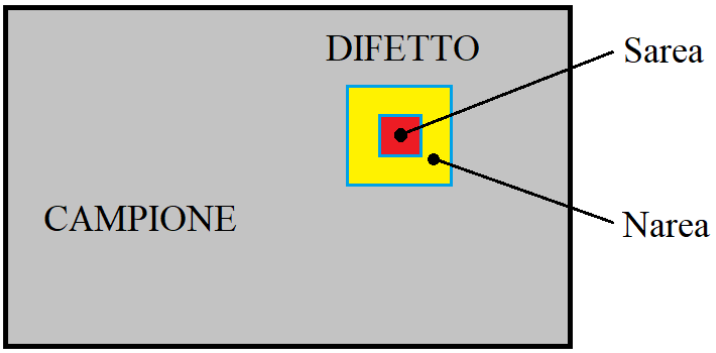


Figura 9: indicazione delle zone di segnale (Sarea) e di rumore (Narea)

Per ogni area occorre calcolare il valore medio della fase. Quindi, in presenza di sufficiente contrasto termico, la media della fase della zona difettiva sarà considerata "segnale" (*Sarea*), mentre la media di quello della zona circostante sarà considerata "rumore" ("*noise*": *Narea*). È possibile, a questo punto, definire il SNR nel modo seguente[7]:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 * \log_{10}\left(\frac{|Sarea_{media} - Narea_{media}|}{\sigma}\right) \qquad [dB] \qquad (29)$$

dove σ è la deviazione standard della zona di rumore.
L'espressione del SNR risulta la stessa di quella usata nel caso della termografia pulsata, varia però i parametri termici considerati e il modo di calcolarli.

Questo metodo di calcolo del SNR è indipendente rispetto al modo in cui il difetto appare, in quanto il difetto può risultare una zona termicamente più calda o più fredda (o con uno sfasamento in anticipo o ritardo rispetto alle zone non-difettive) della zona circostante e il risultato non cambierebbe.
Nell'analisi della mappa delle fasi di un provino, è stato però dimostrato che lo sfasamento tra l'onda incidente e quella riflessa può avere un valore negativo alle più alte frequenze, ciò vuol dire che l'onda riflessa dalle zone difettive è in ritardo di fase rispetto a quella delle zone di rumore; diminuendo progressivamente la frequenza di eccitazione questo sfasamento diminuisce in valore assoluto, fino a diventare zero, per poi ricominciare a crescere con valore positivo (inversione di fase, chiaramente visibile nella figura 10)[6].

Alla frequenza che azzera lo sfasamento di un determinato difetto, che è detta "frequenza cieca", si ha un valore di SNR nullo, per cui il difetto scompare.
Esistono inoltre due frequenze nell'intervallo alle quali si ottiene i massimi valori, positivo e negativo, di contrasto di fase che vengono chiamate "frequenze ottimali".
È chiaro che, durante un controllo pratico, dovrebbe essere utilizzata la frequenza ottimale ed evitata quella cieca.

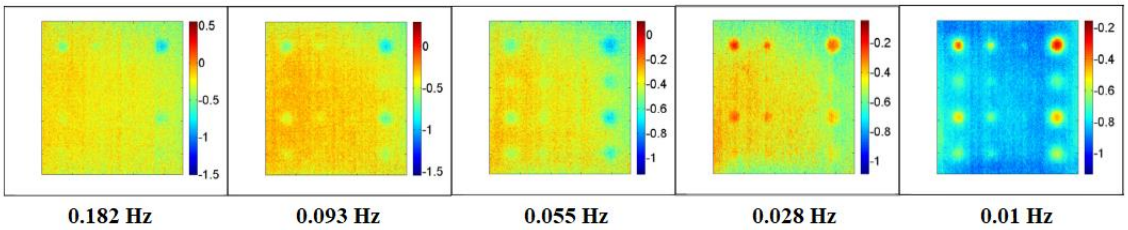


Figura 10: esempio inversione di fase in una indagine termografica di tipo lock-in.

Metodi di miglioramento dei dati termografici per il calcolo del SNR

Esistono inoltre diversi metodi per migliorare i risultati di ricerca dei difetti utilizzando il SNR, che è molto dipendente dal modo in cui il segnale è definito.
Ad esempio, può tornare utile considerare l'immagine termografica nella sua interezza, anziché l'andamento dei vari parametri in un singolo punto (0D) o lungo una linea (1D).
A questo fine è stato messo a punto un algoritmo[8] che permette, oltre che individuare, anche offrire una stima della dimensione dei difetti attraverso l'elaborazione dell'intera mappa delle fasi nel modo seguente:

- la prima fase consiste nel trasformare l'immagine in un grafico 3D, dove x e y sono le coordinate spaziali e z il valore della fase in quel punto. Per poi creare una superficie interpolata:

$$z = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} a_{ij} x^i y^j \tag{30}$$

dove n è l'ordine del fitting polinomiale, mentre i coefficienti a_{ij} si ricavano dal valore dell'errore E (derivando rispetto ad a_{ij} e eguagliando a zero):

$$E = \sum_{k=1}^{N} (\sum_{i=0}^{n} \sum_{i=0}^{n} a_{ij} x_k^i y_k^j - z_k)^2 \tag{31}$$

dove N è il numero di pixel totali.

Un esempio di immagine 3D delle fasi è riportato nella figura 11 dove la superficie rossa rappresenta la mappa originale, mentre quella verde rappresenta quella interpolata.

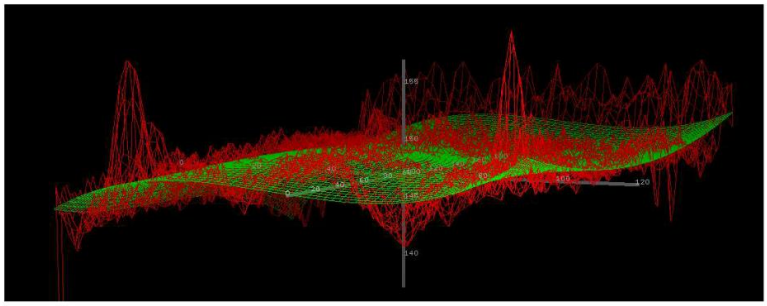


Figura 11: esempio di superficie interpolata nel metodo descritto.

- Il risultato ottenuto genera una superficie che tiene conto delle zone integre e di quelle con difetti. Occorre ora escludere le zone difettive dall'algoritmo di interpolazione. Quindi il passo successivo consiste nel calcolo della deviazione standard tra i dati interpolati nello step precedente e la fase in ogni punto della superficie.

  I pixel aventi valore interpolato maggiore della deviazione sono considerati zone difettive. I valori dei pixel rimanenti (zone non difettive) sono posti pari a 0. Si ottiene quindi un'immagine risultante delle sole zone con difetti.

- Dopo aver individuato la posizione di ogni difetto, è utile utilizzare un'interpolazione gaussiana per riuscirne a stimare l'ampiezza:

$$g(x, y) = A * e^{-\left[\left(\frac{x-x_0}{2s_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{2s_y}\right)^2\right]} \tag{32}$$

dove A è ampiezza della superficie gaussiana, x_0 e y_0 rappresentano la posizione del picco della superficie (centro del difetto), s_x e s_y indicano la deviazione standard, cioè la larghezza della gaussiana lungo gli assi x e y rispettivamente. Se ne riporta un esempio nella figura 12.

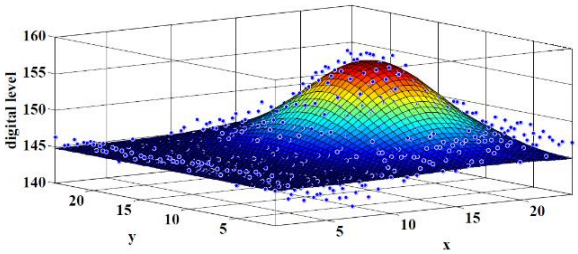


Figura 12: esempio di superficie gaussiana di approssimazione di un difetto.

- Le zone con difetti individuate nello step precedente vengono poste a zero, in modo da lasciare solo le informazioni riguardanti il rumore, che viene calcolato come la media quadratica del valore della fase di ogni pixel.

A questo punto si può procedere al calcolo del SNR per ogni difetto, facendo variare volta per volta la frequenza di eccitazione.

Questo tipo di approccio migliora la ricerca difetti in un provino, dal momento che la possibilità di localizzazione di difetti, con alto livello di rumore, è maggiore per un grafico di superficie anziché per un lineare, come si vede dalla figura 13.

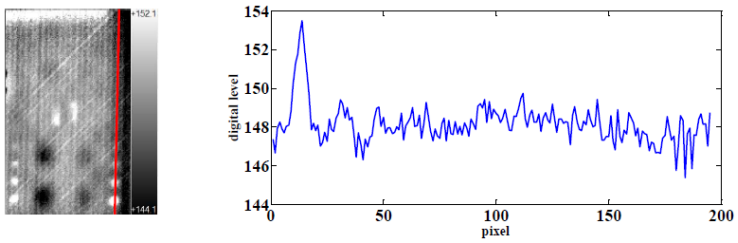


Figura 13: andamento segnale termografico lungo una linea in un provino difettato.

Un altro metodo di miglioramento della valutazione di difettività dei materiali attraverso il SNR prevede l'utilizzo delle immagini di fase e ampiezza delle onde termiche contemporaneamente attraverso algoritmi di "data fusion" al fine di migliorare l'accuratezza nella rilevazione di inclusioni e difetti.

Esistono moltissimi processi di fusione delle immagini, quelli più promettenti risultano la *Principal Component Analysis* (PCA) nel dominio spaziale e la *Discrete Wavelet Transform* (DWT) in quello della frequenza[9].

Principal Component Analysis (PCA)

Il metodo PCA prevede, come primo passo, la generazione di una colonna di vettori per le due immagini. Vengono poi calcolati gli autovalori e gli autovettori delle matrici delle covarianze associate alle colonne generate, le quali vengono poi normalizzate rispetto all'autovalore maggiore.

Le componenti normalizzate P1 e P2 sono calcolate tramite l'autovettore ottenuto e viene generata l'immagine "fusa" tramite l'equazione (i cui passaggi sono spiegati nella figura 14):

$$I_f(x,y) = P_1 I_1(x,y) + P_2 I_2(x,y) \tag{33}$$

dove I_f è l'immagine ''fusa'', I_1 e I_2 sono le due immagini iniziali e P_1 e P_2 le componenti normalizzate.

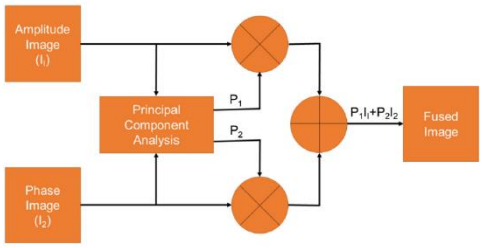


Figura 14: schema applicazione metodo PCA.

Discrete Wavelet Transform (DWT)

La DWT, invece, viene prima applicata sulle due immagini sorgente per poi generare una "mappa decisionale" basata su un set di regole di fusione. Attraverso questa viene costruita una mappa dei coefficienti wavelet ottenuta dalla fusione delle due mappe dei coefficienti delle due immagini in accordo con la mappa decisionale. Viene eseguita, alla fine, la trasformata wavelet inversa che restituisce l'immagine fusa, secondo l'equazione (rappresentata schematicamente nella figura 15):

$$I_f(x,y) = W^{-1}\left[\varphi\left\{W\left(I_1(x,y)\right), W\left(I_2(x,y)\right)\right\}\right] \tag{34}$$

dove I_f è l'immagine fusa, I_1 e I_2 sono le due immagini iniziali, φ è la regola di fusione e W e W^{-1} sono la trasformata wavelet discreta e la sua inversa rispettivamente.

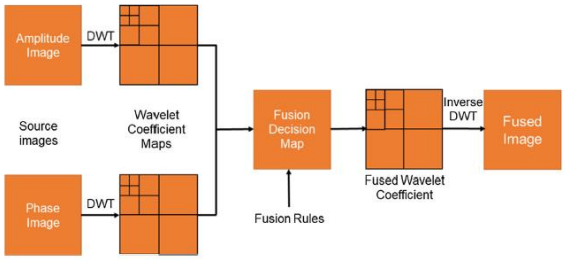


Figura 15: schema applicazione metodo DWT.

I passi richiesti per l'utilizzo di questa tecnica di fusione sono i seguenti:

1. Lettura delle due immagini da fondere I_1 e I_2.
2. Applicare la trasformata wavelet discreta a queste ultime.
3. Utilizzare un algoritmo pixel-based che comporta una fusione delle due immagini basata sul prendere i pixel con valore massimo tra le due approssimazioni.
4. Da questo algoritmo viene generata una mappa decisionale che fornisce le regole per la fusione dei coefficienti di approssimazione delle due immagini sorgente.
5. Si ottiene la trasformata finale fusa generata attraverso le regole indicate, che sarà la nuova matrice dei coefficienti.
6. Applicando infine la trasformata wavelet discreta inversa sarà ricostruita l'immagine finale ottenuta dalla fusione delle due iniziali.

Si può osservare un esempio di risultati ottenuti[5] su un campione di materiale composito in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) nel quale sono stati inseriti, tra i vari strati di resina epossidica, dei fogli di rame di diverse dimensioni e a diverse profondità (figura 16).

L'esperimento è stato svolto con una frequenza di eccitazione decrescente da 0.5 Hz fino a 0.02 Hz, in funzione della lunghezza di diffusione delle onde termiche.

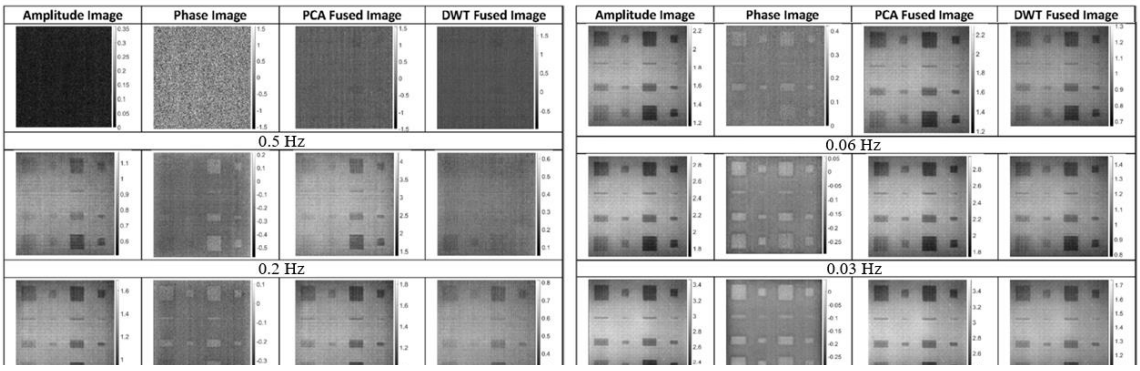


Figura 16: esempio risultati delle tecniche di fusione di immagini per un provino in GFRP con diverse discontinuità.

Il rapporto segnale-rumore è stato utilizzato come parametro per valutare sia le immagini di fase e ampiezza, che quelle "fuse" tramite l'algoritmo, considerando due zone (ciascuna di 5x5 pixel): una in corrispondenza dell'inclusione, l'altra nella zona subito adiacente ("sound region"), secondo l'equazione 29 nella quale "Sarea" è la media aritmetica di tutti i pixel all'interno della zona dell'inclusione mentre "Narea" e σ sono, rispettivamente, la media aritmetica e la deviazione standard di tutti i pixel all'interno della "sound region".

Dai risultati di questo articolo si è evidenziato come il metodo PCA funzioni meglio con alte frequenze di eccitazione (comparate con le basse frequenze) e fornisca valori di SNR maggiori rispetto al metodo DWT, che invece fornisce risultati migliori con le basse frequenze (comparate alle alte)[9].

Un altro vantaggio di queste tecniche è la possibilità di processare anche sequenze di immagini con un meccanismo analogo a quello esposto, ma utilizzando singoli fotogrammi che vengono fusi separatamente.

Procedura di analisi

Strumentazione

Gli strumenti impiegati in un'indagine termografica dipendono dal tipo di tecnica che si vuole utilizzare.
Il primo strumento necessario per ogni tipo di applicazione è la telecamera ad infrarossi (IR), grazie alla quale è possibile rilevare gli andamenti di temperatura emessi dal campione.
Il secondo strumento di cui necessita un'analisi di termografia attiva è la sorgente di eccitazione termica, che ha lo scopo di scaldare il campione per indagarne il comportamento. Le sorgenti possono essere di diverse tipologie, a seconda del tipo di analisi che si vuole mettere in pratica, le principali sono le lampade alogene, i flash, gli induttori e i laser. Ognuno di essi fornisce un diverso profilo di riscaldamento con particolari caratteristiche.
È necessaria poi un'unità di controllo, con il relativo software, che permetta di collegare e gestire le varie componenti del sistema.
Le prove sono state eseguite nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) del Politecnico di Torino utilizzando un macchinario realizzato

dalla DES (*Diagnostic Engineering Solutions*), di cui si riporta un'immagine (figura 17) e il relativo schema (figura 18).

Figura 17: piano di lavoro utilizzato per le prove.

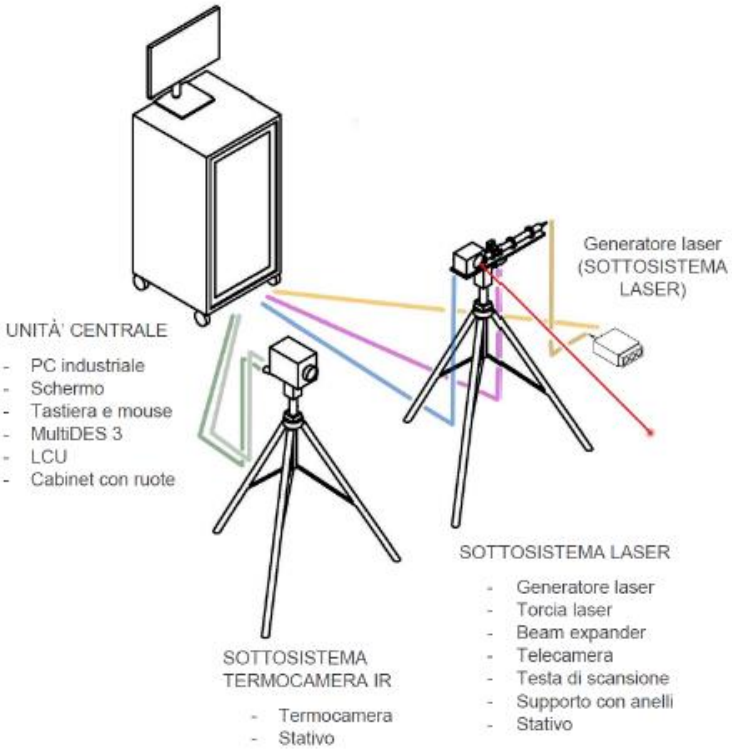


Figura 18: schema strumentazione presente in laboratorio.

Si analizzano ora gli strumenti principali dell'analisi per comprenderne le modalità di utilizzo[10].

La termocamera

La termocamera fornita è una FLIR A6751sc con una risoluzione di 640x512 pixel campionati con una frequenza di 600 Hz.

Figura 19: termocamera FLIR.

La strumentazione presente in laboratorio permette le analisi termografiche sia in modalità di riflessione, che prevede termocamera e raggio laser in posizione adiacente, frontali rispetto al campione, che in modalità di trasmissione, in cui la termocamera acquisisce le immagini dalla parte posteriore del campione, rispetto alla sorgente di eccitazione.

La gestione della termocamera avviene tramite il software *ResearchIR*, di proprietà della FLIR, attraverso il quale è possibile regolare parametri come la finestra di temperatura, la risoluzione della termocamera e il frame rate di acquisizione delle immagini (una risoluzione inferiore permette di aumentare il frame rate e viceversa).

Al termine dell'impostazione di vari dati (quali emissività del materiale, distanza tra le parti, temperatura e umidità dell'ambiente di prova), è possibile procedere al test in completa sicurezza attraverso barriere che racchiudono la strumentazione e acquisire il termogramma che viene poi visualizzato in una schermata del software (figura 20).

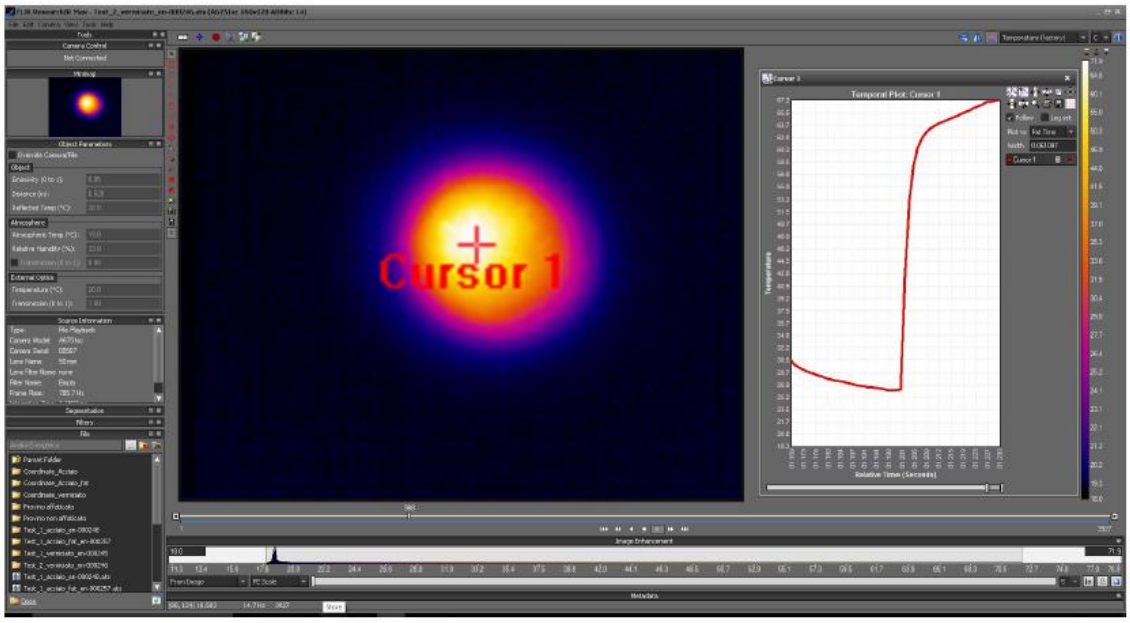


Figura 20: schermata di analisi del termogramma mediante ResearchIR

In più, il software permette un'analisi preliminare delle immagini, controllando che venga scelta un'adeguata finestra di temperatura in modo da evitare un'errata elaborazione dei dati e la definizione di conclusioni non attendibili sulle prove in esecuzione.

Il laser

La sorgente di calore in dotazione a questo sistema è un raggio laser. Un esempio della testa laser presente in laboratorio è rappresentato nell'immagine seguente.

Figura 21: esempio di testa laser fornita con la strumentazione.

Il laser realizza profili di riscaldamento assimilabili ad un'onda quadra. Mentre la gestione di questa sorgente termica avviene tramite l'interfaccia *Multides* realizzata dalla DES, nella quale è possibile regolare il periodo dell'impulso, il numero degli impulsi e la percentuale di potenza.

Il software per l'analisi del termogramma

L'ultimo strumento da analizzare è il software di elaborazione dei dati. Il programma in questione si chiama *Irta* ed è realizzato dalla DES. All'interno di questo programma sono

presenti diversi *tool* per l'esecuzione di diverse analisi. Il *tool* utilizzato per le analisi effettuate è lo *Spot Track*, strumento in grado di rappresentare l'andamento di temperatura generato da un pixel durante la prova. I pixel di interesse sono inseriti attraverso la loro coordinata *x* e *y* nell'immagine del termogramma (figura 22).

Tutte queste informazioni possono poi essere esportate all'esterno del software attraverso dei file Excel.

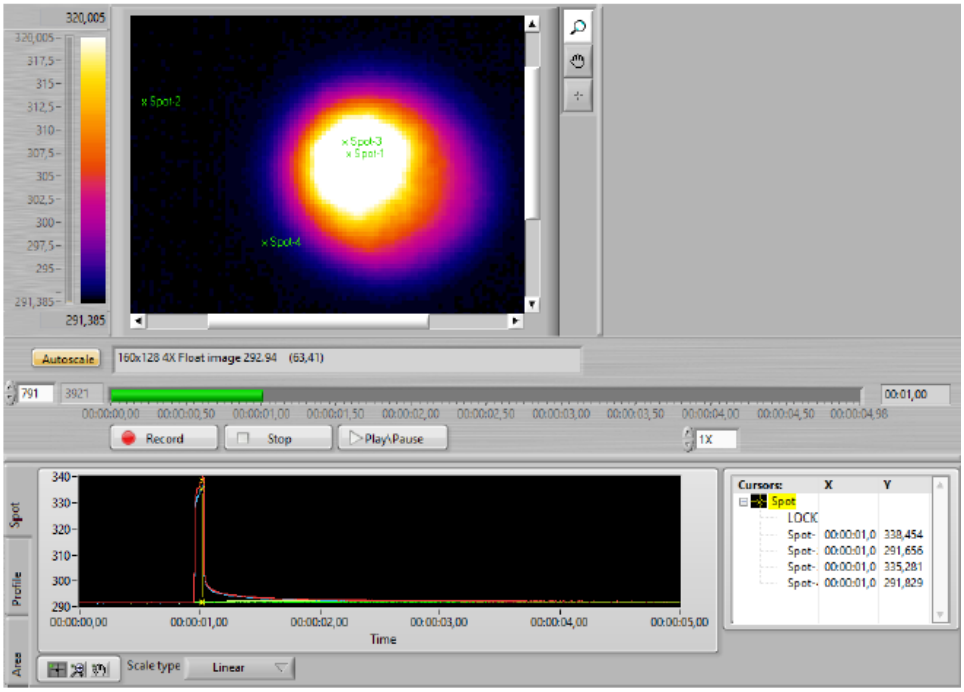


Figura 22: esempio andamenti dello Spot Track per differenti pixel del termogramma.

Descrizione e parametri delle prove

Le prove sono state eseguite su provini aventi una forma di parallelepipedo con diversi spessori ("scaletta"). Dei vari "gradini", i test sono stati effettuati sulle zone aventi spessore 2,5 mm e 10,4 mm.

In particolare, sono stati utilizzati due provini in materiale diverso: acciaio e alluminio, sui quali sono state eseguite le prove prima sul nudo metallo e, successivamente, sugli stessi campioni riverniciati di colore nero per aumentarne l'emissività (come indicato nella tabella seguente).

Emissività provini	
Acciaio non verniciato	0,5
Acciaio verniciato	0,97-0,9
Alluminio non verniciato	0,45
Alluminio verniciato	0,97-0,99

La singola prova consta di un riscaldamento puntuale e quasi istantaneo del provino attraverso l'utilizzo di un laser (con potenza massima di 50 W), posto a una distanza di 0,5 m dal campione, che lo eccita per un intervallo temporale dell'ordine dei millisecondi. Attraverso una telecamera termica (IR) viene registrata la mappa termica della zona scaldata direttamente e di quella circostante prima, durante e dopo il riscaldamento, in modo da avere gli andamenti completi sia del transitorio di riscaldamento che di quello di raffreddamento, con un intervallo totale di acquisizione di dieci secondi e una finestra di acquisizione della telecamera di 10-90 °C.
La prova è stata eseguita in modalità di riflessione e quindi con la telecamera IR e il laser posti nella stessa posizione rispetto al campione (come visibile in figura 17).

Sono state eseguite quattro prove (doppie per la verifica della replicabilità) su ciascuno dei quattro provini. Nel caso dei provini non verniciati, il laser e la telecamera IR sono stati impostati secondo i seguenti parametri:

	Periodo [ms]	Potenza laser [%]	Impulsi	Frame rate [fps]	Tempo di acquisizione [s]	Spessore [mm]
Test_1	50	80	1	600	10	2,5
Test_2	50	80	1	600	10	2,5
Test_3	50	80	1	600	10	10,4
Test_4	50	80	1	600	10	10,4

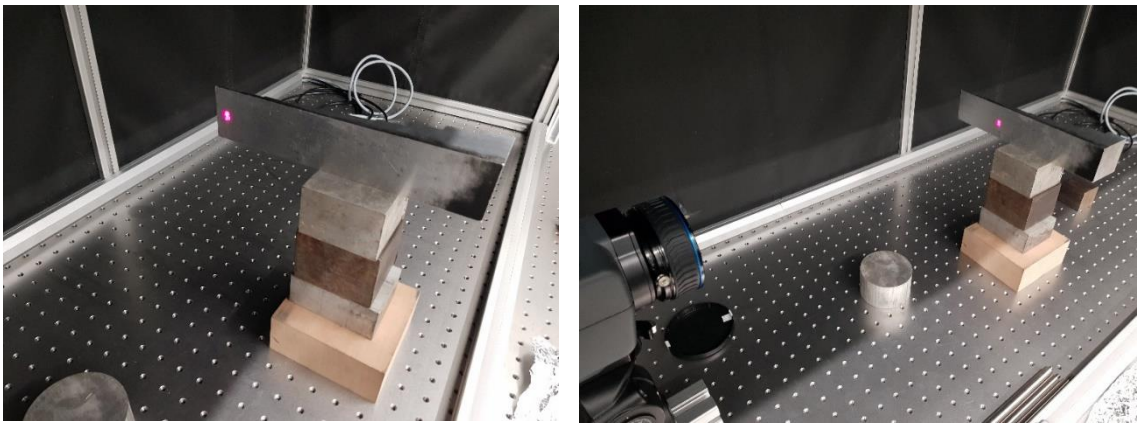


Figura 23: foto dell'esperimento per due differenti spessori dei provini non verniciati.

Mentre, nel caso delle scalette di alluminio e acciaio verniciati, la verniciatura aumenta l'emissività e quindi la quantità di radiazione assorbita, motivo per il quale è necessario diminuire l'energia tramessa tramite il laser (diminuendo la potenza e il periodo di riscaldamento), per cui è stata impostata la prova secondo i seguenti parametri:

	Periodo [ms]	Potenza laser [%]	Impulsi	Frame rate [fps]	Tempo di acquisizione [s]	Spessore [mm]
Test_1	5	50	1	600	10	2,5
Test_2	5	50	1	600	10	2,5
Test_3	5	50	1	600	10	10,4
Test_4	5	50	1	600	10	10,4

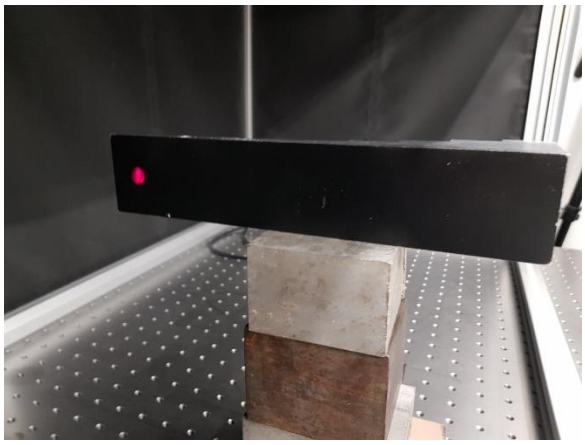


Figura 24: foto di un provino verniciato durante una delle prove.

Dalle immagini termografiche acquisite, sono stati estratti, per ogni prova, gli andamenti di temperatura di cinque punti allineati della superficie del campione, secondo la figura 25.

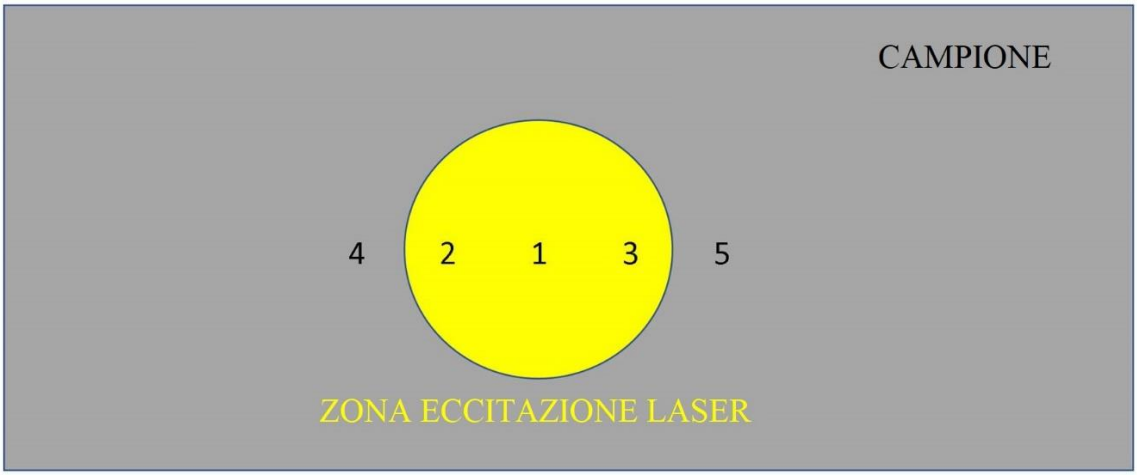


Figura 25: schema dei pixel acquisiti e indagati durante tutte le prove.

- Il punto 1 è il pixel dell'immagine termica dove si raggiunge la massima temperatura durante tutto il test;
- i punti 2 e 3 sono pixel che si trovano equidistanti dal punto 1, ma all'interno della zona irradiata direttamente dal laser, per cui l'incremento di temperatura durante il riscaldamento è comunque molto significativo;
- i punti 4 e 5 (anch'essi equidistanti dal punto alla massima temperatura) sono sufficientemente lontani dalla zona eccitata col laser da subire un incremento di temperatura quasi impercettibile.

Elaborazione dei risultati

Si riportano, a scopo di esempio, gli andamenti della temperatura nei cinque punti nel caso dell'acciaio non verniciato con spessore di 10,4 mm (figura 26):

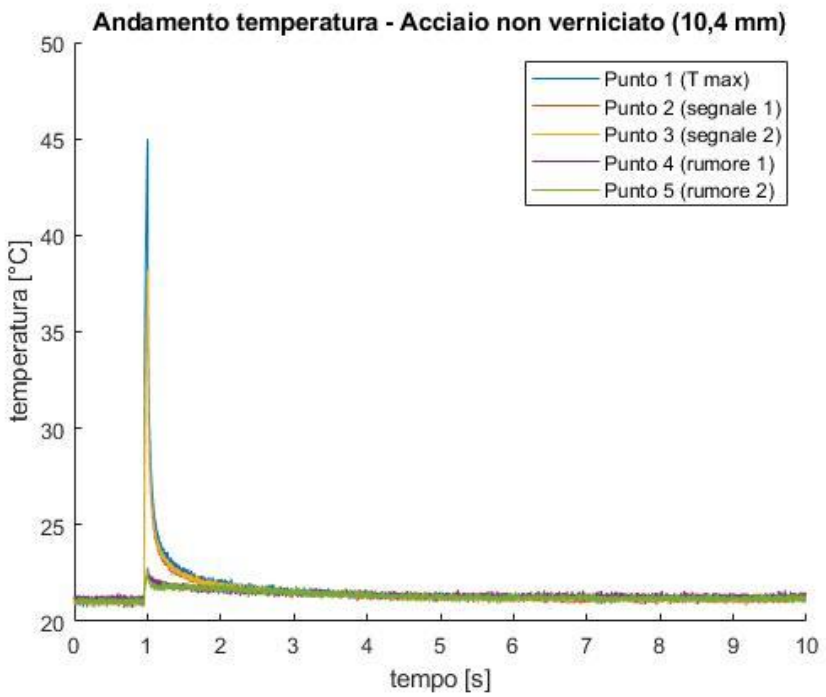


Figura 26: esempio andamento temperatura dei cinque punti di una singola prova (acciaio non verniciato 10,4 mm).

Una volta estratte le mappe termiche di tutte le prove, prima di procedere al calcolo della Trasformata di Fourier[7/8], è apparso opportuno trattare i dati ottenuti, filtrandoli con l'operatore "*smoothdata*" del software di calcolo MATLAB, per ottenere dei risultati meno soggetti alle oscillazioni di temperatura presenti nell'ambiente di prova.
Si riporta un esempio dell'effetto di questo filtro nella figura sottostante.

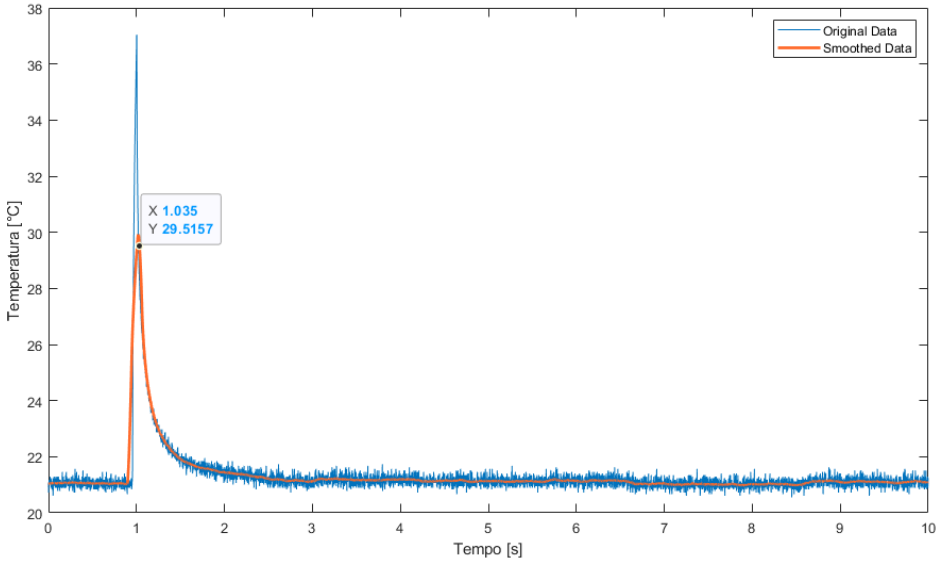


Figura 27: esempio di utilizzo del filtro "smoothdata" di Matlab.

Una volta processate le mappe termiche dei vari provini, si è potuto procedere all'applicazione della trasformata di Fourier tramite MATLAB, attraverso la quale sono stati ottenuti i grafici di fase e ampiezza in funzione della frequenza di tutti i transitori termici.

Si riporta un esempio dei grafici della fase (che, solo per chiarezza di rappresentazione, sono stati filtrati tramite una media mobile, ma utilizzati senza filtraggio nell'elaborazione) e dell'ampiezza ottenuti, nelle figure sottostanti.

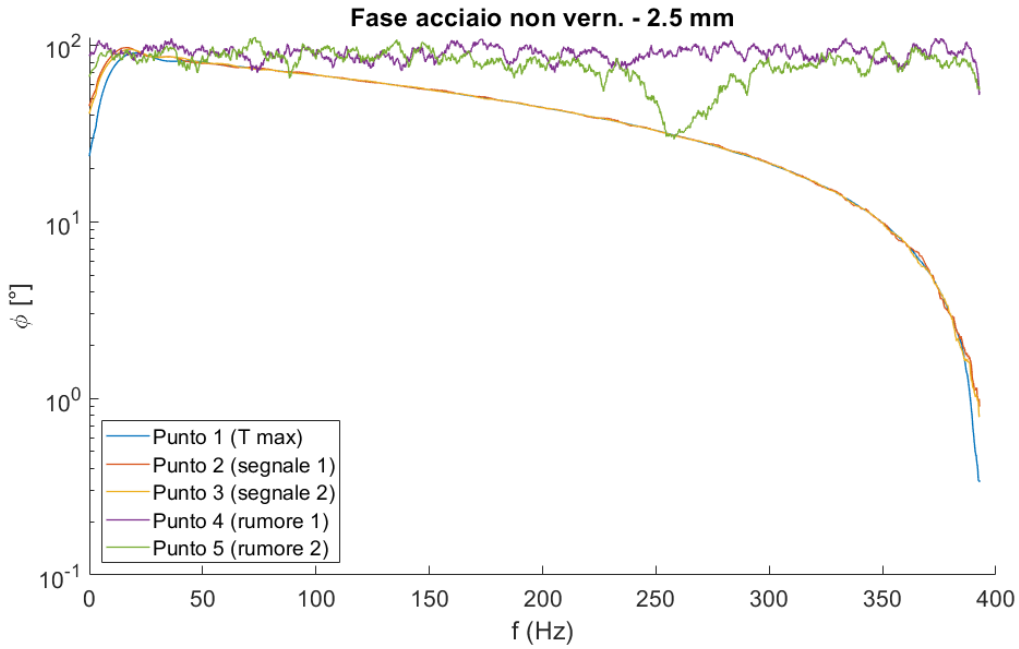


Figura 28: esempio di un andamento di fase ottenuto da una delle prove (acciaio non verniciato 2,5 mm).

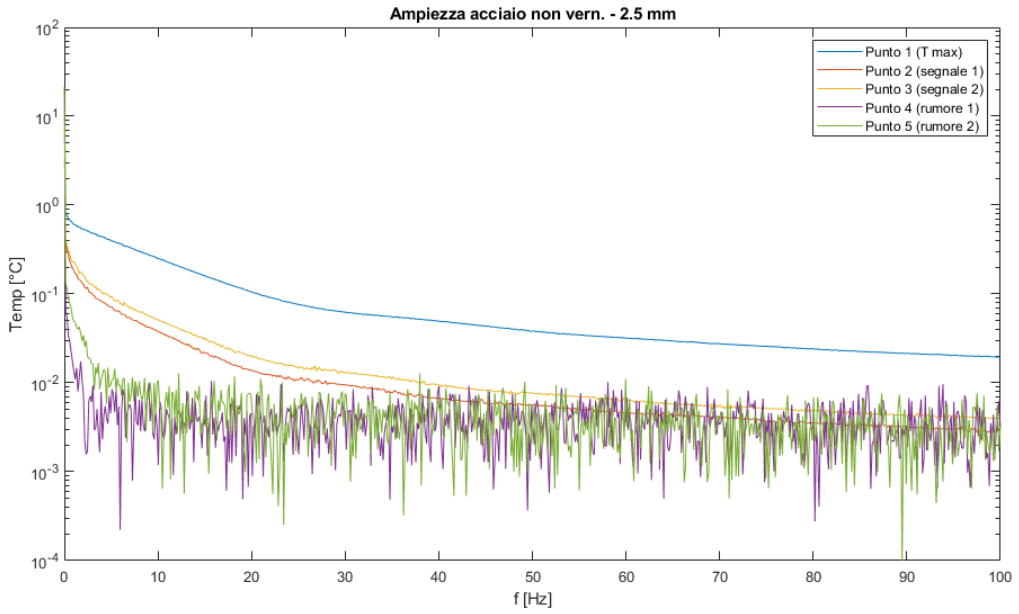


Figura 29: esempio di un andamento di ampiezza ottenuto da una delle prove (acciaio non verniciato 2,5 mm).

È possibile notare immediatamente come il grafico ampiezza-frequenza, per i punti identificati come segnale, sia meno soggetto alle oscillazioni di temperatura (l'immagine dell'andamento non è stata filtrata).
Infatti, in letteratura, è usata prevalentemente l'immagine della fase[5/8], che fornisce dei risultati più precisi grazie alla sua maggiore sensibilità.
Da qui in poi verranno, quindi, considerati solo i grafici delle fasi dei transitori termici analizzati.

Calcolo SNR

Per il calcolo del *Signal to Noise Ratio* è stato ideato un metodo basato sugli studi presenti in letteratura. In particolare, è stata utilizzata la formula di *Madruga et al.*[7], già indicata nell'analisi bibliografica:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 * \log_{10}\left(\frac{|Sarea_{media} - Narea_{media}|}{\sigma}\right) \qquad [dB] \qquad (35)$$

Occorre quindi definire come sono stati valutati i vari parametri di calcolo:

- SIGNAL: si considera come segnale il valore della fase nel punto considerato, per una data frequenza (non è valutato come media in quanto, nell'analisi, sono considerati pochi punti, ma si può adattare nell'utilizzo in prove che riguardano un numero maggiore di punti);
- NOISE: il rumore viene calcolato come media quadratica dei valori di fase nei cinque punti, per una data frequenza, come indicato da *Roy et al.*[8];
- DEVIAZIONE STANDARD (σ): che è l'indice di dispersione del rumore[7] ($\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{N}}$, dove $\bar{x}$ è la media aritmetica dei valori di fase), viene valutato in diversi modi.

A questo proposito sono state ideate due possibili metodologie per il calcolo del rapporto segnale-rumore, che differiscono tra loro nel modo di considerare lo scarto quadratico medio (σ), come indicato nella tabella seguente.

<table>
<tr><th></th><th>SIGNAL</th><th>NOISE</th><th>σ</th></tr>
<tr><td>METODO 1</td><td rowspan="2">La fase in ogni punto e per ogni frequenza è considerata come segnale in ogni metodo utilizzato.</td><td rowspan="2">Il rumore è calcolato, per ogni frequenza, come media quadratica, considerando i cinque punti.</td><td>Calcolata per ogni frequenza considerando tutti i cinque punti.</td></tr>
<tr><td>METODO 2</td><td>Calcolata per ogni frequenza considerando tutti i cinque punti, ma la $\bar{x}$ viene valutata sull'intero set di dati.</td></tr>
</table>

Si riportano due estratti dello script di MATLAB che indicano come sono stati quindi calcolati i vari parametri nei due metodi:

- METODO 1

```
%% Calcolo parametri metodo 1

stdA=std(A);
noise_avg=sqrt(sum(A.^2)./5);
```

- METODO 2

```
%% Calcolo parametri metodo 2

mediaA=mean(A(:));
stdA=zeros(1,N);
stdA=sqrt((sum(A-mediaA).^2)/5);
noise_avg=sqrt(mean(A.^2));
```

dove A è una matrice di cinque righe e tante colonne quanti sono i valori della fase (in funzione della frequenza considerata) negli andamenti dei cinque punti, per ogni test analizzato.

A questo punto, partendo dai grafici fase-frequenza di tutti i test effettuati e avendo calcolato i parametri utili, si è proceduto al calcolo del SNR secondo le modalità appena indicate.
È opportuno sottolineare come, utilizzando i due metodi, non appaia una rilevante differenza nei risultati. Per cui tutti i risultati riportati in seguito sono stati ottenuti attraverso l'utilizzo del "metodo 1", tenendo presente che si sarebbe arrivati a conclusioni analoghe anche con il "metodo 2".

Si riporta un estratto dello script che mostra la formula per il calcolo del SNR utilizzata nel software di calcolo:

```
%% Calcolo SNR

SNR=zeros(5,N);
for i=1:5
    for j=1:N
        SNR(i,j)=20*log10(abs(A(i,j)-noise_avg)/stdA);
    end
end
```

Rappresentazione dei risultati ottenuti

Eseguiti i calcoli finali, si è proceduto al disegno dei grafici che riportano l'andamento del rapporto segnale-rumore per ogni punto, in funzione della frequenza.

A scopo di esempio si riportano i risultati nel caso dell'acciaio non verniciato con spessore 2,5 mm:

- il punto 1 è quello in cui si raggiunge la massima temperatura in tutta la prova, per cui l'andamento (figura 30) risulta meno soggetto alle oscillazioni:

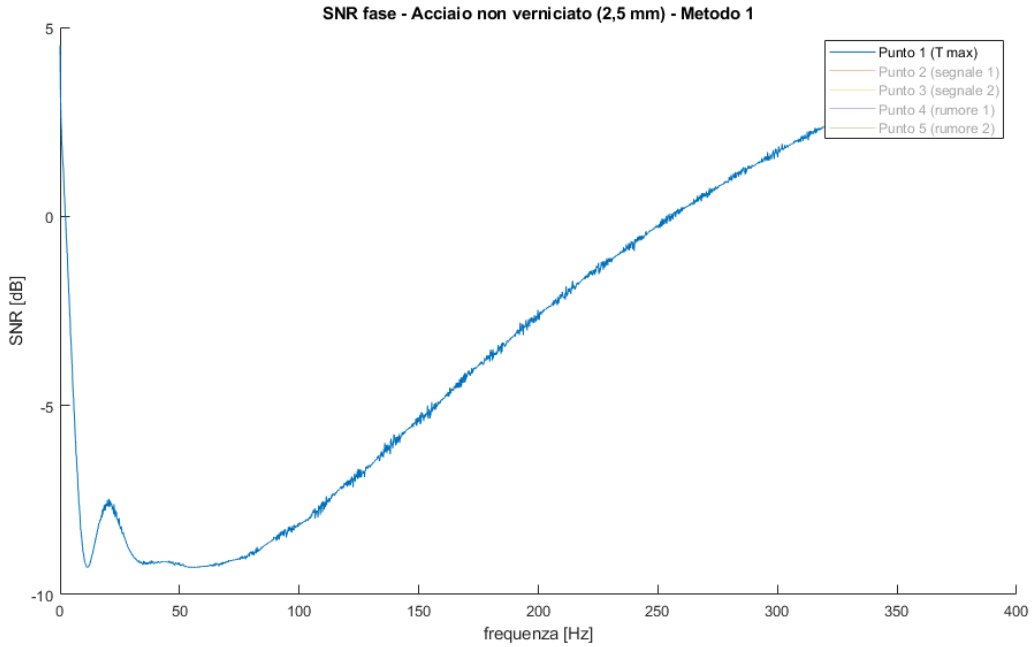


Figura 30: esempio di un andamento del SNR della fase ottenuto da una delle prove (acciaio non verniciato 2,5 mm, punto a massima temperatura).

- i punti 2 e 3 sono considerati punti "di segnale", ossia dove l'aumento di temperatura durante il riscaldamento è ancora consistente, per cui è possibile avere transitori di riscaldamento e raffreddamento che permettono di generare un'immagine delle fasi e del SNR analoghe a quelle del punto 1, ma con un

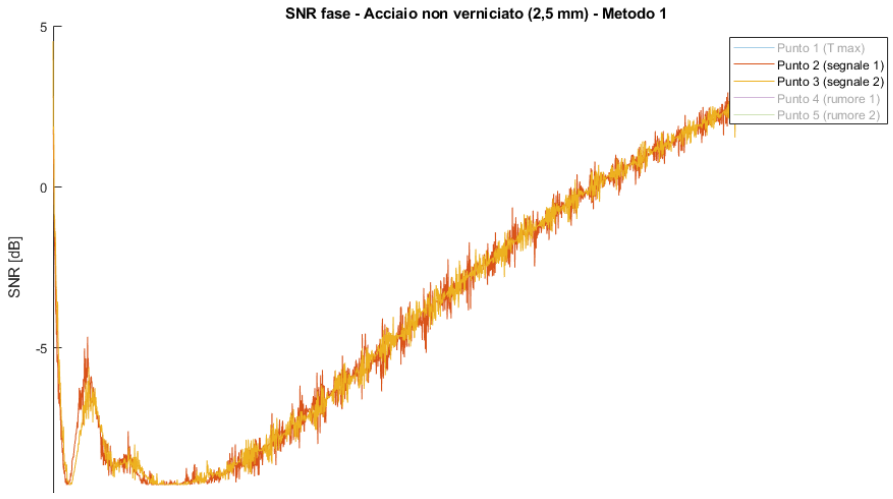


Figura 31: esempio di un andamento del SNR della fase ottenuto da una delle prove (acciaio non verniciato 2,5 mm, punti di segnale).

maggiore impatto delle oscillazioni di temperatura, che provocano andamenti meno definiti (figura 31):

- per quel che riguarda i punti 4 e 5, considerati "di rumore", poiché nella loro immagine termica non è possibile individuare alcun picco significativo di temperatura, l'andamento del grafico fase-frequenza ha un andamento totalmente casuale che produce i seguenti andamenti del SNR (figura 32):

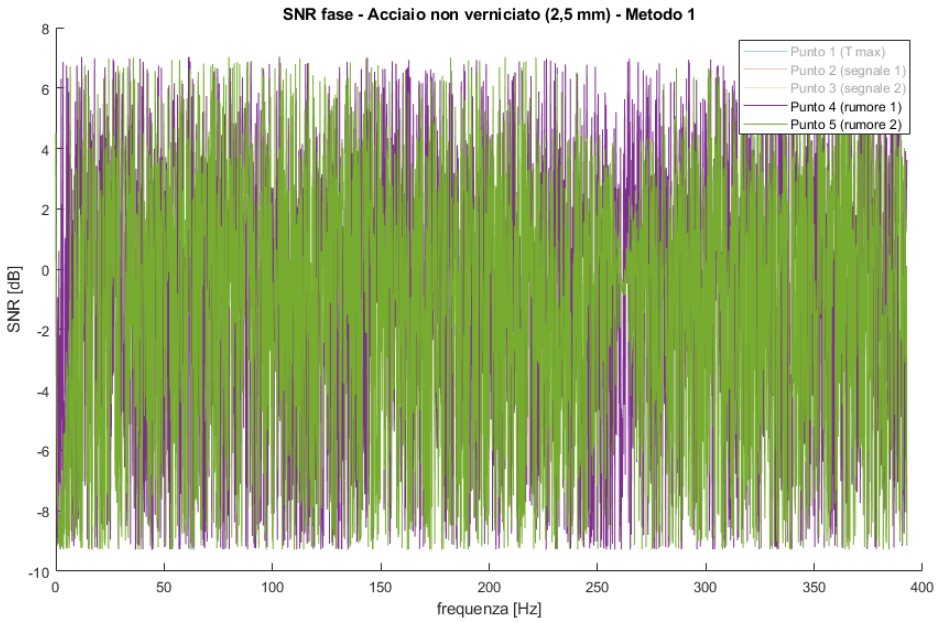


Figura 32: esempio di un andamento del SNR della fase ottenuto da una delle prove (acciaio non verniciato 2,5 mm, punti di rumore).

I grafici della zona di rumore, nonostante non siano interpretabili, raggiungono valori di SNR maggiori delle altre zone probabilmente a causa del fatto che i valori della fase in queste zone risulti maggiore di quelli nelle zone di segnale. In ogni caso il SNR risulta oscillante intorno al valore nullo (per la prova considerata $SNR_{medio_rumore} = -1.04\ dB$

Confronto e analisi dei risultati

Metodo di confronto

Per via del cospicuo numero di prove analizzate ed elaborate, il confronto e l'analisi dei risultati ottenuti vengono eseguiti raffrontando tra loro le varie prove facendo variare un solo parametro tra i seguenti:

- spessore;
- verniciatura;
- materiale.

In generale, verrà analizzato l'andamento del SNR considerando esclusivamente il punto in cui si raggiunge la massima temperatura (punto 1) per ogni prova, poiché risulta di più chiara interpretazione in quanto gli altri punti "di segnale" (punti 2 e 3) sono soggetti a una maggiore oscillazione ma, nonostante questo, si nota comunque un andamento analogo ai rispettivi punti 1.

Come già sottolineato nei capitoli precedenti, sarà considerato solo il "metodo 1" di quelli esposti per il calcolo del rapporto segnale-rumore, in quanto il secondo metodo fornisce risultati simili.

Elenco dei confronti

L'esposizione dei confronti fatti tra i vari risultati è riportata secondo il seguente elenco:

Confronto	Parametro
Acciaio non verniciato (2,5/10,4 mm)	Spessore
Acciaio verniciato (2,5/10,4 mm)	Spessore
Acciaio verniciato/non verniciato (2,5 mm)	Verniciatura
Acciaio verniciato/non verniciato (10,4 mm)	Verniciatura
Alluminio non verniciato (2,5/10,4 mm)	Spessore
Alluminio verniciato (2,5/10,4 mm)	Spessore
Alluminio verniciato/non verniciato (2,5 mm)	Verniciatura
Alluminio verniciato/non verniciato (10,4 mm)	Verniciatura
Acciaio/alluminio non verniciati (2,5 mm)	Materiale
Acciaio/alluminio non verniciati (10,4 mm)	Materiale
Acciaio/alluminio verniciati (2,5 mm)	Materiale
Acciaio/alluminio verniciati (10,4 mm)	Materiale

Anomalie

Non tutti i risultati ottenuti sono stati valutati come significativi a causa di varie irregolarità presentatesi durante i test (come, ad esempio, un riscaldamento non sufficiente). Si riportano, a seguire, le prove per cui i risultati sono stati poco chiari e/o diversi da quelli attesi.

Acciaio non verniciato (spessore 10,4 mm)

Nel caso dell'acciaio non verniciato con spessore di 10,4 mm, sono stati ottenuti i seguenti risultati dal calcolo del SNR. Di cui si riportano in fig.33 il SNR della fase per il punto 1, in fig.34 gli andamenti dei due punti di segnale 2 e 3, e in fig.35 quelli dei punti di rumore 4 e 5.

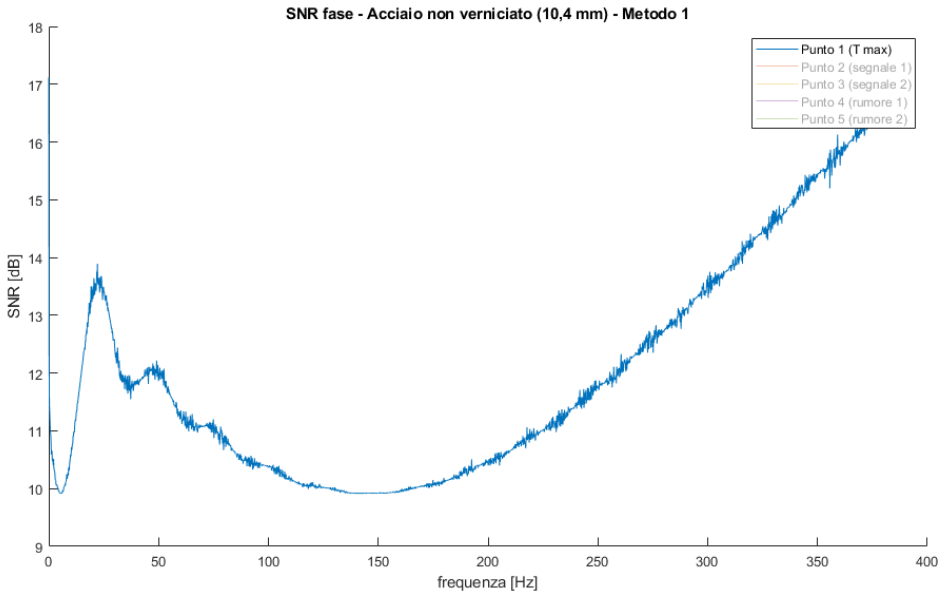


Figura 33: SNR della fase del punto 1 dell'acciaio non verniciato (10,4 mm).

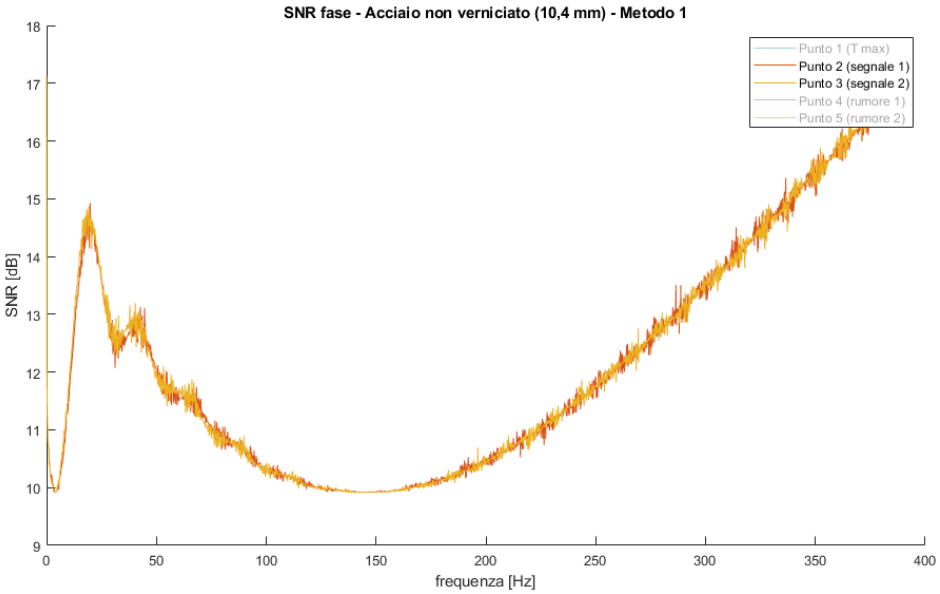


Figura 34: SNR della fase dei punti 2 e 3 dell'acciaio non verniciato (10,4 mm).

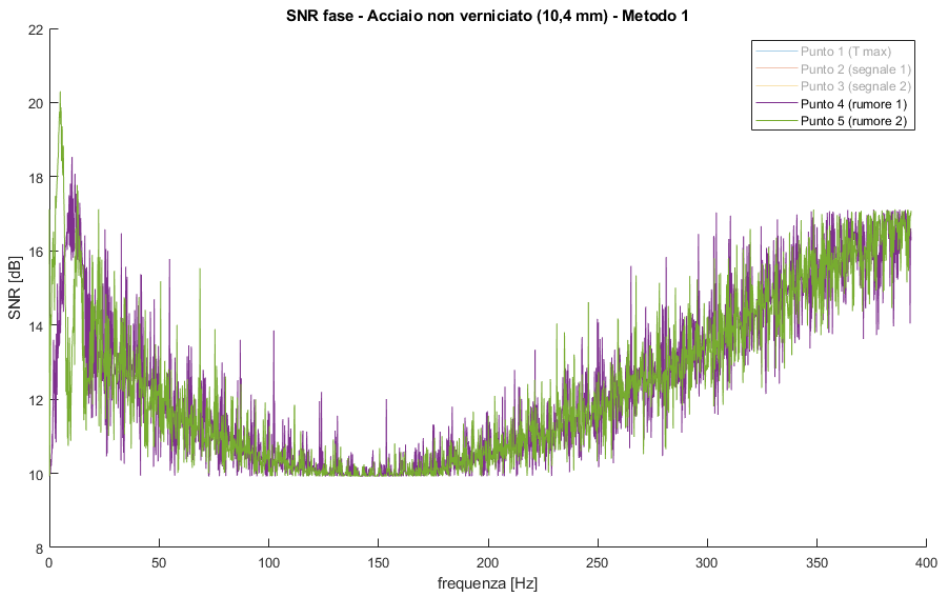


Figura 35: SNR della fase dei punti 4 e 5 dell'acciaio non verniciato (10,4 mm).

L'anomalia presente, rispetto alle altre prove, in questi grafici risiede nel fatto che i punti di rumore abbiano lo stesso andamento (chiaramente più rumoroso) degli altri punti analizzati.

Nella totalità delle altre prove, i punti di rumore hanno fornito risultati di rapporto segnale-rumore non interpretabili, in quanto costituiti da oscillazioni casuali (all'incirca nell'intorno del valore nullo), come visibile nell'esempio dell'acciaio non verniciato con spessore 2,5 mm, in figura 36.

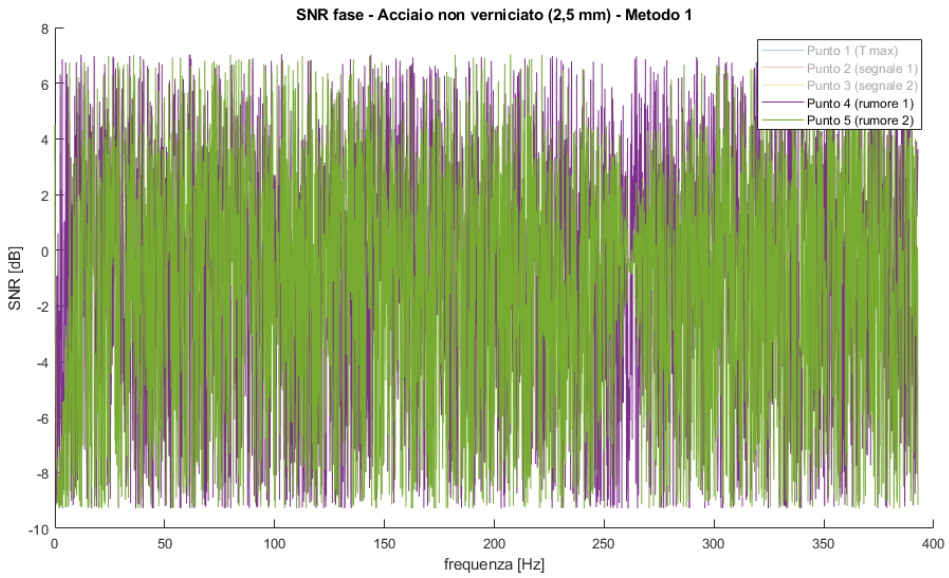


Figura 36: SNR della fase dei punti 4 e 5 dell'acciaio non verniciato (2,5 mm).

Questo comportamento può essere dovuto al fatto che l'andamento di temperatura dei punti di rumore della prova in questione è molto meno soggetta ad oscillazioni (probabilmente a causa delle condizioni ambientali, figura 37) e quindi fornisce andamenti di fase analoghi a quelli degli altri punti (figura 38).

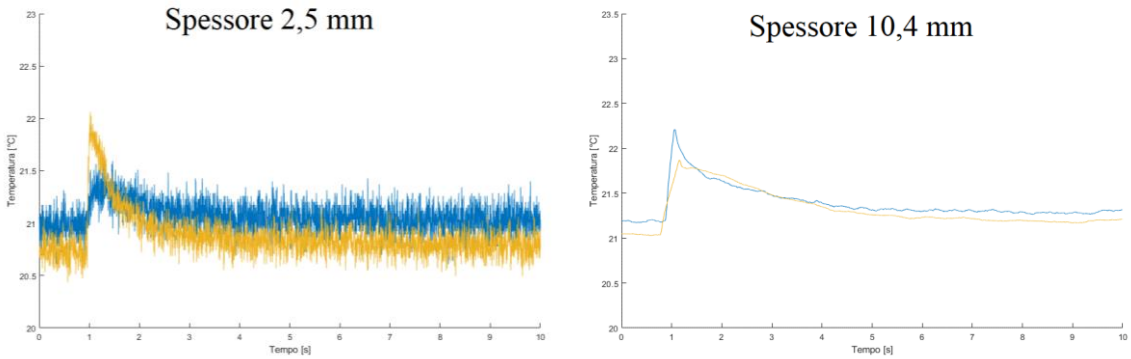


Figura 37: andamenti di temperatura delle zone di rumore dell'acciaio non verniciato a due differenti spessori.

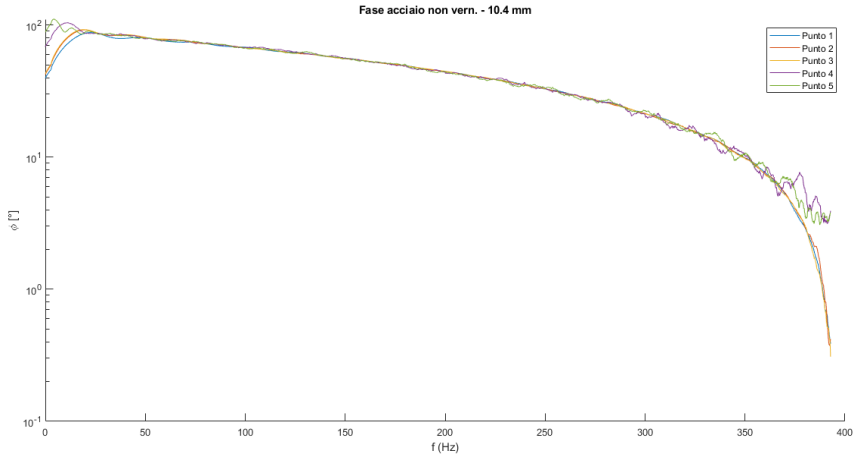


Figura 38: andamento della fase per i cinque punti del provino in acciaio non verniciato (10,4 mm).

Questi dati, estratti dai test, hanno poi generato andamenti del SNR "traslati verso l'alto", probabilmente a causa del fatto che la deviazione standard (denominatore nel calcolo del SNR) diminuisce poiché si ha molta meno dispersione dei valori di fase nei cinque punti, e di conseguenza aumenta il valore di SNR.

Si riporta il confronto tra le due curve di acciaio non verniciato (spessori diversi) per evidenziarne la differenza (figura 39).

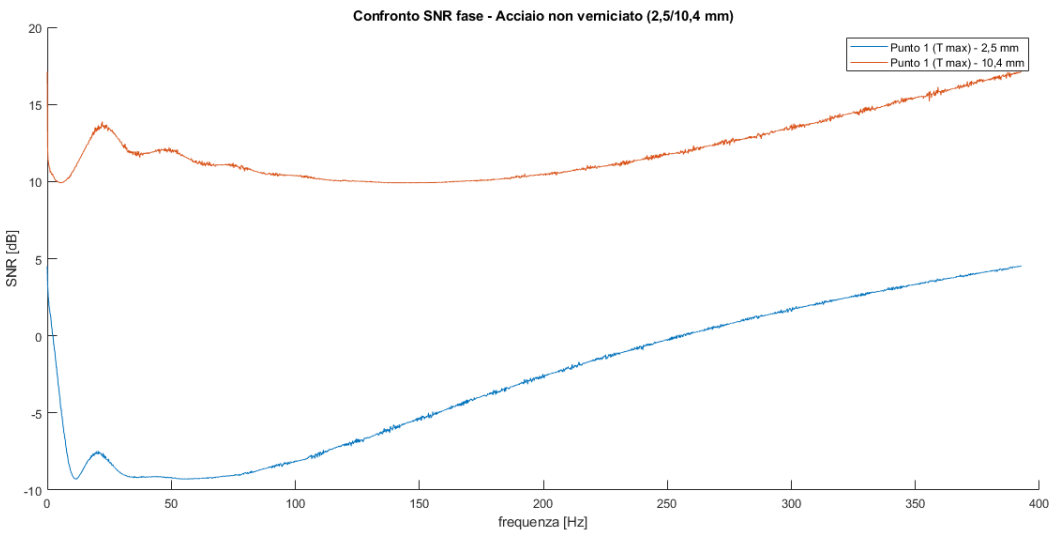


Figura 39: confronto tra provini in acciaio non verniciato con due diversi spessori.

Alluminio non verniciato

Nel caso dell'alluminio non verniciato (entrambi gli spessori), durante la prova non si sono raggiunti picchi di temperatura tali da ottenere dei transitori termici che permettessero di indagare adeguatamente il comportamento del materiale. Questo comportamento può essere causato dal fatto che, nonostante gli stessi parametri di prova dell'acciaio non verniciato, l'alluminio, in virtù della maggiore conducibilità termica, dissipi tutto il calore accumulato in modo quasi istantaneo, tale da non permettere una chiara analisi dei risultati.

Nella tabella a seguire sono indicati i picchi di temperatura raggiunti nei vari punti e, a lato, quella ambiente al momento della prova.

Picchi di temperatura alluminio non verniciato (2,5 mm) [°C]					
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	T_{amb}
25,7	22,6	22,6	22,4	22,5	22,5

Nel caso dello spessore inferiore (2,5 mm), solo il punto 1 ha raggiunto una temperatura tale da fornire un grafico di SNR "leggibile" (figura 40), mentre gli altri quattro punti non hanno generato risultati interpretabili (analoghi ai punti di rumore delle altre prove, figura 41).

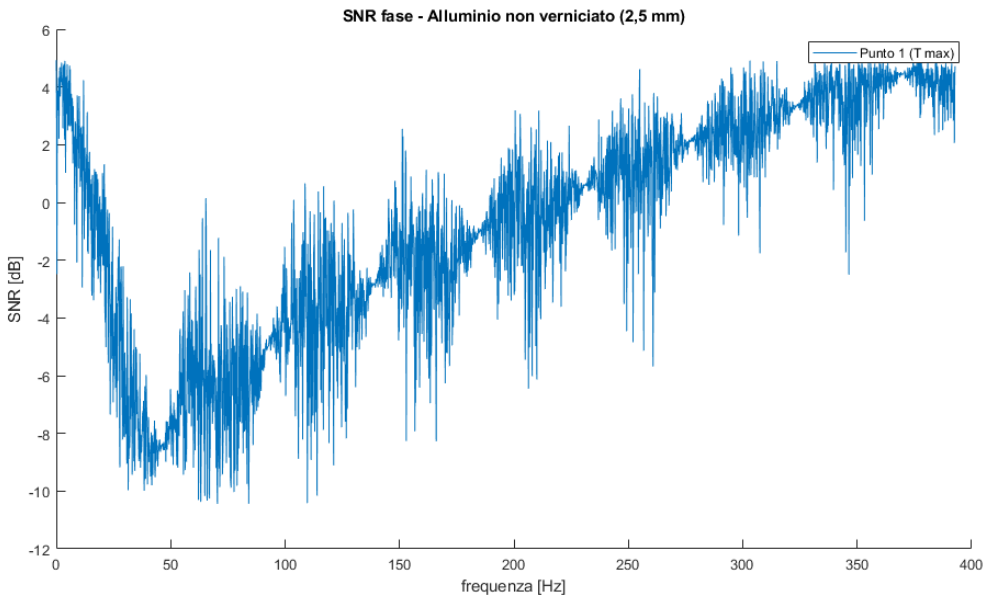


Figura 40: SNR della fase del punto 1 dell'alluminio non verniciato (2,5 mm).

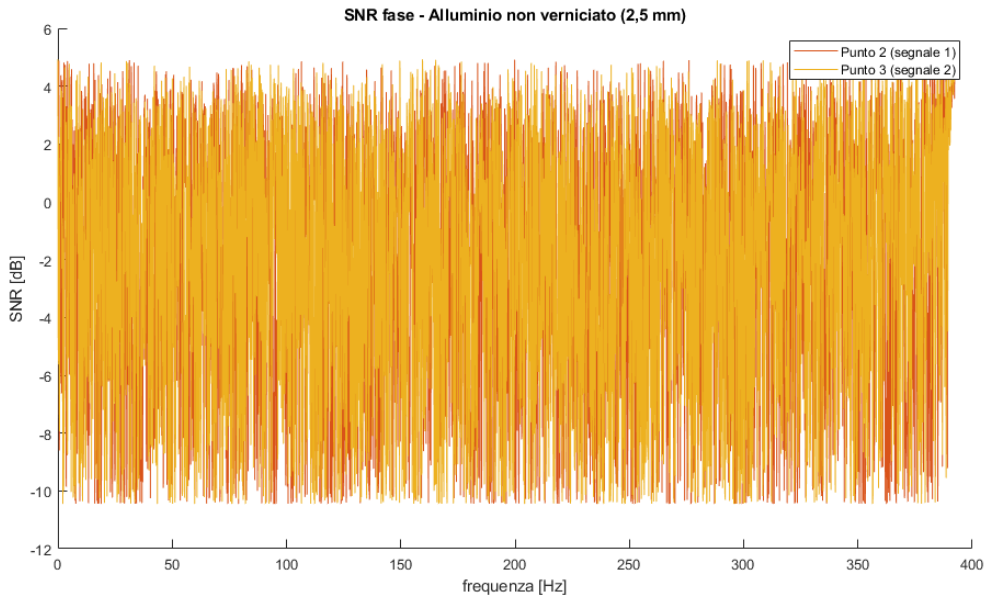


Figura 41: SNR della fase dei punti 2 e 3 dell'alluminio non verniciato (2,5 mm).

Situazione analoga alla precedente per lo spessore di 10,4 mm. A causa della maggior quantità di materiale da scaldare, si raggiungono picchi ancora inferiori rispetto a quelli del caso precedente:

Picchi di temperatura alluminio non verniciato (10,4 mm) [°C]					
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	T_{amb}
22,9	22,3	22,4	22,2	22,3	22,7

Per questo motivo non risultano interpretabili neppure i risultati del punto di massima temperatura (figura 42).

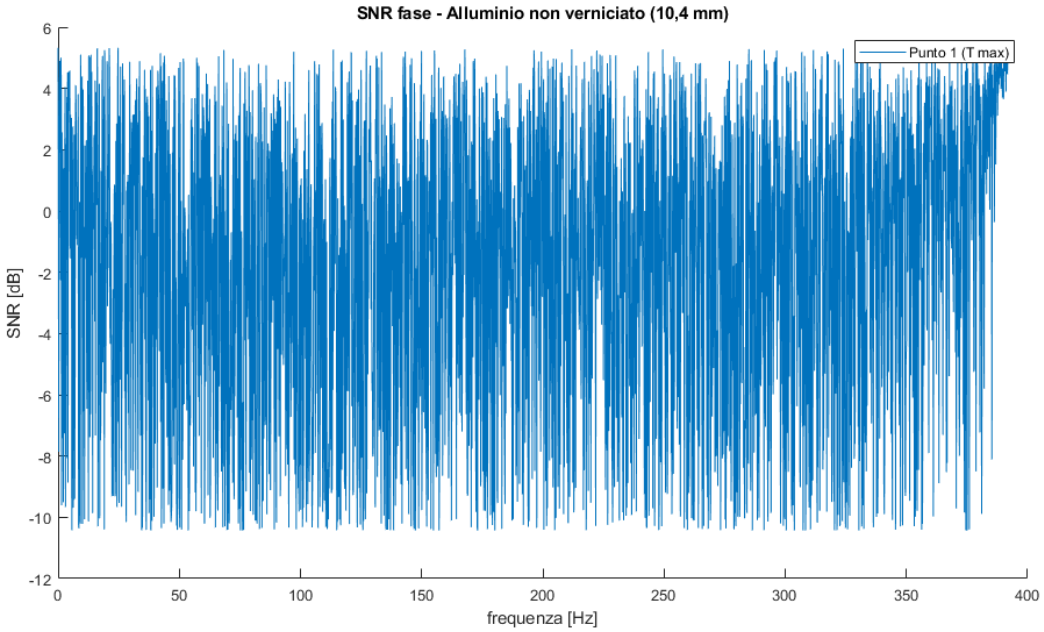


Figura 42: SNR della fase del punto 1 dell'alluminio non verniciato (10,4 mm).

Alluminio verniciato (spessore 2,5 mm)

In questa prova si è presentata una differenza di risultati (unico caso) tra il punto di massima temperatura (punto 1) e quelli di segnale (punti 2 e 3) come si evidenzia dalla figura 43.

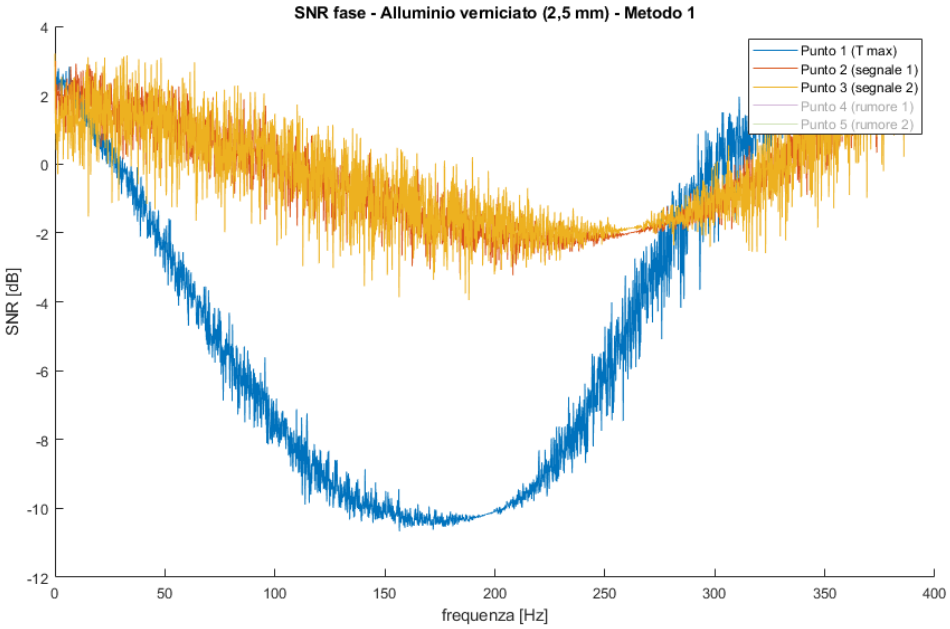


Figura 43: SNR della fase dei punti 1, 2 e 3 dell'alluminio verniciato (2,5 mm).

Questa differenza è dovuta a due diversi spettri della fase per questi tre punti (figura 44).

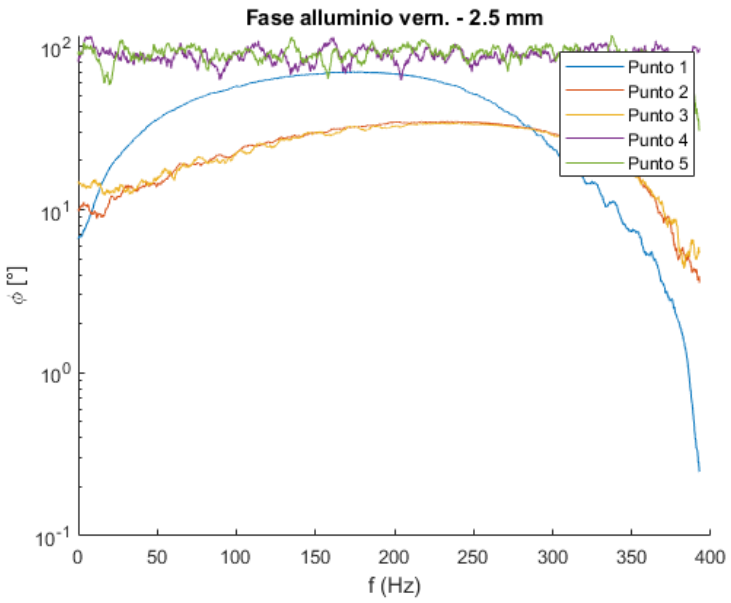


Figura 44: fase dei cinque punti della fase alluminio verniciato (2,5 mm).

Confronto e analisi

A seguire verranno analizzati singolarmente tutti i paragoni tra i vari grafici del rapporto segnale-rumore dei test analizzati ed elaborati.

Acciaio non verniciato (2,5/10,4 mm)

In questo confronto occorre sottolineare il fatto che, nonostante il grafico dello spessore maggiore risulti traslato per i motivi visti prima, l'andamento è molto simile nella zona 0-100 Hz, dove lo spessore 2,5 mm presenta un plateau, che risulta spostato nella fascia 150-200 Hz per lo spessore 10,4 mm.

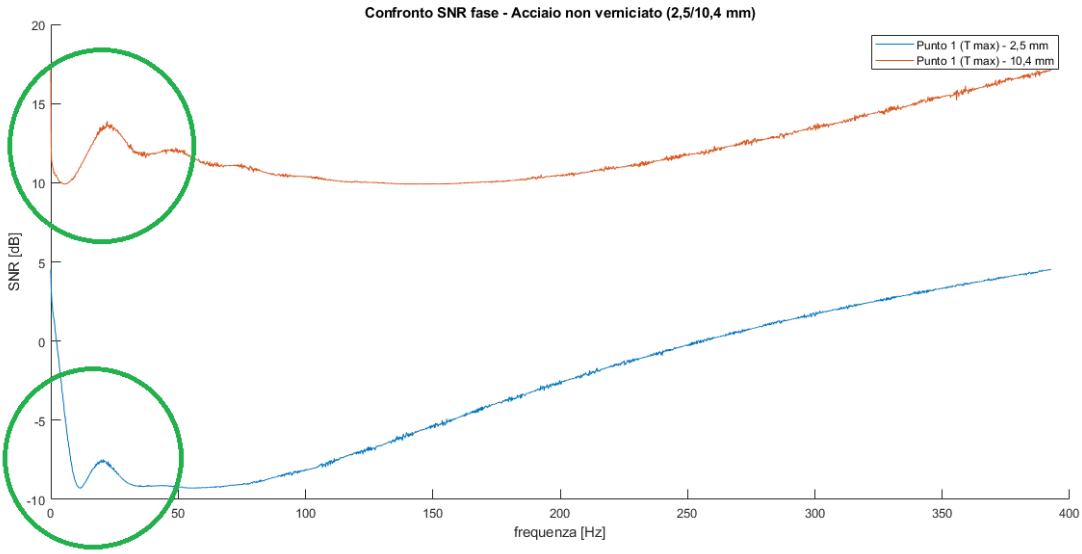


Figura 45: confronto tra provini in acciaio non verniciato con due diversi spessori.

Acciaio verniciato (2,5/10,4 mm)

In questo caso gli andamenti risultano sovrapposti, con il picco presente a circa 200 Hz.

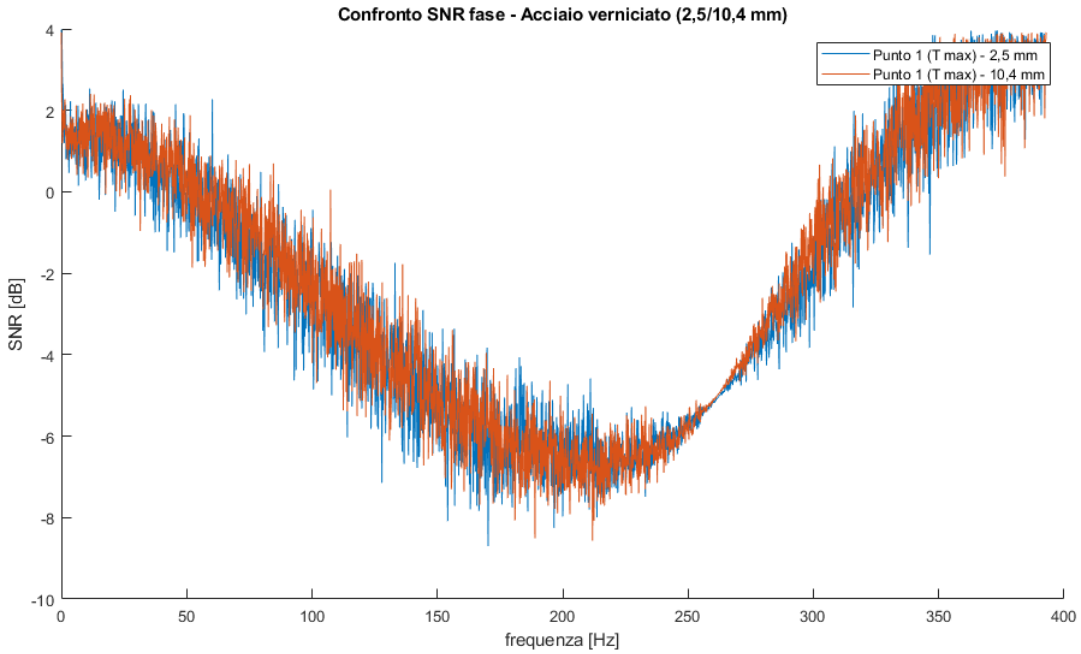


Figura 46: confronto tra provini in acciaio verniciato con due diversi spessori.

Acciaio verniciato/non verniciato (2,5 mm)

In questo primo confronto tra un provino verniciato e non verniciato si può evidenziare un notevole incremento di rumorosità (oscillazioni) del SNR per il provino verniciato. Inoltre, il picco si sposta dalla zona 0-100 Hz (provino non verniciato) a quella 150-250 Hz, con un leggero abbassamento per l'acciaio verniciato.

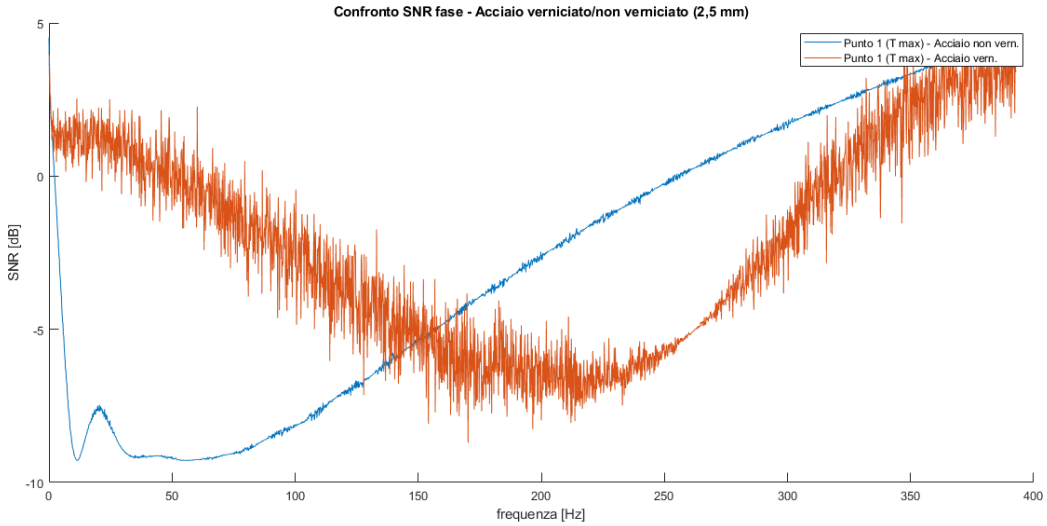


Figura 47: confronto tra provini in acciaio verniciato e non con spessore 2,5 mm.

Acciaio verniciato/non verniciato (10,4 mm)

Il comportamento è analogo allo spessore di 2,5 mm, infatti aumenta il rumore e si perdono i picchi dell'acciaio non verniciato presenti nella zona 0-100 Hz.

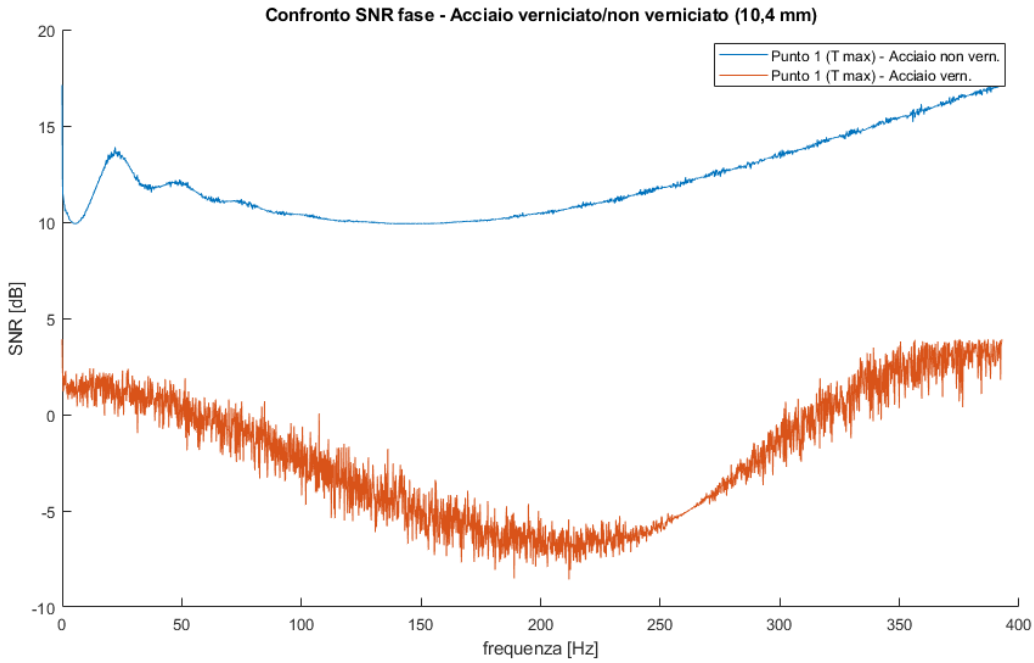


Figura 48: confronto tra provini in acciaio verniciato e non con spessore 10,4 mm.

Alluminio non verniciato (2,5/10,4 mm)

Come già sottolineato prima, non è possibile eseguire confronti perché i risultati non sono consistenti. Si riportano i due grafici del rapporto segnale-rumore per i punti di massima temperatura dei due spessori (figura 49).

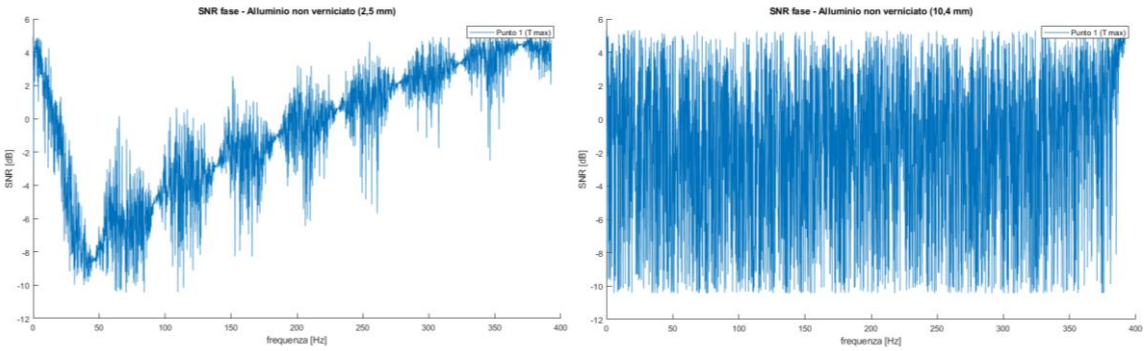


Figura 49: confronto tra provini in alluminio non verniciato con due diversi spessori.

Alluminio verniciato (2,5/10,4 mm)

In questo caso gli andamenti sono molto simili con un plateau leggermente più basso e spostato a destra (intorno a 230 Hz) per il provino con spessore maggiore.

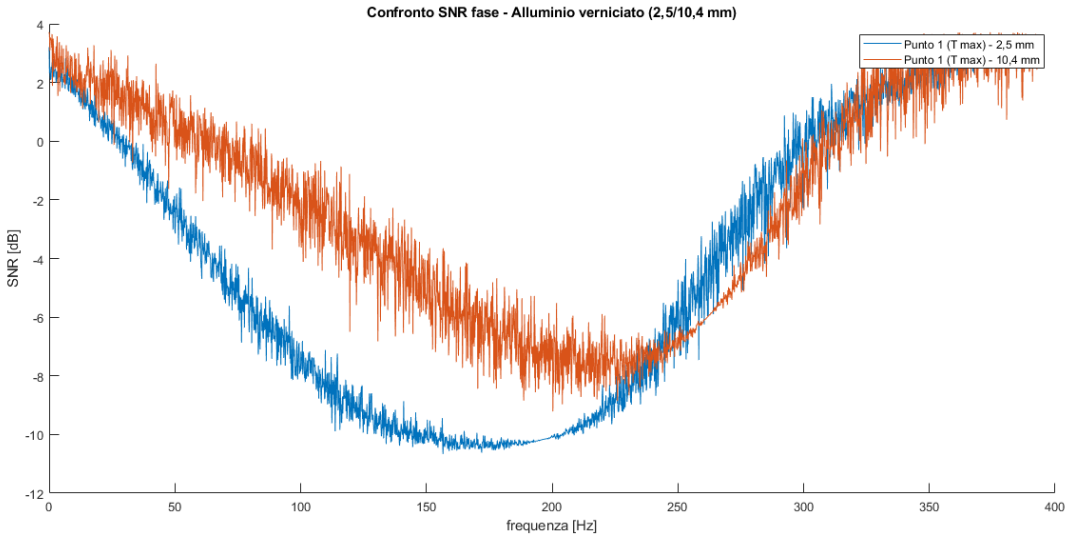


Figura 50: confronto tra provini in alluminio verniciato con due diversi spessori.

Alluminio verniciato/non verniciato (2,5 mm)

La differenza tra i due grafici del SNR è molto simile a quella tra acciaio verniciato e non (nonostante l'eccessiva rumorosità del provino non verniciato dovuta a una delle anomalie).

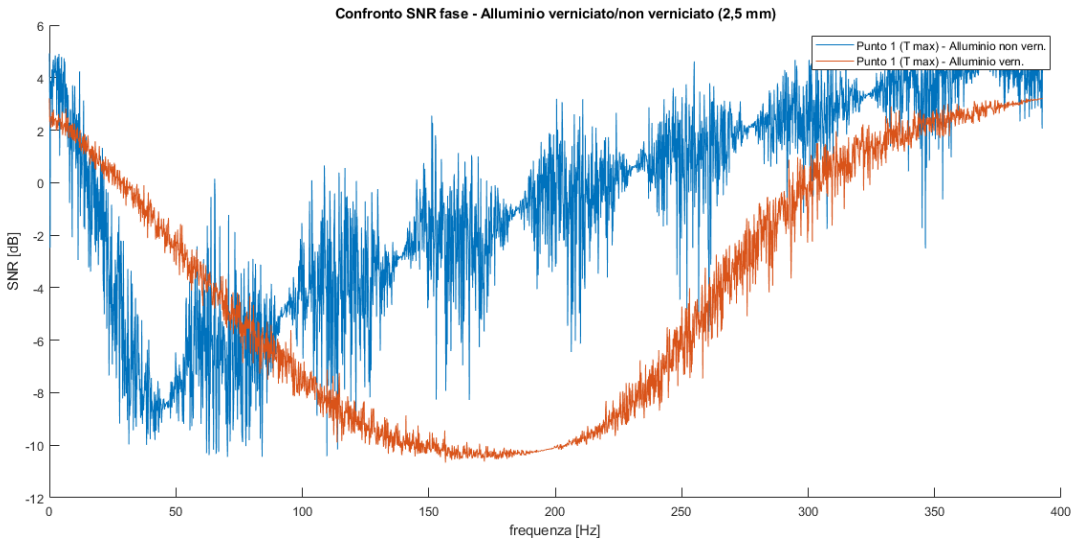


Figura 51: confronto tra provini in alluminio verniciato e non con spessore 2,5 mm.

Alluminio verniciato/non verniciato (10,4 mm)

Confronto non realizzabile per l'assenza di risultati per l'alluminio non verniciato.

Acciaio/alluminio non verniciati (2,5 mm)

Andamenti molto simili (nonostante la rumorosità dell'alluminio), con picchi caratteristici intorno ai 50 Hz.

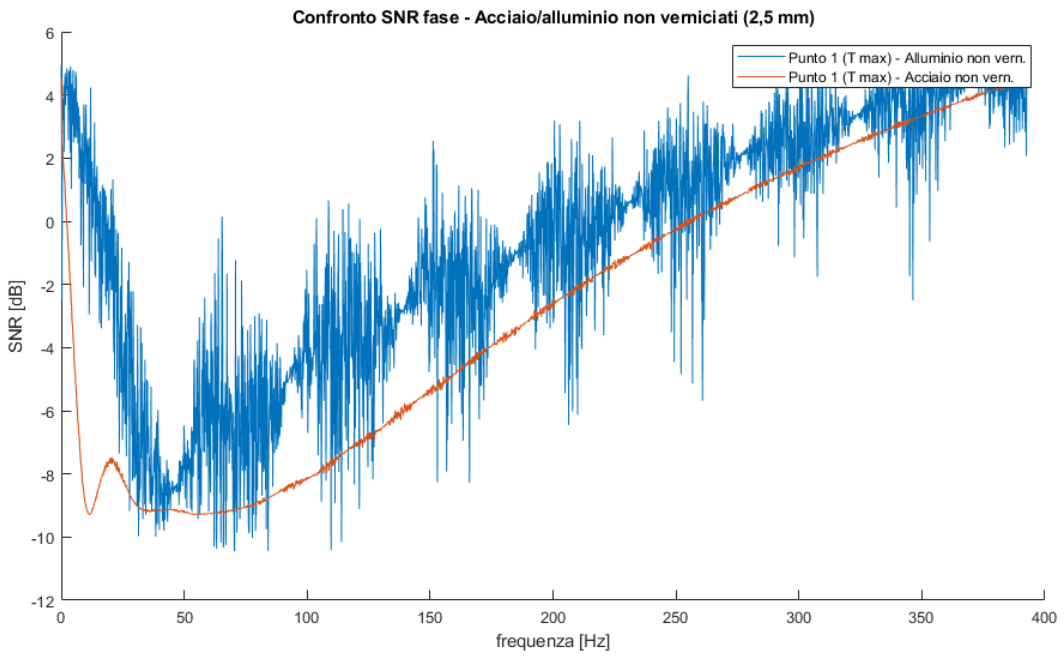


Figura 52: confronto tra provini in acciaio e alluminio non verniciati con spessore 2,5 mm.

Acciaio/alluminio non verniciati (10,4 mm)

Confronto non realizzabile per l'assenza di risultati per l'alluminio non verniciato.

Acciaio/alluminio verniciati (2,5 mm)

Anche in questo caso i due risultati sono molto simili, solo i plateau risultano leggermente spostati e con un valore inferiore nel caso dell'acciaio.

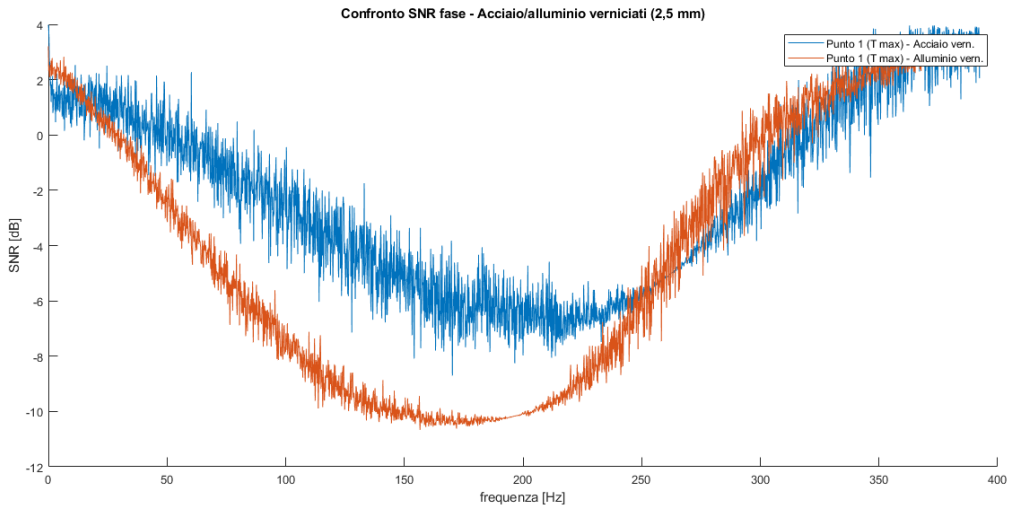


Figura 53: confronto tra provini in acciaio e alluminio verniciati con spessore 2,5 mm.

Acciaio/alluminio verniciati (10,4 mm)

In questo caso gli andamenti risultano praticamente sovrapponibili. Quindi, è chiaro come la verniciatura sortisca lo stesso effetto anche trattando due materiali differenti.

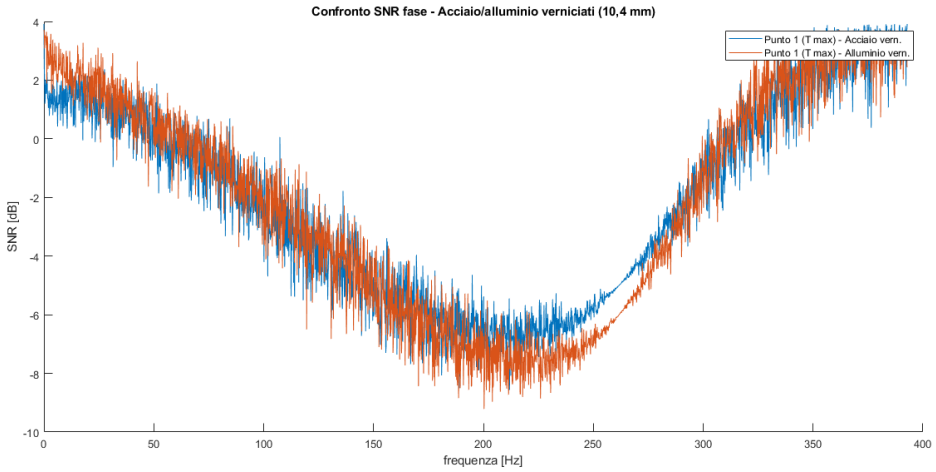


Figura 54: confronto tra provini in acciaio e alluminio non verniciati con spessore 10,4 mm.

Conclusioni

Il lavoro svolto durante questa tesi ha avuto l'obiettivo di utilizzare il SNR per provare a caratterizzare materiali diversi, in questo caso acciaio e una lega di alluminio. In letteratura non sono stati trovati metodi che permettano una simile applicazione, dal momento che tutti gli articoli analizzati utilizzano il rapporto segnale-rumore per ricercare difetti nell'ambito di termografia *pulsed* e *lock-in*, quindi, a questo fine, sono stati ideati due metodi di analisi per le immagini termografiche, comunque basati sulla letteratura riguardante i difetti, che hanno permesso di evidenziare differenze di comportamento tra i vari test.

In particolare, sono stati analizzati provini in diverso spessore, materiale e verniciatura, che sono stati eccitati con un singolo impulso laser. Dopo aver estratto le immagini termografiche di cinque pixel (uno nel quale è raggiunta la massima temperatura, due nel cono di riscaldamento del laser e due al di fuori), è stata applicata la trasformata di Fourier per ottenere i grafici delle fasi. Ottenuti questi ultimi, si è proceduto al calcolo del SNR tramite due metodi, basati sulla formula del rapporto segnale-rumore[7], dove però i diversi parametri (segnale, rumore e deviazione standard del rumore) sono stati valutati secondo diverse modalità. I due metodi hanno fornito risultati analoghi.

Purtroppo, alcune delle prove, forse a causa di disturbi ambientali, non hanno fornito risultati chiari. In particolare, l'alluminio risulta essere molto più rumoroso nei risultati rispetto all'acciaio, probabilmente a causa della sua maggiore conducibilità termica che porta ad avere transitori termici di raffreddamento molto più corti e che quindi forniscono risultati meno chiari.

Si è osservato chiaramente però che il fattore di maggiore influenza nel modificare i comportamenti dei materiali sia la verniciatura, che, nei grafici del SNR è evidenziata da un sensibile aumento della rumorosità (oscillazioni) e lo spostamento del picco di segnale dalla zona 0-100 Hz a quella 150-250 Hz. Anche all'aumentare dello spessore si è visto come il picco tenda a spostarsi verso frequenze maggiori. Risulta inoltre che la verniciatura tenda ad allargare la zona di picco rendendola un plateau.

Per riuscire a ben delineare il comportamento di materiali diverse in condizioni diverse, occorrerebbe eseguire un molto più elevato numero di prove, considerando molti più punti (se non l'intera superficie del campione).

Inoltre, per quel che riguarda la ricerca difetti, con qualche piccolo adattamento, si potrebbe provare a indagare le irregolarità presenti nel provino; anche qui sarebbero necessarie molte altre prove con dei campioni di cui si conoscano preventivamente i difetti.

Bibliografia

[1] *Ibarra-Castanedo, Clemente & Genest, Marc & Guibert, Stéphane & Piau, Jean-Marc & Maldague, Xavier & Bendada, Abdelhakim. (2007). Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 10.1117/12.720097.*

[2] *Chung, Yoonjae & Ranjit, Shrestha & Lee, Seungju & Kim, Wontae. (2020). Thermographic Inspection of Internal Defects in Steel Structures: Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography. Sensors (Switzerland). 20. 6015. 10.3390/s20216015.*

[3] *Salazar, Agustin. (2006). Energy propagation of thermal waves. EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS Eur. J. Phys. 27. 1349-1355. 10.1088/0143-0807/27/6/009.*

[4] *Tzou, D.Y.. (1992). Thermal Resonance Under Frequency Excitations. Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C); (United States). 114:2. 10.1115/1.2911277.*

[5] *López, Fernando & Ibarra-Castanedo, Clemente & Maldgue, X. & Nicolau, Vicente. (2013). Analysis of signal processing techniques in Pulsed Thermography. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 8705. 10.1117/12.2015949.*

[6] *Ranjit, Shrestha & Park, Jeonghak & Kim, Wontae. (2016). Application of thermal wave imaging and phase shifting method for defect detection in Stainless Steel. Infrared Physics & Technology. 76. 676-683. 10.1016/j.infrared.2016.04.033.*

[7] *Madruga, F.J. & Albendea, P. & Ibarra-Castanedo, Clemente & López-Higuera, J.M.. (2010). Signal to noise ratio (SNR) comparison for lock-in thermographic data processing methods in CFRP specimen. 10.21611/qirt.2010.079.*

[8] *Roy, Deboshree & Tuli, Suneet. (2016). Efficient SNR determination algorithm for lock-in thermography defect detection and quantification. 1-5. 10.1109/IICIP.2016.7975332.*

[9] *Ranjit, Shrestha & Kim, Wontae. (2018). Non-destructive testing and evaluation of materials using active thermography and enhancement of signal to noise ratio through data fusion. Infrared Physics & Technology. 94. 10.1016/j.infrared.2018.08.027.*

[10] *Corsaro, L. Caratterizzazione dei materiali mediante termografia attiva. (Politecnico di Torino, 2020).*