



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del Veicolo (LM-33)

Sviluppo di un metodo per la rilevazione di difetti sub-superficiali mediante termografia IR su componenti AM

Relatore: **Prof. Silvio Defanti**

Candidato: **Andrea Ore**

Matricola: **[174178]**

Anno Accademico: 2025/2026

Abstract:

La tesi tratta l'argomento della ricerca non distruttiva dei difetti all'interno di provini in materiale **Ti6Al4V** realizzati per costruzione additiva a fascio di elettroni (**EBM**). La ricerca non distruttiva è eseguita mediante la tecnica di **analisi termografica** dei provini eccitati per effetto **Joule** attraverso una **corrente continua** applicata tramite dei morsetti posti sul provino. Tale tecnica si pone come un'alternativa più **veloce** ed **economica** rispetto alla **tomografia computerizzata**.

Lo scopo dello studio risiede nella volontà di approfondire la conoscenza su vari temi della suddetta tecnica di ricerca non distruttiva dei difetti, così da contribuire allo sviluppo delle linee guida della rilevazione termografica per pezzi realizzati per manifattura additiva a fascio di elettroni.

Durante il lavoro è stato sviluppato un algoritmo Matlab capace di elaborare le matrici termografiche estratte dalle registrazioni termografiche. Tale algoritmo è stato affinato per condurre la maggior parte delle operazioni di calcolo in maniera totalmente automatizzata. L'algoritmo calcola l'**SNR** della firma termica del difetto e la sua dimensione lungo la direzione parallela ed ortogonale alla corrente.

In questa tesi è stato analizzato un set di **40 provini**, ognuno dei quali dotato di due difetti sub-superficiali di diversa **forma, dimensione, orientamento e profondità**.

Dalle analisi dei risultati ottenuti dall'algoritmo Matlab è emerso come la profondità del difetto sia il parametro più impattante sulla rilevabilità dei difetti, con una profondità massima rilevata certificata da tomografia pari a **2,3 mm**. Altri parametri capaci di influenzare la rilevabilità di un difetto sono: la **forma** del difetto, il suo **orientamento spaziale** e la sua **dimensione**. Difetti di forma cilindrica hanno mostrato, mediamente, una rilevabilità inferiore rispetto a difetti di forma prismatica a causa della presenza degli spigoli vivi in questi ultimi. I difetti orientati perpendicolari alla corrente (lungo **J**) si sono rivelati, a parità di condizioni, i più rilevabili rispetto ai difetti lungo le direzioni "**I**" e "**K**".

Fra i parametri dimensionali analizzati è emerso come il volume, la superficie ortogonale alla corrente e la superficie proiettata in termocamera del difetto aumentassero il contrasto del difetto, e quindi la sua rilevabilità, al loro aumento. Fra questi, l'area del difetto ortogonale alla corrente si è rivelato il parametro più importante, in quanto il più impattante sul fenomeno di deviazione e addensamento delle linee di corrente che è responsabile dell'insorgenza della firma termica del difetto.

INDICE

1.	<i>Introduzione</i>	pag. 4
2.	<i>Stato dell'arte</i>	pag. 6
2.1	<i>Termografia</i>	pag. 6
2.2	<i>Tecniche di eccitazione per termografie attive</i>	pag. 6
2.3	<i>Profondità del difetto</i>	pag. 7
2.4	<i>Rilevabilità</i>	pag. 8
2.4.1	<i>SNR</i>	pag. 10
3.	<i>Materiali e metodi</i>	pag. 13
3.1	<i>Strategia di lavoro e obiettivi prefissati</i>	pag. 13
3.2	<i>Design e parametri di realizzazione del provino</i>	pag. 14
3.2.1	<i>Progettazione del provino</i>	pag. 14
3.2.2	<i>Manifattura del provino</i>	pag. 22
3.3	<i>Set-up e prove termografiche</i>	pag. 23
3.3.1	<i>Strumentazione</i>	pag. 23
3.3.2	<i>Set-up e conduzione delle termografie</i>	pag. 25
3.4	<i>Organizzazione acquisizione dati</i>	pag. 28
3.4.1	<i>Descrizione della nomenclatura degli ID dei provini</i>	pag. 28
3.4.2	<i>Individuazione dei frame più significativi</i>	pag. 29
3.4.3	<i>Organizzazione dei dati raccolti</i>	pag. 31
3.5	<i>Sviluppo dell'algoritmo di analisi dei dati</i>	pag. 34
3.5.1	<i>L'algoritmo di partenza, SNR</i>	pag. 34
3.5.2	<i>L'algoritmo di partenza, stima dimensione del difetto</i>	pag. 41
3.5.3	<i>Strategia di ottenimento dell'algoritmo definitivo</i>	pag. 44
3.5.4	<i>Dettagli dell'algoritmo definitivo</i>	pag. 46
3.6	<i>Processamento dei dati IRT</i>	pag. 60
4.	<i>Risultati e discussione</i>	pag. 64
4.1	<i>SNR</i>	pag. 64
4.1.1	<i>Coefficiente di variazione (CV) dell'SNR</i>	pag. 64
4.1.2	<i>Fattori di influenza di SNR</i>	pag. 65
4.2	<i>Risultati delle misure di lunghezza lungo la direzione X e Y</i>	pag. 70
4.2.1	<i>Confronto fra le misure della dimensione del difetto lungo X e Y</i>	pag. 70

4.2.2	<i>Criterio di selezione per le sessioni di prova multiple.....</i>	pag. 74
4.3	<i>Altre evidenze sperimentali.....</i>	pag. 76
4.3.1	<i>Profondità del difetto.....</i>	pag. 76
4.3.2	<i>Effetto della verniciatura non ottimale.....</i>	pag. 77
4.3.3	<i>Effetto della frequenza di acquisizione della termocamera.....</i>	pag. 78
4.3.4	<i>Massima profondità rilevata.....</i>	pag. 80
4.4	<i>Conclusioni e sviluppi futuri.....</i>	pag. 81
4.4.1	<i>Sintesi obiettivi e lavoro svolto.....</i>	pag. 81
4.4.2	<i>Risultati significativi ottenuti.....</i>	pag. 81
4.4.3	<i>Limiti della ricerca.....</i>	pag. 82
4.4.4	<i>Possibili sviluppi futuri.....</i>	pag. 83
5.	<i>Bibliografia.....</i>	pag. 84

1. INTRODUZIONE

Argomento tesi:

La tesi tratta l'argomento della ricerca non distruttiva dei difetti all'interno di provini in materiale **Ti6Al4V** realizzati per costruzione additiva a fascio di elettroni (**EBM**). La ricerca non distruttiva è eseguita mediante la tecnica di analisi termografica dei provini eccitati per effetto **Joule** attraverso una **corrente continua** applicata tramite dei morsetti posti sul provino. L'utilizzo di tale tecnica di ricerca non distruttiva su tale materiale e su dei provini con **rugosità** tipica della costruzione additiva a fascio di elettroni risulta essere un ambito ancora poco esplorato nella letteratura scientifica.

Scopo del lavoro di tesi:

Lo scopo dello studio risiede nella volontà di approfondire la conoscenza su vari temi della suddetta tecnica di ricerca non distruttiva dei difetti. La ricerca condotta in questa tesi si basa su un lavoro condotto precedentemente dal dipartimento [1] costituendone, di fatto, un'evoluzione ed un approfondimento. I temi che si sono voluti approfondire sono: il perfezionamento delle linee guida della metodologia di rilevazione e di calcolo dei difetti mediante termografia, che verrà discussa nella sezione denominata "materiali e metodi", i limiti di rilevabilità dei difetti mediante la termografia ed i fattori di influenza della rilevazione come **dimensione**, **profondità**, **orientamento** e **forma** del difetto. Si precisa che con "**rilevabilità del difetto**" si intende non solo la capacità di constatare la presenza di un difetto grazie alle anomalie termiche che esso produce a seguito del passaggio della corrente, ma anche la capacità di associare una quantificazione della dimensione al difetto stesso. Per approfondire queste conoscenze sulla ricerca non distruttiva di difetti in componenti realizzati per costruzione additiva a fascio di elettroni, sono stati realizzati e analizzati **40 provini**. Su ognuno dei 40 provini erano presenti **2 difetti chiusi** da riprendere sia in **vista frontale** che in **vista posteriore**. I provini disponevano di un ampio range di dimensioni e profondità, così da poter analizzare nel dettaglio i limiti di rilevabilità del difetto, approfondendo, di fatto, tale tematica rispetto alla ricerca precedentemente condotta dal dipartimento. Inoltre questi provini disponevano di difetti chiusi che introducevano altre variabili rispetto allo studio precedente, come un diverso orientamento spaziale del difetto rispetto alla corrente, una diversa area ortogonale al flusso di corrente ed una diversa forma, la quale poteva essere prismatica o cilindrica. Con "perfezionamento delle linee guida della metodologia di rilevazione e di calcolo dei difetti mediante termografia" si intende: miglioramento dell'algoritmo e della metodologia di raccolta dati e conduzione riprese.

Motivazioni dello studio:

Le motivazioni che hanno portato a questo studio sono la volontà di approfondire i limiti di utilizzo delle termografie come strumento di quantificazione della dimensione dei difetti per componenti realizzati in **EBM**. La rilevazione non distruttiva mediante termografie è studiata nell'ottica di trovare una tecnica che si contrapponga alla ricerca dei difetti mediante **tomografia computerizzata** puntando su minori tempi di ricerca e minori costi.

2. STATO DELL' ARTE

2.1 Termografia

Le termografie sono dei potenti e versatili **strumenti di analisi e diagnosi non invasiva** utilizzati in numerosi ambiti professionali. Le termografie consistono nell'attuazione di riprese mediante strumenti chiamati **termocamere**. Le **termocamere** sono capaci di rilevare le radiazioni sulla lunghezza d'onda dell'infrarosso che il pezzo in esame emette. Ogni oggetto, infatti, a causa della sua temperatura, emette calore radiante sotto forma di **radiazione elettromagnetica** [2, 3]. Le termografie si dividono in **attive** e **passive**. La termografia passiva consiste nella ripresa mediante termocamera di componenti e strutture **durante il loro esercizio** ed è ampiamente usata in settori quali edilizia, elettronica e controlli industriali. In tempi recenti i ricercatori hanno implementato la **termografia passiva** per analisi **IN-SITU** nel mondo della costruzione additiva **L-PBF** [4, 5] riuscendo così a monitorare il corretto svolgimento del processo di costruzione additiva del pezzo. Sempre recentemente è nato l'interesse verso una possibile nuova applicazione delle termografie. È stato riscontrato, infatti, un **forte interesse per l'applicazione delle termografie attive nell'identificazione e quantificazione di difetti superficiali e sub-superficiali**. La **termografia attiva** è una tecnica di analisi non distruttiva che usa una **sorgente esterna di stimolazione** del componente ispezionato e che **si basa sulla teoria della propagazione dell'onda termica** [6, 7].

La ricerca non distruttiva di difetti sulla superficie e sotto la superficie è spesso effettuata con tecniche **lente e costose**, come la **microscopia confocale** per ispezionare le superfici e la **tomografia computerizzata (CT)** per avere una ricostruzione 3D completa dell'interno del componente. La termografia attiva (**IRT**) ha fornito risultati incoraggianti nel suo impiego per il rilevamento **EX-SITU** di difetti superficiali e sub-superficiali, dimostrandosi una **valida alternativa, più veloce ed economica, per la ricerca di difetti sulla superficie e di difetti posti a piccole profondità sotto la superficie del pezzo** [1, 7, 8, 9, 4]. Infatti, ad esempio, mentre nella **CT** più è alto il grado di precisione e di dettaglio richiesto e più i tempi ed i costi crescono [10], nella **IRT** l'incremento di questi fattori non altera i tempi e varia di poco i costi di esercizio.

2.2 Tecniche di eccitazione per termografie attive

Vi sono numerose tecniche con cui eseguire l'eccitazione attiva del pezzo; ad esempio [7] tratta la termografia pulsata (**PT**) e la vibro-termografia (**VT**). Nella **PT** si ha un'**eccitazione esterna** del componente tramite delle lampade capaci di generare dei flash impulsivi che riscaldano la superficie

del pezzo. Nella **VT**, invece, si sfrutta un'**eccitazione interna** attraverso la propagazione nel materiale di un'onda ultrasonica generata dalla vibrazione indotta nel pezzo tramite due morsetti collegati all'estremità del provino. In [11] si analizzano varie tecniche di stimolazione, fra cui si evidenziano la termografia **lock-in**, la termografia **per effetto joule tramite correnti parassite indotte**, la termografia a **microonde (MT)** e l'uso di sorgenti di eccitazione a **laser**. In [12] si studia l'uso, come sorgente di eccitazione, di una coppia di laser ad alta potenza con tecnologia di proiezione **DLP**. Infine, in [1], così come in questa tesi, viene usata la **corrente continua** come fonte di eccitazione per la termografia attiva. Tutte queste tecniche precedentemente elencate, ed usate per la rilevazione di difetti sub-superficiali, si basano su una logica comune che possiamo così riassumere: **la presenza di un difetto sotto la superficie si comporta come un ostacolo**. Il difetto altera la normale propagazione che l'agente eccitante avrebbe nel materiale sano, creando dissipazioni che sviluppino calore nell'intorno del difetto (oppure dei veri e propri accumuli di calore qualora l'agente eccitante derivi proprio da un riscaldamento del pezzo come nella PT). **Questo fa sì che il difetto appaia più caldo rispetto al materiale sano circostante rendendolo, pertanto, rilevabile dalla termocamera**. Nel nostro caso la corrente dovrà aggirare il difetto, accumulandosi attorno ad esso e dissipando una maggior quantità di energia sotto forma di calore per effetto joule. Un punto su cui molte ricerche convergono (come [1, 7, 13, 14, 15]) è che **la rilevabilità di un difetto sub-superficiale cresce con l'aumentare della sua dimensione e la diminuzione della sua profondità**. Per questo motivo l'uso di termografie attive in pezzi prodotti in costruzione additiva (**AM**) risulta essere notevolmente sfidante per tale tecnologia. Infatti le dimensioni ridotte dei difetti nei pezzi metallici **AM**, derivanti ad esempio da fusioni incomplete (**LACK OF FUSION**) [16], unite al fatto che i difetti possono trovarsi anche in profondità nel pezzo, sono dei fattori critici per la rilevabilità del difetto tramite termografia.

2.3 *Profondità del difetto*

È importante sottolineare come, fra **profondità** e **dimensione**, la **profondità** del difetto sia il fattore più limitante per la rilevabilità termografica. Infatti un difetto sufficientemente profondo risulta essere irrilevabile anche se di grandi dimensioni [15]. Da quanto appena detto si può concludere che, qualora sia **indispensabile** verificare anche la presenza dei difetti più in profondità nel pezzo, la **tomografia computerizzata** sia uno strumento imprescindibile.

In letteratura il rapporto **size to depth (S/D)** viene usato come fattore capace di fornire indicazioni sulla possibilità o meno di rilevazione di un difetto tramite **IRT**. Esso è il rapporto fra la dimensione del difetto e la sua profondità sotto la superficie. In [1] viene riportato come le guide empiriche suggeriscano che $S/D \geq 2$ fornisca generalmente una buona lettura del difetto. Sempre in [1] viene riportato come, alcuni studi più recenti, abbiano stimato dei valori limite di S/D compresi fra 1 e 0,5. In questo lavoro di tesi si studierà un altro fattore oltre al S/D : **l'area del difetto ortogonale alla corrente**. E' bene sottolineare come l'area ortogonale all'agente eccitante della termografia attiva sia rilevante per agenti eccitanti interni al pezzo. Infine in [1] è stato riscontrato un limite di rilevabilità del difetto che si attesta intorno ad una profondità compresa fra **1,5 e 2 mm** per analisi termografica ad effetto joule con corrente continua in provini di **Ti6Al4V**.

2.4 Rilevabilità

Affinché un difetto sia rilevabile dalla termocamera la traccia termica del difetto dovrà distinguersi dal rumore di fondo del materiale [15 e 18]. Per poter distinguere la **traccia termica** del difetto servirà, innanzitutto, disporre di una termocamera con una **sensibilità termica** elevata (**NETD**) [15]. La sensibilità termica è la minor differenza di temperatura riscontrabile dalla termocamera. Le termocamere più avanzate dispongono di **NETD** pari o inferiori ai 30 mK [2 , 3], come la FLIR A6751 MWIR con un NETD di 20 mK ottimizzata per l'ispezione di celle solari e componenti elettronici. In [17 , 15] si sottolinea come sia importante disporre di una termocamera con elevati **fps** così da essere sicuri di poter estrarre i frame migliori per la misurazione del difetto.

Un'ulteriore parametro hardware importante della termocamera per la rilevazione dei difetti tramite termografia IR è la frequenza di acquisizione dei fotogrammi (**fps**). In [1] è stato riportato che l'uso di una termocamera a 30 fps ha limitato la scelta dei frame utili alla misura a soli 2-3 frame, portando i ricercatori a concludere che una termocamera con fps più alti avrebbe consentito l'estrazione di frame con difetti maggiormente contrastati e visibili. La necessità di elevati fps è una conseguenza diretta dell'estrema velocità di propagazione dell'onda termica nei materiali metallici. L'importanza degli fps, che i ricercatori hanno esposto in [17 e 15], è stata riscontrata anche in questo lavoro di tesi e verrà discussa nei capitoli successivi.

Per quanto riguarda il **rumore**, in [15 e 18] si distinguono due tipologie: **rumore additivo** e **rumore moltiplicativo**. Il **rumore additivo** è un fattore **casuale** dipendente da **riflessioni** dell'ambiente

circostante e dal sensore stesso della termocamera IR. Superfici riflettenti possono essere percepite dalla termocamera come uno specchio, mostrando l'immagine termica di elementi circostanti dell'ambiente [2 e 3]. Per mitigare tale effetto in [1, 13] è stata usata l'applicazione di **verniciature alto emissive** sul componente. In particolare, l'emissività dei provini verniciati dell'articolo [1] valeva **0,94**, che è lo stesso valore dei provini verniciati usati per la fase sperimentale di questa tesi. I ricercatori hanno evidenziato varie problematiche relative al processo di verniciatura legate principalmente alla difficoltà dell'adozione di verniciature uniformi in pezzi complessi (tipici della costruzione additiva), oltre a dei maggiori costi di esercizio. Una ulteriore accortezza è stata adottata per ridurre il rumore ambientale in [1], grazie all'utilizzo di una struttura di copertura per schermare termocamera e provino dall'ambiente del laboratorio. E' importante sottolineare che il picco di emissività si raggiunge quando la termocamera è posta ortogonalmente all'oggetto da ispezionare [2, 3, 15, 1]. Il **rumore moltiplicativo**, invece, è legato al pezzo [15] ed è causato da disuniformità naturali del materiale come **rugosità** (non sempre costante lungo il materiale) e **eterogeneità strutturali interne del pezzo**. Per quanto riguarda l'influenza della **rugosità** sulle **IRT** vi sono ancora pochi studi in letteratura; nella fattispecie, in [1] viene trattata esplicitamente l'influenza della **rugosità** tipica di componenti realizzati per costruzione additiva in letto di polvere a fascio di elettroni (**PBF-EB**).

La **PBF-EB** ha la peculiarità di produrre pezzi con **rugosità** elevate, soprattutto se paragonate ai pezzi prodotti in **L-PBF**, a causa della dimensione della granulometria della polvere e dello spessore degli strati di polvere vergine depositati in fase di costruzione. In [1] la ricerca è stata condotta analizzando superfici target corrispondenti a diverse orientazioni di costruzione sulla piattaforma. Le superfici analizzate sono 4: superfici laterali, superfici superiori, superfici inferiori e superfici inferiori a contatto con la piattaforma. Le superfici laterali vengono realizzate in maniera progressiva strato dopo strato e sono risultate, tramite **microscopia ottica**, **le superfici più rugose fra le 4**. Dopo aver eseguito i calcoli della dimensione dei difetti tramite **IRT** ed averle confrontate con la **CT**, **è emerso che la rugosità superficiale limita fortemente la rilevabilità del difetto, con le superfici laterali che si sono discostate maggiormente da quanto rilevato in CT** [1]. Altre conclusioni importanti di [1] sono le seguenti: 1) il comportamento della polvere intrappolata nei difetti è analogo a quello del vuoto, pertanto è stato ipotizzato come i difetti chiusi presentino la medesima traccia termica dei difetti aperti 2) l'assenza di correlazione fra aumento del valore di corrente continua con l'aumento di rilevabilità del difetto. Per questo motivo il team di ricerca di [1] ha usato una corrente continua di 200 A, **confermando l'economicità dei costi di esercizio di questa tecnica IRT**.

Durante la ricerca bibliografica delle pubblicazioni scientifiche per questo stato dell'arte si è riscontrato una prevalenza di ricerche sul tema delle **IRT** in ambito **AM** sulla tecnologia **L-PBF**, mentre l'ambito delle **IRT** per la tecnologia **PBF-EB** risulta ancora poco esplorato. La motivazione è probabilmente legata al fatto che la tecnologia **L-PBF** sia più diffusa a livello industriale, mentre la tecnologia **PBF-EB** sia principalmente confinata ad ambienti di ricerca scientifica.

2.4.1 SNR

Un parametro chiave di prestazione per le **IRT** è il signal to noise ratio (**SNR**). L'SNR quantifica quanto la traccia termica del difetto si discosti dal rumore di fondo. È considerato un parametro chiave di prestazione poiché maggiore è il valore di **SNR** del difetto e maggiore è la sua rilevabilità termografica [1, 18].

Non esiste ancora una definizione unica che sia universalmente accettata per l'**SNR**: infatti in [18] vengono riportate e studiate ben 7 formule per il calcolo di **SNR**. Un ulteriore problema risiede nel fatto che, anche se si usasse la stessa formula di calcolo di **SNR**, la scelta di diverse regioni di interesse (ROI) del difetto (il segnale) (ROI_d) e dello sfondo del provino (ROI_p) (il rumore) portano a risultati molto diversi fra loro [1, 18]. Questa notevole influenza della scelta delle **ROI** è stata riscontrata anche durante il lavoro di ricerca svolto in questa tesi. Pertanto, una delle sfide principali del calcolo dell'SNR è quella di trovare una metodologia di misura che sia ripetibile e standard senza fattori di influenza arbitrari legati all'essere umano. L'**SNR** viene influenzato anche da operazioni di elaborazione dei filmati come filtraggio e correzione gamma [18]. In [1], così come in questa tesi, si sono analizzate solo immagini prive di elaborazione alcuna (**RAW**) per il calcolo di **SNR**. Fra le varie definizioni di **SNR** analizzate in [18] è stato riscontrato che **SNR₂** ha una buona efficacia e robustezza nella quantificazione dei difetti. La formula di **SNR₂** è stata adottata sia in [1] che in questa tesi poiché ha una scala lineare e di immediata interpretazione.

$$SNR_2 = \frac{|\overline{T_d} - \overline{T_{nd}}|}{\sigma_{nd}}$$

Fra le varie tipologie di regioni d'interesse per il rumore trattate in [18], in [1], [18] e in [15], così come in questa tesi, è stato scelto l'uso di una **ROI_p** concentrica alla **ROI_d**, così da valutare il

contrasto del difetto rispetto al materiale del provino ad esso circostante. Questo approccio prende il nome in letteratura di “**self referencing**”. La scelta di mantenere tale schema delle **ROI** in questa tesi risiede nel fatto che esso permetta di **rilevare quanto la temperatura media sul difetto si discosti dalla temperatura media dell’area nel suo intorno e dalle oscillazioni di temperatura casuali del rumore moltiplicativo di tale area.**

In [18] vengono proposte due metodologie per il dimensionamento delle **ROI**. La **prima** metodologia consiste nello sfruttare **informazioni note a priori**. Sostanzialmente se si conosce il posizionamento del difetto e la sua dimensione possiamo applicare una “**maschera binaria**” sul difetto. Il paper suggerisce che, se le informazioni a priori derivano da un modello CAD, si potrebbe eseguire una calibrazione per ottenere corrispondenza fra le coordinate del CAD e quelle dei punti nelle immagini della termocamera. La **maschera binaria** funziona così: i pixel della termocamera sul difetto verranno associati al numero 1, gli altri pixel restanti al numero 0. Si possono ottenere, pertanto, anche geometrie irregolari del difetto. Si calcola l’area dei pixel con il numero 1 “**Ad**”.

Una volta nota **Ad** si calcola la “**regione transitoria**” che sarà una **regione circolare** centrata nel centro del difetto e di diametro pari alla radice quadrata di **Ad**. **La regione transitoria comprende sia il difetto che una zona di provino contaminata dalla diffusione dell’onda termica del difetto.**

Viene poi effettuata una seconda espansione, tracciando una circonferenza di diametro pari alla radice quadrata dell’area della circonferenza transitoria. La **regione di riferimento** è data dalla differenza delle seguenti due circonferenze concentriche: la circonferenza della seconda espansione alla quale si sottrae la circonferenza dell’area transitoria. La scelta dell’uso di aree circolari in [18] è stata fatta in virtù delle operazioni di espansione, così da espandere ugualmente in tutte le direzioni.

A detta dei ricercatori di [18] tale metodo risulta essere **automatico e privo di scelte arbitrarie** da parte dell’operatore, garantendo ripetibilità e confronto nelle misure di **SNR**.

Il secondo metodo proposto in [18] si applica quando **non vi sono conoscenze a priori sul difetto**; esso continua ad usare la logica delle aree **self referencing**. La peculiarità di tale metodo risiede nella ricerca della regione del difetto mediante un’operazione chiamata **segmentazione** che viene eseguita da un algoritmo. I ricercatori sottolineano però che il metodo non esclude l’intervento dell’operatore, in quanto l’operatore dovrà fornire un pixel rappresentativo del difetto da cui partirà tutta l’operazione di segmentazione. Inoltre [18] riporta come non esista un algoritmo ottimizzato per tutte le casistiche di difetti riscontrabili e conclude evidenziando che, **qualora vi siano difetti**

poco contrastati o di dimensioni troppo piccole, l'operazione di segmentazione fallisce. In questo lavoro di tesi verrà presentato un ulteriore metodo di calcolo di **SNR** mediante l'uso di tecnica **self reference** con conoscenze a priori. Le ragioni che stanno dietro questa scelta risiedono nella problematica di fitting delle **ROI** per il calcolo di **SNR**, allorquando i difetti risultano essere molto vicini ai bordi del provino. Infatti, quando il difetto era troppo vicino ai bordi del provino, la ROI usciva fuori dal perimetro del provino causando un errore. Per questa ragione è stato studiato un metodo che, pur garantendo poca arbitrarietà nella scelta delle **ROI**, avesse anche la flessibilità necessaria per calcolare l'SNR dei difetti più vicini ai bordi del provino. Si ritiene che questo aspetto consenta un passo in avanti verso l'analisi di pezzi reali. Nel fare ciò l'**SNR** è stato usato come un **filtro** per l'avvio della procedura di calcolo dimensionale, ponendo **SNR>1** come condizione di avvio della procedura [1, 15].

Si conclude il tema dell'**SNR** evidenziando altri due aspetti della ricerca [18] che sono stati riscontrati a loro volta in questo lavoro di tesi: 1) più un difetto risulta essere **profondo**, più il picco di SNR arriva ad un istante temporale avanzato nel tempo 2) a parità di SNR, un difetto di maggiori dimensioni risulta essere maggiormente individuabile.

3. MATERIALI E METODI

3.1 *Strategia di lavoro e obiettivi prefissati*

L'obiettivo principale di questo lavoro è stato l'analisi mediante **termografia attiva per effetto Joule in corrente continua** di un set di **40 provini**, ognuno dei quali contiene al suo interno due difetti chiusi sotto superficie intenzionalmente realizzati.

Gli obiettivi di questa campagna sperimentale sono stati: la comprensione dell'influenza di orientamento, della forma e delle dimensioni geometriche del difetto sulla sua rilevazione termografica, una comprensione più ampia dell'influenza della profondità sulla rilevazione termografica, l'ottimizzazione dell'algoritmo Matlab usato in [1] e l'ottimizzazione della strategia di lavoro per condurre ed analizzare le termografie.

Sostanzialmente gli obiettivi si possono riassumere come la volontà di ampliare la conoscenza sulla materia e di migliorare le procedure di raccolta ed elaborazione dati.

Il lavoro è stato così pianificato: dopo aver studiato l'articolo [1], l'algoritmo Matlab usato in [1], aver studiato la letteratura scientifica di riferimento, si è proceduto con la fase di formazione pratica sull'uso della strumentazione di ricerca dell'officina. Una volta raggiunta una sufficiente competenza tecnica ed autonomia nella gestione delle riprese e del **set-up** dell'esperimento le prove sono state interamente condotte in autonomia.

Per quanto riguarda la parte sperimentale si sono distinte **3 fasi**:

- la **fase di acquisizione delle sequenze termografiche**;
- la **fase di raccolta dati**;
- la **fase di elaborazione dei dati ottenuti**;

Prima di stabilire una procedura definitiva di ognuna di queste tre fasi vi è stato uno studio approfondito e critico che consentisse una fluida armonia di lavoro delle tre fasi, le quali sono state concepite come elementi di un unico flusso di lavoro.

Infatti, vista la notevole mole di dati che si è raccolto, la gestione del tempo e, soprattutto, della categorizzazione e nomenclatura dei file doveva essere quanto più lineare, rigorosa e coerente possibile per evitare errori nella fase di elaborazione dei dati.

Durante ognuna delle tre fasi sono stati scritti dei report periodici e sono state annotate tutte le particolarità riscontrate durante le prove, così da poter discutere con il relatore i dati ottenuti.

Dopo ogni confronto e discussione dei vari report col relatore si è acquisita una crescente padronanza della fase sperimentale.

Le tre fasi e le relative strategie saranno descritte in maniera dettagliata nei paragrafi successivi.

3.2 Design e parametri di realizzazione del provino

3.2.1 Progettazione del provino

Tutti i 40 provini hanno forma prismatica con **lunghezza** pari a 85,5 mm, **altezza** 20,5 mm e **spessore** 5 mm (6 mm se si considerano i pin identificativi su fronte e retro del provino) come mostrato in **fig.1**.

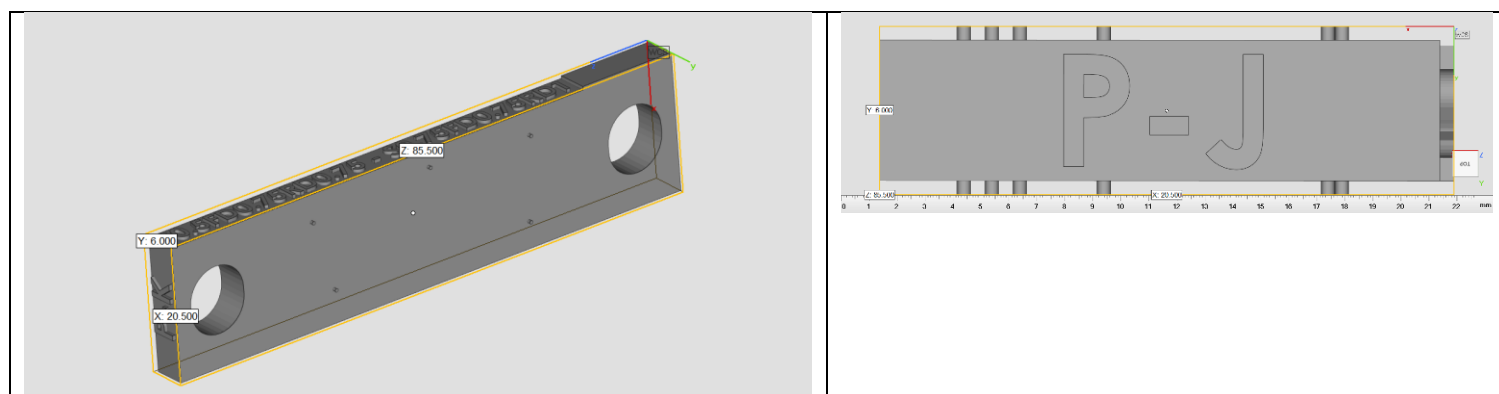


Figura 1 : modello CAD con misure

Come si può notare dalla **fig.1** il provino presenta due fori circolari alle sue estremità per consentire l'accoppiamento del provino ai **morsetti** mediante serraggio con collegamento filettato.

Tutti i provini sono stati verniciati con una vernice nera opaca per limitare fenomeni di riflessione della radiazione ambientale. L'**emissività** della superficie è stata verificata sperimentalmente a **0,94** (**fig.3**).

Dalla **fig.2** si nota come il provino presenti dei **pin** sui lati delle **superfici target** (le superfici che saranno esposte a favore di termocamera). Questi pin sono caratteristici di ogni provino e sono identici per le due **superfici target**.

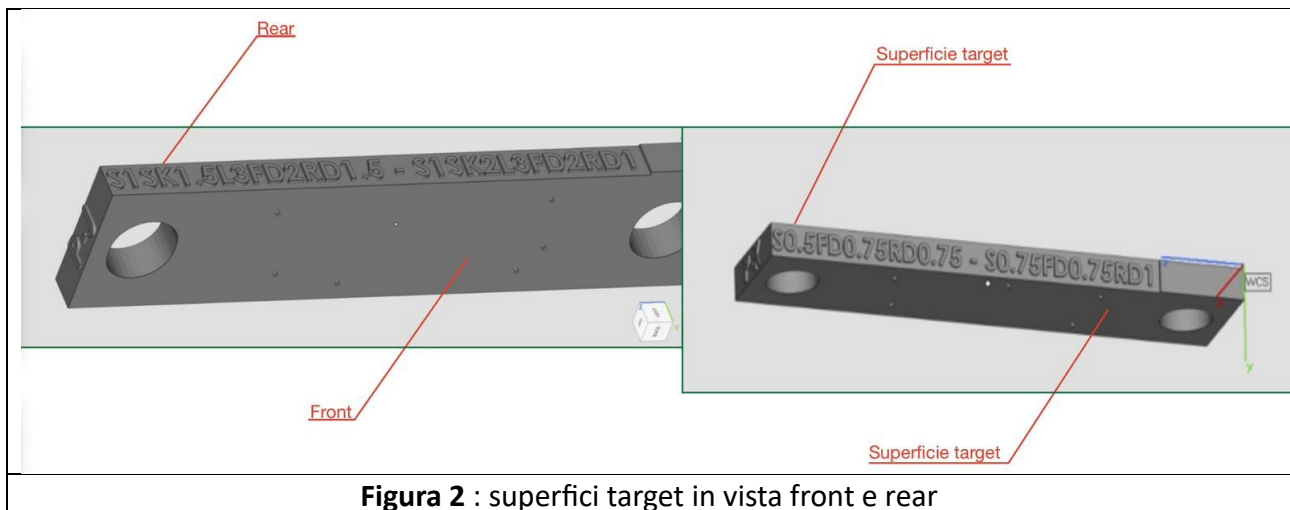


Figura 2 : superfici target in vista front e rear

I **pin** sono stati sfruttati come **supporto** per il corretto svolgimento delle riprese termografiche in quanto hanno consentito di posizionare correttamente il provino di fronte all'inquadratura della termocamera (come osservabile nell'immagine di destra della **fig.3**) e di eseguire una corretta messa a fuoco ogni volta che si accende la termocamera per la prima volta durante la sessione di riprese o quando si cambia il provino da esaminare (aspetto che sarà approfondito durante la descrizione della prova termografica nei paragrafi successivi).

Dato che i **pin** sono degli elementi di riferimento non sono stati verniciati così da poterli identificare con facilità dalla termocamera come osservabile nell'immagine di sinistra della **fig.3**.

I provini non hanno subito alcuna lavorazione successiva alla loro realizzazione, pertanto tutte le superfici sono classificabili come "as-built".

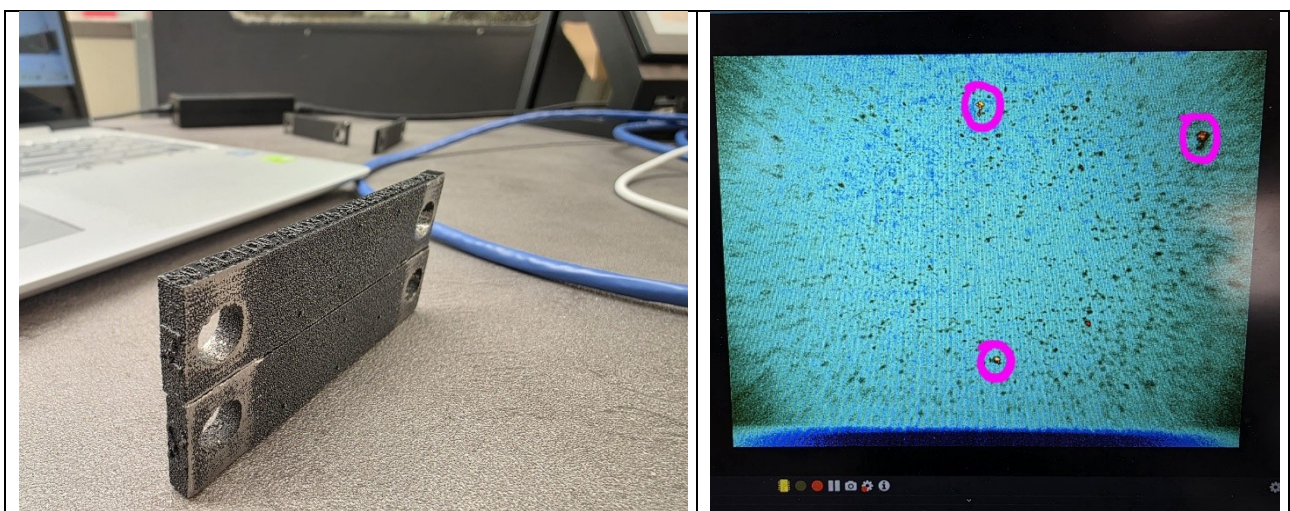


Figura 3 : pin di riferimento sui provini

Le **superfici target** sono due per ogni provino e si distinguono in **superficie frontale** e **superficie posteriore** (fig.2).

Entrambe sono due superfici di tipo “**side**” secondo la nomenclatura usata in [1], ovvero sono superfici parallele alla direzione “**Z**” di costruzione, pertanto sono posizionate sul piatto della macchina esattamente come visualizzabile in **fig.3**, dove il tavolo di lavoro grigio è da assimilare al piatto della macchina **EBM**.

Le superfici di tipo **side** sono superfici estremamente **rugose** come si può facilmente notare dalla fig.3.

Tutti i provini dispongono di **scritte identificative** in rilievo che consentono di identificare il numero del provino esaminato, la tipologia ed orientamento del difetto e come montare correttamente il provino sui morsetti.

Infatti la superficie frontale si distingue da quella posteriore proprio grazie alla scritta in rilievo posta sul lato lungo del provino.

Affinché una **superficie target** sia in **vista frontale** la scritta in rilievo sul lato lungo del provino deve trovarsi verso l’alto e deve essere leggibile esattamente come in fig.2.

Ognuno dei 40 provini della campagna sperimentale dispone di due difetti chiusi sub-superficiali appositamente realizzati che possono essere di forma **prismatica** o **cilindrica** ed avere tre orientazioni nello spazio.

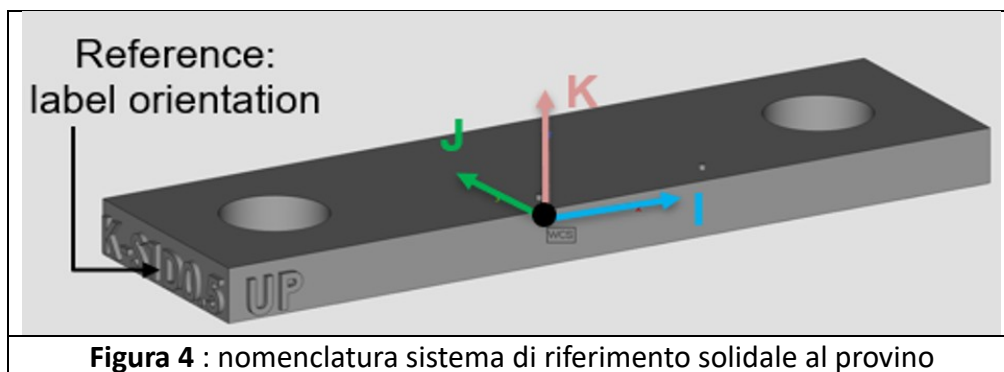
I dettagli di tutti i 40 provini della campagna sperimentale sono stati raggruppati nella **tabella 1** sottostante.

Questa campagna sperimentale ha prestato particolare attenzione a fattori dimensionali come il volume, l’area perpendicolare alla corrente e la superficie proiettata in termocamera del difetto, oltre all’influenza di forma e orientamento spaziale dei difetti.

I due difetti presenti in ognuno dei 40 provini sono chiamati: **difetto 1** e **difetto 2**. Il **difetto 1** si trova sulla **sinistra** dell’osservatore che analizza il provino in **vista frontale**, il **difetto 2** si trova sulla destra della **vista frontale**, mentre in **vista posteriore** il **difetto 1** si trova sulla destra dell’osservatore ed il **difetto 2** sulla sinistra dell’osservatore.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	N. provino	N. difetto	Tipo difetto	Profondità 1 FRONT	Profondità 2 REAR	Volume [mm3]	Area proiettata su termo [mm2]	Area perpendicolare a corrente [mm2]	lato_I	lato_J	lato_K
2	11	1	P-I	0,75	3,75	0,50	1,00	0,25	2	0,5	
3	11	2	P-I	0,75	3,75	0,75	1,50	0,25	3	0,5	
4	12	1	P-I	1,00	3,50	0,50	1,00	0,25	2	0,5	
5	12	2	P-I	1,00	3,50	0,75	1,50	0,25	3	0,5	
6	13	1	P-I	0,75	3,50	1,13	1,50	0,56	2	0,75	
7	13	2	P-I	0,75	3,50	1,69	2,25	0,56	3	0,75	
8	14	1	P-I	1,00	3,25	1,13	1,50	0,56	2	0,75	
9	14	2	P-I	1,00	3,25	1,69	2,25	0,56	3	0,75	
10	15	1	P-I	1,50	2,75	1,13	1,50	0,56	2	0,75	
11	15	2	P-I	1,50	2,75	1,69	2,25	0,56	3	0,75	
12	16	1	P-I	1,00	3,00	2,00	2,00	1,00	2	1	
13	16	2	P-I	1,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3	1	
14	17	1	P-I	1,50	2,50	2,00	2,00	1,00	2	1	
15	17	2	P-I	1,50	2,50	3,00	3,00	1,00	3	1	
16	18	1	P-I	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2	1	
17	18	2	P-I	2,00	2,00	3,00	3,00	1,00	3	1	
18	21	1	P-I	0,75	3,50	0,75	1,00	0,38	2	0,5	0,75
19	21	2	P-I	0,75	3,25	1,00	1,00	0,50	2	0,5	1
20	22	1	P-I	1,00	2,50	4,50	3,00	1,50	3	1	1,5
21	22	2	P-I	1,00	2,00	6,00	3,00	2,00	3	1	2
22	33	1	C-I	0,75	3,75	0,39	1,00	0,20	2	0,5	
23	33	2	C-I	0,75	3,75	0,59	1,50	0,20	3	0,5	
24	34	1	C-I	1,00	3,50	0,39	1,00	0,20	2	0,5	
25	34	2	C-I	1,00	3,50	0,59	1,50	0,20	3	0,5	
26	35	1	C-I	0,75	3,50	0,88	1,50	0,44	2	0,75	
27	35	2	C-I	0,75	3,50	1,33	2,25	0,44	3	0,75	
28	36	1	C-I	1,00	3,25	0,88	1,50	0,44	2	0,75	
29	36	2	C-I	1,00	3,25	1,33	2,25	0,44	3	0,75	
30	37	1	C-I	1,50	2,75	0,88	1,50	0,44	2	0,75	
31	37	2	C-I	1,50	2,75	1,33	2,25	0,44	3	0,75	
32	38	1	C-I	1,00	3,00	1,57	2,00	0,79	2	1	
33	38	2	C-I	1,00	3,00	2,36	3,00	0,79	3	1	
34	39	1	C-I	1,50	2,50	1,57	2,00	0,79	2	1	
35	39	2	C-I	1,50	2,50	2,36	3,00	0,79	3	1	
36	40	1	C-I	2,00	2,00	1,57	2,00	0,79	2	1	
37	40	2	C-I	2,00	2,00	2,36	3,00	0,79	3	1	
38	3	1	P-J	0,75	3,75	0,50	1,00	1,00	0,5	2	
39	3	2	P-J	0,75	3,75	0,75	1,50	1,50	0,5	3	
40	4	1	P-J	1,00	3,50	0,50	1,00	1,00	0,5	2	
41	4	2	P-J	1,00	3,50	0,75	1,50	1,50	0,5	3	
42	5	1	P-J	0,75	3,50	1,13	1,50	1,50	0,75	2	
43	5	2	P-J	0,75	3,50	1,69	2,25	2,25	0,75	3	
44	6	1	P-J	1,00	3,25	1,13	1,50	1,50	0,75	2	
45	6	2	P-J	1,00	3,25	1,69	2,25	2,25	0,75	3	
46	7	1	P-J	1,50	2,75	1,13	1,50	1,50	0,75	2	
47	7	2	P-J	1,50	2,75	1,69	2,25	2,25	0,75	3	
48	8	1	P-J	1,00	3,00	2,00	2,00	2,00	1	2	
49	8	2	P-J	1,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1	3	
50	9	1	P-J	1,50	2,50	2,00	2,00	2,00	1	2	
51	9	2	P-J	1,50	2,50	3,00	3,00	3,00	1	3	
52	10	1	P-J	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1	2	
53	10	2	P-J	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	1	3	
54	19	1	P-J	1,00	3,25	0,75	1,00	1,50	0,5	2	0,75
55	19	2	P-J	1,00	3,00	1,00	1,00	2,00	0,5	2	1
56	20	1	P-J	2,00	1,50	4,50	3,00	4,50	1	3	1,5
57	20	2	P-J	2,00	1,00	6,00	3,00	6,00	1	3	2
58	25	1	C-J	0,75	3,75	0,39	1,00	1,00	0,5	2	
59	25	2	C-J	0,75	3,75	0,59	1,50	1,50	0,5	3	
60	26	1	C-J	1,00	3,50	0,39	1,00	1,00	0,5	2	
61	26	2	C-J	1,00	3,50	0,59	1,50	1,50	0,5	3	
62	27	1	C-J	0,75	3,50	0,88	1,50	1,50	0,75	2	
63	27	2	C-J	0,75	3,50	1,33	2,25	2,25	0,75	3	
64	28	1	C-J	1,00	3,25	0,88	1,50	1,50	0,75	2	
65	28	2	C-J	1,00	3,25	1,33	2,25	2,25	0,75	3	
66	29	1	C-J	1,50	2,75	0,88	1,50	1,50	0,75	2	
67	29	2	C-J	1,50	2,75	1,33	2,25	2,25	0,75	3	
68	30	1	C-J	1,00	3,00	1,57	2,00	2,00	1	2	
69	30	2	C-J	1,00	3,00	2,36	3,00	3,00	1	3	
70	31	1	C-J	1,50	2,50	1,57	2,00	2,00	1	2	
71	31	2	C-J	1,50	2,50	2,36	3,00	3,00	1	3	
72	32	1	C-J	2,00	2,00	1,57	2,00	2,00	1	2	
73	32	2	C-J	2,00	2,00	2,36	3,00	3,00	1	3	
74	1	1	P-K	0,75	0,75	0,88	0,25	1,75	0,5	0,5	3,5
75	1	2	P-K	0,75	1,00	1,83	0,56	2,44	0,75	0,75	3,25
76	2	1	P-K	1,00	0,75	3,25	1,00	3,25	1	1	3,25
77	2	2	P-K	1,00	1,00	3,00	1,00	3,00	1	1	3
78	23	1	C-K	0,75	0,75	0,69	0,20	1,75	0,5	0,5	3,5
79	23	2	C-K	0,75	1,00	1,44	0,44	2,44	0,75	0,75	3,25
80	24	1	C-K	1,00	0,75	2,55	0,79	3,25	1	1	3,25
81	24	2	C-K	1,00	1,00	2,36	0,79	3,00	1	1	3

Tabella 1 : raccolta informazioni dei difetti analizzate dalla campagna sperimentale



La **fig.4** mostra la nomenclatura del sistema di riferimento solidale al provino. Le tre direzioni **J,K** ed **I** visualizzabili in **fig.4** sono anche i tre orientamenti possibili per i difetti presenti nel provino.

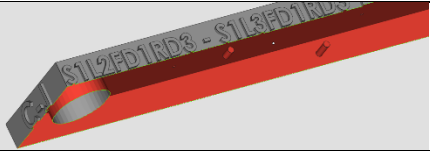
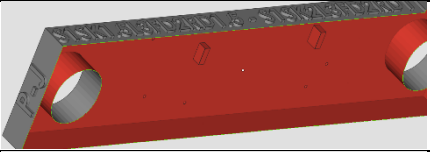
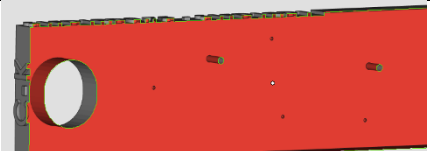
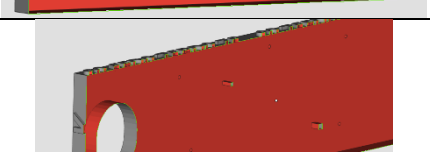
La direzione **K** si sviluppa lungo lo **spessore** del provino, la direzione **J** verso l'**altezza** del provino e la direzione **I** verso la **lunghezza** del provino.

La direzione **I** è anche la direzione lungo la quale la **corrente continua** scorre durante le prove.

La scritta in rilievo posta lateralmente lungo l'altezza del provino fornisce l'informazione su **forma e orientamento spaziale** del difetto grazie ad una sigla di due lettere maiuscole.

Nella sigla viene scritta prima la lettera che identifica la **forma del difetto** e poi la lettera **I, J** o **K** per identificare la **direzione del difetto**.

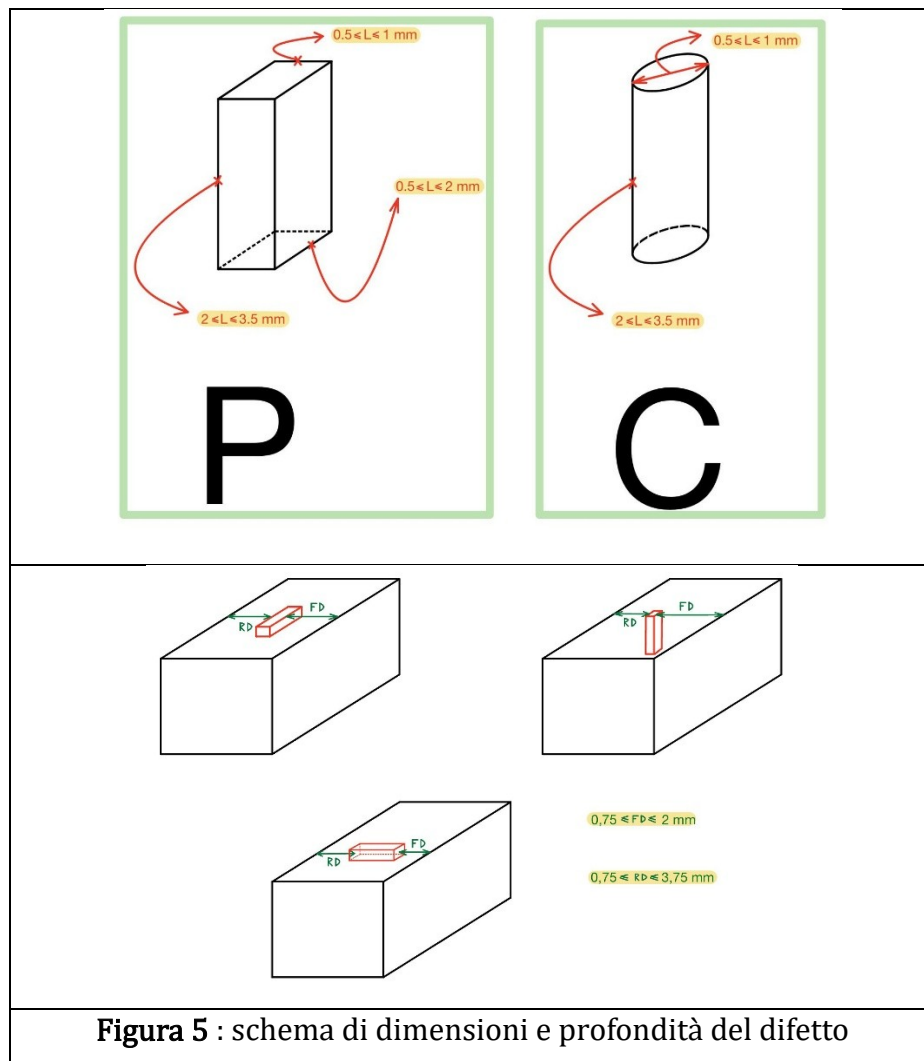
La lettera "**C**" identifica una forma **cilindrica** del difetto, mentre la lettera "**P**" identifica una forma **prismatica** del difetto.

C-J	
P-J	
C-K	
P-K	
C-I	
P-I	
Tabella 2 : forma e direzione dei difetti	

In **tabella 2** sono mostrate tutte le combinazioni possibili di forma e direzione dei difetti analizzati.

I difetti contenuti sotto la superficie dei provini presentano **dimensioni** e **profondità** diverse (come osservabile in **tabella 1**).

Le dimensioni dei lati principali sono comprese fra 0,5 e 2 mm, le lunghezze sono comprese fra 2 e 3,5 mm e le profondità sono comprese fra i 0,75 e 3,75 mm come mostrato in **fig.5**.



Si precisa come le dimensioni dei provini, così come le dimensioni dei difetti e delle loro profondità, sono dei **valori nominali**, ovvero sono le dimensioni del modello **CAD**. Com'è noto il modello **CAD** è un elemento ideale non replicabile nella realtà, pertanto, come dimostrato anche dalle **tomografie** dei provini in [1], le vere dimensioni e profondità sono diverse dai valori nominali. Il cambiamento di dimensione e profondità riscontrato in [1] avveniva in maniera non sempre prevedibile a causa della variabilità tipica del processo di produzione, specialmente nella riproduzione di dettagli di piccola dimensione. Per questo motivo ***i valori nominali saranno trattati durante l'analisi dei risultati con estrema cautela***. Solo i risultati delle **tomografie computerizzate** potranno davvero fornire delle informazioni affidabili in merito a dimensione e profondità dei difetti.

A testimonianza di ciò viene inserita la **fig.6** che mostra quanto le circonferenze, perfette nei CAD delle figure 2, 3 e 5, siano ben distanti da una forma circolare esatta e dal perfetto centramento dei fori passanti. Questo fenomeno è causato dalla scarsa precisione della tecnologia **PBF-EBM**.



Figura 6 : scarsa precisione geometrica delle circonferenze dei fori passanti

3.2.2 Manifattura del provino

I provini sono stati realizzati mediante costruzione additiva in letto di polvere a fascio di elettroni (PBF-EBM). Il macchinario usato per la loro realizzazione è l'**Arcam A2X** visibile nella **fig.7** sottostante.

**GE Additive**

Arcam EBM A2X

The Arcam EBM A2X is the ultimate additive manufacturing solution for titanium alloys and processing materials that require high-process temperatures. It is specifically designed for cost-effective production of demanding applications that need to meet the highest material standards.

Technical Data

Max. build size	200 x 200 x 380
Max. beam power	3000 W
Cathode type	Tungsten filament
Min. beam diameter	250µm
Max. EB translation speed	8000 m/s
Active cooling	No
Vacuum base pressure	5 x 10 ⁻⁴ mbar (chamber pressure before start of process)
Build atmosphere	2 x 10 ⁻³ mbar (partial pressure of He)
He consumption, build process	1 liter/h
He consumption, build cool down	50-75 liters/build cycle
Power supply	3 x 400 V, 32 A, 7 Kw
Size approx.	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H)
Weight	1700 kg
CAD interface	Standard: STL

- > Platform designed for material development and research
- > High-process temperatures
- > Easy-to-use operator interface

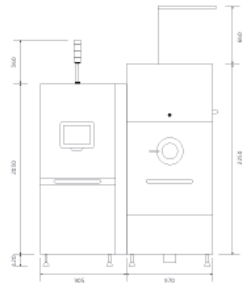






Figura 7 : Arcam A2X (fonte ge.com/additive)

La polvere usata per la realizzazione dei provini è la lega di titanio **Ti6Al4V ELI** realizzata da **ATI**. Il produttore della polvere fornisce nella scheda tecnica una dimensione della granulometria compresa fra i 50 ed i 150 µm con D10 di 54 µm, D50 di 100 µm ed un D90 di 146 µm. La **densità**

apparente della polvere fornita dal produttore è $2,59\text{g/cm}^3$. La **temperatura di preriscaldamento** dello strato di polvere prima della fusione è di 700°C .

Lo spessore dello strato di polvere vergine depositato ad ogni iterazione ha valore pari a 0,050 mm. I parametri di processo utilizzati per la realizzazione del set dei 40 provini sono quelli standard consigliati dal produttore ed è anche stata utilizzata la tecnologia Multibeam (fascio multiplo di elettroni) per realizzare la fusione dei contorni dei provini, esattamente come per i provini del caso studio di [1].

3.3 *Set-up e prove termografiche*

3.3.1 *Strumentazione*

La **termocamera** utilizzata per le acquisizioni termografiche è una **FLIR** modello **A700** equipaggiata con ottica **macro 2x Teledyne T300238** (lunghezza focale: 17,5 mm e apertura focale $f : 1,1$).

A causa dell'equipaggiamento delle suddette lenti macro, la termocamera presenta un valore di **NETD inferiore a 40 mK**. La termocamera è equipaggiata con un sensore a microbolometro non raffreddato con banda spettrale compresa nell'intervallo $7,5\text{-}14\ \mu\text{m}$ (IR).

Il modello 700 della serie A di FLIR ha una risoluzione di **640×480 pixel**. La termocamera è stata posizionata su un supporto dedicato posizionato a **40 mm** dal campione e con l'asse ottico perpendicolare alla superficie target (**fig.8**). In tale configurazione la termocamera ha acquisito un **campo visivo** di dimensione $25,5 \times 19,1\ \text{mm}^2$, ottenendo così una **risoluzione spaziale** di $40\ \mu\text{m}$.

La termocamera ha acquisito le immagini ad una frequenza di 30 Hz (30 fps).

Il **supporto** su cui la termocamera ed i morsetti sono stati montati è una struttura a T che consente di regolare la distanza della termocamera e la posizione del provino mediante delle guide a pattino come mostrato in **fig.8**.

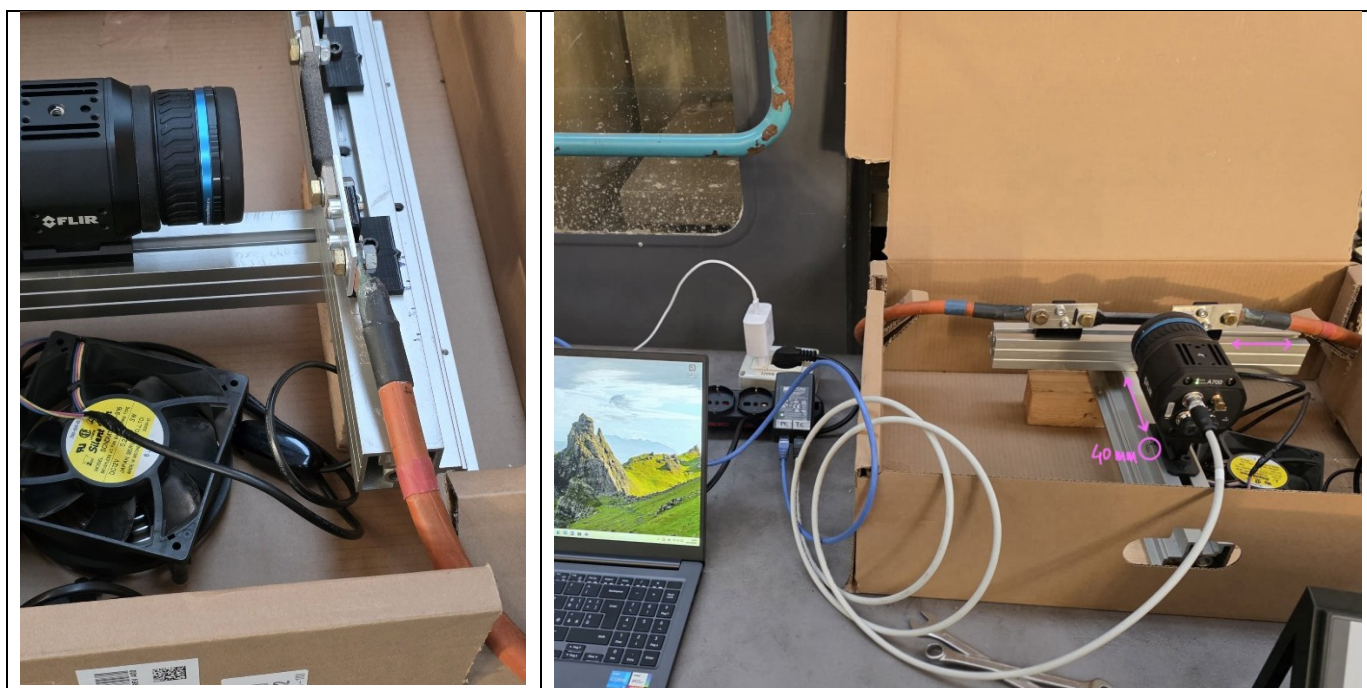


Figura 8 : posizionamento termocamera e morsetti su supporto a T

Dalla **fig.8** è possibile osservare anche la struttura usata durante le riprese per schermare la termocamera dall'ambiente dell'officina consistente in una struttura di cartone ondulato.

Per l'**alimentazione elettrica** è stato usato come alimentatore un Xingtongli GKDM24-1000CVC (**fig.9**) il quale è in grado di erogare una **corrente continua** sino a 1000 A a 24 V. L'alimentatore è stato impostato sul potenziale di 1 V arrivando ad erogare, approssimativamente, 200 A.

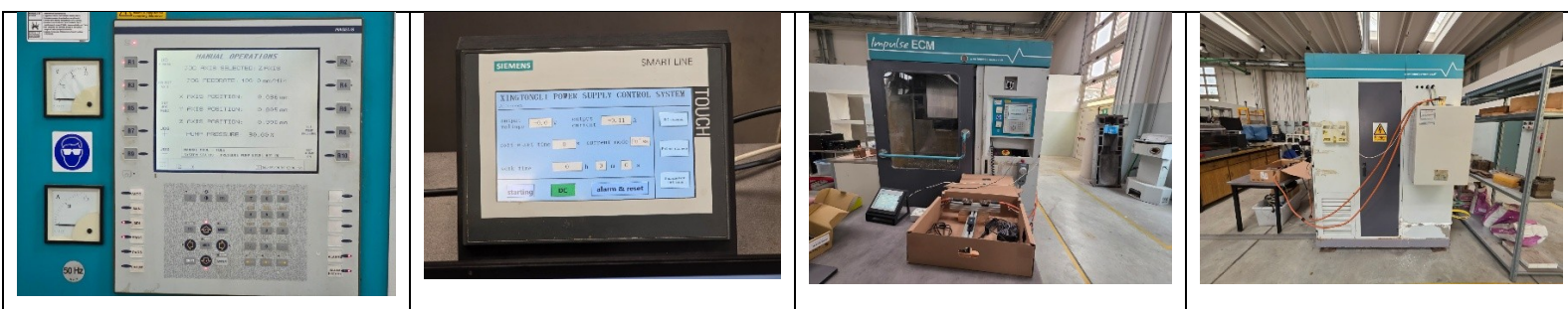


Figura 9 : alimentatore Xingtongli GKDM24-1000CVC

Infine si evidenzia l'uso di una **ventola** per accelerare la fase di raffreddamento del provino fra prove consecutive, per consentire di tornare alle stesse condizioni iniziali di partenza dell'esperimento per ogni test.

3.3.2 Set-up e conduzione delle termografie

La prima fase di ogni sessione di riprese consiste nell'allestimento del set-up di lavoro.



Figura 10 : Set-up

Si è optato per la scelta di una disposizione semplice ed ordinata che consentisse un processo di lavoro preciso e fluido (**fig.10**). Il posizionamento dei computer, dei provini da analizzare, degli attrezzi ed il cable management sono stati mantenuti sempre come in **fig.10**. Il **pannello di controllo** dell'alimentatore è stato posizionato sempre dietro al computer a cui la termocamera era collegata (**fig.10**) in modo da evitare tocchi involontari sul pannello. La termocamera è stata sempre posizionata con cura prestando estrema attenzione al mantenimento dei **40 mm** di distanza dalla superficie target del provino analizzato, così da non invalidare la stima sulla risoluzione spaziale di 40 μm precedentemente introdotta.

Il passo successivo consiste nel montaggio del provino sui morsetti. Il provino viene montato e posizionato in modo da inquadrare inizialmente il **difetto 1** in **vista frontale**. Di questa fase si

sottolineano due aspetti importanti. Il primo riguarda il **posizionamento verticale** del provino prima del completo serraggio del collegamento filettato; infatti, avendo un collegamento filettato che **lavora ad attrito**, è presente del **gioco**. Il provino viene mantenuto perfettamente orizzontale. Il secondo punto importante riguarda il **serraggio**: un serraggio inadeguato causa una pressione di contatto insufficiente che ostacola il corretto passaggio della corrente, provocando la formazione di scintille in corrispondenza dei morsetti. Il problema del **serraggio** è una caratteristica tipica delle prove termografiche attive per effetto Joule e può diventare oggettivamente difficile da risolvere per l'analisi di pezzi con forme geometriche complesse in ambito industriale. Il problema, in tal caso, è legato alla necessità di realizzare dei morsetti per i cavi elettrici adatti alla geometria complessa del pezzo da analizzare.

Una volta montato il provino si procede con la **messa a fuoco** manuale della termocamera. Per compiere questa operazione sono risultati molto utili i **pin di riferimento** trattati nel paragrafo 3.2.2.

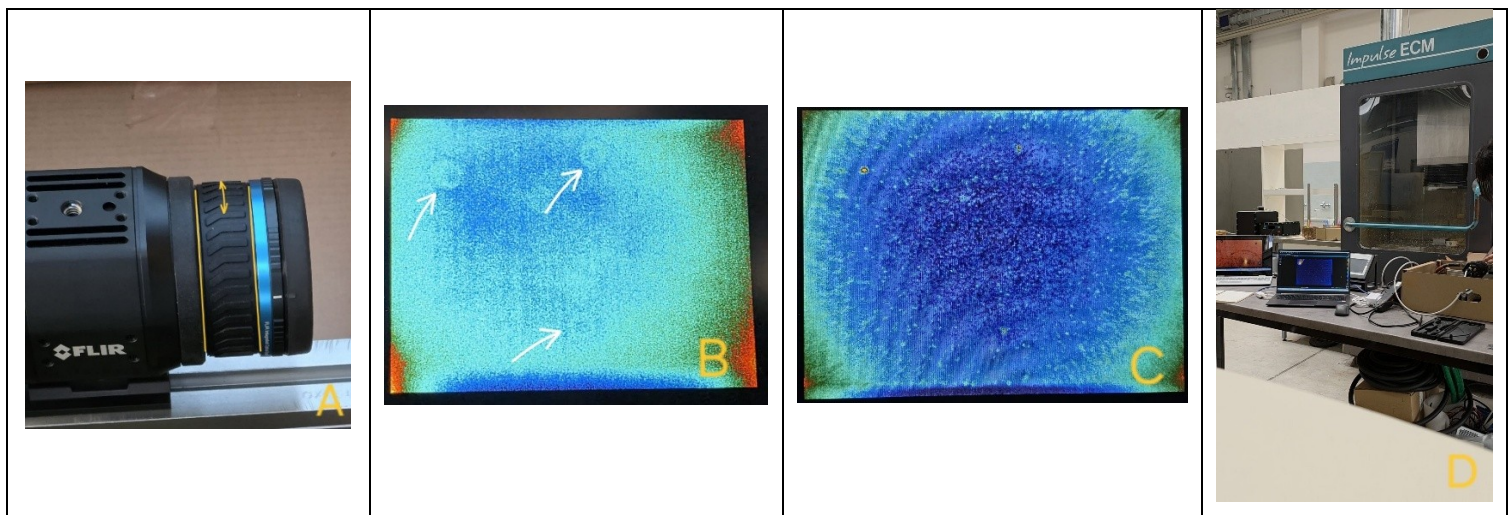


Figura 11 : processo di messa a fuoco

Viene regolata una **ghiera** sulla termocamera come mostrato in **fig. 11 A** passando dalla condizione di **fig.11 B** alla condizione di **fig. 11 C**, dove possiamo notare la migliore definizione dell'immagine.

Completata la messa a fuoco si procede con la verifica delle condizioni iniziali adeguate per poter avviare la termografia. Il provino viene raffreddato con l'uso di una **ventola** così da garantire che la sua temperatura non differisca più di 0,5°C dall'ambiente circostante (**fig. 12 A**) [1]. Quando le condizioni iniziali adeguate vengono raggiunte l'immagine termica sarà come quella in **fig. 12 B**, in cui la superficie del provino si confonde con l'ambiente nell'immagine termografica poiché hanno temperatura molto simile tra loro.

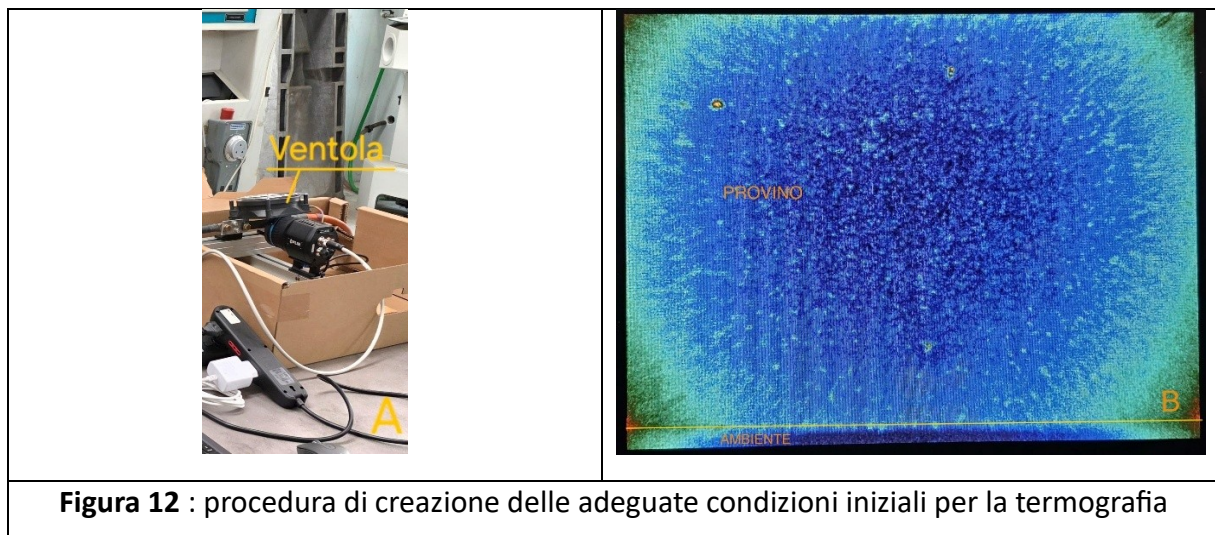


Figura 12 : procedura di creazione delle adeguate condizioni iniziali per la termografia

Completata la fase di set-up si procede con la fase di avvio dell'esperimento. La scatola viene chiusa per isolare il provino dalle riflessioni ambientali, l'alimentatore viene acceso (resta spento quando si maneggiano i provini sui morsetti), il **NUC (Non-Uniformity Correction)** della termocamera (impostato su manuale) viene aggiornato, si avvia la registrazione e poi si avvia l'alimentatore. Il provino si scalderrà rapidamente e verrà portato ad una temperatura massima compresa fra i **40°C** ed i **50°C**. Tale range di temperature massime si è rivelato più che sufficiente per l'individuazione della traccia termica del difetto. Una volta ottenuto il filmato termografico si procede a fermare l'alimentatore e poi a bloccare la registrazione. Tutta questa procedura è **estremamente veloce**, portando all'ottenimento di filmati che raramente hanno ecceduto i 60 fotogrammi (2 secondi). Si sottolinea anche un tempo di prova particolarmente breve che ha visto circa 30 fotogrammi di fase di riscaldamento per effetto Joule, confermando un basso consumo di corrente per il riscaldamento del provino ed una minimizzazione dello spazio di memoria richiesto per la conservazione dei filmati, in accordo con i risultati trovati in [1].

3.4 Organizzazione acquisizione dati

3.4.1. Descrizione della nomenclatura degli ID dei provini

2	1	P-K	S0.5FD0.75RD0.75	29	12	P-I	S0.5L3FD1RD3.5	53	26	C-J	S0.5L3FD1RD3.5
3	1	P-K	S0.75FD0.75RD1	30	21	P-I	S0.5SK0.75L2FD0.75RD3.5	54	27	C-J	S0.75L2FD0.75RD3.5
4	2	P-K	S1FD1RD0.75	31	21	P-I	S0.5SK1L2FD0.75RD3.25	55	28	C-J	S0.75L2FD1RD3.25
5	2	P-K	S1FD1RD1	32	13	P-I	S0.75L2FD0.75RD3.5	56	29	C-J	S0.75L2FD1.5RD2.75
6	3	P-J	S0.5L2FD0.75RD3.75	33	14	P-I	S0.75L2FD1RD3.25	57	27	C-J	S0.75L3FD0.75RD3.5
7	4	P-J	S0.5L2FD1RD3.5	34	15	P-I	S0.75L2FD1.5RD2.75	58	28	C-J	S0.75L3FD1RD3.25
8	3	P-J	S0.5L3FD0.75RD3.75	35	13	P-I	S0.75L3FD0.75RD3.5	59	29	C-J	S0.75L3FD1.5RD2.75
9	4	P-J	S0.5L3FD1RD3.5	36	14	P-I	S0.75L3FD1RD3.25	60	30	C-J	S1L2FD1RD3
10	19	P-J	S0.5SK0.75L2FD1RD3.25	37	15	P-I	S0.75L3FD1.5RD2.75	61	31	C-J	S1L2FD1.5RD2.5
11	19	P-J	S0.5SK1L2FD1RD3	38	16	P-I	S1L2FD1RD3	62	32	C-J	S1L2FD2RD2
12	5	P-J	S0.75L2FD0.75RD3.5	39	17	P-I	S1L2FD1.5RD2.5	63	30	C-J	S1L3FD1RD3
13	6	P-J	S0.75L2FD1RD3.25	40	18	P-I	S1L2FD2RD2	64	31	C-J	S1L3FD1.5RD2.5
14	7	P-J	S0.75L2FD1.5RD2.75	41	16	P-I	S1L3FD1RD3	65	32	C-J	S1L3FD2RD2
15	5	P-J	S0.75L3FD0.75RD3.5	42	17	P-I	S1L3FD1.5RD2.5	66	33	C-I	S0.5L2FD0.75RD3.75
16	6	P-J	S0.75L3FD1RD3.25	43	18	P-I	S1L3FD2RD2	67	34	C-I	S0.5L2FD1RD3.5
17	7	P-J	S0.75L3FD1.5RD2.75	44	22	P-I	S1SK1.5L3FD1RD2.5	68	33	C-I	S0.5L3FD0.75RD3.75
18	8	P-J	S1L2FD1RD3	45	22	P-I	S1SK2L3FD1RD2	69	34	C-I	S0.5L3FD1RD3.5
19	9	P-J	S1L2FD1.5RD2.5	46	23	C-K	S0.5FD0.75RD0.75	70	35	C-I	S0.75L2FD0.75RD3.5
20	10	P-J	S1L2FD2RD2	47	23	C-K	S0.75FD0.75RD1	71	36	C-I	S0.75L2FD1RD3.25
21	8	P-J	S1L3FD1RD3	48	24	C-K	S1FD1RD0.75	72	37	C-I	S0.75L3FD0.75RD3.5
22	9	P-J	S1L3FD1.5RD2.5	49	24	C-K	S1FD1RD1	73	36	C-I	S0.75L3FD1RD3.25
23	10	P-J	S1L3FD2RD2	50	25	C-J	S0.5L2FD0.75RD3.75	74	37	C-I	S0.75L3FD1.5RD2.75
24	20	P-J	S1SK1.5L3FD2RD1.5	51	26	C-J	S0.5L2FD1RD3.5	75	38	C-I	S1L2FD1RD3
25	20	P-J	S1SK2L3FD2RD1	52	25	C-J	S0.5L3FD0.75RD3.75	76	39	C-I	S1L2FD1.5RD2.5
26	11	P-I	S0.5L2FD0.75RD3.75					77	40	C-I	S1L2FD2RD2
27	12	P-I	S0.5L2FD1RD3.5					78	38	C-I	S1L3FD1RD3
28	11	P-I	S0.5L3FD0.75RD3.75					79	39	C-I	S1L3FD1.5RD2.5
								80	40	C-I	S1L3FD2RD2
								81			

Figura 13 : nomenclatura ID provini

A partire dal foglio di calcolo illustrato in **fig.13** sono stati ottenuti gli **ID** con cui tutte le registrazioni sono state nominate e salvate.

A titolo puramente esemplificativo, prendiamo il **provino 2** (righe 4 e 5 dell'Excel di **fig.13**): la riga 4 contiene fronte e retro del difetto 1 del provino 2, mentre la riga 5 contiene fronte e retro del difetto 2 del provino 2. La sigla "**FD**" identifica la "front depth" (profondità frontale), mentre "**RD**" identifica la "rear depth" (profondità sul lato posteriore).

Pertanto la registrazione del **difetto 1** in **vista frontale** del **provino 2** è identificato come: "2-P-K-S1_FD1".

La registrazione del **difetto 1** in **vista posteriore** del **provino 2** sarà : "2-P-K-S1_RD0.75".

Con la stessa logica il **fronte** e **retro** del **difetto 2** del **provino 2** : "2-P-K-S1_FD1" e "2-P-K-S1_RD1".

Dopo aver salvato i filmati delle termografie si è proceduto all'estrazione delle **matrici termiche** dai ciascuno dei filmati. La **matrice termica** è un file ".CSV" che contiene l'informazione della temperatura letta, per un certo frame di ripresa, di ognuno dei 307200 pixel del sensore della termocamera. Ogni matrice termica estratta sarà analizzata tramite un **algoritmo Matlab** che sarà trattato nel prossimo paragrafo.

3.4.2. Individuazione dei frame più significativi

La scelta dei frame da estrarre ed analizzare per la misura del difetto è analoga a quella usata in [1]. In particolare i frame vengono **ri-indicizzati** rispetto alla numerazione standard che hanno nel video. L'obiettivo è quello di escludere l'intervallo temporale precedente all'attivazione del generatore di corrente. Per ottenere questo risultato viene analizzata la sequenza di fotogrammi nel programma **FLIR studio**. Il primo frame che cambia **visivamente** rispetto agli altri prima dell'avvio del flusso di corrente diventa il **frame 1** e da qui la numerazione prosegue.

Per ogni difetto di ogni provino, sia in vista frontale che in vista posteriore, la scelta dei frame da analizzare è fondamentale per far sì di ottenere delle immagini in cui il difetto analizzato sia il più visibile possibile e quindi abbia il maggior **SNR**. Dalle prove si è visto che i frame in cui il difetto compare con il maggior valore di **SNR** sono tipicamente il 2 e il 3, con qualche eccezione in cui sono stati analizzati i frame 3 e 4, per le seguenti due motivazioni :

- 1) Il difetto non era ancora visibile nel frame 2.
- 2) Il difetto nel frame 2 era visibile ma in un momento di transitorio.

Il caso due si riconosceva a causa del cambio del centro della traccia termica del difetto e dai colori dell'immagine, che mostravano una temperatura più bassa nelle righe di pixel in basso e temperature via via più alte salendo di riga. Questo effetto visivo della “gradiente termico a bande orizzontali” è una diretta conseguenza del modo della FLIR A700 di acquisire le immagini. La termocamera, infatti, non acquisisce la lettura della temperatura del singolo pixel in contemporanea su tutti i suoi pixel, ma legge la temperatura simultaneamente solo dei pixel presenti su di una stessa riga (rolling shutter). La termocamera FLIR A700 parte dal basso ed inizia a leggere la temperatura di 640 pixel, poi sale di una riga e ne legge altri 640 e così via per 480 righe in verticale. Questo fa sì che, durante un marcato e veloce transitorio, i pixel delle righe più in basso risultino più freddi di quelli delle righe più in alto.

Per chiarire meglio quanto appena detto viene riportata la **fig.14** sottostante, dove si mostrano 3 frame consecutivi, il primo dei quali è un frame ancora investito dal transitorio che presenta le due caratteristiche appena descritte (cambio del centro e “gradiente termico a bande orizzontali”).

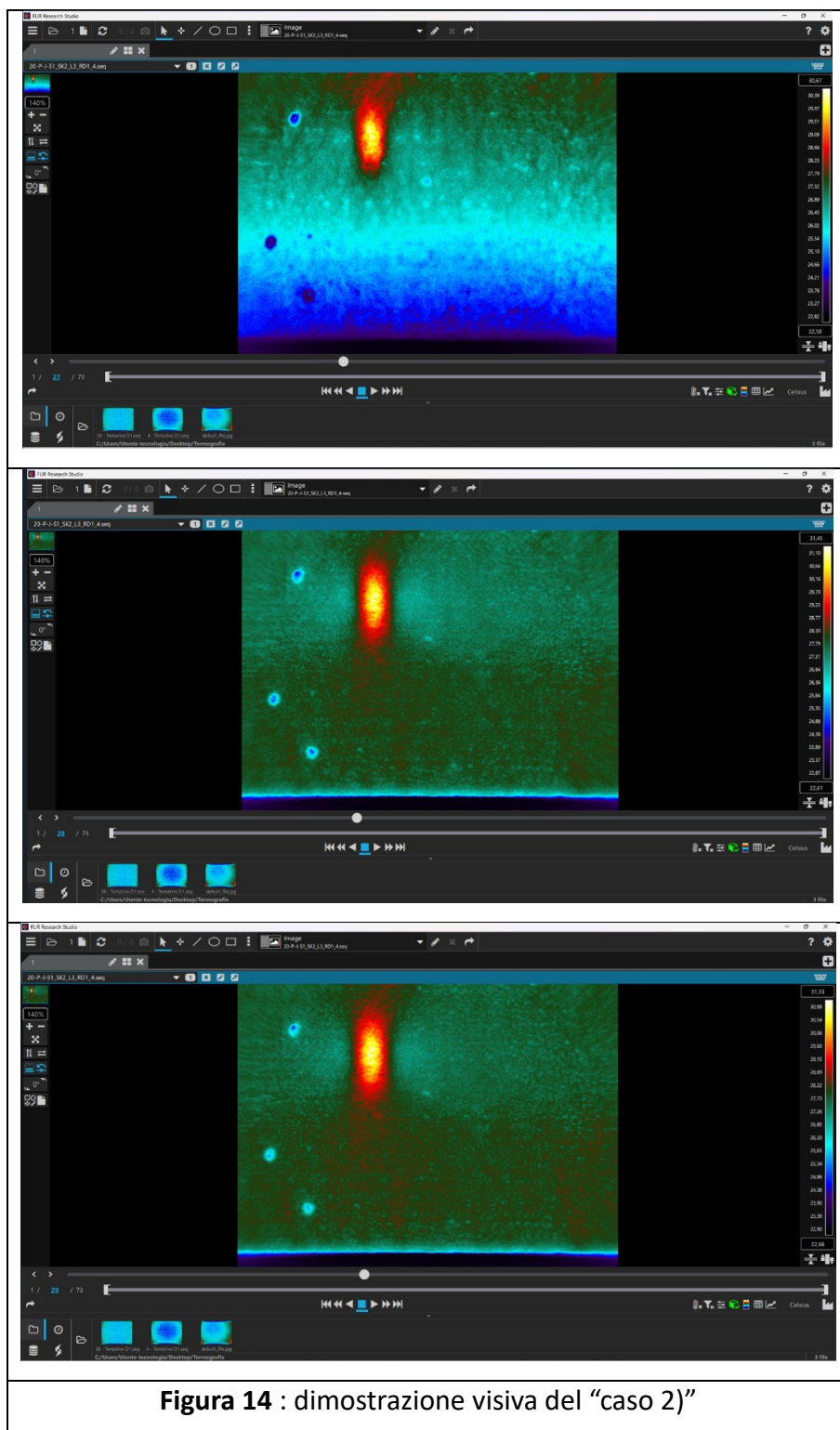
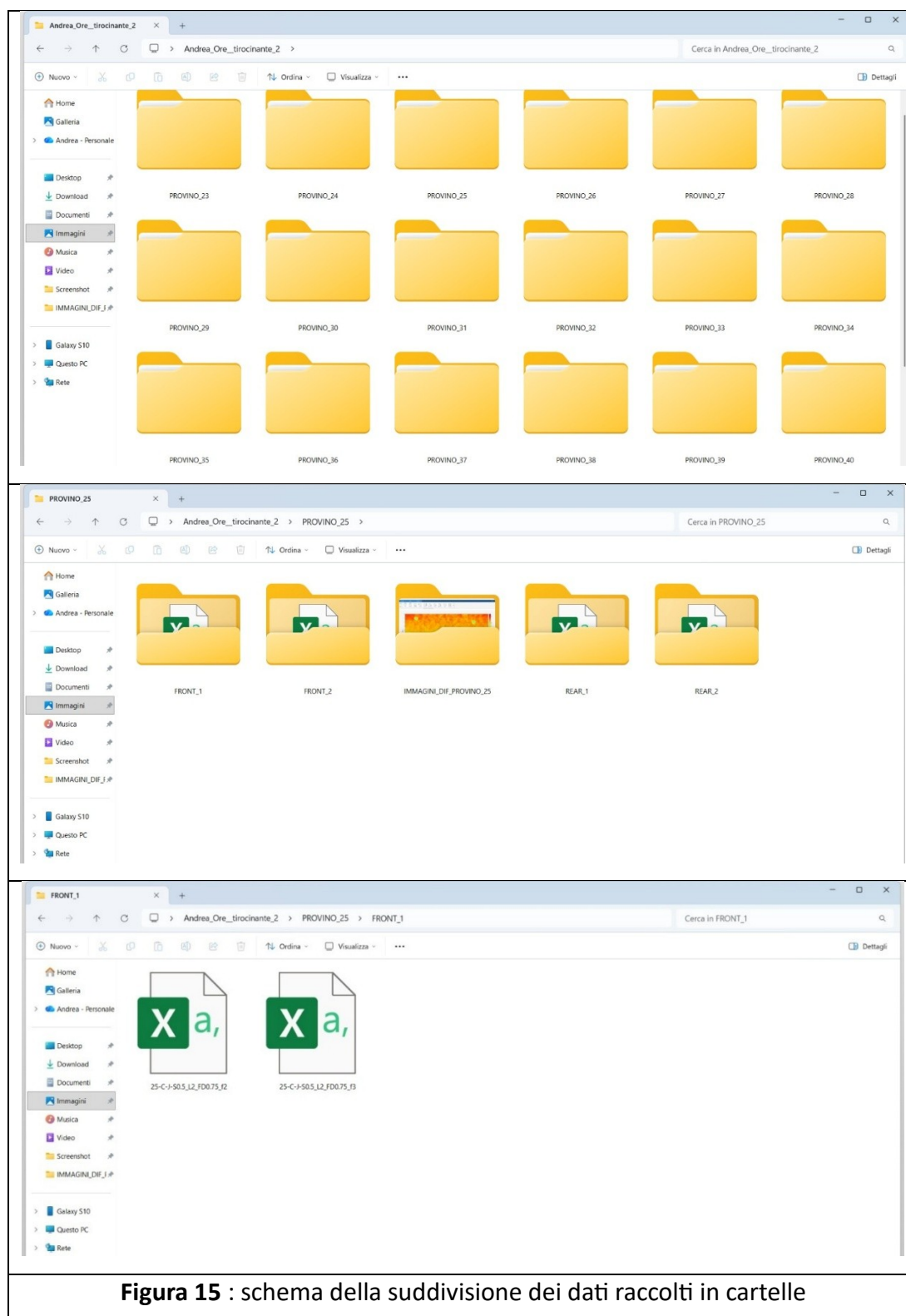


Figura 14 : dimostrazione visiva del “caso 2)”

Il nome del file CSV, contenente i dati di temperatura di ogni pixel, estratto avrà un’ulteriore termine che ne identifica il frame di estrazione. Ad esempio i frame 2 e 3 del **difetto 1** in **vista posteriore** del **provino 2** sono identificati come: “2-P-K-S1_RD0.75_f2” e “2-P-K-S1_RD0.75_f3”.

3.4.3. Organizzazione dei dati raccolti

Per rendere più semplice ed agevole il processo di elaborazione dei dati è stata adottata struttura gerarchica di cartelle dei file CSV che mostrasse esplicitamente il numero del provino, il numero del difetto (se 1 o 2) e la vista (se fronte o retro), come mostrato in **fig.15**.



Per ogni provino è stata creata anche una raccolta di immagini del modello CAD del provino, in sezione ed in vista complessiva, e dei fotogrammi estratti da **FLIR studio**, al fine di consentire una visione d'insieme rapida delle informazioni visive più rilevanti (**fig.16**).



L'aver suddiviso i dati con tale schema di sottocartelle ha consentito di rendere più compatti e semplici i nomi delle immagini. La convenzione di denominazione delle foto visibili in **fig.16** è la seguente: la **lettera iniziale maiuscola** identifica se siamo in fronte o in retro, ovvero "**F**" per "front", "**R**" per "rear". Il numero che segue la lettere in maiuscolo indica il difetto 1 o 2. Infine è presente "**f2**", "**f3**" o "**f4**" in base al frame a cui l'immagine corrisponde.

Per poter operare delle misurazioni termografiche in modo rigoroso è necessario eseguire acquisizioni multiple per ogni difetto di ogni provino in fronte e retro. La fase maggiormente onerosa in termini di tempo è quella del ripristino delle condizioni iniziali della prova, infatti servono circa **2 minuti** per un provino a temperatura ambiente e circa **6 minuti** per raffreddare un provino che si trova a 45°C. Per questa ragione si è inizialmente condotto un primo ciclo di riprese per tutti e 40 i provini e di usare questi dati per affinare l'**algoritmo Matlab** di lettura dei file **CSV**. Dopo aver completato il primo ciclo di riprese ed estrazione dei file **CSV** ed aver condotto una fase di analisi dei risultati ottenuti tramite **Matlab**, si è scelto di limitare le riprese multiple solamente ai difetti che sono risultati visibili o al limite della rivelabilità nel primo ciclo di misure. Sono state svolte (dopo il primo ciclo di riprese) 4 riprese ulteriori, arrivando ad un totale di **5 riprese** complessive per ogni difetto che avesse superato il vincolo precedentemente imposto. Da questa semplificazione sono

stati estratti ed analizzati un totale di **1108** fotogrammi. Verranno forniti nel capitolo di analisi dei risultati dei dati concreti a supporto di questa decisione.

I file video salvati hanno la stessa convenzione di denominazione introdotta all'inizio del sottoparagrafo 3.4.1, con l'aggiunta di un termine che identifica il numero della ripresa. Nello specifico i file delle 4 riprese multiple si distinguono da quelli della prima serie di riprese poiché un file della prima serie ha la forma "2-P-K-S1_RD0.75", mentre le 4 riprese multiple corrispondenti saranno "2-P-K-S1_RD0.75_1", "2-P-K-S1_RD0.75_2", "2-P-K-S1_RD0.75_3" e "2-P-K-S1_RD0.75_4".

La medesima logica è stata applicata per i file **CSV**, dove, ad esempio, "2-P-K-S1_RD0.75_f2" è per un **CSV** del primo ciclo, mentre le 4 riprese multiple corrispondenti saranno:

"2-P-K-S1_RD0.75_f2_1", "2-P-K-S1_RD0.75_f2_2", "2-P-K-S1_RD0.75_f2_3" e "2-P-K-S1_RD0.75_f2_4".

3.5 Sviluppo dell'algoritmo di analisi dei dati

3.5.1 L'algoritmo di partenza, SNR

Durante le fasi iniziali del tirocinio sono stati messi a disposizione due algoritmi **Matlab** di analisi delle matrici termiche. Un algoritmo era dedicato al calcolo del rapporto segnale-rumore (**SNR**, Signal-to-Noise Ratio), mentre il secondo svolgeva il calcolo della **dimensione del difetto** lungo la direzione di scorrimento della corrente.

Questi due algoritmi sono stati usati per l'ottenimento dei risultati presentati nello studio [1].

In questo sottoparagrafo si analizzano le azioni più importanti svolte dai due codici, i loro limiti operativi e l'ottimizzazione implementata successivamente. In **fig.17** viene mostrato l'algoritmo completo per il calcolo dell'**SNR** di una matrice termica. L'algoritmo di **fig.17** è stato diviso in otto blocchi logici per facilitare l'analisi dei punti salienti dell'algoritmo.

Come già introdotto nello stato dell'arte, la formula per il calcolo di **SNR** è :

$$SNR = \frac{|\overline{T_d} - \overline{T_{nd}}|}{\sigma_{nd}}$$

Per il calcolo di **SNR** tramite questa formula è necessario definire due regioni (**ROI**, region of interest), una **ROI_d** rappresentativa della **regione del difetto**, ed una **ROI_nd** rappresentativa della **regione di provino non contaminata dal difetto (fig.18)**. La **ROI_d** è una regione di forma rettangolare che deve contenere non solo la traccia termica del difetto, ma anche una zona circostante influenzata dal fenomeno di diffusione termica della traccia del difetto stesso. Per ottenere la **ROI_nd** dobbiamo effettuare la seguente operazione: si definisce un'area rettangolare concentrica ed esterna alla **ROI_d**, ottenuta per espansione di quest'ultima. Dopo aver operato l'espansione si sottrae all'area appena ottenuta l'area della **ROI_d**, ottenendo così la **ROI_nd**.

Il termine $\overline{T_d}$ rappresenta la temperatura media dei pixel all'interno della **ROI_d**, mentre $\overline{T_{nd}}$ rappresenta la temperatura media dei pixel all'interno della **ROI_nd**. Infine σ_{nd} rappresenta la **deviazione standard** della temperatura entro la **ROI_nd**.

1	%ENTER PIXEL SIZE [mm]	1
2	pxsz = 0.04;	
3		
4	%ENTER SAMPLE AREA	
5	% rowstart = 127;	
6	% rowstop = 361;	
7	% colstart = 1;	
8	% colstop = 570;	
9	RAW = readmatrix("20-P-J-S1_SK1.5_L3_RD1.5_f3.csv");	
10	m=size(RAW,1);	
11	n=size(RAW,2);	
12		
13		
14	%ENTER DEFECT POSITION	2
15	% v = max(RAW(:)); %max value of the matrix	
16	% [ii,jj] = find(RAW == v); % row and column number of the max	
17	dcx = 14.2; % dc = defect coordinates. Coordinate of the center of the defect in mm	
18	dcy = 5.93;	
19	rh = 2.9; % rh = rectangle height. Height of the rectangle used to obtain the temperature plot	
20	rw = 1.85; % rw = rectangle width. Width of the rectangle used to obtain the temperature plot	
21		
22		
23	%ENTER NOISE POSITION	3
24	dcxn = dcx; % dc = defect coordinates. Coordinate of the center of the defect in mm	
25	dcyn = dcy;	
26		
27	rhn=rh*2.5; % rh = rectangle height. Height of the rectangle used to obtain the surroundings	
28	rwn = rw*5; % rw = rectangle width. Width of the rectangle used to obtain the surroundings	
29		
30		
31	IRfigure = image([0 n*pxsz],[0 m*pxsz],RAW,'DataMapping','scaled');	
32	colormap(CustomColormap);	
33	cb = colorbar();	
34	ylabel(cb,"Temperature [°C]");	
35	ylabel("Position [mm]")	
36	xlabel("Position [mm]")	
37	% pos = [0.5 0.5 0.5 0.5];	
38	% rectangle('Position',pos,'Curvature',[1 1])	
39	% axis equal	
40	rectangle('Position',[dcx-rw/2,dcy-rh/2,rw,rh]);	
41	rectangle('Position',[dcxn-rwn/2,dcyn-rhn/2,rwn,rhn]);	
42	% rectangle("Position",[dcy,dcx]);	
43		
44	impixelinfo	
45		
46	%ROI DEFECT	5
47	c1 = round((dcx-rw/2)/pxsz);	
48	c2 = round((dcx+rw/2)/pxsz);	
49	r1 = round((dcy-rh/2)/pxsz);	
50	r2 = round((dcy+rh/2)/pxsz);	
51	ROI=RAW(r2:r1, c1:c2);	
52	%	
53	% ROI NOISE	6
54	c1n = round(((dcxn-rwn)/2)/pxsz);	
55	c2n = round((dcxn+rwn/2)/pxsz);	
56	r1n = round((dcyn+rhn/2)/pxsz);	
57	r2n = round((dcyn-rhn/2)/pxsz);	
58		
59	ROI=RAW(r2n:r1n, c1n:c2n);	
60		
61	m_ROId=size(ROI,1);	
62	n_ROId=size(ROI,2);	
63	m_ROIn=size(ROI,1);	
64	n_ROIn=size(ROI,2);	
65		
66	m_ROIstart= round((m_ROIn-m_ROId)/2);	7
67	m_ROIend= round((m_ROIstart + m_ROId));	
68		
69	n_ROIstart= round((n_ROIn-n_ROId)/2);	
70	n_ROIend= round((n_ROIstart + n_ROId));	
71		
72	ROI(m_ROIstart:m_ROIend, n_ROIstart:n_ROIend)=0;	
73		
74		
75	% % COMPUTING THE SNR	8
76	MTd=mean(ROI,"all");	
77		
78	MTn=mean(nonzeros(ROI));	
79	sigma = std(nonzeros(ROI(:)));	
80		
81	DeltaT=abs(MTd-MTn);	
82	SNR=DeltaT/sigma;	

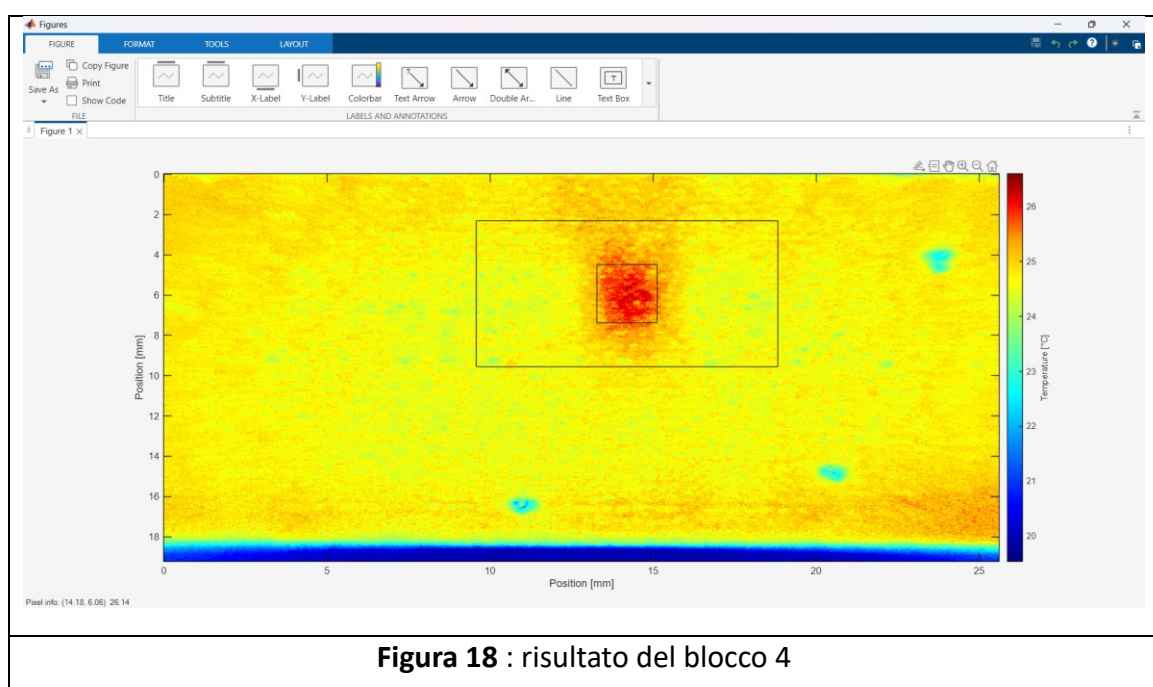
Figura 17 : algoritmo Matlab iniziale per il calcolo di SNR

Il **blocco 1** della **fig.17** (righe di codice 1-11) esegue la lettura e l'importazione della matrice **CSV** esportata da **FLIR studio** (riga 9) rilevandone e memorizzandone le dimensioni in pixel (righe 10 e 11). Viene anche inserita la risoluzione spaziale trovata nel paragrafo 3.3.1.

Il **blocco 2** (righe di codice 14-20) è dedicato alla definizione della **ROI_d**. L'utente è invitato ad inserire la posizione del **centro** della traccia termica del difetto tramite **dcx** e **dcy** e la dimensione del rettangolo della **ROI_d** tramite **rh** per l'altezza e **rw** per la larghezza del rettangolo.

Nel **blocco 3** (righe di codice 23-28) viene effettuata l'espansione dell'area del rettangolo della **ROI_d** tramite le righe 27 e 28.

Il **blocco 4** (righe di codice 31-44) riveste un ruolo centrale. Permette di visualizzare l'immagine termica grezza (RAW) letta dalla matrice **CSV** attraverso la riga di codice 31 e ad una mappa di colori caricata nella riga 32. La riga 31 esegue anche una conversione degli assi coordinati x (orizzontale) ed y (verticale) da pixel a millimetri; questo permette all'operatore di visualizzare le coordinate nell'immagine puntando il cursore del mouse, consentendo un posizionamento preciso dei rettangoli delle **ROI**. Il blocco 4 consente di visualizzare sul lato destro dell'immagine **RAW** una barra verticale con la scala dei colori della "customcolormap" (colorbar). Le coordinate in mm e la temperatura in °C corrispondenti al punto su cui si trova il puntatore del mouse vengono mostrate tramite il comando "impixelinfo". Infine il blocco 4 disegna i due rettangoli concentrici corrispondenti alle informazioni ottenute dai blocchi 2 e 3. Quanto appena detto è visualizzabile nell'immagine di **fig.18**.



Nei **blocchi 5, 6** (righe di codice 46-59) vengono svolti i passaggi che consentono di dimensionare correttamente le **ROI** espresse in millimetri. Nel **blocco 5** si lavora per creare la **ROI_d** e nel **blocco 6** si crea la **ROI** a cui si sottrarrà la **ROI_d** per ottenere **ROI_nd**.

Nel **blocco 7** (righe di codice 61-72) viene eseguita l'operazione di rimozione dell'area del difetto della **ROI_d** per ottenere la **ROI_nd** ponendo a zero tutte le informazioni contenute nella **ROI_d** nella riga di codice 72.

Infine nel **blocco 8** (righe di codice 75-82) si esegue il calcolo dell'**SNR**.

Questo algoritmo è ben scritto, estremamente funzionale ed è stato ampiamente usato per calcolare l'**SNR** di vari provini della campagna sperimentale dei 40 provini di questa tesi con risultati più che soddisfacenti. Tuttavia, sono emerse diverse aree di miglioramento tra cui la necessità di definire un criterio più oggettivo e svincolato dall'operatore per il dimensionamento delle ROI. Il codice di partenza, infatti, risultava idoneo per lo studio svolto in [1] dove tutti i difetti erano di forma circolare, orientati come i difetti "K" del presente set di 40 provini (quindi avevano una traccia termica relativamente contenuta), posizionati centrati rispetto all'altezza del provino e ben spaziati fra loro. L'uniformità della dimensione e della spaziatura dei difetti nei provini della ricerca di [1] ha reso relativamente semplice svolgere i calcoli e restare coerenti.

I difetti presenti nel set dei 40 provini analizzati in questa tesi, invece, hanno una varietà di dimensione e posizionamento molto più ampia. Essendo i difetti orientati secondo diverse direzioni, variano molto la dimensione che appare sulla superficie target, creando difficoltà nel trovare dei valori univoci dei moltiplicatori per passare da rh e rw ad rhn ed rwn per tutte le tipologie di difetto.

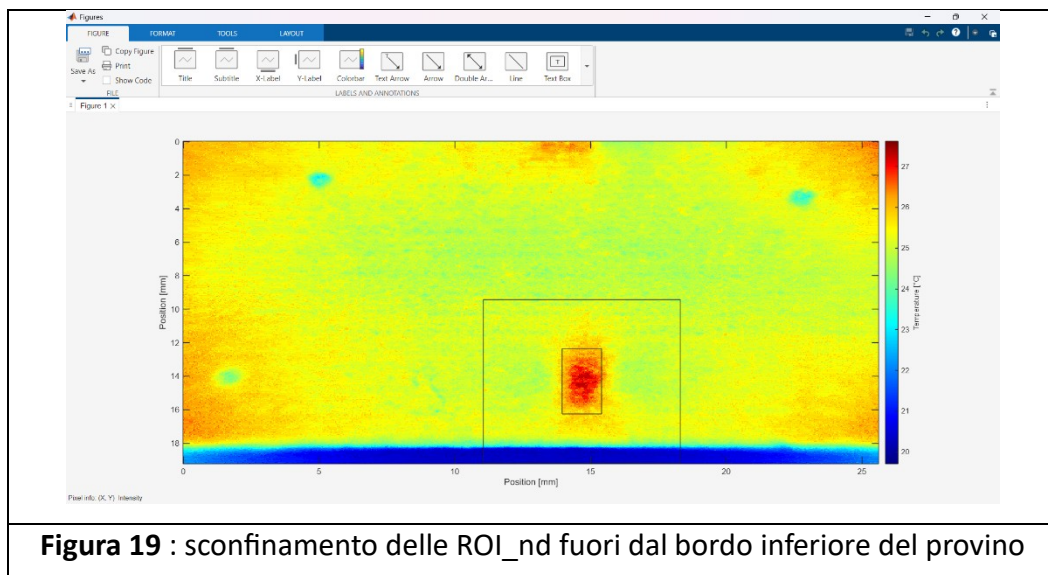
Si sottolinea come la scelta di utilizzare dei moltiplicatori fissi per tutti i difetti sia considerato un requisito di ripetibilità del calcolo di **SNR** ([18], [1]) che consente un paragone fra le misurazioni di **SNR** ottenuti per difetti diversi e fotogrammi diversi.

Durante la prima fase di calcolo degli **SNR** dei difetti è stata riscontrata la necessità di usare moltiplicatori alti per i difetti orientati lungo **K**, così da ottenere una popolazione di pixel statisticamente significativa all'interno delle **ROI**. Tuttavia tali moltiplicatori non potevano essere fisicamente rispettati per i difetti orientati lungo **J** e lungo **I**. Infatti è più volte capitato che si includessero zone di rumore marcato che alteravano il calcolo di **SNR** facendo ottenere $SNR < 1$ in difetti che, invece, erano sufficientemente visibili per essere misurati, portando a dei **falsi negativi** (scarti fittizi). E' anche capitato, per i difetti che si trovavano vicino ai bordi, di ottenere la fuoriuscita

della **ROI_nd** dai contorni del provino, generando l'interruzione del calcolo dell'**SNR** per questi difetti.

Il calcolo dell'**SNR** nel caso di sconfinamento della **ROI_nd** al di fuori del provino è stato necessariamente interrotto in quanto, a causa dell'inclusione nella **ROI_nd** di parte dell'ambiente circostante, i valori della **temperatura media** e della **deviazione standard** calcolati nella **ROI_nd** venivano del tutto falsati dalle temperature più fredde dell'ambiente, restituendo letture di **SNR** assolutamente prive di validità metrologica.

Il problema è stato affrontato, in un primo momento, dividendo i provini in tre gruppi in base al loro orientamento spaziale ed assegnando dei moltiplicatori idonei per ogni gruppo. Tuttavia il problema dello sconfinamento dei limiti del provino da parte della **ROI_nd** rimaneva per alcuni difetti, come mostrato nella **fig.19**.



Come possibile soluzione è stato proposto l'uso della variazione di **rwn** ed **rhn** in maniera tale da rientrare entro i confini del provino e da mantenere inalterato il valore numerico dell'area della **ROI_nd**.

Questa tecnica creava una marcata espansione in una particolare direzione, come riscontrabile dalla **fig.20** sottostante.

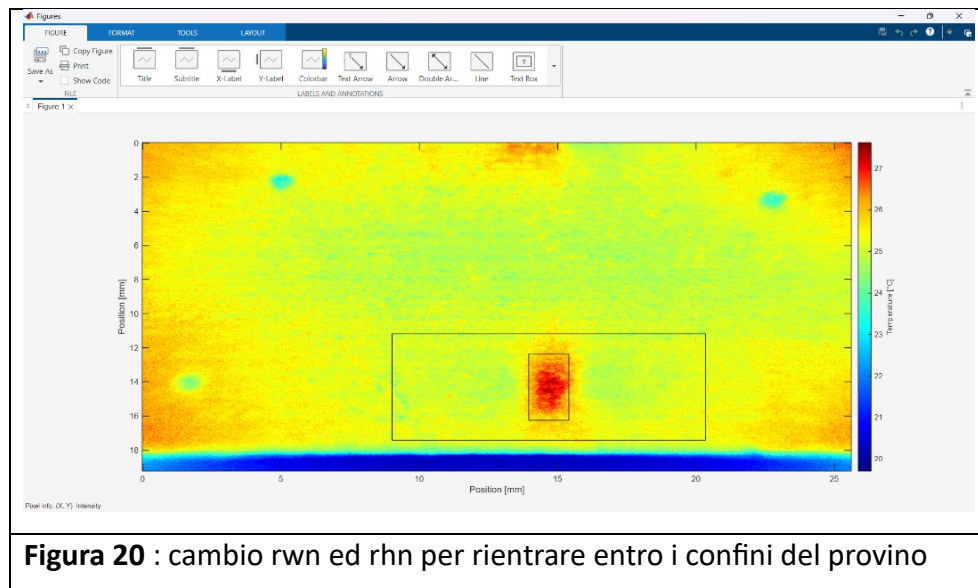


Figura 20 : cambio rwn ed rhn per rientrare entro i confini del provino

Il vero problema di questa tecnica era il seguente : sebbene le nuove dimensioni di **rwn** ed **rhn** garantissero lo stesso valore dell'area di **ROI_nd**, tale area si poteva ottenere scegliendo diverse combinazioni di **rwn** ed **rhn** e, per ognuno di questi valori, l'**SNR** misurato aveva valori molto diversi, riscontrando lo stesso problema esposto in [1] in merito alla notevole variazione di **SNR** con area e forma delle **ROI** scelte. Da quanto appena detto, il rischio di associare ad **SNR** degli indici privi di consistenza fisica era molto elevato.

Inoltre la creazione di direzioni preferenziali per l'espansione delle **ROI** è un fenomeno criticato da chi sceglie l'adozione di **ROI circolari** per il calcolo dell'**SNR** ([18]) poiché ritenuto un fattore di arbitrarietà.

L'adozione di **ROI** di forma circolare secondo le direttive di [18] è stata scartata perché non capace di risolvere i problemi precedentemente esposti.

Lo sviluppo del nuovo algoritmo per il calcolo dell'**SNR** è scaturito dall'osservazione sistematica di questa fenomenologia: l'impiego di moltiplicatori fissi per determinare **rwn** ed **rhn** talvolta includeva disturbi termici locali così marcati e particolari da abbattere il valore di **SNR**. In tali circostanze l'**SNR** di difetti chiaramente distinguibili all'osservazione visiva risultava più basso dell'**SNR** di difetti meno visibili. Questa discrepanza tra i valori di **SNR** dei due difetti si verificava a causa della presenza di zone di rumore marcato nella **ROI_nd** del difetto maggiormente distinguibile, mentre il difetto meno distinguibile aveva una **ROI_nd** termicamente più omogenea. Si è osservato che, cambiando i valori di **rwn** ed **rhn** verso valori ritenuti più adeguati per quella immagine, non solo l'**SNR** del difetto ben visibile cresceva, ma superava il valore di **SNR** del difetto meno visibile, ripristinando la coerenza fra

il valore di **SNR** con quanto visibile dall'operatore. Al contrario, per i difetti meno visibili, la modifica di **rwn** ed **rhn** non ha prodotto incrementi significativi di **SNR**, il che permette di dedurre che quei valori di **rwn** ed **rhn** fossero già prossimi ai valori ottimali per massimizzare l'**SNR** di quell'immagine usando la tecnica delle **ROI** rettangolari concentriche. Questo aspetto verrà ampiamente mostrato nel paragrafo 3.5.4.

In sintesi, la maggiore dimensione dei difetti lungo **J** e lungo **I** di questa campagna sperimentale ha mostrato i limiti applicativi dell'uso di **moltiplicatori fissi**. Per fare ulteriore chiarezza, la criticità riscontrata è analoga a quella derivante dall'usare come **ROI_{nd}** l'area ottenuta dalla differenza fra l'**area dell'intero provino** e la **ROI_d**. Seppur in tal caso non si abbia il problema dell'arbitrarietà della scelta dei coefficienti moltiplicativi di **rwn** ed **rhn**, la presenza di **disomogeneità termiche** nel provino altera l'effettiva oggettività dell'**SNR** riducendo la sua efficacia nel fornire una misura della qualità della rilevabilità di un difetto rispetto ad un altro.

In sostanza, maggiore è l'estensione di un difetto in proporzione alla dimensione del provino maggiore è la probabilità che, usando dei moltiplicatori fissi, si inglobino aree del provino rumorose che si discostano eccessivamente dalle zone limitrofe alla ROI_d.

Da questa evidenza sperimentale è scaturita la proposta di sviluppare un algoritmo ottimizzato per il calcolo dell'**SNR**, capace di selezionare autonomamente i valori di **rwn** ed **rhn** seguendo il criterio di massimizzazione dell'**SNR** di un frame quando calcolato con **ROI** concentriche di forma rettangolare il cui funzionamento verrà spiegato più avanti nel dettaglio.

3.5.2 L'algoritmo di partenza, stima dimensione del difetto

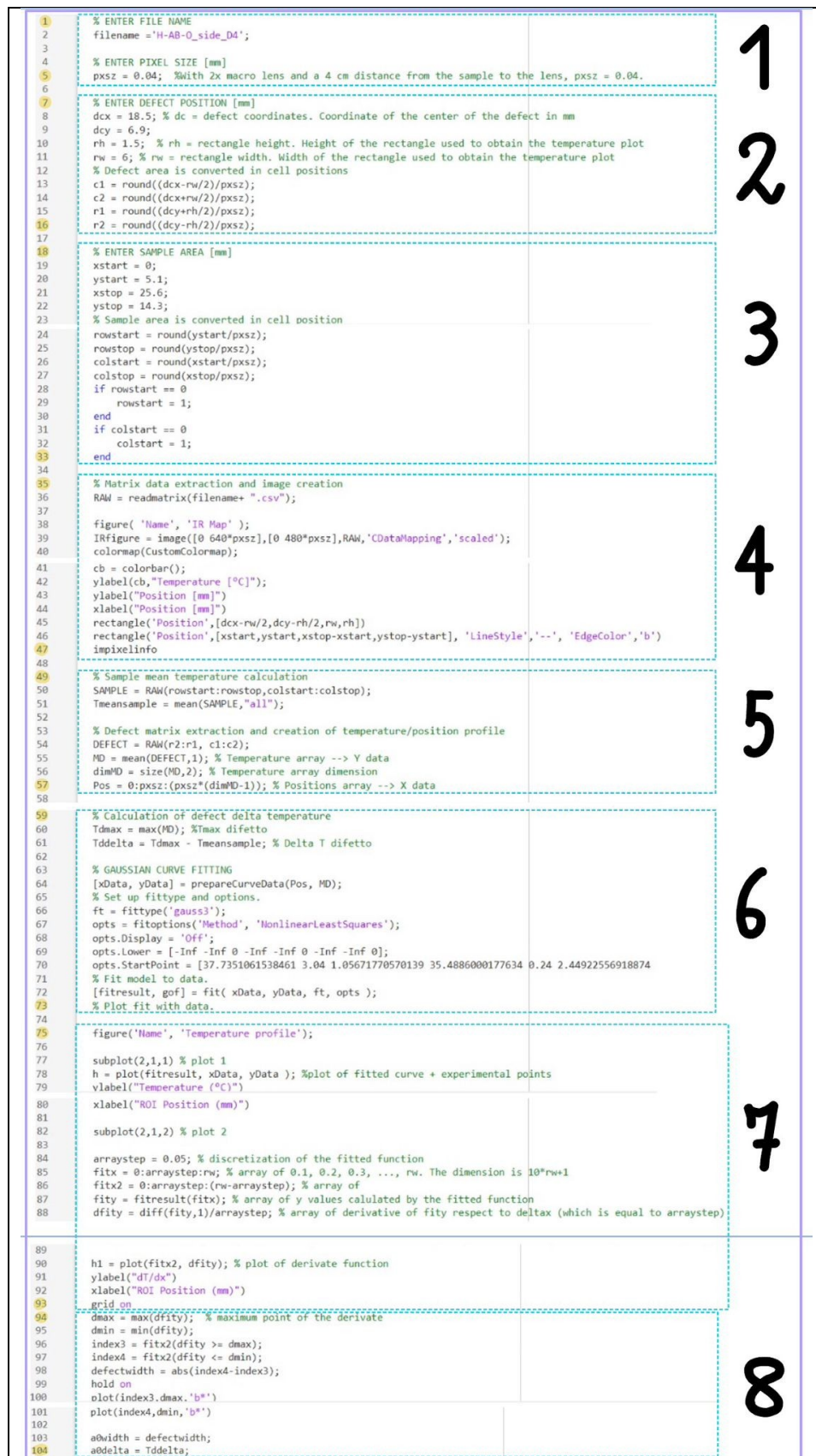


Figura 21 : algoritmo originale di stima della dimensione del difetto

Di seguito verranno analizzati i punti salienti dell'algoritmo di calcolo della dimensione del difetto lungo la direzione di scorrimento della corrente mostrato in **fig.21**.

Il **blocco 1** richiama il file **CSV** da analizzare e la **risoluzione spaziale** della termocamera nella specifica configurazione sperimentale.

Il **blocco 2** richiede all'utente due informazioni: la posizione del centro del difetto e la dimensione del **rettangolo di calcolo** tramite **rh** ed **rw**. Il **rettangolo di calcolo** è centrato sul centro del difetto ed è un'area importante perché da essa dipende l'**accuratezza e la ripetibilità** della stima della dimensione del difetto. In questo algoritmo **rh** ed **rw** devono essere inseriti manualmente dall'utente, con l'unica indicazione di scegliere **rw sufficientemente larga** per avere dei risultati soddisfacenti ed **rh** tale da delineare strettamente il difetto, come mostrato in **fig.22**. Si precisa anche come **rh** deve essere abbastanza grande da consentire di calcolare una media su un numero di pixel sufficientemente grande da non risentire dell'eccessiva influenza di fenomeni locali. L'inserimento manuale di **rh** ed **rw** è un fattore di arbitrarietà della misura. Durante l'uso di questo algoritmo **rh** ed **rw** venivano selezionati per tentativi successivi, scegliendo la coppia di valori in grado di restituire un grafico con una buona qualità della gaussiana che fornisse la rappresentazione più realistica di quanto rilevato dalla termocamera (**fig.22**).

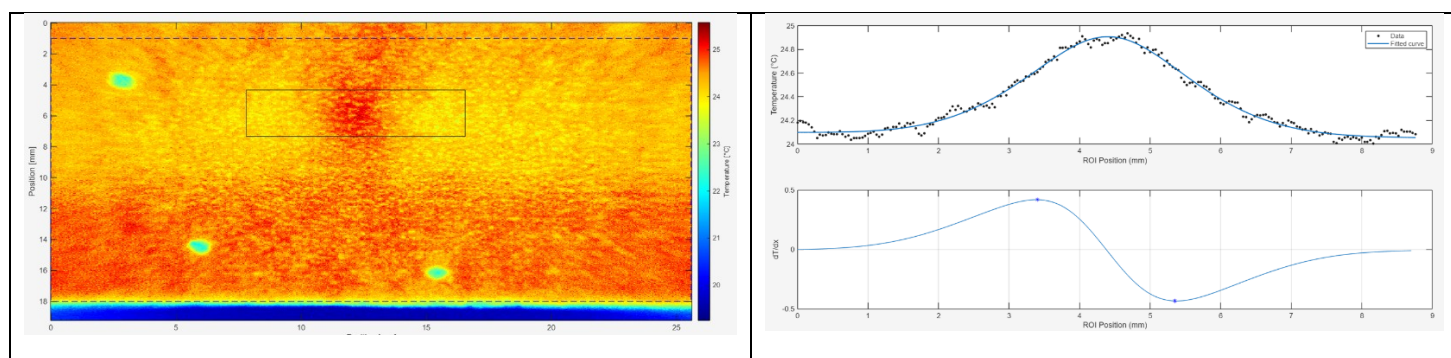


Figura 22 : esempio di **rw** ed **rh** ottimali per il rettangolo di calcolo

Il **blocco 3** serve a definire i limiti della "sample area", ovvero l'area utile del provino. In **fig.22** tale regione è delimitata graficamente da una linea tratteggiata di forma rettangolare.

Il **blocco 4** legge il file **CSV** fornito al punto 1 e lo converte in una immagine termica con l'ausilio di un mappa di colori (come per l'algoritmo di **SNR**).

Il **blocco 5** si occupa di calcolare la temperatura media del provino tramite la riga 51, di estrarre il difetto tramite la riga di codice 54 e di operare un calcolo della temperatura media entro l'area del difetto estratto in 54 (tale area è il **rettangolo di calcolo**). Nello specifico, le righe di codice 55, 56 e 57 eseguono una media per colonne della temperatura nel rettangolo di calcolo e creano un vettore riga. Tale vettore riga ha un numero di elementi pari al numero di colonne presenti nel rettangolo di calcolo su cui è stata svolta la media e, per ogni suo elemento, ha il valore della media della colonna corrispondente. Infine, questo vettore riga sarà direttamente collegato a delle posizioni fisiche in mm.

Il **blocco 6** esegue varie operazioni. Con le righe di codice 60 e 61 calcola quanto il difetto spicca termicamente rispetto al provino attraverso la grandezza denominata "**Tdelta**". **Tdelta** altro non è che una differenza fra la più alta temperatura media dentro la ROI e la temperatura media del provino, entrambe calcolate nel blocco 5. Il difetto produce una **cuspid termica** sulle medie delle temperature dei punti letti nel blocco 5, esattamente come visualizzabile seguendo i puntini neri nell'immagine di destra della **fig.22**. Questo fenomeno succede perché il difetto peggiora la conducibilità elettrica e termica del materiale, provocando un aumento di temperatura nell'area dove si trova. Il blocco 6 approssima questi punti con la somma di tre gaussiane mediante la riga di codice 66, mentre con la riga 67 si comanda di eseguire un fit non lineare che lavora iterativamente per minimizzare l'**errore quadratico**. Vengono anche impostati dei limiti inferiori per le tre gaussiane nella riga 69. Nello specifico si impone la **larghezza della gaussiana** ≥ 0 , ponendo il terzo termine (corrispondente alla larghezza della gaussiana) pari a 0, mentre per quanto riguarda **ampiezza** e **posizione del centro** della gaussiana vengono lasciate libere grazie alla scritta "-Inf". La riga 70 richiede l'inserimento di un punto di partenza da parte dell'utente per convergere al giusto fit. Infine la riga 72 esegue il fit, creando la curva blu del grafico della **fig.22** (fitted curve).

Il **blocco 7** esegue la rappresentazione grafica del profilo termico ed il calcolo della **derivata prima** della curva interpolata.

Il **blocco 8** crea e visualizza il grafico della **derivata** ed identifica i bordi del difetto. Infatti, i bordi del difetto sono quelli che causano la maggiore variazione della pendenza della funzione gaussiana. Per questo motivo i bordi del difetto vengono trovati in corrispondenza del massimo e del minimo della funzione derivata. La dimensione del difetto è pari alla distanza lungo la direzione **X** fra massimo e minimo della funzione derivata della gaussiana. Questa tecnica è abbastanza diffusa in termografia

e consente di superare la soggettività dell'individuazione della dimensione del difetto dalla sola lettura del grafico della gaussiana.

I problemi principali riscontrati in questo algoritmo sono i seguenti:

- 1) La scelta arbitraria dei parametri **rh** ed **rw** da parte dell'utente. L'utente, infatti, deve scegliere ed inserire **manualmente** tali valori dopo aver completato un **lungo** processo di ricerca della coppia di valori **rw** ed **rh** che fornisse la rappresentazione più realistica di quanto rilevato dalla termocamera. Si sottolinea come l'aspetto del tempo sia estremamente penalizzante qualora si debbano fare tante analisi come in questa tesi. Il nuovo algoritmo, invece, esegue in automatico i calcoli provando diverse coppie di **rw** ed **rh** e seleziona la coppia **rw-rh** secondo uno **schema di step progressivi** che verrà esposto nel paragrafo 3.5.4.
- 2) La riga 70 che richiede l'inserimento da parte dell'utente di un **punto iniziale** per poter avviare il processo di fitting. Questo aspetto viene fatto in automatico nel nuovo algoritmo.
- 3) Il calcolo della dimensione del difetto viene fatto solo in direzione **X**, tuttavia si può replicare l'esatto schema di calcolo per ottenere anche la misura in direzione **Y**. Il nuovo algoritmo include anche il calcolo della dimensione del difetto lungo la direzione **Y**.
- 4) Manca una parte ben articolata che salvi i dati in un programma che consenta di eseguire delle analisi statistiche successive dei risultati, come, ad esempio, Excel.

3.5.3 Strategia di ottenimento dell'algoritmo definitivo

Il nuovo algoritmo è stato sviluppato, sottoposto a debug ed ottimizzato in ambiente **Matlab**.

La procedura di ottimizzazione del codice è stata estremamente lunga ed ha seguito questo schema: si è operato, inizialmente, sui singoli tre algoritmi (calcolo **SNR**, dimensione difetto lungo **X** e lungo **Y**) per poi unirli e testare il funzionamento dell'algoritmo unico.

Il primo algoritmo che è stato migliorato è quello per il calcolo dell'**SNR**. Tale algoritmo è stato provato su tutti e 40 i provini. Ogni qual volta si presentava un provino che dava anomalie di calcolo o errori di esecuzione, si procedeva a capire le motivazione degli errori e a risolverli. Infine sono state registrate in modo sistematico le coordinate dei centri termici dei difetti ed i valori di **SNR** misurati. Una volta ottimizzato l'algoritmo del calcolo di **SNR** si è proceduto all'ottimizzazione dell'algoritmo per la misura del difetto in direzione **X** seguendo la stessa identica logica. Tale algoritmo è stato

ottimizzato partendo dai difetti che avevano mostrato **SNR** più alto, per poi andare ad analizzare anche i rimanenti difetti con **SNR** più basso.

Una volta ottimizzato l'algoritmo di misura della dimensione del difetto in direzione **X**, si è proceduto a replicarlo esattamente in direzione **Y**. La direzione **Y**, ortogonale alla corrente, si è dimostrata più difficile da elaborare rispetto alla direzione **X**, questo principalmente a causa dei gradienti di temperatura indotti dal difetto meno marcati e della estrema vicinanza ai bordi di alcuni difetti, fatto che ha limitato la scelta possibile delle coppie di **rw** ed **rh** per ottimizzare il fitting.

Infine i singoli algoritmi sono stati integrati in un unico codice principale. Un aspetto fondamentale per il corretto funzionamento dell'algoritmo unico è stato garantire che la ricerca di **rw** ed **rh** ottimali per la direzione **X** e la direzione **Y** fosse disaccoppiata, ovvero che venissero calcolate le coppie ottimali per la direzione **X** e la direzione **Y** in maniera indipendente. La parte di algoritmo per il calcolo di **SNR** è stata messa per prima ed usata come un filtro, bloccando il calcolo della dimensione del difetto quando **SNR**<1.

Una volta completato il test del programma unico è stata integrata una routine di esportazione che salvasse tutti i risultati più importanti su un foglio Excel.

3.5.4 Dettagli dell'algoritmo definitivo

La prima parte dell'algoritmo riveste molta importanza ed è anche l'unica parte dove l'operatore deve inserire dei dati manualmente.

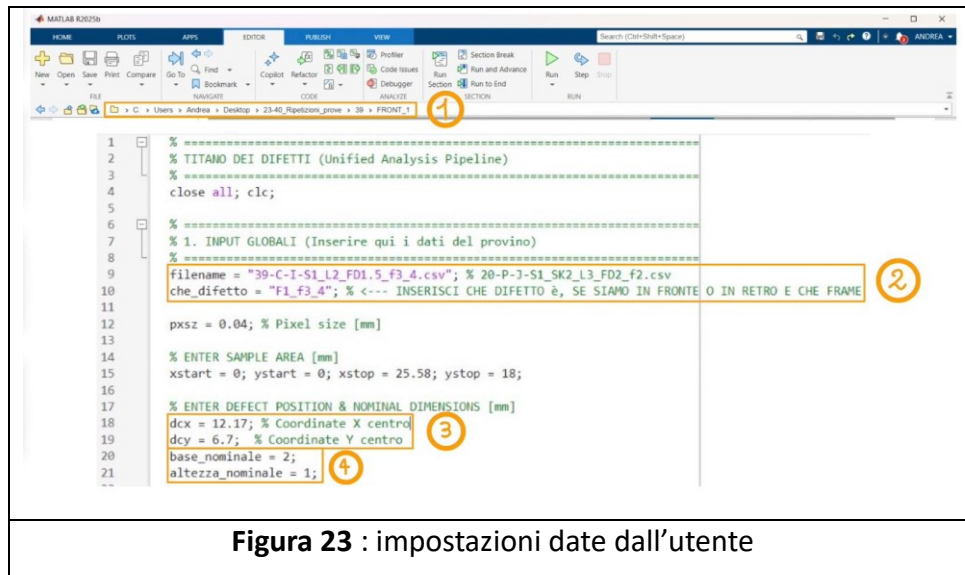


Figura 23 : impostazioni date dall'utente

Come prima cosa l'operatore deve settare il percorso corretto delle cartelle di lavoro come mostrato nel punto 1 della **fig.23**.

Questo aspetto sfrutta appieno l'organizzazione delle matrici **CSV** mostrata in **fig.15** del paragrafo 3.4.3 e consente di ridurre gli errori di distrazione sulla corretta scelta del file **CSV**, dato che il programma si avvia solo se il numero del provino, del difetto e la vista del difetto coincidono con la corretta ubicazione del file **CSV** corrispondente.

Si riporta come sia più volte capitato che, l'aver settato correttamente le cartelle di lavoro, ha prevenuto l'elaborazione di un **CSV** diverso da quello corretto, come mostrato in **fig.24**.

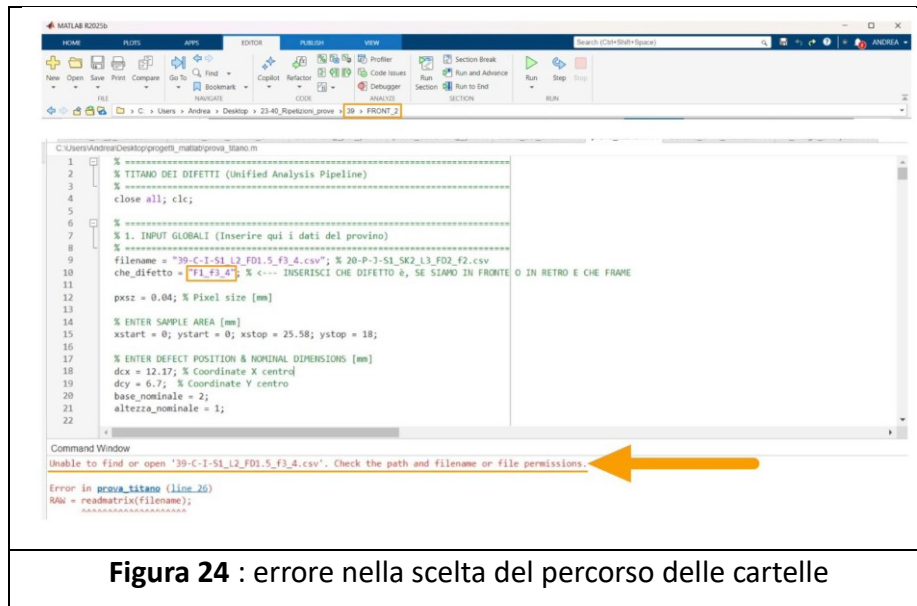


Figura 24 : errore nella scelta del percorso delle cartelle

Come secondo passaggio l'operatore dovrà fornire il **nome** del file nella riga 9 e la **sigla** che identifica il difetto, la vista ispezionata, frame in analisi e ripetizione della ripresa nella riga 10.

Il secondo passaggio è fondamentale per la corretta creazione delle cartelle dove saranno salvate le immagini dei grafici dei calcoli per le dimensioni del difetto lungo **X** e **Y** e di **SNR**, come mostrato in fig.25. Infatti il programma estrae il numero del provino dal nome del file fornito ed userà il testo scritto nella riga 10 per nominare le cartelle.

```

9 filename = "20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f2_1.csv"; % 20-P-J-S1_SK2_L3_FD2_f2.csv
10 che_difetto = "R2_f2_1"; % <--- INSERISCI CHE DIFETTO è, SE SIAMO IN FRONTE O IN RETRO E CHE FRAME
11

```

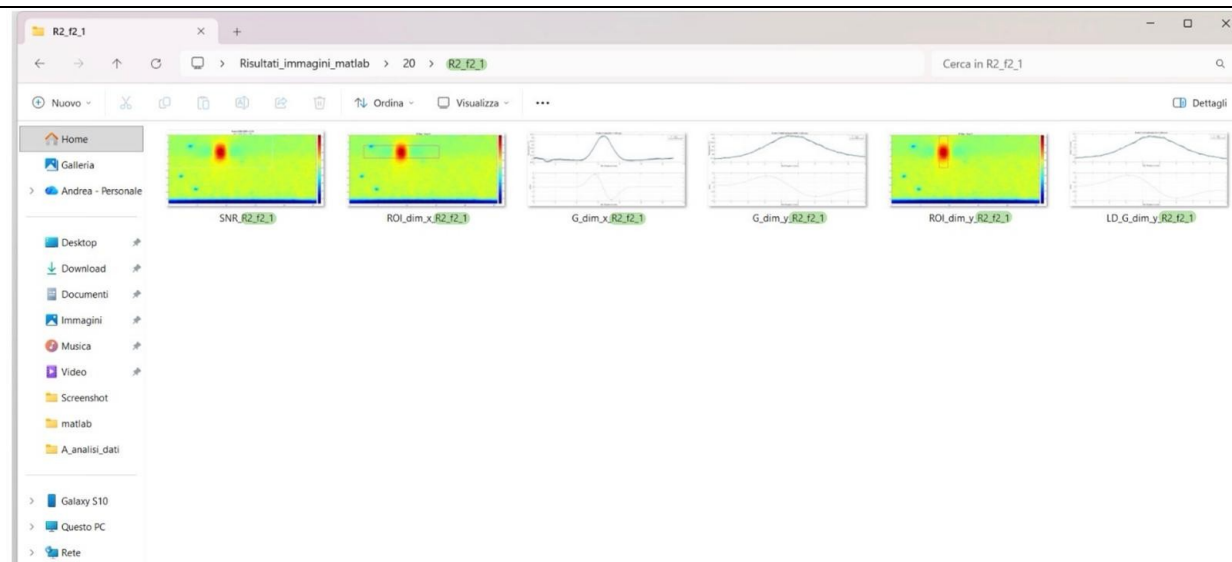
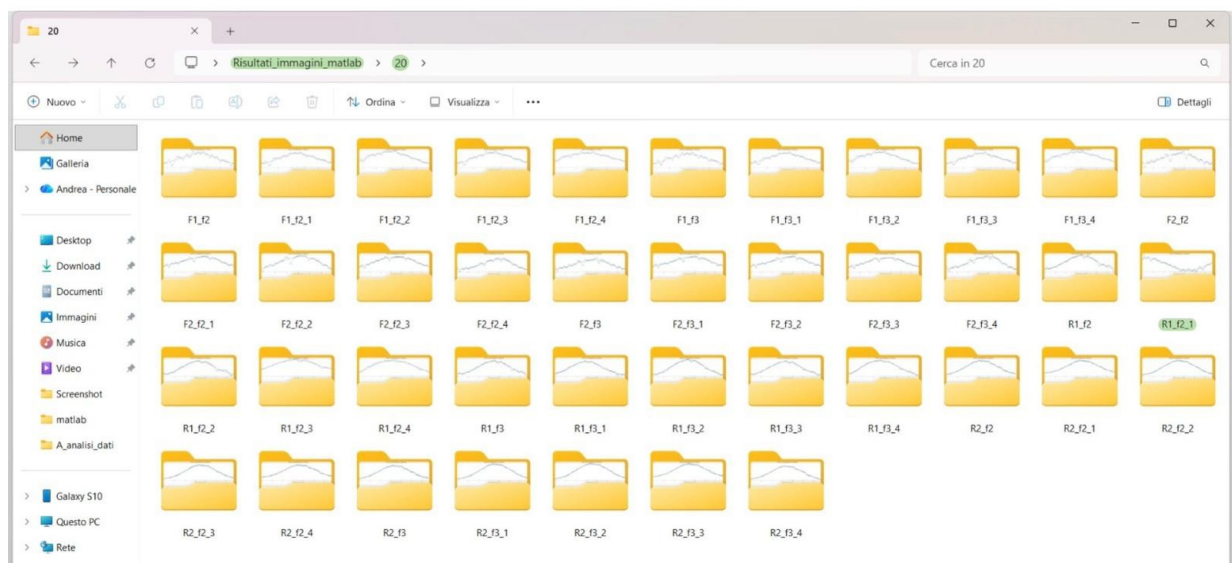
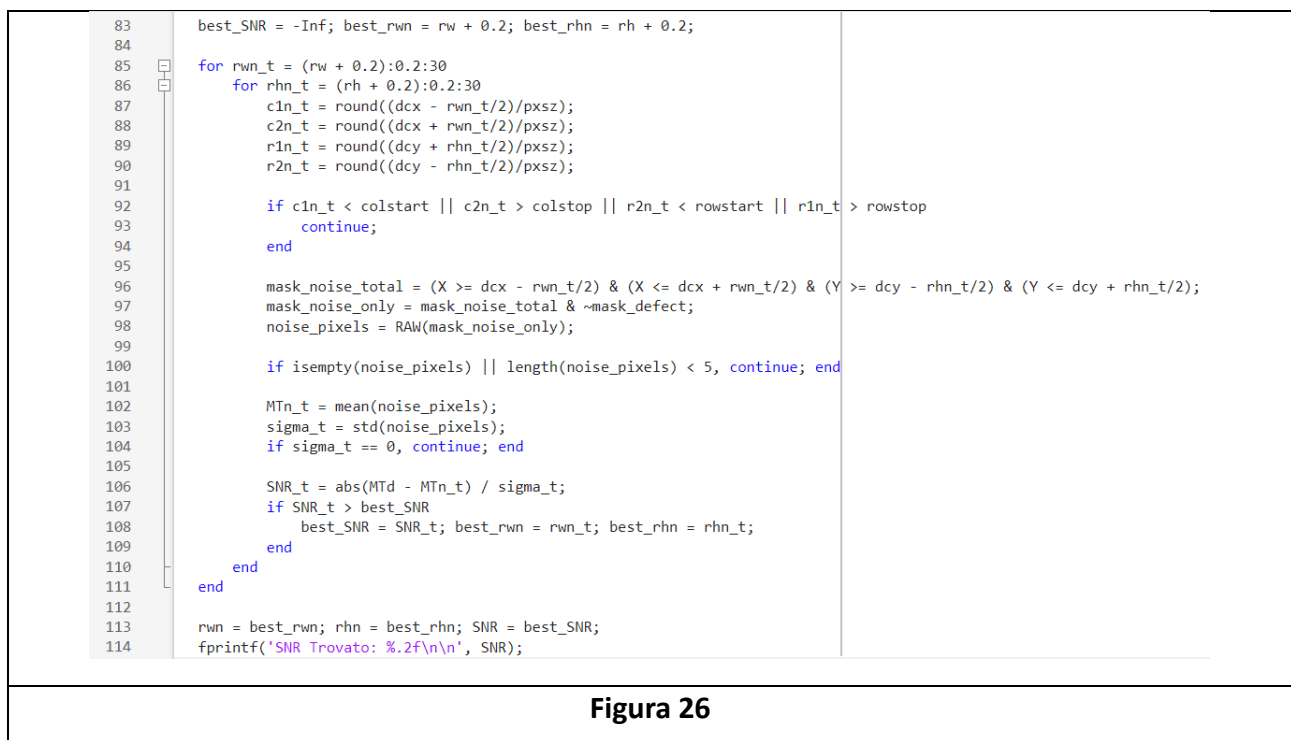


Figura 25 : schema salvataggio grafici

Infine l'operatore dovrà solamente inserire le coordinate del **centro termico del difetto** e le dimensioni nominali del difetto prese dal **CAD** e, dopodiché, da questo punto in poi, l'elaborazione procede in modalità automatica. L'aspetto della necessità di conoscere a priori la dimensione del difetto tramite il modello **CAD** sicuramente rappresenta un limite operativo del codice attuale, tuttavia lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di ampliare la conoscenza sulla materia, per questa ragione non è stato svolto un lavoro che provasse a trovare in autonomia il centro e la dimensione della traccia termica, tuttavia questo aspetto è sicuramente un tema interessante che si potrebbe

studiare negli sviluppi futuri. Un'altra possibile alternativa potrebbe consistere nel settaggio, di primo tentativo, della dimensione dei difetti tipica della tecnica di produzione che più si avvicina alla dimensione della traccia termica del difetto.

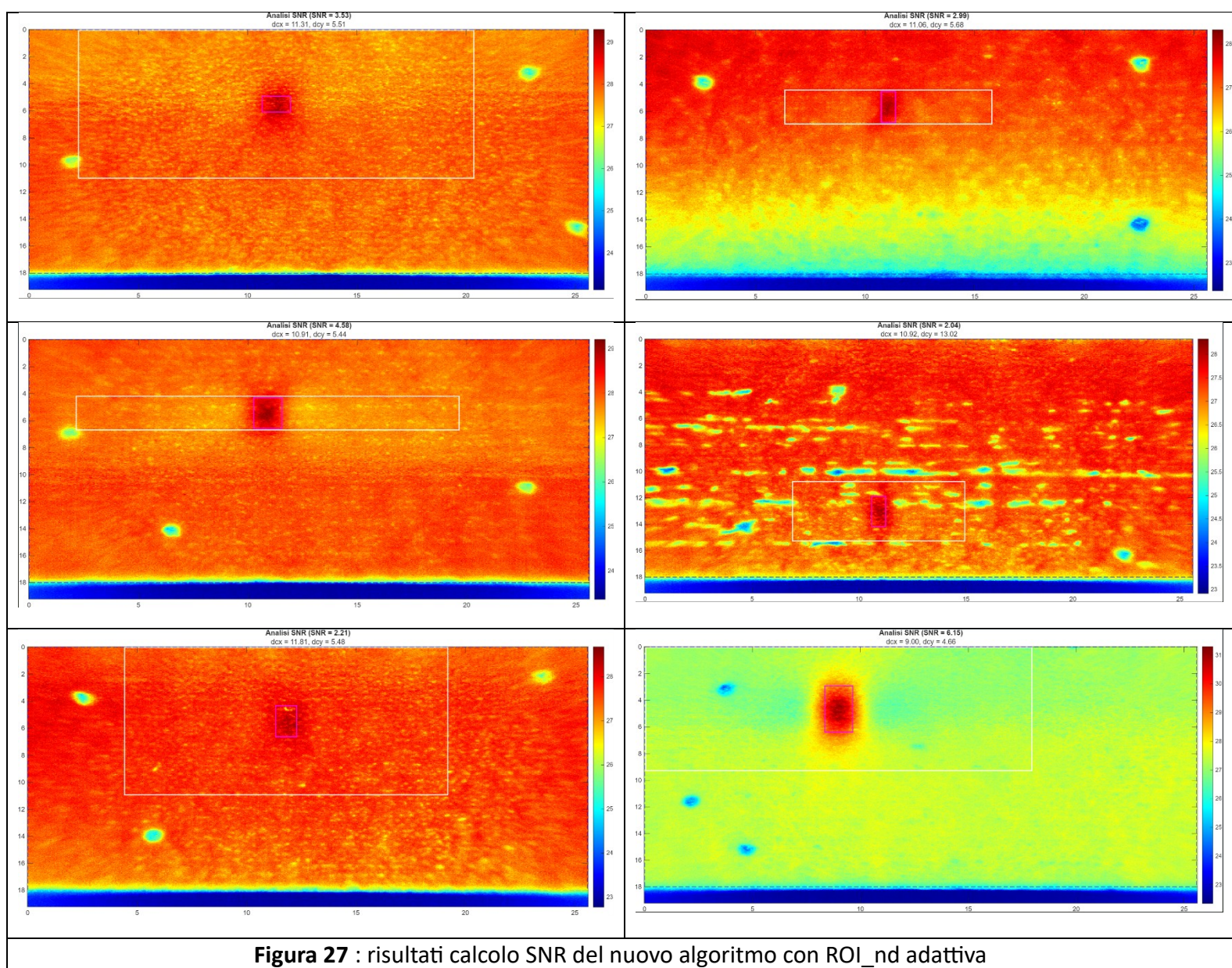
L'algoritmo procederà alla creazione della **ROI_d** applicando un'espansione alle dimensioni nominali del difetto fornite dall'utente. Nello specifico viene ampliata del **30%** la **base nominale** e del **15%** l'**altezza nominale**. Questa espansione serve a contenere entro la **ROI_d** anche le tracce termiche originate dal difetto che si sono espanse a causa della **diffusione termica**, evitando che vadano a inquinare la **ROI_nd**. La scelta di ampliare maggiormente la base rispetto all'altezza dipende dal fatto che la dimensione della base del difetto, tende ad ampliarsi lungo la direzione di scorrimento della corrente.



In **fig.26** vengono mostrati i passi del nuovo algoritmo di calcolo dell'**SNR** che consentono di impostare i vincoli geometrici del provino, atti a prevenire lo sconfinamento delle ROI, ed i cicli di ottimizzazione che scelgono i valori di **rwn** ed **rhn** tali che l'**SNR** sia massimizzato. Si parte da **rwn** e **rhn** che sono incrementati di 0,2 mm rispetto a **rw** e **rh** e si analizzano, mediante ciclo for annidato, le varie combinazioni di **rwn** ed **rhn** ed i relativi valori di **SNR** prodotti. I valori di **rwn** ed **rhn** hanno un limite di dimensione massima di 30 mm ed hanno uno step di crescita di 0,2 mm.

Questo approccio consente di confrontare oggettivamente gli SNR calcolati per diversi difetti e diversi fotogrammi sulla base del massimo SNR estraibile usando un sistema di ROI concentriche e di forma rettangolare.

In **fig.27** sono riportati alcuni risultati di **SNR** ottenuti con il nuovo algoritmo.



In **fig.28** viene mostrato un caso in cui il nuovo algoritmo ha fornito una lettura di **SNR** più realistica rispetto al precedente metodo di calcolo con moltiplicatori fissi. La **fig.28** confronta il frame 2 del difetto 1 in vista frontale del provino 26 (B, D, F) con il frame 2 del difetto 1 in vista frontale del provino 7 (A, C, E). Come si può notare da un confronto fra le immagini estratte da **FLIR studio** A e B

della **fig.28**, l'immagine B del provino 26 ha il difetto che presenta una visibilità e una definizione nettamente superiori rispetto al difetto del provino 7. Ciononostante, col vecchio algoritmo che usava dei moltiplicatori per i difetti lungo J fissi pari a $rwn=5rw$ e $rhn=2.5rh$ si otteneva, paradossalmente, **SNR=1.65** per il difetto del provino 7, contro **SNR=1.49** del provino 26 (immagini C e D).

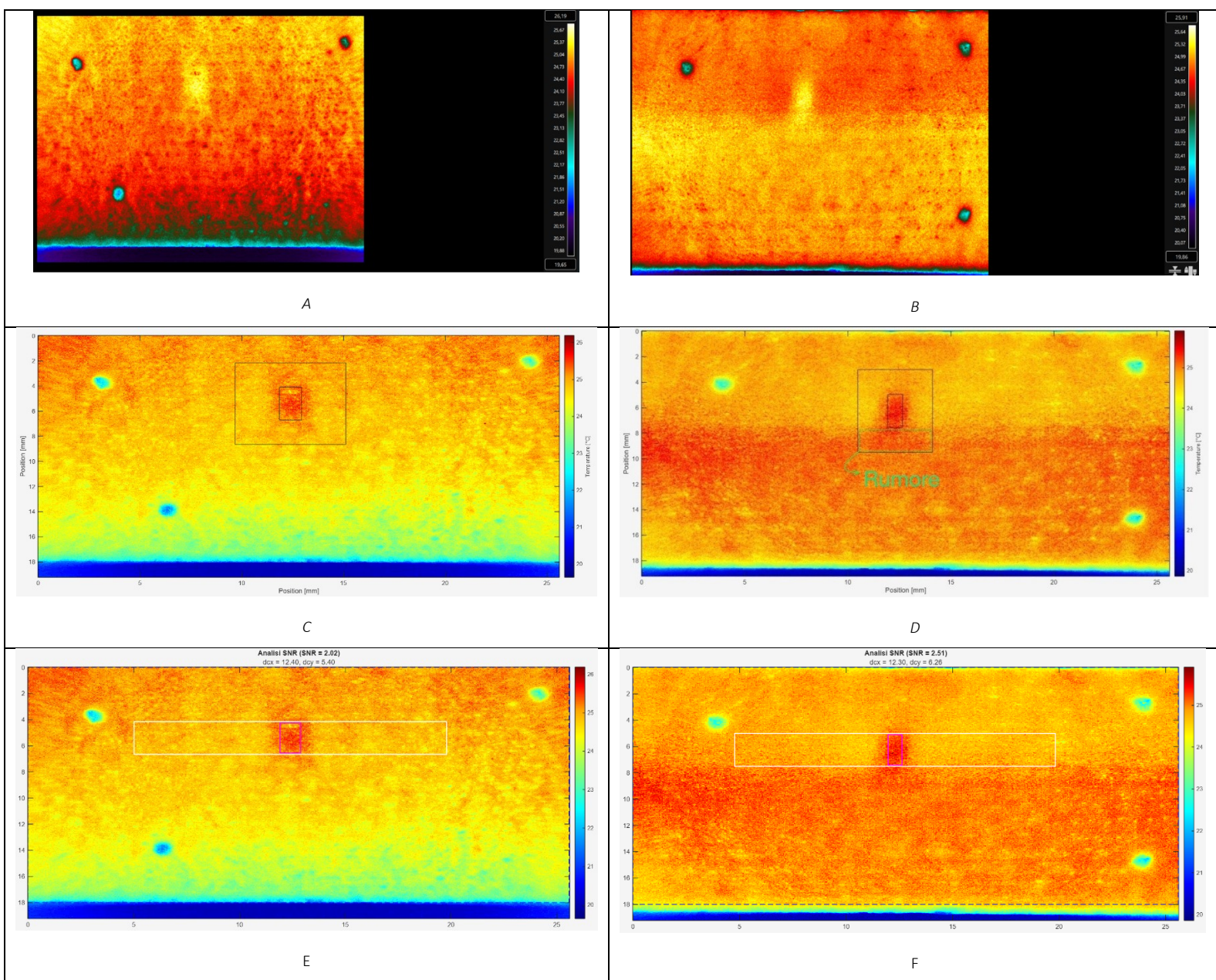


Figura 28

Come si può notare dal confronto fra le immagini E ed F di **fig.28**, ottenute con il nuovo algoritmo, entrambi gli **SNR** sono aumentati, con l'**SNR** del difetto del provino 7 pari a 2.02, mentre l'**SNR** del

difetto del provino 26 diventa pari a 2.51. Tuttavia il provino 26 ottiene un **SNR** più alto di 0.49 sul difetto del provino 7, grazie ad una **ROI_nd** che ha evitato le zone di rumore. Risulta così ripristinata la coerenza visiva con i risultati delle misurazioni di **SNR**. Questo esempio dimostra come l'uso di moltiplicatori fissi di espansione delle ROI non corrisponda ad una effettiva capacità di confronto oggettivo fra **SNR** di difetti diversi a causa della notevole influenza che il rumore ha sul calcolo di **SNR**. In conclusione il nuovo algoritmo non solo ripristina la **coerenza visiva** con le immagini **RAW** di FLIR studio, ma consente di impiegare l'**SNR** del fotogramma come parametro metrologico affidabile di paragone per stabilire se un difetto sia più rilevabile di un altro mediante termografia. Inoltre il nuovo algoritmo aumenta l'affidabilità dell'uso di **SNR** come criterio per lo scarto automatico delle misurazioni con **SNR<1**.

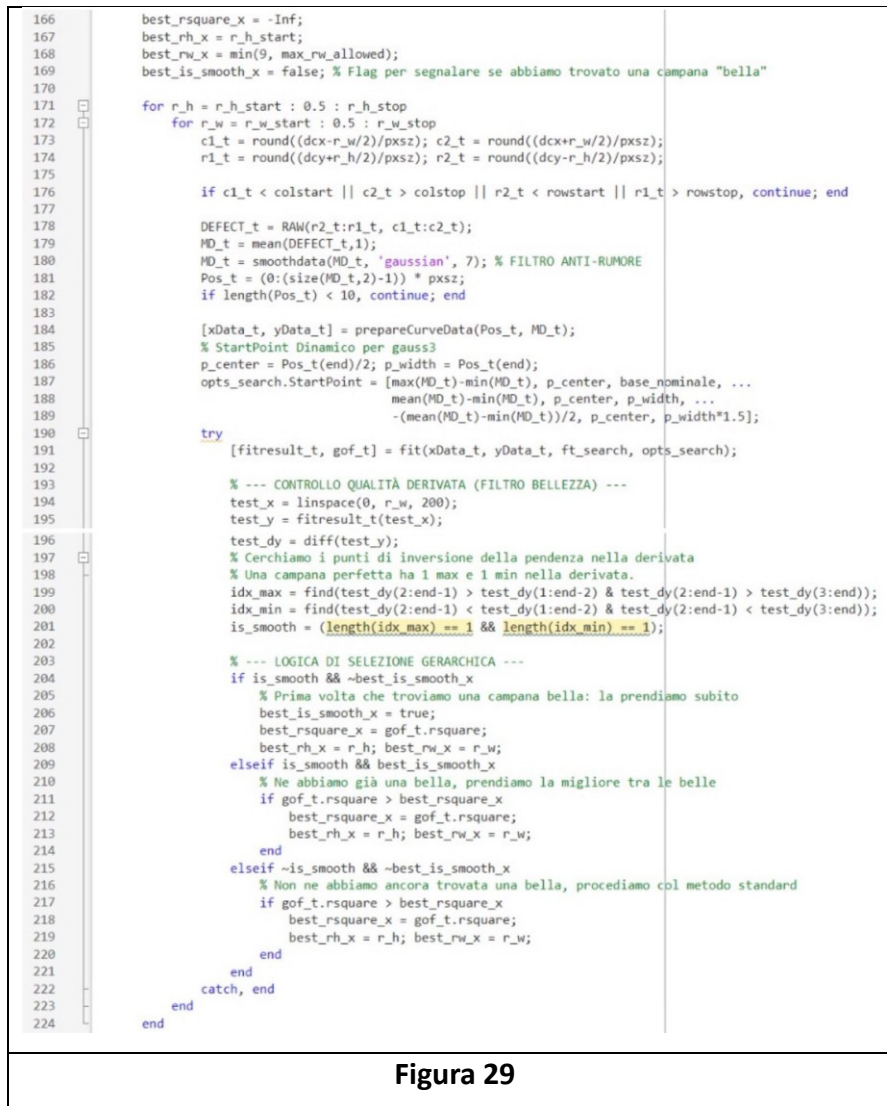


Figura 29

In **fig.29** vengono mostrati i passaggi fondamentali della logica di funzionamento della **ricerca adattiva** delle dimensioni della regione del **rettangolo di calcolo** per la stima dimensionale del difetto. Il codice varia sistematicamente la larghezza **rw** e l'altezza **rh** del **rettangolo di calcolo** e, per ogni combinazione, esegue il **fit gaussiano a tre termini** scegliendo in maniera autonoma il punto di partenza necessario ad avviare il processo di fitting. Il nuovo algoritmo esegue in automatico i calcoli provando diverse coppie di **rw** ed **rh** e seleziona la coppia **rw-rh** secondo il seguente schema a step progressivi:

- Il **primo step** consiste in una prima selezione di coppie di **rw** ed **rh** che rispettino quei requisiti che l'utente era tenuto a ricercare manualmente nell'algoritmo originale per garantire una rappresentazione realistica di quanto rilevato dalla termocamera (ovvero catturando la vera firma termica del difetto). Tali requisiti sono: una lunghezza del **rettangolo di calcolo** più ampia nella direzione lungo la quale si vuole effettuare la misura del difetto ("lato lungo") ed una dimensione della **ROI** più contenuta lungo la direzione ortogonale alla precedente ("lato corto"), così da circondare il difetto. La **tabella 3** mostra i limiti dimensionali impostati nell'algoritmo per gli intervalli di ricerca dei lati del rettangolo di calcolo **rw** e **rh**.

Direzione di misura	Tipo di lato	Asse geometrico	Variabile	Valore di inizio (Minimo)	Valore di fine (Massimo)	Step di ricerca
Misura su X (<i>width</i>)	Lato lungo	Asse X (larghezza)	rw	7 mm	16 mm	0,5 mm
	Lato corto	Asse Y (altezza)	rh	1 mm	altezza_nominale * 1.3	0,5 mm
Misura su Y (<i>height</i>)	Lato lungo	Asse Y (altezza)	rh	altezza_nominale * 1.5	9,3 mm	0,5 mm
	Lato corto	Asse X (larghezza)	rw	0,5 mm	base_nominale * 2	0,5 mm

Tabella 3

La direzione di misura **Y** ha un limite dimensionale massimo inferiore (pari a 9,3 mm contro i 16 mm della direzione **X**) a causa della vicinanza di molti difetti ai bordi orizzontali del provino (per non uscire al di fuori dei confini del provino con la ROI). La **circonscrizione del difetto** svolta dall'algoritmo viene eseguita selezionando una lunghezza che garantisca sempre un numero sufficiente di pixel per evitare che fenomeni locali influenzino le medie delle temperature, ma che, allo stesso tempo, non superi significativamente la traccia termica del difetto, così da non includere nel calcolo delle temperature medie le zone di provino non influenzate dal difetto. Per questo motivo, come osservabile in **tabella 3**, si sono impostati dei valori di minimo e di massimo per ogni intervallo dimensionale, con particolare attenzione agli intervalli dei "**lati corti**". L'incremento di **rw** ed **rh** dalle dimensioni minime viene fatto mantenendo un passo fisso di incremento pari a 0,5 mm. Questi intervalli di minimo e massimo sono stati ottimizzati empiricamente elaborando tutti i 40 provini della campagna sperimentale;

- **Il secondo step** opera scegliendo, fra le coppie di valori **rw-rh** selezionate al punto precedente, tutte quelle coppie che forniscono una corretta forma per la gaussiana interpolante, attraverso una valutazione effettuata analizzando l'andamento della sua funzione derivata;
- **Il terzo ed ultimo step** seleziona, fra le coppie di valori **rw-rh** ottenute al precedente punto, una coppia che fornisce il miglior fitting dei punti sperimentali da parte della funzione gaussiana interpolata;

Per ogni coppia di valori **rw** ed **rh** trattata l'algoritmo analizza l'andamento della derivata della funzione gaussiana ottenuta dall'operazione di fitting, valutando positivamente tutte le curve la cui derivata presenta un massimo ed un minimo internamente all'intervallo di spazio considerato dal rettangolo di calcolo.

Qualora vi siano più curve con la derivata che rispetta tale criterio, allora l'algoritmo seleziona quella con il **coefficiente di determinazione** più elevato **poiché rappresentativo dell'ottenimento di un livello di rumore inferiore** e di un miglior fitting della gaussiana sui dati sperimentali.

Infine, nel caso in cui a causa della presenza di rumore elevato non venga trovata nessuna **ROI** che rispetti la richiesta sull'andamento della derivata, il programma seleziona in via subordinata la coppia

di valori di **rw** ed **rh** che garantiscono il **coefficiente di determinazione** più alto. In **fig.30** sono riportati alcuni risultati del nuovo algoritmo.

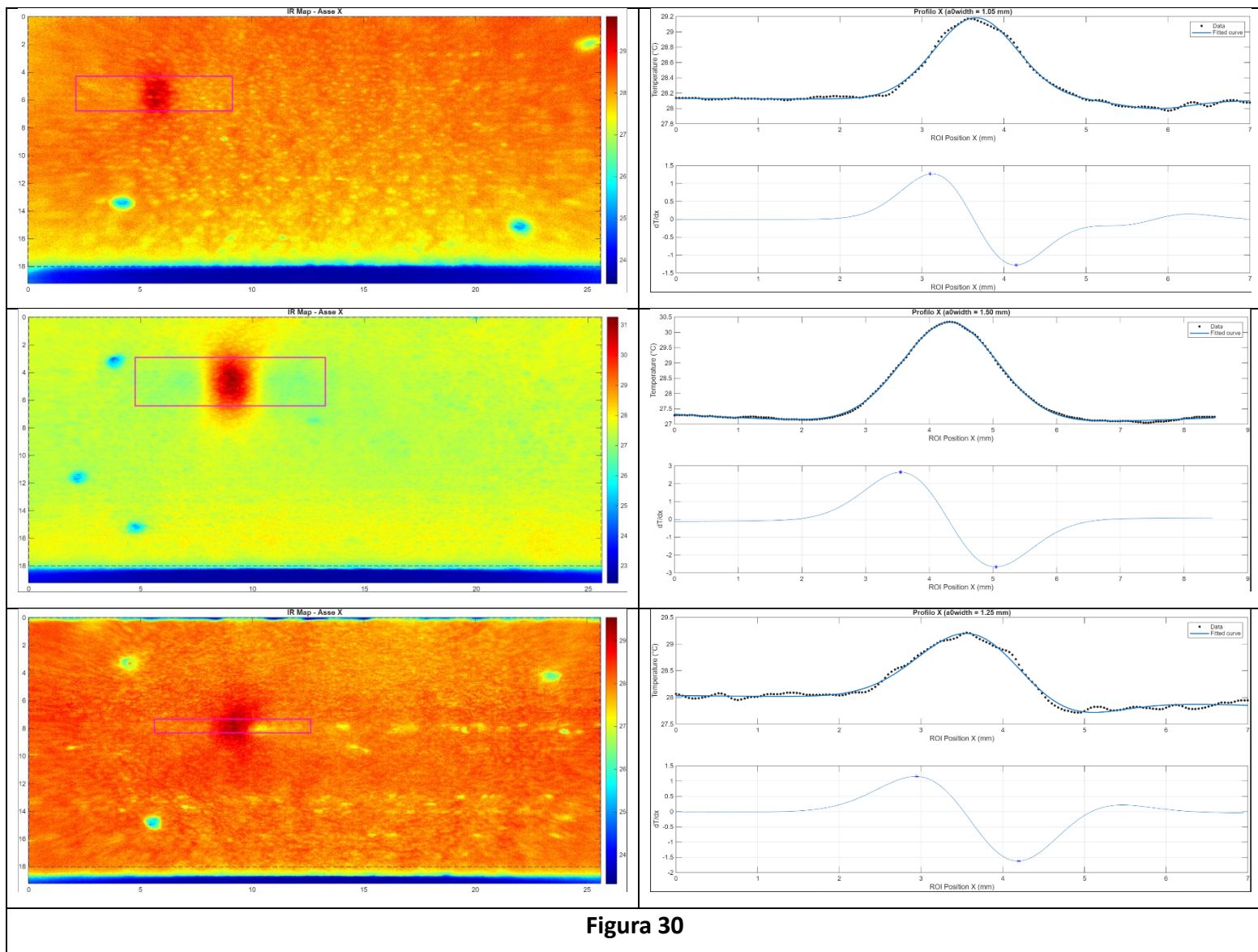


Figura 30

Per riuscire a fornire delle stime coerenti anche nei casi di più difficile lettura, ovvero per tutti quei casi che hanno **profili termici** reali che si discostano significativamente dalla forma di una gaussiana ideale, il programma non si limita solo alla misura della distanza fra massimi e minimi assoluti della funzione derivata, ma controlla se esistono dei massimi e minimi locali interni all'intervallo e, nel caso, misura la distanza fra loro, come mostrato per il minimo della funzione derivata in **fig.31**.

Si conclude sottolineando come lo schema a **step progressivi**, grazie all'aggiunta degli step due e tre, consente di selezionare la coppia di valori **rw-rh** in modo più preciso, oggettivo e ripetibile.

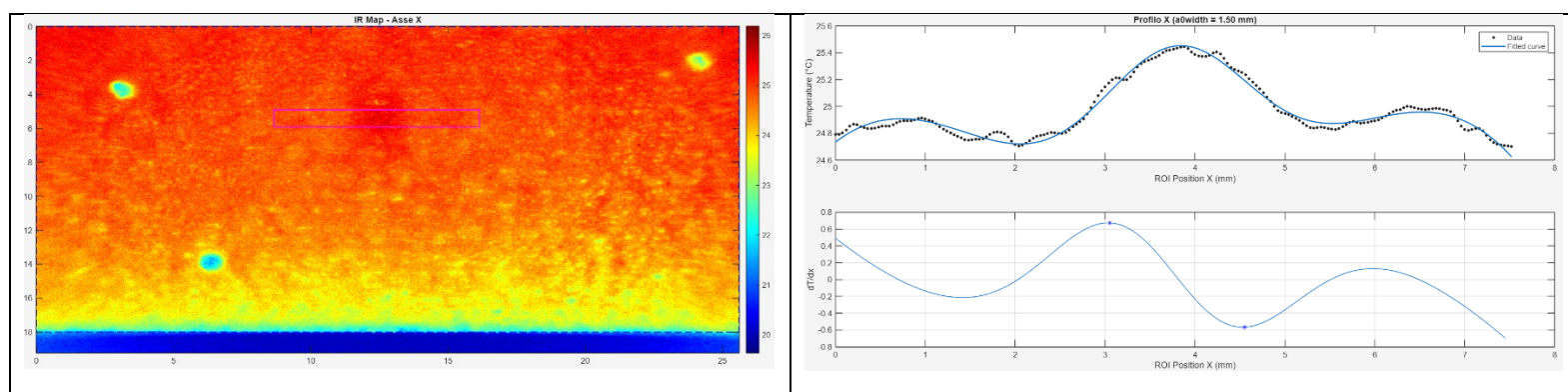


Figura 31

Come già introdotto, il nuovo algoritmo dispone di una sezione di codice per il calcolo della dimensione del difetto lungo la direzione **Y**, ortogonale alla direzione di scorrimento della corrente. Per il calcolo della dimensione del difetto lungo la direzione **Y** la logica di selezione dell'area del **rettangolo di calcolo**, così come la logica di estrazione del profilo di temperatura, è la stessa del caso di misura lungo la direzione **X**. Vengono tuttavia implementati alcuni accorgimenti specifici al calcolo lungo la direzione **Y**. Il **rettangolo di calcolo** dovrà disporre di un'altezza sufficientemente ampia per consentire il tracciamento di un adeguato profilo di temperatura per la lettura della dimensione del difetto (esattamente come per il calcolo lungo la direzione **X** dove bisognava garantire che la dimensione della base del rettangolo di calcolo fosse sufficientemente estesa). Le dimensioni di **rw** ed **rh** del rettangolo di calcolo sono scelte in maniera indipendente dal caso di calcolo lungo la direzione **X**. La media della temperatura dei pixel nella **ROI** per il calcolo della dimensione del difetto lungo **Y** viene fatta, riga per riga, su tutti i pixel che si trovano lungo la direzione **X** entro lo spazio delimitato dalla base del rettangolo di calcolo.

La misura della dimensione del difetto lungo la direzione **Y** è risultata particolarmente critica a causa di due fattori: la vicinanza di alcuni difetti ai bordi del provino ed i gradienti termici indotti dal difetto meno marcati rispetto a quelli riscontrati lungo la direzione **X**.

Per quanto concerne l'estrema vicinanza del difetto ai bordi, la conseguenza è una minore libertà di scelta delle dimensioni della **ROI**. Questo limite fisico nella scelta della coppia di valori di **rw** ed **rh** del rettangolo di misura è un limite oggettivo e non risolvibile via software.

Il gradiente termico lungo **Y** causato dal difetto meno pronunciato è dovuto essenzialmente al fatto che la temperatura di sfondo del provino misurata in questa direzione presenta una variabilità intrinseca maggiore rispetto a quella rilevata lungo la direzione **X**. In sostanza un provino privo dei

difetti intenzionalmente realizzati, tipici di questa campagna sperimentale, mostrerebbe, se così ispezionato, una temperatura relativamente uniforme lungo i pixel di una stessa riga, mentre avrebbe una certa variazione di temperatura fra i pixel di una stessa colonna.

Per questo motivo, dato che i contributi del gradiente termico indotto dal difetto si sommano alle naturali variazioni di temperatura lungo **Y**, la **visione dell'anomalia termica indotta** dalla presenza del difetto è di più difficile lettura.

Alla variazione di temperatura lungo **Y** contribuisce anche la **modalità di acquisizione** del sensore della termocamera. La termocamera **FLIR A700** ha una risoluzione di **640x480 pixel** e non misura la temperatura simultaneamente su tutti i suoi 307200 pixel, ma esegue una **lettura sequenziale** riga per riga (ovvero 640 pixel alla volta per 480 righe, processo che prende il nome di **rolling shutter**).

Per quanto tale processo di acquisizione avvenga velocemente, il fenomeno dello scambio termico continua a evolversi e, pertanto, inevitabilmente, le righe lette per ultime avranno più tempo per riscaldarsi rispetto alle prime.

Questa modalità di lettura introduce un gradiente termico fittizio nel provino lungo la direzione **Y**.

Per questo motivo si è applicato un algoritmo standard di **linear detrending** sui profili di temperatura con l'intento di valutarne l'efficacia su tale campagna sperimentale.

Le misure grezze (**RAW**) lungo **Y** sono state eseguite parallelamente alle misure lungo **Y** con **linear detrending** così da poter eseguire un'operazione di **confronto**.

La **fig.32** mostra i passi dell'algoritmo che eseguono il **linear detrending**.

```

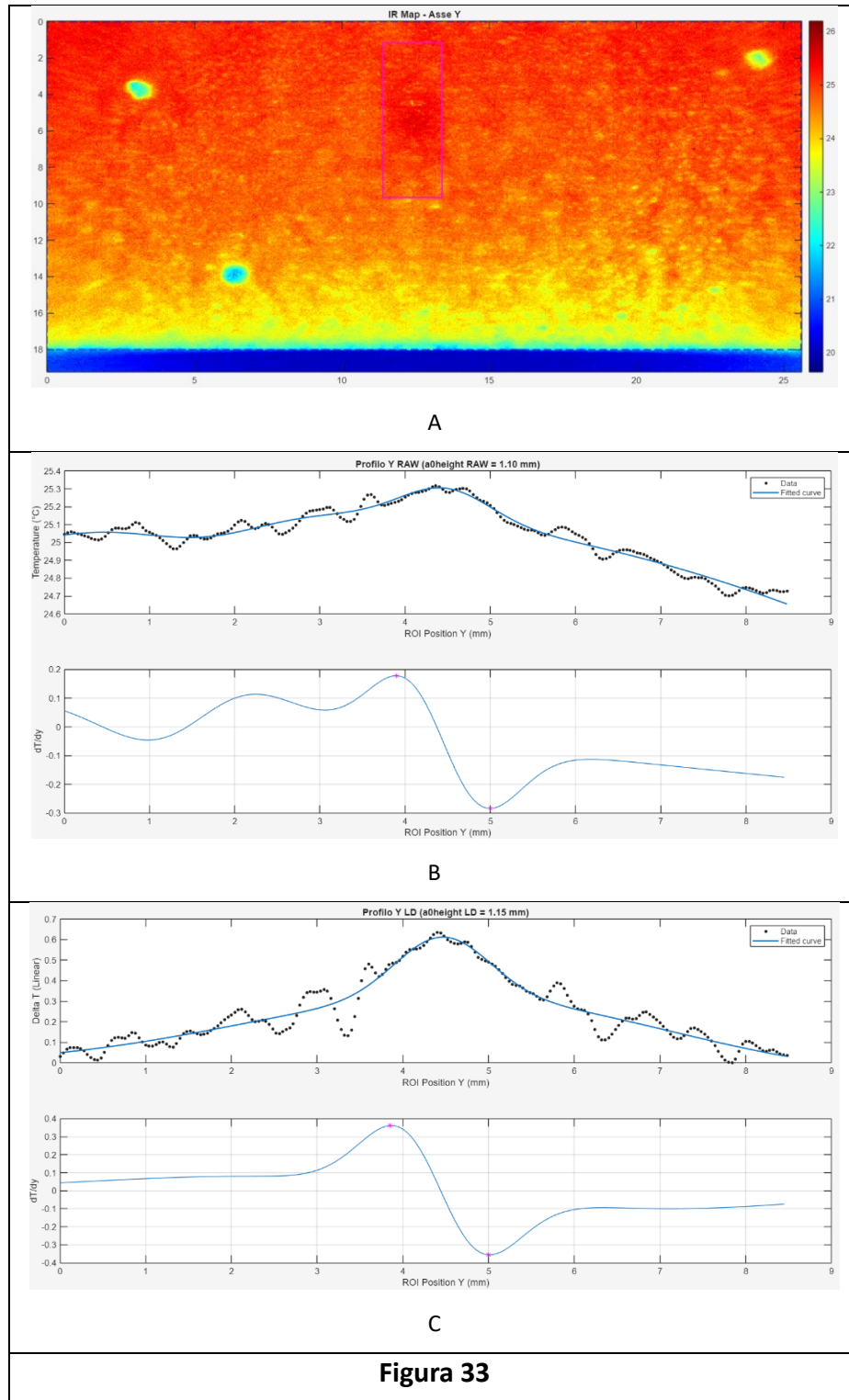
412 disp('--- FASE 4: ANALISI ASSE Y (LINEAR DETRENDING) ---');
413
414 % Recupero Nitidezza: Forziamo la gabbia stretta (1mm) come nel codice originale
415 rw_y_tight = max(1.0, base_nominale);
416 c1_y_tight = round((dcx-rw_y_tight/2)/pxsz);
417 c2_y_tight = round((dcx+rw_y_tight/2)/pxsz);
418
419 DEFECT_Y_tight = RAW(r2_y:r1_y, c1_y_tight:c2_y_tight);
420 MD_Y_tight = mean(DEFECT_Y_tight, 2);
421 MD_Y_tight = smoothdata(MD_Y_tight, 'gaussian', 7); % Smoothing originale
422
423 num_pts = length(MD_Y_tight);
424 edge_pts = max(5, round(num_pts * 0.15));
425 x_edges = [Pos_Y(1:edge_pts), Pos_Y(end-edge_pts+1:end)];
426 y_edges = [MD_Y_tight(1:edge_pts), MD_Y_tight(end-edge_pts+1:end)];
427 p_poly = polyfit(x_edges, y_edges, 1);
428 trend_LD = polyval(p_poly, Pos_Y);
429
430 MD_Y_det_ld = MD_Y_tight - trend_LD;
431 MD_Y_ld = MD_Y_det_ld + abs(min(MD_Y_det_ld));
432
433 [xData_y_ld, yData_y_ld] = prepareCurveData(Pos_Y, MD_Y_ld);
434
435 % Fit Options originali
436 opts_ld = fityoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares', 'Display', 'Off');
437 opts_ld.Lower = [-Inf -Inf 0 -Inf -Inf -Inf 0];
438 opts_ld.StartPoint = [max(MD_Y_ld)-min(MD_Y_ld), p_center, altezza_nominale, ...
439                     mean(MD_Y_ld)-min(MD_Y_ld), p_center, p_width, ...
440                     -(mean(MD_Y_ld)-min(MD_Y_ld))/2, p_center, p_width*1.5];
441
442 [fitresult_y_ld, ~] = fit(xData_y_ld, yData_y_ld, ft_search, opts_ld);
443
444 % PLOT 6: PROFILO Y LD
445 f6 = figure('Name', 'Temperature profile Y-Axis (LINEAR DETRENDED)');
446 subplot(2,1,1); plot(fitresult_y_ld, xData_y_ld, yData_y_ld); ylabel("Delta T (Linear)"); xlabel("ROI Position Y (mm)");
447
448 fity_y_ld = fitresult_y_ld(fity_y);
449 dfity_y_ld = diff(fity_y_ld,1)/arraystep;
450 subplot(2,1,2); plot(fity2_y, dfity_y_ld); ylabel("dT/dy"); xlabel("ROI Position Y (mm)"); grid on;
451
452 dfity_y_row_ld = dfity_y_ld(:);
453 is_max_y_ld = [false, (dfity_y_row_ld(2:end-1) > dfity_y_row_ld(1:end-2)) & (dfity_y_row_ld(2:end-1) > dfity_y_row_ld(3:end)), false];
454 is_min_y_ld = [false, (dfity_y_row_ld(2:end-1) < dfity_y_row_ld(1:end-2)) & (dfity_y_row_ld(2:end-1) < dfity_y_row_ld(3:end)), false];
455
456 if any(is_max_y_ld)
457     [dmax_ld, temp_imax_ld] = max(dfity_y_row_ld(is_max_y_ld));
458     idx_maxs_ld = find(is_max_y_ld); imax_y_ld = idx_maxs_ld(temp_imax_ld);
459 else
460     [dmax_ld, imax_y_ld] = max(dfity_y_row_ld);
461 end
462
463 if any(is_min_y_ld)
464     [dmin_ld, temp_imin_ld] = min(dfity_y_row_ld(is_min_y_ld));
465     idx_mins_ld = find(is_min_y_ld); imin_y_ld = idx_mins_ld(temp_imin_ld);
466 else
467     [dmin_ld, imin_y_ld] = min(dfity_y_row_ld);
468 end
469
470 index3_ld = fity2_y(imax_y_ld); index4_ld = fity2_y(imin_y_ld);
471
472 if any(is_min_y_ld)
473     [dmin_ld, temp_imin_ld] = min(dfity_y_row_ld(is_min_y_ld));
474     idx_mins_ld = find(is_min_y_ld); imin_y_ld = idx_mins_ld(temp_imin_ld);
475 else
476     [dmin_ld, imin_y_ld] = min(dfity_y_row_ld);
477 end
478
479 index3_ld = fity2_y(imax_y_ld); index4_ld = fity2_y(imin_y_ld);
480 a0height_LD = abs(index4_ld-index3_ld);
481 hold on; plot(index3_ld, dmax_ld, 'm*'); plot(index4_ld, dmin_ld, 'm*');
482
483 subplot(2,1,1); title(sprintf('Profilo Y LD (a0height LD = %.2f mm)', a0height_LD));
484 exportgraphics(f6, fullfile(save_dir, sprintf('LD_6_din_y_%.png', che_difetto)));
485
486 disp('--- ANALISI COMPLETATA CON SUCCESSO ---');
487
488 end
489

```

Figura 32 : linear detrending

Il **linear detrending** è uno strumento matematico usato in fisica per correggere i profili termici da imperfezioni legate al materiale o alla geometria del provino stesso. Queste caratteristiche inducono un **pattern**, ovvero un andamento di fondo che sarebbe così anche senza il difetto. Il **pattern** letto dal linear detrending è un **pattern lineare**, ovvero, definita la **ROI** per il calcolo lungo **Y**, si esegue la media della temperatura dei pixel contenuti nelle “code” della **ROI** e si interpola il loro andamento con una **retta**. Per stimare il numero di righe da includere nelle code delle **ROI** l’algoritmo calcola quante righe di pixel sono presenti nella **ROI**, ne calcola il 15% e poi prende questo numero di righe di pixel sia dall’estremo superiore che inferiore della **ROI**. La retta dell'andamento dello sfondo del provino è un pattern di fondo a cui si somma l'effetto del difetto, ovvero la campana ottenuta dalla

somma di 3 gaussiane. Per questo motivo la campana, a meno che la retta non sia orizzontale, viene distorta, risultando in una misura della dimensione del difetto meno accurata. L'operazione di detrending rimuove tale andamento dello sfondo del provino letto nella **ROI**, così da rendere più evidente il gradiente di temperatura causato dal difetto. In **fig.33** viene mostrato un caso in cui il **linear detrending** ha ottimizzato la lettura del profilo termico del difetto.



Come si può notare dal confronto tra i grafici B e C di **fig.33**, il profilo termico del difetto ottenuto dall'operazione di **linear detrending** (**fig.33 C**) presenta una campana molto più simmetrica e priva di distorsione, grazie alla rimozione del gradiente dello sfondo del provino.

3.6 Processamento dei dati IRT

I dati significativi ricavati da Matlab sono stati esportati e raccolti su un foglio **Excel** per ogni ripetizione di ciascun difetto. Questo ha consentito di poter effettuare rapidamente e con rigore i calcoli di **medie**, **deviazioni standard** e **coefficiente di variazione** dei parametri di interesse. I dati sono stati ordinati ed elaborati tramite funzioni macro scritte in **Visual-Basic** per Excel (**VBA**). In **fig.34** è riportata un'immagine che mostra una parte dell'Excel di raccolta dati.

1	Nome File	ID_Difetto	Centro_X_dcx	Centro_Y_dcy	SNR_Max	Defect_Width	Delta_T_X	Defect_Height_RAW	Defect_Height_LD	Delta_T_Y
578	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f2_1	R2_f2_1	9	4,66	6,148236732	1,55	2,915769059	2,95	2,9	3,018712318
579	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f2_2	R2_f2_2	9	4,66	6,365851045	1,6	3,594613478	3,25	3,25	3,043472757
580	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f2_3	R2_f2_3	9	4,66	6,093143791	1,45	3,707842983	3,05	2,8	3,448630028
581	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f2_4	R2_f2_4	9	4,66	5,920425131	1,5	2,781987999	3,25	3,1	2,294298097
582	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f3_1	R2_f3_1	9	4,66	6,304118845	1,55	2,726290097	3,05	3	2,795237048
583	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f3_2	R2_f3_2	9	4,66	6,449514988	1,6	2,812604914	3,25	3,2	2,831281746
584	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f3_3	R2_f3_3	9	4,66	6,458186965	1,5	2,781698291	3,05	3	2,788677921
585	20-P-J-S1_SK2_L3_RD1_f3_4	R2_f3_4	9	4,66	6,07359523	1,55	2,663687956	3,15	2,9	2,213190495
586	21-P-I-S0.5_SK0.75_L2_FD0.75_f3	F1_f3_0	10,3	15,4	0,393957462					
587	21-P-I-S0.5_SK0.75_L2_FD0.75_f2	F1_f2_0	10,3	15,4	0,292300033					
588	21-P-I-S0.5_SK0.75_L2_RD3.5_f3	R1_f3_0	14,18	15,3	0,324568849					
589	21-P-I-S0.5_SK0.75_L2_RD3.5_f2	R1_f2_0	14,18	15,3	0,341646663					
590	21-P-I-S0.5_SK1_L2_FD0.75_f3	F2_f3_0	14,5	13,9	0,50274789					
591	21-P-I-S0.5_SK1_L2_FD0.75_f2	F2_f2_0	14,5	13,9	0,469325622					
592	21-P-I-S0.5_SK1_L2_RD3.25_f3	R2_f3_0	10,5	13,77	0,323464425					
593	21-P-I-S0.5_SK1_L2_RD3.25_f2	R2_f2_0	10,5	13,77	0,333812414					
594	22-P-I-S1_SK1.5_L3_FD1_f3	F1_f3_0	5,22	15,09	2,193563891	3,5	0,675356785	0,45	0,45	0,445203437
595	22-P-I-S1_SK1.5_L3_FD1_f2	F1_f2_0	5,22	15,09	2,156787725	3,4	0,734773267	2,1	0,45	0,667304687
596	22-P-I-S1_SK1.5_L3_RD2.5_f3	R1_f3_0	21,53	15,47	0,901324982					
597	22-P-I-S1_SK1.5_L3_RD2.5_f2	R1_f2_0	21,53	15,47	0,860087758					
598	22-P-I-S1_SK2_L3_FD1_f3	F2_f3_0	15,36	15,11	2,639376647	3,35	0,659867374	2,05	2,05	0,603171178
599	22-P-I-S1_SK2_L3_FD1_f2	F2_f2_0	15,36	15,11	2,549275306	3,15	0,72717651	2,2	1,8	0,599970307
600	22-P-I-S1_SK2_L3_RD2_f3	R2_f3_0	10,86	14,1	0,95665781					

Figura 34 : foglio Excel dei dati raccolti

I dati di rilevanza che sono stati elaborati sono:

- il valore di **SNR massimo** estratto;
- la **larghezza del difetto** (defect width);
- il **delta di temperatura** lungo la direzione **X** (si confronta con il delta di temperatura lungo **Y** e si sceglie il maggiore fra i due);
- il **delta di temperatura** lungo la direzione **Y**;
- l'**altezza del difetto** ottenuta su immagine **RAW** (defect height RAW);
- l'altezza ottenuta per **linear detrending** (defect height LD);

Per questi sei valori di interesse si calcola **media aritmetica**, **deviazione standard campionaria** ed il **coefficiente di variazione** (CV%) mediante le tre formule sotto riportate.

$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100$
Media aritmetica	Deviazione standard	Coefficiente di variazione

L'**arrotondamento** dei dati di rilevanza ha seguito la seguente logica in accordo con la procedura di **arrotondamento metrologico**:

- 1) Si calcola la **deviazione standard** del dato.
- 2) Si individua la prima **cifra significativa** della deviazione standard.
- 3) Si arrotonda la deviazione standard conservando due cifre significative.
- 4) Si controlla che il valore della deviazione standard ottenuto dall'approssimazione sia superiore alla **risoluzione** dello strumento, altrimenti si pone la deviazione standard pari alla risoluzione dello strumento.
- 5) Si approssima il valore della **media aritmetica** dei dati sulla base dei decimali presenti nella **deviazione standard** (elaborata sino al punto 4).

Non è stata impostata una soglia minima per la deviazione standard dell'SNR. Per quanto concerne la **deviazione standard** delle misure di **lunghezza** e dei **delta di temperatura**, sono stati fissati dei limiti inferiori. Nello specifico, per tutte le misure di lunghezza si è impostato un limite inferiore alla **deviazione standard** di **0.04 mm**, pari alla **risoluzione spaziale** della termocamera nel nostro set-up. Per le **deviazioni standard** dei **delta di temperatura**, invece, è stato impostato un limite inferiore di **0.04 °C**, coerentemente con l'**NETD** della termocamera nel nostro set-up (**NETD < 40 mK**). In **fig.35** è riportata una immagine che mostra una parte dell'Excel di elaborazione e riepilogo dei dati raccolti nel foglio Excel di **fig.34**. Al fine di fornire un'immediata valutazione qualitativa della **dispersione dei dati** e della **ripetibilità** delle misure per ciascun parametro, è stata introdotta una classificazione a cinque livelli basata sul valore percentuale del **coefficiente di variazione**. A ciascun intervallo è stato associato un esito e una specifica codifica cromatica nel foglio di riepilogo, secondo la seguente logica:

Intervallo del CV%	Giudizio Qualitativo	Significato Metrologico	Colore nel Riepilogo
< 10%	Molto basso	Eccellente stabilità e ripetibilità della misura	Verde scuro
$10\% \leq CV \leq 20\%$	Basso	Buona ripetibilità statistica	Verde chiaro
$20\% < CV < 35\%$	Accettabile	Dispersione contenuta entro limiti tollerabili	Grigio
$35\% \leq CV < 50\%$	Alto	Variabilità marcata fra le prove	Rosso chiaro
> 50%	Molto alto	Forte dispersione (misura poco stabile)	Rosso scuro

	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_SNR	Std_SNR	CV_SNR	Esito_CV_SNR	Media_Width	Std_Width	CV_Width	Esito_CV_Width
12	2-P-K-S1_RD0.75_f2	P-K	R1_f2,0	4,124	0,052	1,3%	Molto Basso	1,270	0,057	4,5%	Molto Basso
13	2-P-K-S1_RD0.75_f3		R1_f3,0	4,193	0,032	0,8%	Molto Basso	1,310	0,042	3,2%	Molto Basso
14	2-P-K-S1-FD1_f2		F2_f2,0	3,27	0,19	5,8%	Molto Basso	1,440	0,065	4,5%	Molto Basso
15	2-P-K-S1-FD1_f3		F2_f3,0	3,39	0,14	4,1%	Molto Basso	1,470	0,045	3,1%	Molto Basso
16	2-P-K-S1_RD1_f2		R2_f2,0	3,18	0,12	3,8%	Molto Basso	1,440	0,089	6,2%	Molto Basso
17	2-P-K-S1_RD1_f3		R2_f3,0	3,266	0,089	2,7%	Molto Basso	1,480	0,057	3,9%	Molto Basso
18	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	2,74	0,24	8,8%	Molto Basso	1,04	0,15	14,4%	Basso
19	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	2,84	0,24	8,5%	Molto Basso	1,160	0,042	3,6%	Molto Basso
20	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f2		R1_f2,0	0,28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f3		R1_f3,0	0,29	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	3,36	0,40	11,9%	Basso	1,030	0,076	7,4%	Molto Basso
23	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	3,56	0,49	13,8%	Basso	1,100	0,061	5,5%	Molto Basso
24	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f2		R2_f2,0	0,51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f3		R2_f3,0	0,44	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f2	P-J	F1_f2,0	2,079	0,043	2,1%	Molto Basso	1,01	0,13	12,9%	Basso
27	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f3		F1_f3,0	2,24	0,13	5,8%	Molto Basso	1,010	0,089	8,8%	Molto Basso
28	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	0,41	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	0,34	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f2		F2_f2,0	2,94	0,28	9,5%	Molto Basso	1,240	0,042	3,4%	Molto Basso
31	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f3		F2_f3,0	3,21	0,30	9,3%	Molto Basso	1,250	0,040	3,2%	Molto Basso
32	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	0,59	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
33	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f3		R2_f3,0	0,56	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
34	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	3,94	0,41	10,4%	Basso	1,140	0,055	4,8%	Molto Basso
35	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	4,30	0,18	4,2%	Molto Basso	1,180	0,045	3,8%	Molto Basso
36	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	0,80	0,23	28,8%	Accettabile	0,65	ND	ND	ND
37	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	0,77	0,20	26,0%	Accettabile	0,75	ND	ND	ND
38	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	4,64	0,25	5,4%	Molto Basso	1,220	0,057	4,7%	Molto Basso
39	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	4,85	0,33	6,8%	Molto Basso	1,250	0,061	4,9%	Molto Basso
40	5-P-J-S0.75_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	0,53	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_Delta_T_X	Std_Delta_T_X	CV_Delta_T_X	Esito_CV_Delta_T_X	Media_Height_RAW	Std_Height_RAW	CV_Height_RAW	Esito_CV_Height_RAW
12	2-P-K-S1_RD0.75_f2	P-K	R1_f2,0	1,368	0,068	5,0%	Molto Basso	2,12	0,22	10,4%	Basso
13	2-P-K-S1_RD0.75_f3		R1_f3,0	1,188	0,040	3,4%	Molto Basso	2,27	0,19	8,4%	Molto Basso
14	2-P-K-S1-FD1_f2		F2_f2,0	0,94	0,18	19,1%	Basso	0,75	0,23	30,7%	Accettabile
15	2-P-K-S1-FD1_f3		F2_f3,0	0,86	0,14	16,3%	Basso	0,830	0,057	6,9%	Molto Basso
16	2-P-K-S1_RD1_f2		R2_f2,0	0,89	0,15	16,9%	Basso	1,84	0,19	10,3%	Basso
17	2-P-K-S1_RD1_f3		R2_f3,0	0,83	0,13	15,7%	Basso	1,83	0,23	12,6%	Basso
18	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	0,90	0,24	26,7%	Accettabile	0,83	0,82	98,8%	Molto Alto
19	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	0,697	0,078	11,2%	Basso	0,87	0,85	97,7%	Molto Alto
20	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f2		R1_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f3		R1_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	1,15	0,14	12,2%	Basso	3,41	0,77	22,6%	Accettabile
23	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	0,89	0,13	14,6%	Basso	2,73	0,77	28,2%	Accettabile
24	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f3		R2_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f2	P-J	F1_f2,0	0,73	0,15	20,5%	Accettabile	1,43	0,61	42,7%	Alto
27	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f3		F1_f3,0	0,62	0,16	25,8%	Accettabile	1,89	0,85	45,0%	Alto
28	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f2		F2_f2,0	1,18	0,16	13,6%	Basso	2,87	0,17	5,9%	Molto Basso
31	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f3		F2_f3,0	1,05	0,13	12,4%	Basso	2,82	0,19	6,7%	Molto Basso
32	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
33	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f3		R2_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
34	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	1,57	0,35	22,3%	Accettabile	1,91	0,77	40,3%	Alto
35	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	1,13	0,13	11,5%	Basso	2,53	0,21	8,3%	Molto Basso
36	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	0,44	ND	ND	ND	0,95	ND	ND	ND
37	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	0,36	ND	ND	ND	1,05	ND	ND	ND
38	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	1,92	0,23	12,0%	Basso	2,46	0,40	16,3%	Basso
39	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	1,53	0,20	13,1%	Basso	2,43	0,97	39,9%	Alto
40	5-P-J-S0.75_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_Height_LD	Std_Height_LD	CV_Height_LD	Esito_CV_Height_LD	Media_Delta_T_Y	Std_Delta_T_Y	CV_Delta_T_Y	Esito_CV_Delta_T_Y
12	2-P-K-S1_RD0.75_f2	P-K	R1_f2,0	1,87	0,22	11,8%	Basso	1,258	0,071	5,6%	Molto Basso
13	2-P-K-S1_RD0.75_f3		R1_f3,0	1,54	0,61	39,6%	Alto	1,026	0,080	7,8%	Molto Basso
14	2-P-K-S1-FD1_f2		F2_f2,0	0,700	0,079	11,3%	Basso	0,79	0,19	24,1%	Accettabile
15	2-P-K-S1-FD1_f3		F2_f3,0	0,700	0,050	7,1%	Molto Basso	0,75	0,22	29,3%	Accettabile
16	2-P-K-S1_RD1_f2		R2_f2,0	1,24	0,11	8,9%	Molto Basso	0,62	0,19	30,6%	Accettabile
17	2-P-K-S1_RD1_f3		R2_f3,0	1,29	0,11	8,5%	Molto Basso	0,59	0,13	22,0%	Accettabile
18	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	1,45	0,76	52,4%	Molto Alto	0,99	0,19	19,2%	Basso
19	3-P-J-S0.5_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	0,83	0,82	98,8%	Molto Alto	0,75	0,13	17,3%	Basso
20	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f2		R1_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	3-P-J-S0.5_L2_RD3.75_f3		R1_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	3,60	0,32	8,9%	Molto Basso	1,02	0,22	21,6%	Accettabile
23	3-P-J-S0.5_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	3,33	0,28	8,4%	Molto Basso	0,89	0,11	12,4%	Basso
24	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	3-P-J-S0.5_L3_RD3.75_f3		R2_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f2	P-J	F1_f2,0	3,6	1,8	50,0%	Molto Alto	0,57	0,12	21,1%	Accettabile
27	4-P-J-S0.5_L2-FD1_f3		F1_f3,0	3,0	1,1	36,7%	Alto	0,536	0,090	16,8%	Basso
28	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	4-P-J-S0.5_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f2		F2_f2,0	2,64	0,11	4,2%	Molto Basso	0,96	0,25	26,0%	Accettabile
31	4-P-J-S0.5_L3_FD1_f3		F2_f3,0	2,680	0,057	2,1%	Molto Basso	0,97	0,24	24,7%	Accettabile
32	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
33	4-P-J-S0.5_L3_RD3.5_f3		R2_f3,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
34	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f2	P-J	F1_f2,0	2,31	0,18	7,8%	Molto Basso	1,31	0,48	36,6%	Alto
35	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f3		F1_f3,0	2,63	0,40	15,2%	Basso	1,03	0,18	17,5%	Basso
36	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f2		R1_f2,0	5,65	ND	ND	ND	0,40	ND	ND	ND
37	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f3		R1_f3,0	4,25	ND	ND	ND	0,35	ND	ND	ND
38	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f2		F2_f2,0	2,63	0,53	20,2%	Accettabile	1,99	0,18	9,0%	Molto Basso
39	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f3		F2_f3,0	3,20	0,31	9,7%	Molto Basso	1,41	0,36	25,5%	Accettabile
40	5-P-J-S0.75_L3_RD3.5_f2		R2_f2,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Figura 35 : Excel di elaborazione dei dati raccolti

Come si può osservare nella **fig.35**, alcuni difetti presentano la dicitura **ND (Non Definito)** in corrispondenza dei valori di **deviazione standard** e **coefficiente di variazione (CV)** di **SNR**. I difetti che presentano la dicitura **ND** nelle statistiche di **SNR** sono i difetti per cui è stata svolta solo una prova termografica, anziché le cinque previste dal protocollo standard per ciascun difetto. La scelta di non procedere con le restanti quattro repliche è scaturita da un criterio di ottimizzazione della campagna sperimentale. Si è infatti riscontrato sistematicamente che, qualora un difetto con profondità nominale elevata ($\geq 3\text{ mm}$) risultasse del tutto invisibile nella prima prova (ovvero privo di qualsiasi segnatura termica rilevabile, anche a basso contrasto o con contorni sfumati), esso manteneva la medesima irrilevabilità anche nei test successivi. Di conseguenza, al fine di ottimizzare tempistiche e risorse operative, si è deciso di sospendere le ripetizioni per tutti quei difetti che soddisfacevano tali condizioni fisiche e geometriche.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 SNR

4.1.1 Coefficiente di variazione (CV) dell'SNR

Il primo risultato che è stato esaminato al fine di verificare che il nuovo metodo di calcolo proposto per **SNR** fornisse delle misure ripetibili è la **dispersione statistica** delle misure ripetute di **SNR** del nuovo algoritmo. Per questo motivo si è analizzato il valore del **coefficiente di variazione (CV)** del valore di **SNR** delle prove ripetute.

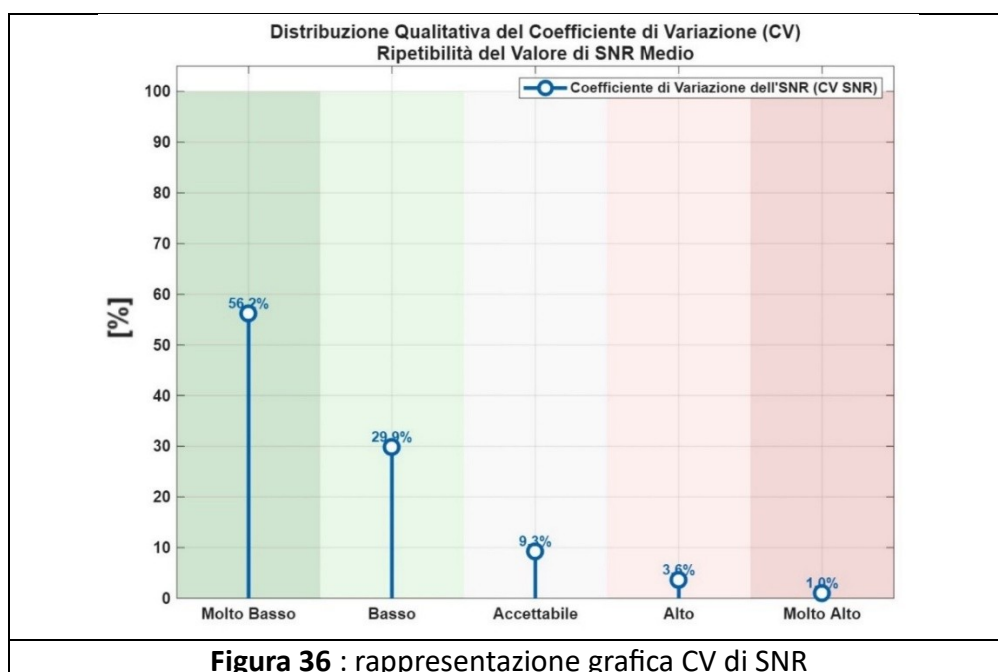


Figura 36 : rappresentazione grafica CV di SNR

In **fig.36** possiamo leggere un grafico realizzato sulla base dei dati elaborati tramite **Excel** delle misure estratte da **Matlab**. Il grafico riporta in ascissa le cinque fasce di esito qualitativo (descritte precedentemente nel paragrafo 3.6) ed in ordinata la **frequenza percentuale** con cui il **CV** dell'**SNR** ricade in ciascuna di esse. Come si può osservare, il **56,2%** delle misure ripetute di **SNR** ha ottenuto un **CV** molto basso, ovvero inferiore al **10%**, mentre l'**86,1%** delle misure ripetute ha avuto un **CV** minore del **20%**. È stato pertanto dimostrato come la misura di **SNR** del nuovo metodo proposto non sia un valore che fluttua in modo casuale e instabile, ma presenta un'ottima tendenza statistica in termini di ripetibilità. La principale critica mossa a questa nuova metodologia di calcolo di **SNR** era legata alla possibilità che l'algoritmo introducesse arbitrariamente delle zone di provino fredde e

troppo distanti dal difetto solo per ottenere valori di temperatura media della **ROI_nd** più bassa.

Questo fenomeno **non** si è verificato principalmente per tre motivi:

- In tutti i provini è stata adottata la concentricità geometrica di **ROI_d** e **ROI_nd**;
- in molti provini la $\overline{T_{nd}}$ aveva già un valore fortemente delineato dalle zone limitrofe al difetto;
- l'inserimento di pixel troppo diversi rispetto al trend della $\overline{T_{nd}}$ delineato dalle zone limitrofe al difetto faceva aumentare σ_{nd} e, di conseguenza, impediva di ottenere un incremento di **SNR**;

Infatti, da un confronto con i dati ottenuti con il precedente algoritmo, si è notato che il nuovo algoritmo non ha cambiato i trend di fondo già evidenziati dal precedente metodo di calcolo, ma li ha, in maggior parte, resi solo più evidenti. Il nuovo algoritmo ha modificato l'esito esclusivamente dei casi dubbi, ossia laddove i difetti erano troppo vicini ai bordi del provino, oppure nei casi in cui due difetti presentavano valori di **SNR** molto simili (oppure incoerenti con quanto riscontrabile dalle immagini termiche) a causa del rumore di fondo nella **ROI_nd**, risolvendo così le incertezze legate alla cosiddetta “zona grigia di confronto”.

4.1.2 Fattori di influenza di SNR

Durante la fase di elaborazione dati sono emersi diversi fattori di influenza della misura di **SNR**.

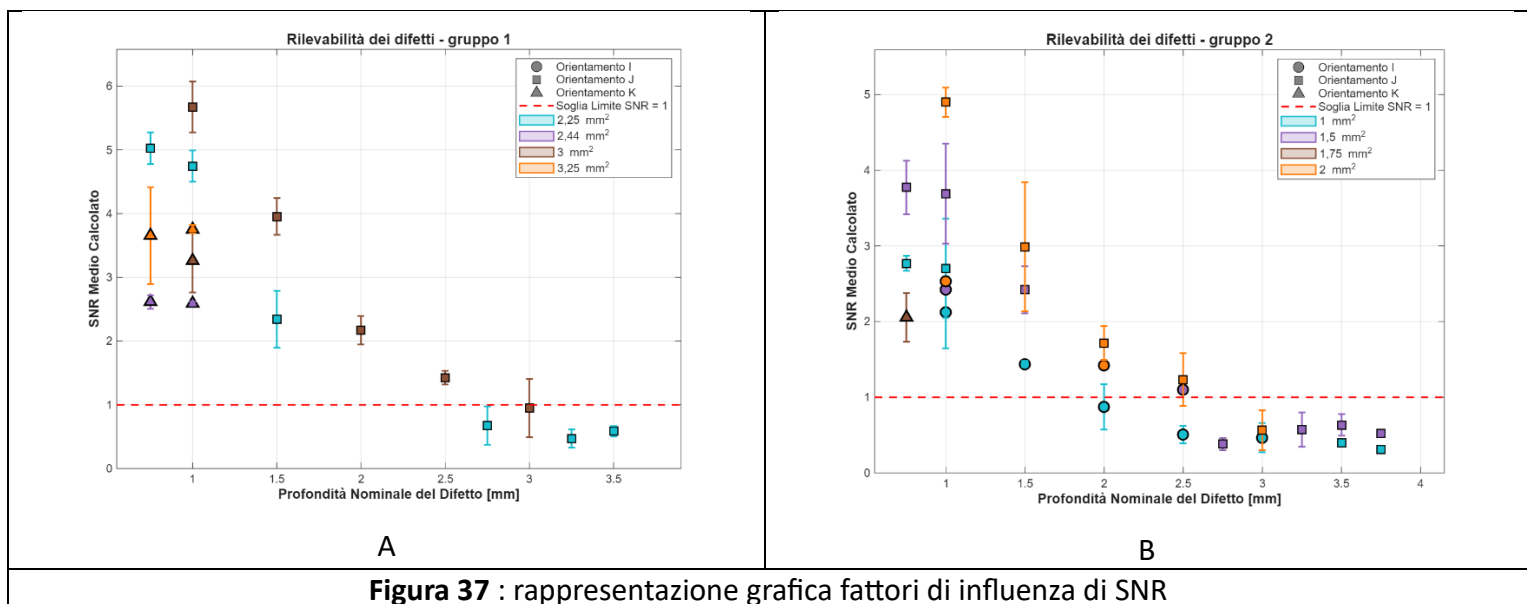


Figura 37 : rappresentazione grafica fattori di influenza di SNR

Nella **fig.37** sono rappresentati due grafici che evidenziano alcuni fattori di influenza della misurazione di **SNR**. I due grafici presentano nelle **ascisse** la profondità nominale che il difetto possiede nel file CAD e nelle **ordinate** il valore dell'SNR medio calcolato dalle prove termografiche ripetute. Vista la notevole quantità di dati elaborati, per agevolare la lettura e l'interpretazione dei grafici, i risultati del calcolo degli **SNR** medi sono stati divisi in due gruppi sulla base del valore dell'**area ortogonale alla corrente** di un certo difetto. Sono state raggruppate fra loro **aree ortogonali alla corrente** di dimensioni comparabili (compatibilmente con la precisione geometrica e dimensionale della macchina **EBM** usata). Il **gruppo 1** racchiude le **aree ortogonali** di valore: $2,25\text{ mm}^2$, $2,44\text{ mm}^2$, 3 mm^2 e $3,25\text{ mm}^2$.

Il **gruppo 2** racchiude le **aree ortogonali** di valore: 1 mm^2 , $1,5\text{ mm}^2$, $1,75\text{ mm}^2$ e 2 mm^2 .

Si precisa che, per ogni difetto che rientrasse in uno di questi due gruppi, è stato riportato solamente il valore di **SNR** medio più alto fra i due frame analizzati (fra f2 e f3 oppure fra f3 e f4, come spiegato nel capitolo 3). La **fig.37** riporta anche l'informazione sull'orientamento spaziale del difetto secondo il sistema di riferimento introdotto nel paragrafo 3.3.2.

Nella **fig.37** i risultati vengono rappresentati mostrando valor medio e deviazione standard dei dati che hanno la stessa **profondità**, **area ortogonale** e direzione di **orientamento spaziale del difetto**, ottenendo un risultato grafico semplice e chiaro.

Dalla **fig.37** evinciamo che il valore di **SNR** di un difetto a parità di **area ortogonale** ed **orientamento spaziale** cala in maniera sensibile con la profondità. Questo trend è stato evidenziato in entrambi i gruppi analizzati, ed è estremamente evidente se si osservano i difetti di area ortogonale pari a 3 mm^2 e $2,25\text{ mm}^2$ orientati lungo **J** nel gruppo 1 ed i difetti di area ortogonale pari a 1 mm^2 lungo la direzione **"I"** ed i difetti di area ortogonale pari a 2 mm^2 orientati lungo **"J"** del gruppo 2. La profondità del difetto è uno dei parametri più significativi per la sua rilevabilità termografica. Difetti molto profondi, oltre i 2 mm, sono estremamente difficili da rilevare.

Un altro aspetto importante che possiamo osservare dalla **fig.37** è la crescita del valore di **SNR** a parità di profondità ed orientamento spaziale con l'aumento dell'**area ortogonale** alla corrente.

La crescita dell'**area ortogonale** alla corrente comporta un maggiore ostacolo al passaggio della corrente stessa, per questo motivo ne conseguono **gradienti termici** associati al difetto più marcati ed i valori di **SNR** crescono di conseguenza.

L'immagine **A** della **fig.37** evidenzia chiaramente come i difetti orientati nello spazio lungo la direzione **"J"** abbiano ottenuto delle misure di **SNR** superiori rispetto ai difetti orientati lungo la

direzione “K” anche in condizioni di **area ortogonale** superiore dei difetti lungo “K” o di maggior **profondità** dei difetti lungo “J” rispetto a quelli lungo “K”.

L'immagine **B** della **fig.37** evidenzia come i difetti orientati nello spazio lungo la direzione “I” abbiano ottenuto mediamente delle misure di SNR superiori rispetto ai difetti orientati lungo la direzione “K”, nonostante i difetti lungo la direzione “I” siano collocati ad una profondità leggermente superiore (teoricamente) ed abbiano delle **aree ortogonali** inferiori. Sempre dall'immagine **B** di **fig.37** si evince che, a parità di **area ortogonale** e **profondità**, i difetti diretti lungo “J” hanno ottenuto valori superiori di **SNR** rispetto ai difetti diretti lungo “I”. ***Da queste osservazioni si conclude che l'orientamento spaziale del difetto abbia influenza sul valore dell'SNR del difetto.*** Si conclude anche che, a parità di **profondità** e di **area ortogonale** alla corrente, l'ordine decrescente di influenza sull'**SNR** della direzione è: J, I, K.

Si ritiene che la motivazione del maggior valore di **SNR** rilevato a parità di **profondità** e di **area ortogonale** della direzione “I” rispetto alla direzione “K” dipenda da due fattori:

- 1) Sotto tali condizioni il difetto direzionato lungo “I” ha un'**area esposta all'obiettivo della termocamera** di maggior dimensione rispetto al difetto lungo “K”.
- 2) Affinché il difetto direzionato lungo “I” abbia la stessa **area ortogonale** del difetto direzionato lungo “K”, il difetto direzionato lungo “I” avrà un **volume** superiore rispetto al difetto direzionato lungo “K”.

A parità di **area ortogonale** alla corrente, il difetto direzionato lungo “K” espone la minore area all'obiettivo della termocamera rispetto alle direzioni “I” e “J”.

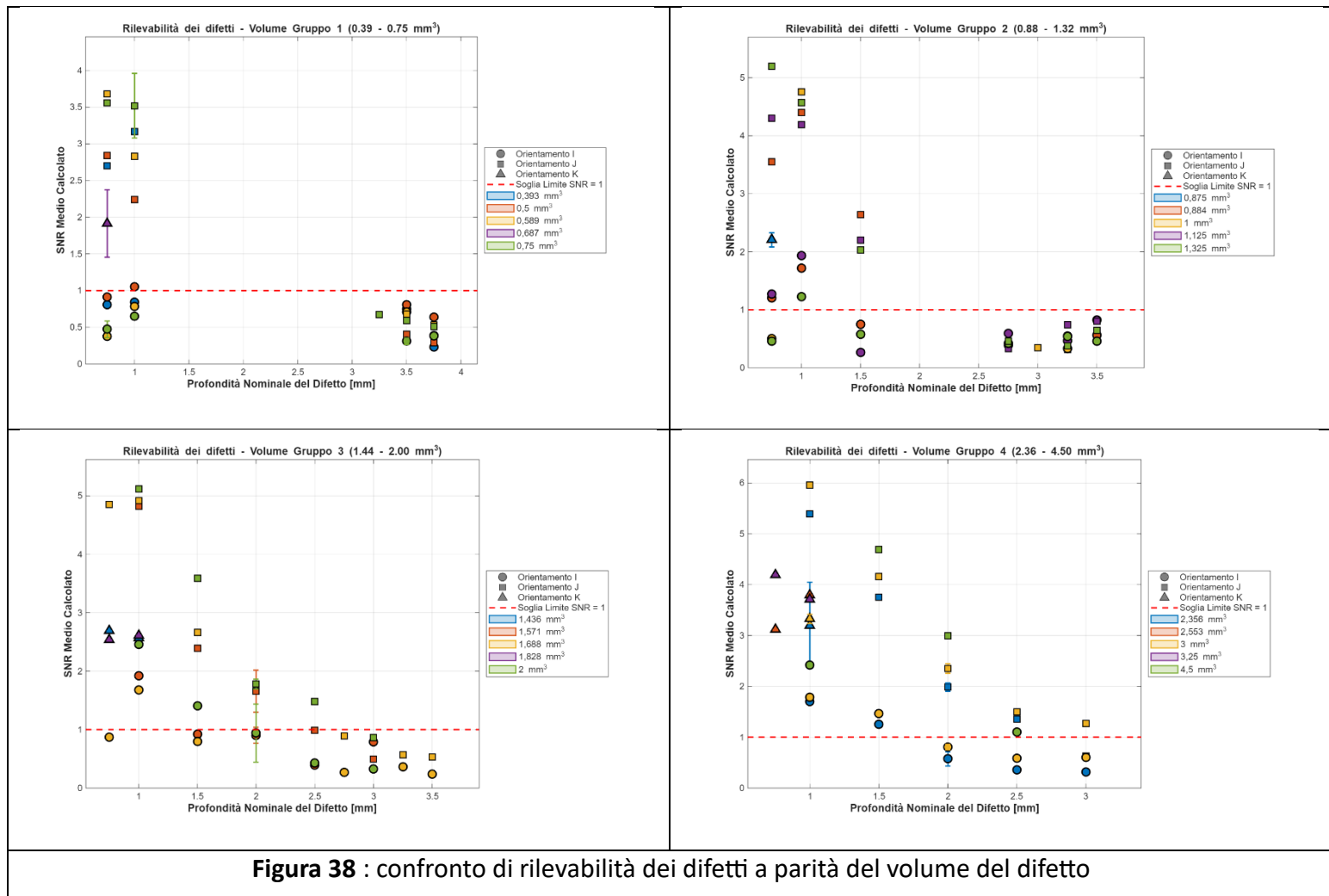
I difetti orientati lungo “J” ottengono **SNR** più alti rispetto ai difetti orientati lungo “I” a parità di **profondità** ed **area ortogonale**, nonostante il maggior volume del difetto lungo “I”, poiché i difetti lungo “J” hanno una maggiore estensione nella direzione **ortogonale** al flusso della corrente (Y in questo caso).

A parità di **volume** del difetto, i difetti orientati lungo “I” sono quelli che hanno **area ortogonale** alla corrente più piccola e, pertanto, risultano avere **SNR** più basso rispetto ai difetti orientati lungo “J” e “K” che si trovano alla medesima profondità, come riscontrabile nelle varie immagini della **fig.38**.

I grafici di **fig.38** evidenziano come, a parità di **volume** e **profondità**, i difetti orientati lungo la direzione “I” hanno un limite di profondità oltre il quale non sono rilevabili che risulta essere inferiore rispetto ai gruppi di difetti orientati lungo “K” e “J”. Dal **gruppo 1** di **fig.38** (volume compreso fra i 0.5 mm^3 ed i 0.76 mm^3) nessun difetto direzionato lungo “I” è stato rilevato, nemmeno i difetti posti alla profondità di 0,75 mm ed 1 mm. Le immagini di **fig.38** evidenziano come **SNR** cresca

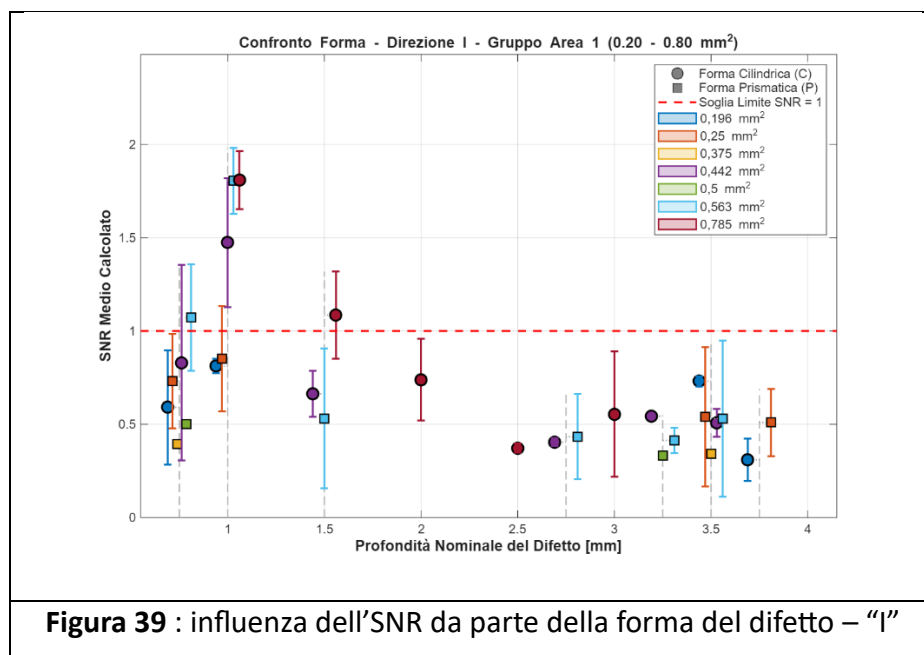
a parità di profondità con l'aumentare della dimensione del volume del difetto per tutti i tipi di orientamento spaziale. Sempre dalle immagini di **fig.38** si evince come il limite di profondità oltre quale un certo tipo di difetto non sia più rilevato aumenti con l'aumentare della dimensione del difetto.

La **fig.38** conferma che i difetti orientati lungo la direzione "J" forniscono, a parità di condizioni, le immagini dei difetti più contrastate rispetto alle altre tipologie di orientamento spaziale del difetto.



Un altro fattore di influenza dell'**SNR** emerso dall'analisi dei dati è legato alla **forma del difetto**.

I difetti presenti nei provini hanno due forme geometriche: una forma **prismatica** ed una forma **cilindrica**. Per analizzare l'influenza della forma sono stati realizzati dei grafici **SNR-profondità** che raggruppano i difetti per **orientamento dimensionale** ed **area ortogonale** alla corrente.



Per quanto concerne la direzione “I” non sono emerse significative evidenze statistiche sulle differenze dei valori di **SNR** misurati fra forma **cilindrica** e **prismatica** come riscontrabile dalla **fig.39**.

In questa serie di grafici per migliorare la leggibilità dei risultati è stata adottato uno sfalsamento dei punti con stessa **profondità** ed **SNR** molto vicini. L'effettiva profondità è leggibile seguendo la linea grigia tratteggiata di collegamento ai punti.

Il motivo dietro questo mancato riscontro per la direzione “I” è probabilmente legato al basso valore di **SNR** dei difetti che sono risultati essere idonei al confronto nel grafico di **fig.39**. Infatti, quasi tutti i difetti del grafico di **fig.39** sono al di sotto della soglia di rilevabilità di **SNR=1**.

Sono emerse, invece, differenze statisticamente rilevanti per i difetti orientati lungo le direzioni “J” e “K”. Sia lungo la direzione “J” che lungo la direzione “K” a parità di **profondità** e di **area ortogonale** i difetti di forma **prismatica** hanno presentato, mediamente, dei valori di **SNR** più alti rispetto ai difetti di forma **cilindrica** come osservabile dalla **fig.40**. Questo riscontro statistico mostra dei tratti in comune con la teoria della concentrazione delle tensioni nella meccanica dei materiali, dove difetti di forma circolare causano un accumulo degli sforzi inferiore rispetto a quello indotto da difetti con forme geometriche più acuminata e con spigoli vivi.

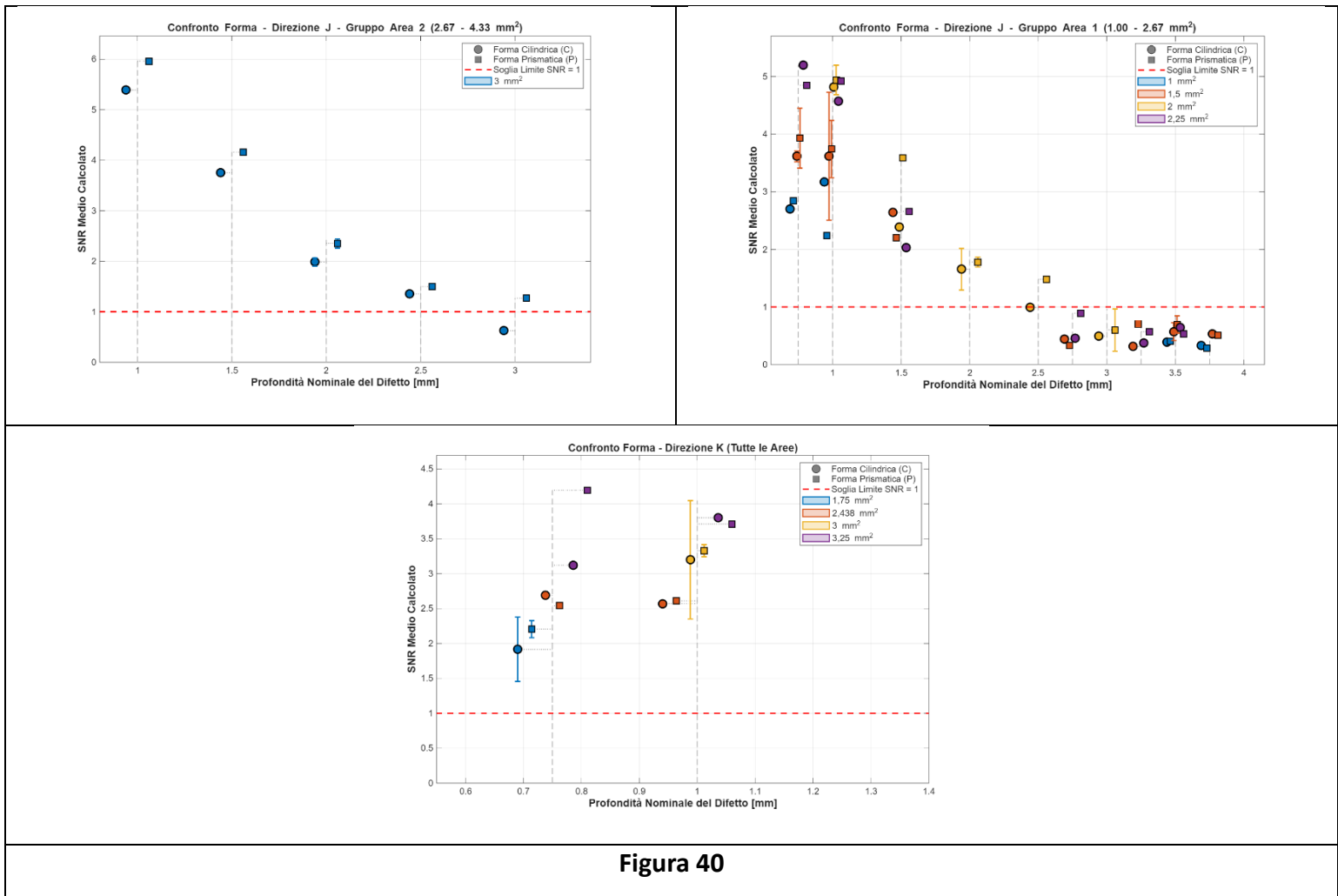


Figura 40

4.2 Risultati delle misure di lunghezza lungo la direzione X e Y

4.2.1 Confronto fra le misure della dimensione del difetto lungo X e Y

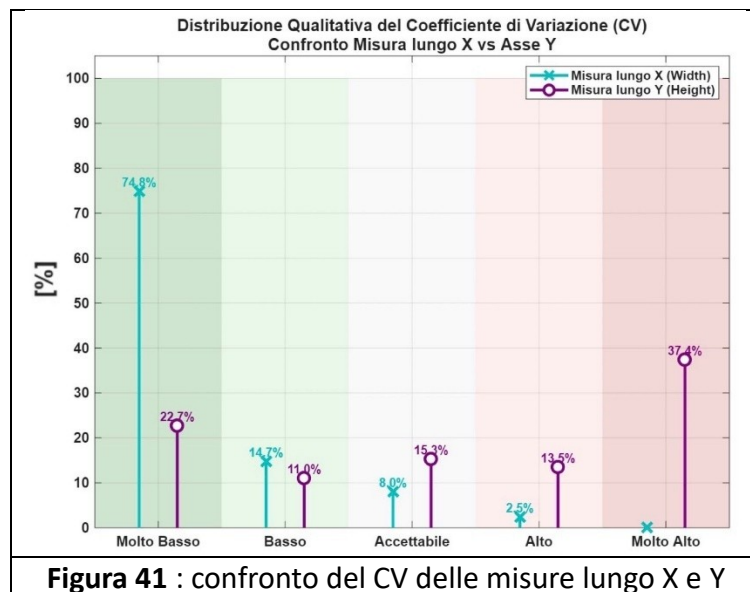


Figura 41 : confronto del CV delle misure lungo X e Y

Il grafico di **fig.41** mostra come i **rilievi** lungo **X** presentino valori di **CV** molto contenuti nella maggior parte delle **prove ripetute**: il **74,8%** delle acquisizioni mostra infatti un **CV** inferiore al **10%** (corrispondente a una variabilità “molto bassa”) e ben l'**89,5%** si attesta al di sotto della soglia del **20%** (fascia “bassa”+ fascia “molto bassa”). Questa evidenza conferma l’ottima **ripetibilità** della misurazione lungo la direzione **X** e, più in generale, della fase sperimentale nel suo complesso.

Tuttavia, nonostante le **logiche algoritmiche** di calcolo per la stima dei difetti lungo l'asse **Y** siano **identiche** a quelle impiegate per l'asse **X**, la **fig.41** rivela per la direzione **Y** una dispersione statistica nettamente superiore.

Da quanto constatato si può concludere che la misura dei difetti lungo la direzione parallela allo scorrimento della corrente (**X**) è più **precisa e ripetibile** della misura condotta lungo la direzione ortogonale al flusso di corrente (**Y**).

Le principali motivazioni che hanno portato a questo esito sono:

- 1) Il **gradiente termico** in direzione **Y** del background termico del provino che si sovrappone a quello del difetto. Dato che la misura lungo **Y** considera una regione di provino decisamente più estesa in direzione **Y**, ne consegue che la misura lungo **Y** sia molto più condizionata da questo fenomeno rispetto alla misura lungo **X**. Come osservabile dalla **fig.42**, i profili termici estratti per la misura del difetto lungo **Y** (B, D, F) sono, a parità di **SNR**, meno marcati e netti, con **profili gaussiani** caratterizzati da una minore ampiezza di picco (ridotto contrasto termico locale rispetto al background) e da una marcata asimmetria. Inoltre le misure lungo **Y** tendono ad avere oscillazioni dei dati sperimentali mediati (punti neri) più ampie rispetto alla curva di fitting (interpolante) anche per **SNR** alti, il che denota una visione meno netta e sicura del difetto da parte dell’algoritmo.
- 2) L’estrema vicinanza di molti difetti ai bordi fisici superiori ed inferiori del provino (lungo la direzione **Y**) (**fig.43** e **fig.44**). Questo comporta una minore possibilità di scelta della **ROI** per il calcolo lungo **Y** ed una maggiore sovrapposizione degli effetti termici di bordo sulle temperature dei pixel interni alla **ROI**. Lo stesso problema non è stato riscontrato per le misure lungo **X** poiché i difetti erano collocati sufficientemente distanti dai bordi fisici laterali (lungo la direzione **X**).

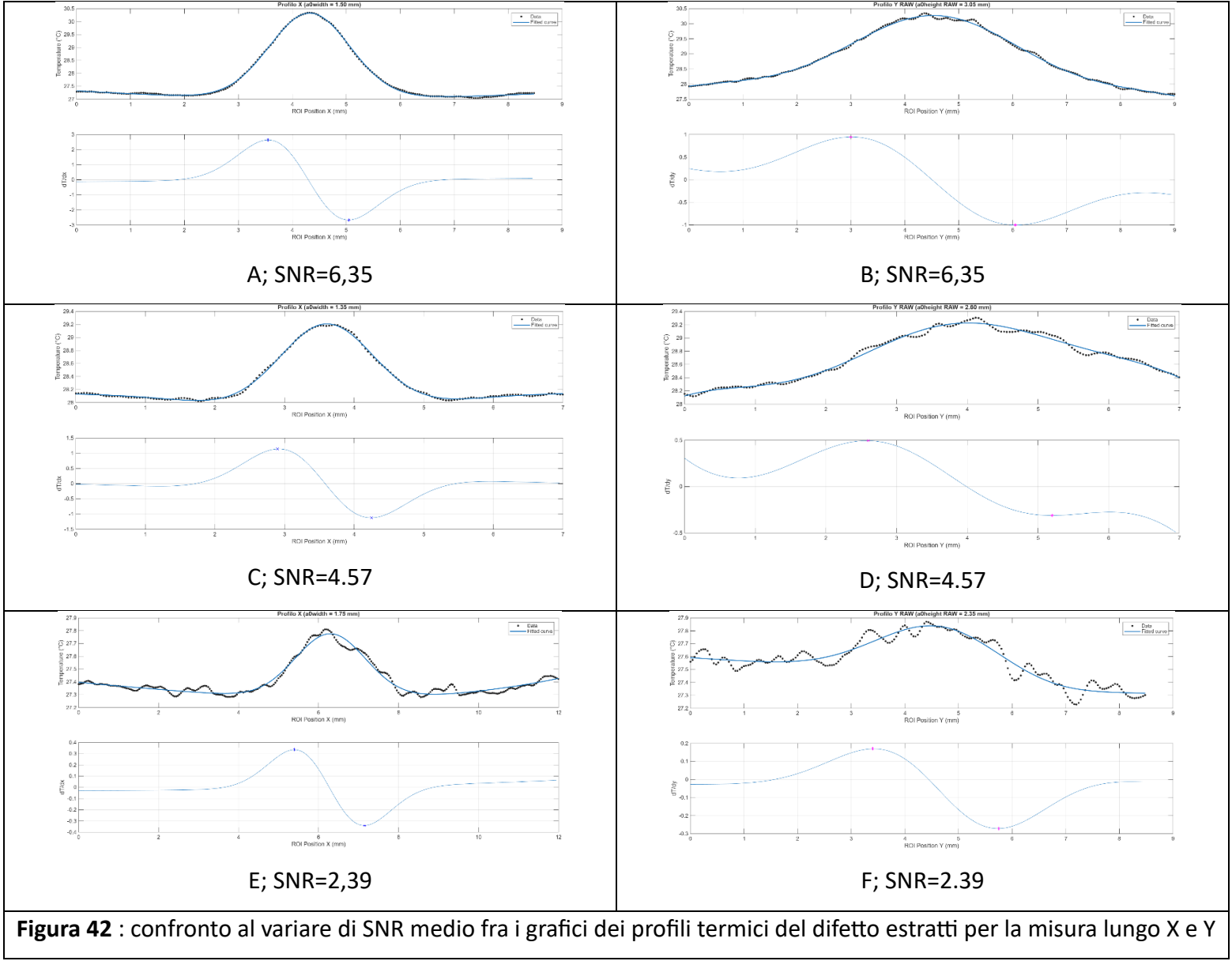


Figura 42 : confronto al variare di SNR medio fra i grafici dei profili termici del difetto estratti per la misura lungo X e Y

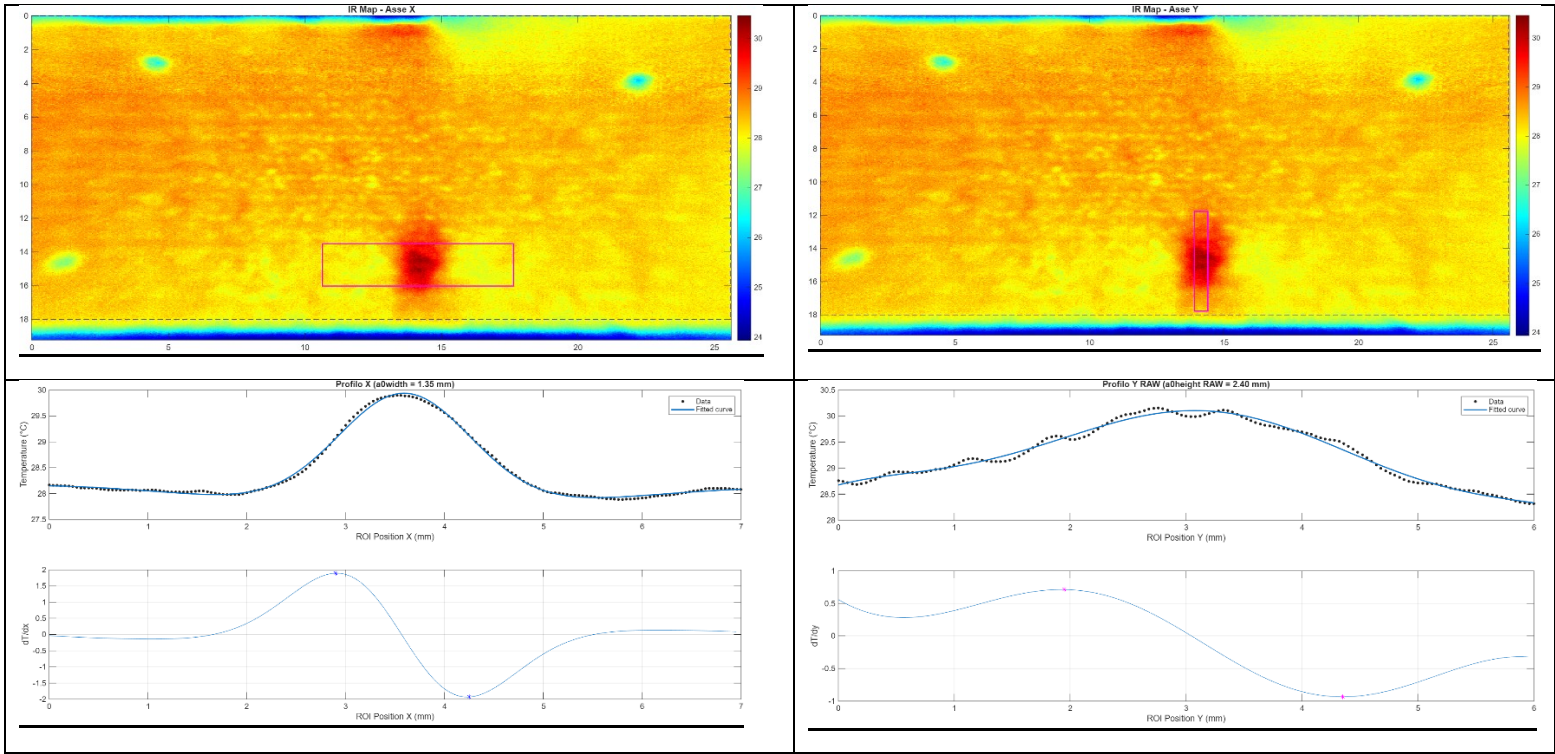


Figura 43 : esempio di influenza degli effetti termici di bordo e della minor possibilità di scelta della ROI

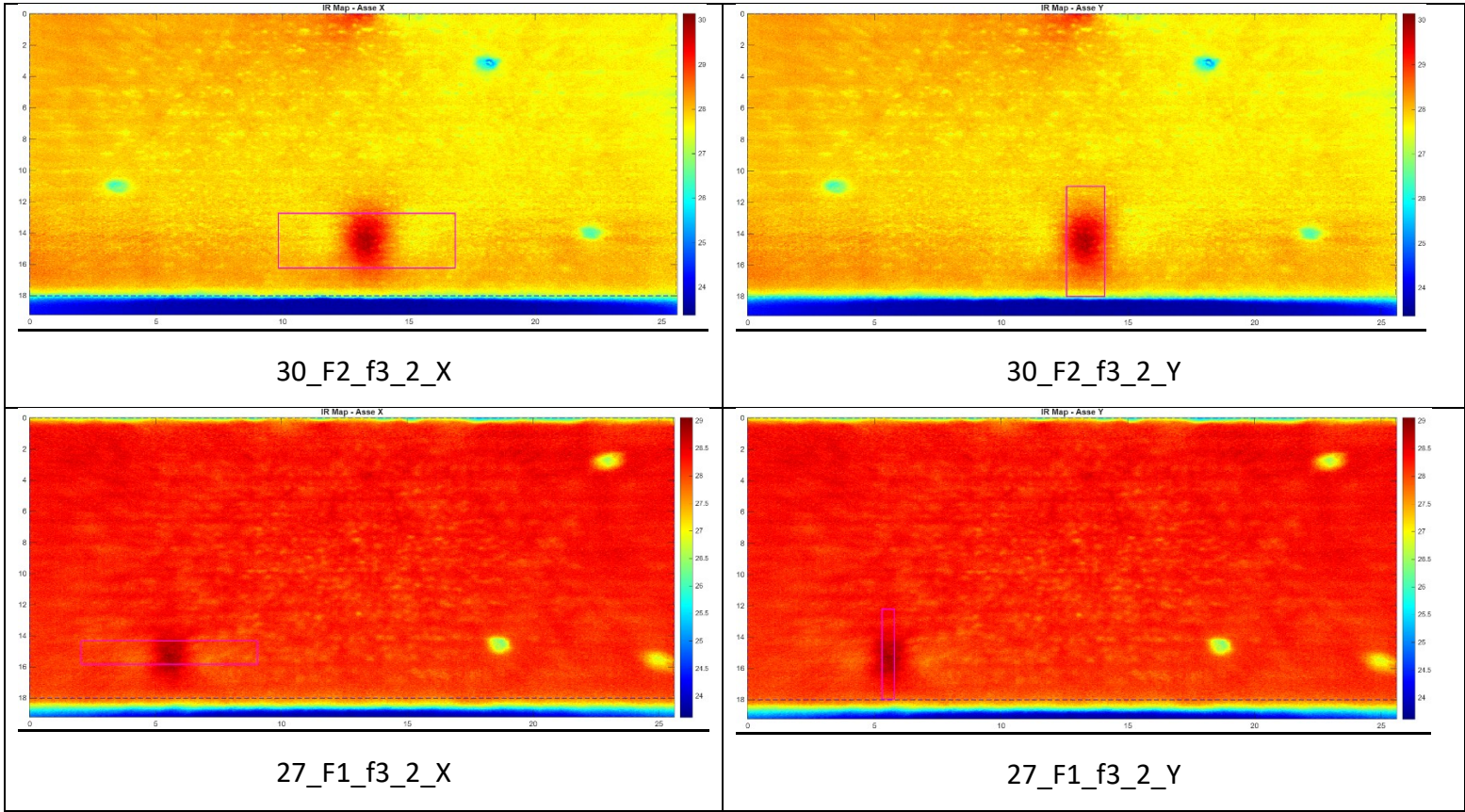


Figura 44 : altri esempi di estrema vicinanza del difetto ai bordi fisici inferiori

Dalla **fig.42** si evince anche un altro fenomeno che interconnette **SNR** di un difetto con la sua misura termografica: difetti più contrastati hanno **SNR** più alti e vengono meglio interpretati dall'algoritmo, ottenendo **profili gaussiani** con ampiezze di picco elevate (elevato contrasto termico locale rispetto al background) e una marcata simmetria. Inoltre le misure con **SNR più alti** tendono ad avere oscillazioni dei dati sperimentali mediati (punti neri) contenute rispetto alla curva di fitting (interpolante) , il che denota una visione più netta e sicura del difetto da parte dell'algoritmo.

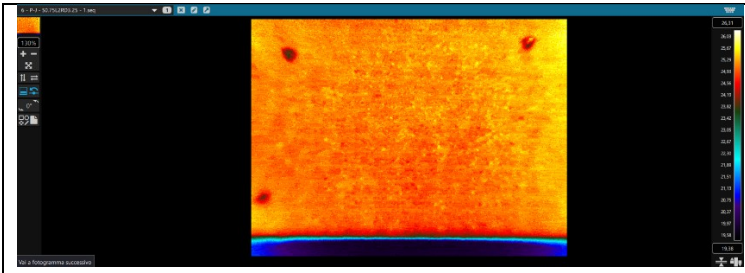
Al momento della redazione di questa tesi **non** sono ancora presenti le **tomografie computerizzate** di tutti i difetti, motivo per cui non si hanno dati a sufficienza per valutare l'accuratezza delle misure termografiche.

Si riporta, infine, come la rimozione del trend di fondo del provino (**linear detrending**) non abbia portato ad un miglioramento significativo nella misura del difetto e nella qualità del fitting dei profili gaussiani lungo la direzione **Y**. Il linear detrending si è rivelato uno strumento utile principalmente per i frame in cui era presente un transitorio marcato, tipico dei frame f2, mentre per i frame f3 e f4 non ha prodotto miglioramenti degni di nota.

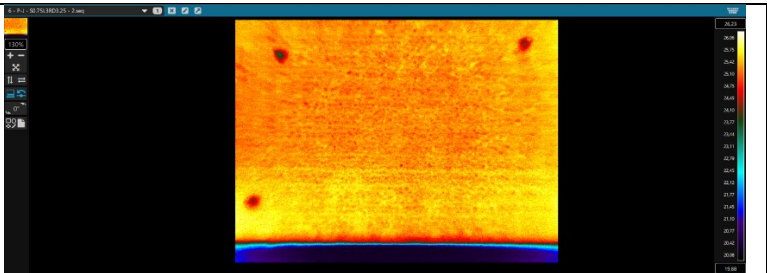
4.2.2 Criterio di selezione per le sessioni di prova multiple

Di seguito viene mostrata la tipologia di difetto che è stato scartato dalla sessione di riprese multiple. Tali difetti si manifestavano termicamente come mostrato nelle immagini **A** e **B** di **fig.45**, traducendosi in un valore di **SNR** inferiore all'unità (come esemplificato nel grafico **C** della medesima figura). Per validare la robustezza di questo criterio di esclusione e confermare la bontà della strategia adottata, il **provino 6** (rappresentato nelle immagini **A**, **B** e **C**) è stato comunque sottoposto all'intera campagna di prove multiple. I risultati hanno confermato l'ipotesi iniziale, evidenziando costantemente un **SNR** inferiore a 1 per tutte le repliche ed escludendo qualsiasi possibilità di elaborazione metrologica.

Al contrario, per i difetti che si collocavano al limite della soglia di rilevabilità (mostrati nelle immagini **D** ed **E**), si è proceduto all'esecuzione completa delle prove ripetute. In questi casi limite, l'elaborazione dei dati ha confermato una condizione di **SNR < 1** (immagine **E**), che ha inibito in modo automatico l'avvio della procedura algoritmica per il calcolo dimensionale del difetto.



A



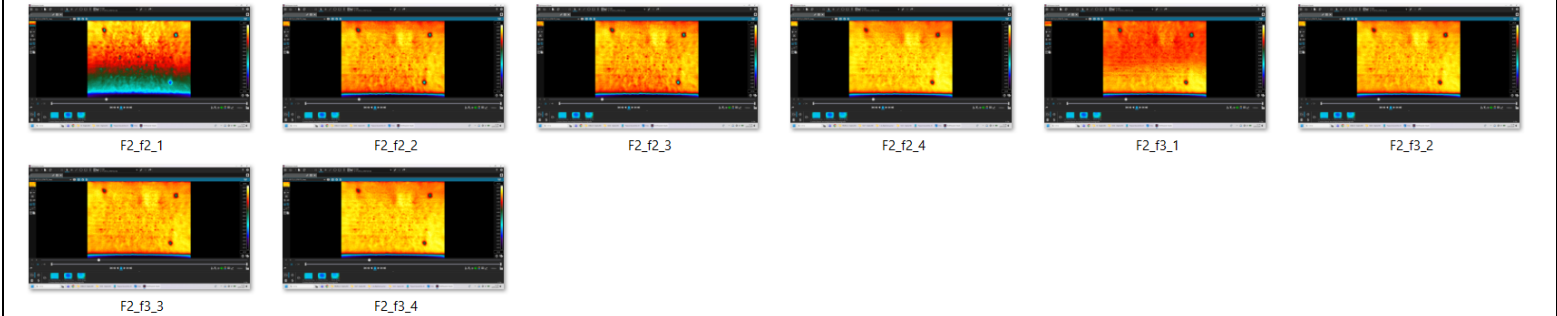
B

	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_SNR	Std_SNR	CV_SNR	Esito_CV_SNR
1							
34	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_L2	P-J	F1_f2_0	3.94	0.41	10.4%	Basso
35	5-P-J-S0.75_L2_FD0.75_f3		F1_f3_0	4.30	0.18	4.2%	Molto Basso
36	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f2		R1_f2_0	0.80	0.23	28.8%	Accettabile
37	5-P-J-S0.75_L2_RD3.5_f3		R1_f3_0	0.77	0.20	26.0%	Accettabile
38	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f2		F2_f2_0	4.64	0.25	5.4%	Molto Basso
39	5-P-J-S0.75_L3_FD0.75_f3		F2_f3_0	4.85	0.33	6.8%	Molto Basso
40	5-P-J-S0.75_L3_RD3.5_f2	P-J	R2_f2_0	0.53	ND	ND	ND
41	5-P-J-S0.75_L3_RD3.5_f3		R2_f3_0	0.53	ND	ND	ND
42	6-P-J-S0.75_L2_FD1_f2		F1_f2_0	4.11	0.28	6.8%	Molto Basso
43	6-P-J-S0.75_L2_FD1_f3		F1_f3_0	4.19	0.24	5.7%	Molto Basso
44	6-P-J-S0.75_L3_FD1_f2		F2_f2_0	4.61	0.28	6.1%	Molto Basso
45	6-P-J-S0.75_L3_FD1_f3		F2_f3_0	4.92	0.24	4.9%	Molto Basso
46	6-P-J-S0.75_L2_RD3.25_f2	P-J	R1_f2_0	0.74	0.19	25.7%	Accettabile
47	6-P-J-S0.75_L2_RD3.25_f3		R1_f3_0	0.59	0.13	22.0%	Accettabile
48	6-P-J-S0.75_L3_RD3.25_f2		R2_f2_0	0.40	0.34	85.0%	Molto Alto
49	6-P-J-S0.75_L3_RD3.25_f3		R2_f3_0	0.57	0.24	42.1%	Alto

C

	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_SNR	Std_SNR	CV_SNR	Esito_CV_SNR
1							
88	11-P-I-S0.5_L3_RD3.75_f3	P-I	R2_f3_0	0.38	ND	ND	ND
89							
90	12-P-I-S0.5_L2_FD1_f2		F1_f2_0	0.95	0.10	10.5%	Basso
91	12-P-I-S0.5_L2_FD1_f3		F1_f3_0	1.05	0.11	10.5%	Basso
92	12-P-I-S0.5_L2_RD3.5_f2		R1_f2_0	0.80	ND	ND	ND
93	12-P-I-S0.5_L2_RD3.5_f3		R1_f3_0	0.63	ND	ND	ND
94	12-P-I-S0.5_L3_FD1_f2	P-I	F2_f2_0	0.606	0.035	5.8%	Molto Basso
95	12-P-I-S0.5_L3_FD1_f3		F2_f3_0	0.652	0.067	10.3%	Basso
96	12-P-I-S0.5_L3_RD3.5_f2		R2_f2_0	0.28	ND	ND	ND
97	12-P-I-S0.5_L3_RD3.5_f3		R2_f3_0	0.21	ND	ND	ND
98	13-P-I-S0.75_L2_FD0.75_f2	P-I	F1_f2_0	1.144	0.098	8.6%	Molto Basso
99	13-P-I-S0.75_L2_FD0.75_f3		F1_f3_0	1.274	0.064	5.0%	Molto Basso
100	13-P-I-S0.75_L2_RD3.5_f2		R1_f2_0	0.83	ND	ND	ND
101	13-P-I-S0.75_L2_RD3.5_f3		R1_f3_0	0.81	ND	ND	ND
102	13-P-I-S0.75_L3_FD0.75_f2		F2_f2_0	0.87	0.20	23.0%	Accettabile
103	13-P-I-S0.75_L3_FD0.75_f3		F2_f3_0	0.87	0.16	18.4%	Basso
104	13-P-I-S0.75_L3_RD3.5_f2	P-I	R2_f2_0	0.22	ND	ND	ND
105	13-P-I-S0.75_L3_RD3.5_f3		R2_f3_0	0.24	ND	ND	ND

D



E

Figura 45

4.3 Altre evidenze sperimentali

4.3.1 Profondità del difetto

Si è constatato come la **profondità** del difetto sia stata il parametro più importante per la rilevabilità dello stesso dato che, al crescere della profondità, il valore di **SNR** del difetto si abbassa sensibilmente.

Di seguito si vogliono mostrare alcune immagini termiche di difetti che evidenziano alcuni aspetti peculiari legati alla **profondità**. Si sfrutta il fatto che la campagna sperimentale sia stata compiuta facendo riprese termografiche in fronte e retro di ogni difetto e che, diversi difetti, avessero profondità differenti fra fronte e retro. Pertanto, al netto di possibili disuniformità del materiale fra fronte e retro, si è riusciti ad isolare l'effetto visivo della differenza di profondità sulla traccia termica del difetto.

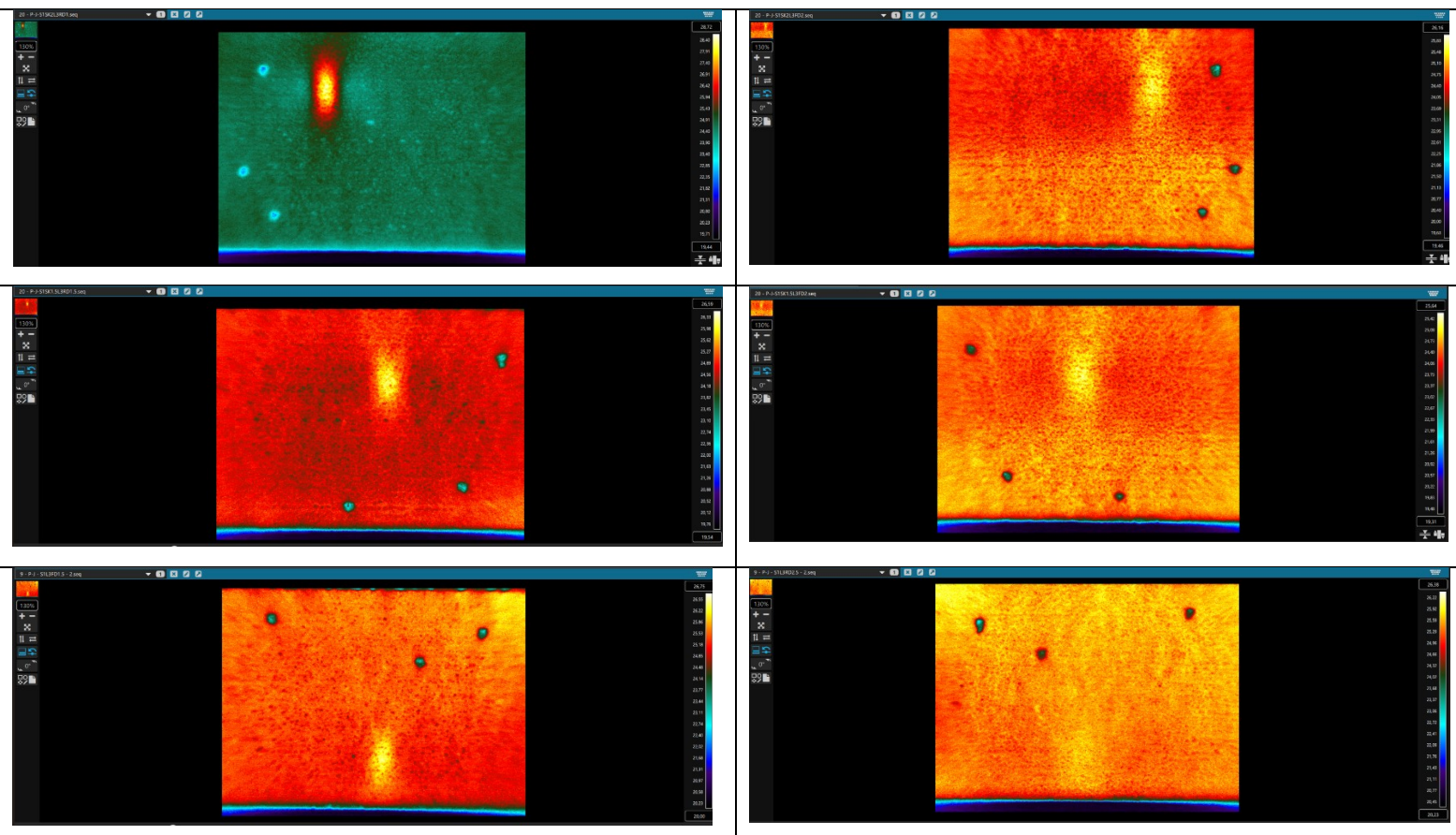


Figura 46 : effetto della profondità sull'immagine termica di un difetto

Nella **fig.46** vengono mostrati sulla sinistra le immagini termiche di difetti poco profondi e sulla colonna di destra le corrispondenti immagini termiche del medesimo difetto, ma ad una profondità superiore.

Dalle immagini di **fig.46** si evince come un difetto profondo, a parità di altre condizioni, risulti essere meno definito nei contorni (effetto di sfocamento termico, **blurring**), meno contrastato ed appare, mediamente, più grande di dimensione rispetto ad un difetto meno profondo. Questo fenomeno è causato dal maggior spazio che l'onda termica deve affrontare prima di affiorare sulla superficie del provino.

4.3.2 Effetto della verniciatura non ottimale

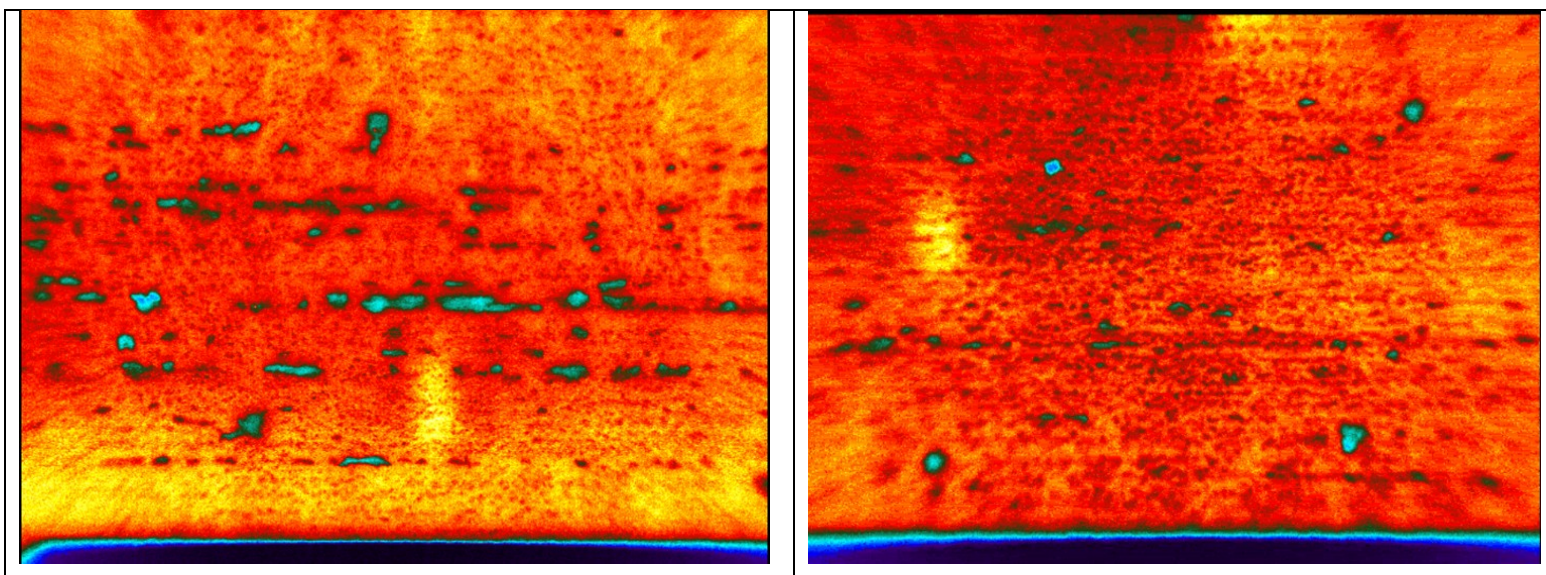


Figura 47 : esempio visivo di verniciatura non ottimale

Una verniciatura non ottimale provoca **variazioni locali di emissività** e un **incremento della riflettanza** superficiale, introducendo **artefatti termici** (visibili come “spot freddi” in ciano in **fig.47**) che riducono il valore di SNR a causa dell'aumento della dispersione statistica della temperatura entro la **ROI_nd**. Tali “spot freddi” appaiono così poiché riflettono l'ambiente circostante che si trova ad una temperatura inferiore rispetto al provino riscaldato per effetto Joule.

Si sottolinea inoltre la difficoltà nell'identificare visivamente le zone di verniciatura non ottimale del provino prima di iniziare una prova termografica.

Per quanto riguarda fenomeni di usura della vernice durante lo svolgimento delle prove termografiche ripetute non si sono riscontrati fenomeni di usura degni di nota.

4.3.3 Effetto della frequenza di acquisizione della termocamera

Il limite principale del lavorare con una termocamera che acquisisce le immagini a bassa frequenza risiede nella limitata scelta di frame disponibili per le misurazioni. Infatti, lavorando con una frequenza di acquisizione di 30 Hz, è stato possibile estrarre mediamente solo due frame utili per ciascuna prova.

Un ulteriore problema legato a una ridotta risoluzione temporale è l'impossibilità di seguire accuratamente l'evoluzione dinamica del transitorio termico del provino. Questo limite fa sì che la capacità di catturare o meno specifici fenomeni transitori di breve durata dipenda fortemente da una sincronizzazione temporale casuale tra la sequenza di acquisizione dei fotogrammi e l'impulso termico fisico. Questa criticità è stata riscontrata sperimentalmente durante le prove ripetute su un provino caratterizzato da una specifica anomalia nella geometria del difetto, ma il concetto può essere esteso in linea generale come la potenziale mancata cattura del frame corrispondente all'istante di massimo contrasto termico (picco di **SNR**) del difetto stesso.

Quanto appena descritto è riscontrabile nella **fig.48**, all'interno della quale è stata inserita anche la **ricostruzione tomografica** del difetto (eseguita in collaborazione con un team di ricerca del Politecnico di Torino) che evidenzia l'anomalia nella geometria del difetto sopra citata.

Si precisa come nella **fig.48** siano state inserite le immagini termografiche corrispondenti allo stesso istante temporale (frame f2) estratte da diverse prove ripetute.

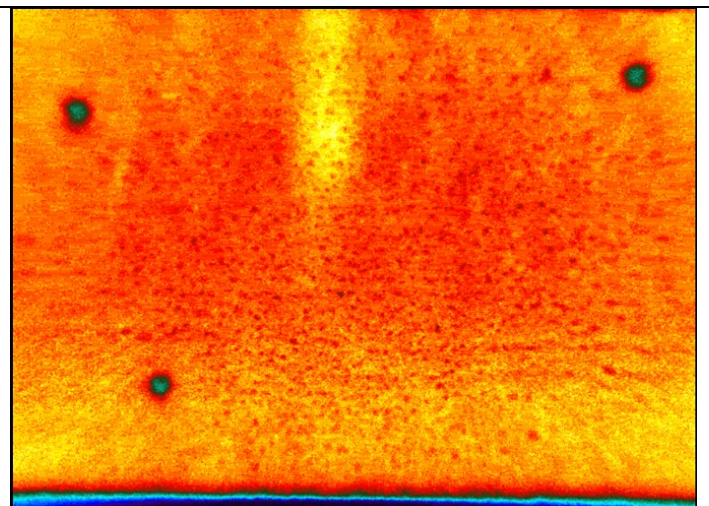
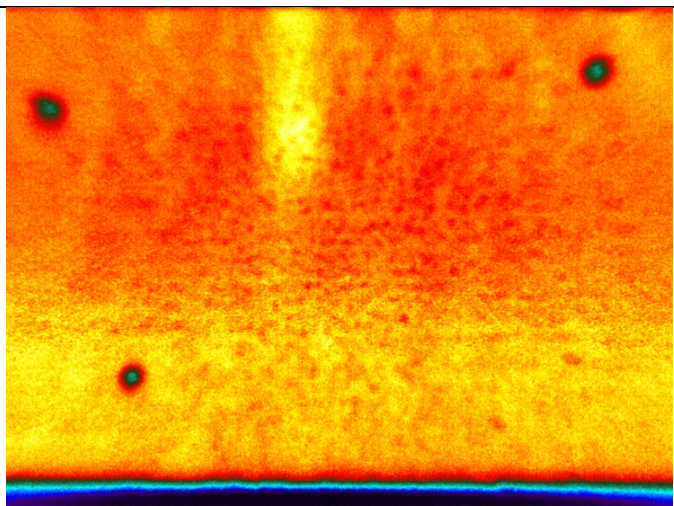
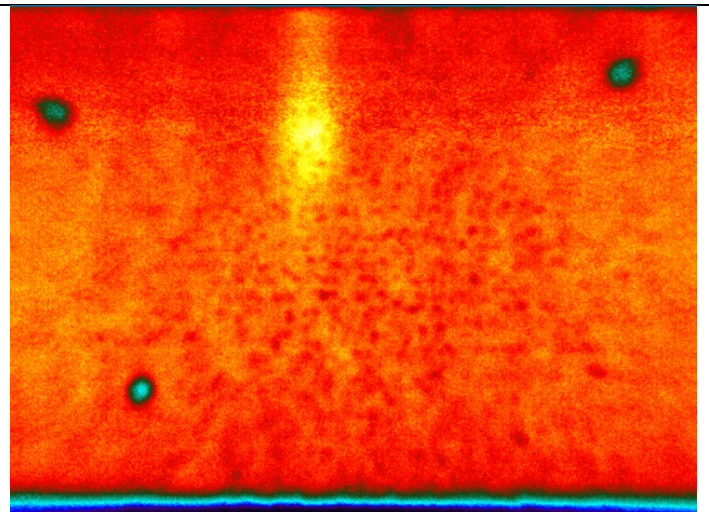
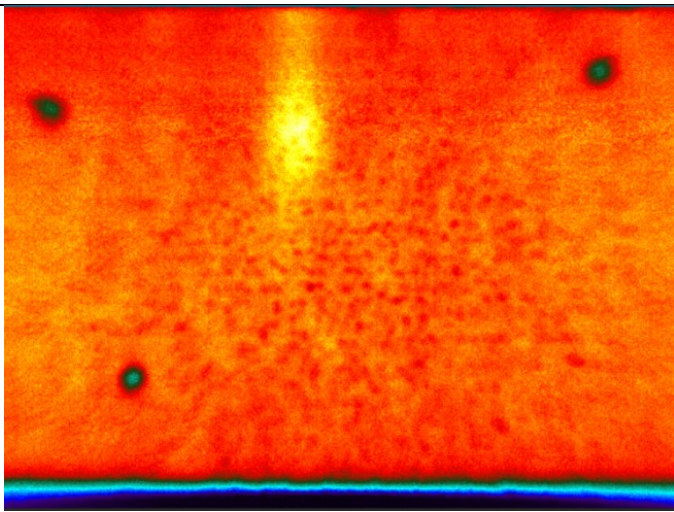
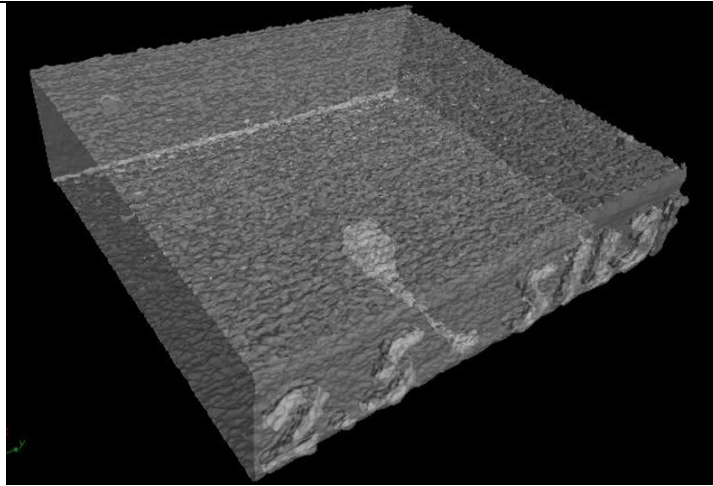
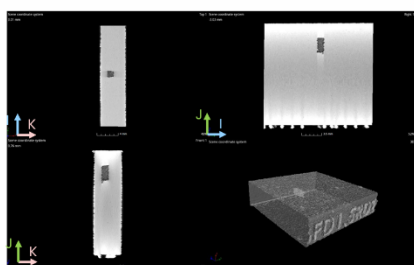


Figura 48

4.3.4 Massima profondità rilevata

La massima profondità di un difetto rilevata tramite **termografia** ed accertata tramite **tomografia computerizzata** risulta pari a **2.3 mm**. Si sottolinea come, a causa della mancata esecuzione dell'indagine tomografica sull'intera serie dei 40 provini, tale valore rappresenti la massima profondità *accertata* e verificata sperimentalmente; tuttavia, non si esclude la possibilità che tra i provini non sottoposti a tomografia siano stati rilevati con successo difetti situati a profondità lievemente superiori.

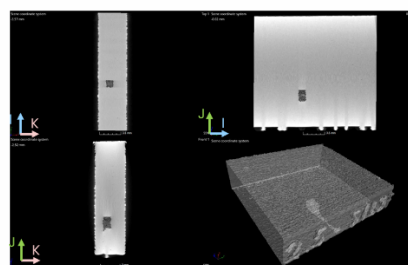
Sample 9 – PJ_S1_L3_FDI.5_RD2.5



Side 1 (//i) (Nominal) [mm]	1,0
Side 2 (//k) (Nominal) [mm]	1,0
Length (Nominal) [mm]	3,0
Depth 1 (Nominal) [mm]	1,5
Depth 2 (Nominal) [mm]	2,5
Side 1 (//i) / SD (Real) [mm / mm]	1,06/0,08
Side 2 (//k) / SD (Real) [mm / mm]	1,18/0,07
Length / SD (Real) [mm / mm]	2,55/0,03
Depth 1 / SD (Real) [mm / mm]	1,27/0,06
Depth 2 / SD (Real) [mm / mm]	2,30/0,06
Side 1 (//i) %err[%]	6,0%
Side 2 (//k) %err[%]	17,7%
Length %err[%]	-15,0%
Depth 1 %err[%]	-15,1%
Depth 2 %err[%]	-7,8%

Difetto 1

Sample 9 – PJ_S1_L2_FDI.5_RD2.5



Side 1 (//i) (Nominal) [mm]	1,0
Side 2 (//k) (Nominal) [mm]	1,0
Length (Nominal) [mm]	2,0
Depth 1 (Nominal) [mm]	1,5
Depth 2 (Nominal) [mm]	2,5
Side 1 (//i) / SD (Real) [mm / mm]	1,15/0,05
Side 2 (//k) / SD (Real) [mm / mm]	1,12/0,01
Length / SD (Real) [mm / mm]	1,79/0,04
Depth 1 / SD (Real) [mm / mm]	1,34/0,07
Depth 2 / SD (Real) [mm / mm]	2,30/0,04
Side 1 (//i) %err[%]	15,0%
Side 2 (//k) %err[%]	12,3%
Length %err[%]	-10,5%
Depth 1 %err[%]	-10,4%
Depth 2 %err[%]	-8,0%

Difetto 2

	Nome_File	Forma_Direzione	ID_Difetto	Media_SNR	Std_SNR	CV_SNR	Esito_CV_SNR	Media_Width	Std_Width	CV_Width
62	8-P-J-S1_L3_FDI.5_f2	P-J	F2_f2_0	5,96	0,75	12,6%	Basso	1,370	0,045	3,3%
63	8-P-J-S1_L3_FDI.5_f3		R2_f2_0	1,08	0,17	15,7%	Basso	1,75	0,35	20,0%
64	8-P-J-S1_L3_RD3_f2		R2_f3_0	1,27	0,12	9,4%	Molto Basso	2,11	0,80	37,9%
65	8-P-J-S1_L3_RD3_f3		R2_f3_0	1,27	0,12	9,4%	Molto Basso	2,11	0,80	37,9%
66	9-P-J-S1_L2_FDI.5_f2	P-J	F1_f2_0	3,25	0,58	17,8%	Basso	1,750	0,050	2,9%
67	9-P-J-S1_L2_FDI.5_f3		F1_f3_0	3,59	0,42	11,7%	Basso	1,740	0,055	3,2%
68	9-P-J-S1_L2_RD2.5_f2		R1_f2_0	1,33	0,17	12,8%	Basso	2,42	0,23	9,5%
69	9-P-J-S1_L2_RD2.5_f3		R1_f3_0	1,480	0,096	6,5%	Molto Basso	1,84	0,76	41,3%
70	9-P-J-S1_L3_FDI.5_f2		F2_f2_0	3,83	0,16	4,2%	Molto Basso	1,51	0,11	7,3%
71	9-P-J-S1_L3_FDI.5_f3		F2_f3_0	4,16	0,16	3,8%	Molto Basso	1,59	0,13	8,2%
72	9-P-J-S1_L3_RD2.5_f2		R2_f2_0	1,07	0,48	44,9%	Alto	3,72	0,13	3,5%
73	9-P-J-S1_L3_RD2.5_f3		R2_f3_0	1,50	0,27	18,0%	Basso	3,33	0,32	9,6%

Figura 49 : risultati tomografia computerizzata (Politecnico di Torino)

4.4 Conclusioni e sviluppi futuri

4.4.1 Sintesi obiettivi e lavoro svolto

Gli obiettivi principali del lavoro di tesi sono stati: lo sviluppo ed il perfezionamento di una metodologia per l'ispezione termografica a infrarossi (**IR**) su componenti in **Additive Manufacturing (AM)** realizzati in **EBM** e lo studio dei fattori di influenza sul **SNR** e dei rilievi dimensionali dei difetti sub-superficiali. I fattori di influenza analizzati sono stati: **profondità, orientamento spaziale, forma e dimensioni del difetto**. Per quanto concerne le dimensioni del difetto, è stata analizzata l'influenza dell'**area ortogonale alla corrente**, del **volume** e dell'**area del difetto proiettata sulla superficie target** esposta all'obiettivo della termocamera.

Per raggiungere questi obiettivi si è sviluppato un algoritmo dedicato, capace di stimare autonomamente il valore di **SNR** e della dimensione del difetto lungo la direzione **X** e **Y**. L'algoritmo, dopo aver ricevuto come ingresso la dimensione nominale del difetto (dimensione del modello **CAD**) ed il centro della traccia termica dello stesso, operava in modalità automatica, consentendo l'elaborazione di un'ampia mole di dati in tempi brevi e con un'ottima ripetibilità. Il protocollo sperimentale adottato si è dimostrato altamente ripetibile ed efficiente. Infine si constata come la pianificazione di raccolta dei dati delle prove sperimentali ha consentito di eseguire un'accurata valutazione statistica e fisica dei risultati ottenuti.

4.4.2 Risultati significativi ottenuti

- La **profondità** è la variabile più incisiva per le rilevazioni termografiche. La profondità incide notevolmente sul contrasto del difetto rispetto allo sfondo (**SNR**), sulla sua nitidezza e definizione dei contorni. L'aumento della profondità tende ad incrementare la dimensione rilevata del difetto tramite la termografia (quando esso è ancora visibile). La massima profondità rilevata e validata da tomografia è stata di **2,3 mm**.
- L'**orientamento spaziale** del difetto è in grado di modificare il valore di **SNR**, mostrando che il maggior valore di contrasto termico del difetto è stato ottenuto per difetti direzionati lungo la direzione **J**.
- L'aumento della **dimensione del difetto** fa incrementare il valore di **SNR** dello stesso. Il parametro dimensionale più importante per **SNR** è l'**area ortogonale** alla corrente del difetto. Altri parametri dimensionali che hanno causato l'aumento di **SNR con il loro** incremento sono stati: il volume del difetto, l'area di quest'ultimo sulla superficie target

del provino esposta all'obiettivo della termocamera e la dimensione del difetto lungo la direzione ortogonale alla corrente.

- La **forma del difetto** è in grado di influenzare il valore numerico di **SNR**. Le forme prismatiche dei difetti hanno ottenuto, mediamente, valori di **SNR** più alti rispetto alle forme cilindriche. Pertanto si è concluso che forme con spigoli vivi costituiscono un maggior ostacolo al normale passaggio della corrente rispetto a difetti con forme smussate e cilindriche.
- Un elevato **SNR** garantisce una maggiore stabilità e precisione nel processo di identificazione dei bordi e di calcolo dimensionale da parte dell'algoritmo.
- **Ripetibilità delle misure (X vs Y)**: le prove ripetute hanno evidenziato una dispersione statistica nettamente inferiore lungo la direzione **X** (parallela al flusso di corrente) rispetto alla direzione **Y** (ortogonale). Il **74,8%** delle misure lungo **X** ha ottenuto un **CV** inferiore al **10%**, a fronte di appena il **22,7%** riscontrato per l'asse **Y**. Il motivo principale di questa discrepanza risiede nella presenza del marcato gradiente termico di background lungo l'asse **Y** che si sovrappone alla traccia termica del difetto, combinato al maggior numero di pixel (maggiore estensione spaziale della **ROI**) analizzati lungo la direzione **Y**. A questo fenomeno si aggiungono la ridotta flessibilità nel posizionamento e dimensionamento della **ROI** dovuta alla vicinanza dei difetti ai bordi fisici (superiore e inferiore) del provino, la sovrapposizione dei relativi effetti termici di bordo e la metodologia di acquisizione dei fotogrammi della termocamera FLIR A700 (rolling shutter).
- La metodologia proposta ha dimostrato un'elevata efficienza temporale, sia nella fase di acquisizione termografica che in quella di elaborazione delle matrici termiche.

4.4.3 Limiti della ricerca

- Il principale limite della ricerca è stato l'assenza delle **tomografie computerizzate** per l'intero set di 40 provini. Questo aspetto ha consentito di giudicare solamente la chiarezza con cui l'algoritmo vedeva ed interpretava ogni traccia termica di un difetto, ovvero ha limitato le considerazioni sugli esiti delle misure solamente a **precisione** e **ripetibilità**, ma non ha consentito di creare alcuna statistica che trattasse l'**accuratezza** delle misurazioni svolte
- La frequenza di campionamento (pari a 30 Hz) che ha fortemente limitato il numero di frame utili analizzabili. Questo limite introduce un potenziale errore di discretizzazione

temporale, che può inficiare la stima dell'**SNR** massimo e compromettere la fedeltà della ricostruzione geometrica dei dettagli più fini del difetto.

4.4.4 Possibili sviluppi futuri

La tecnica di termografia a infrarossi ad eccitazione elettrica (**Joule Hearing IRT**) ha confermato i suoi vantaggi in termini di tempistiche di acquisizione, elaborazione dei dati ed economicità di esercizio. Per la rilevazione di difetti entro i 2 mm di profondità, questa metodologia si è dimostrata un'alternativa estremamente valida, rapida e non distruttiva rispetto alla tomografia computerizzata. Possibili sviluppi futuri della ricerca potrebbero riguardare l'analisi dell'influenza dei **parametri hardware della termocamera** sulle capacità di misura. Nello specifico, si suggerisce di indagare il ruolo della **sensibilità termica (NETD)**, della **risoluzione spaziale del sensore (numero di pixel)** e della **frequenza temporale di acquisizione (frame rate)**, procedendo a una stima quantitativa dell'**accuratezza** mediante il confronto sistematico con i rilievi tomografici. Questa futura indagine consentirà di delineare i requisiti tecnici e i parametri chiave per lo sviluppo e l'ottimizzazione di una termocamera altamente specializzata per il controllo non distruttivo dei difetti sub-superficiali nei componenti AM.

5. BIBLIOGRAFIA

1. S. Defanti, S. De Giorgi, G. Rizza, G. Colombini, L. Denti, e M. Galati, "Detection of sub-superficial defects by infrared thermography in parts made by powder bed fusion with electron beam," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 10533-10547, 2025, doi: 10.1007/s40964-025-01313-z.
2. FLIR Systems, *Manuale di termografia ad infrarossi per il mercato delle costruzioni e delle energie rinnovabili*, FLIR Systems, [2011].
3. FLIR Systems, *Thermal Imaging Guidebook for Industrial Applications*, FLIR Systems, [2011].
4. E. D'Accardi, S. Altenburg, C. Maierhofer, D. Palumbo, e U. Galletti, "Detection of Typical Metal Additive Manufacturing Defects by the Application of Thermographic Techniques," in *Proceedings of the 15th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA 2019)*, vol. 27, n. 1, p. 24, Settembre 2019, doi: 10.3390/proceedings2019027024.
5. Oster S, Breese PP, Ulbricht A et al (2024) A deep learning framework for defect prediction based on thermographic in-situ monitoring in laser powder bed fusion. *J Intell Manuf* 35:1687-1706. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02117-0>.
6. Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J et al (2014) Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors* 14:12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>.
7. Deane S, Avdelidis NP, Ibarra-Castanedo C et al (2019) Application of NDT thermographic imaging of aerospace structures. *Infrared Phys Technol* 97:456–466. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.02.002>.
8. Galati M, De Giorgi S, Rizza G et al (2025) A review of ex-situ, in situ and artificial intelligence-based thermographic measurements in additively manufactured parts. *J Nondestr Eval* 44:68. <https://doi.org/10.1007/s10921-025-01195-9>.
9. Ibarra-Castanedo C, Tarpani JR, Maldague XPV (2013) Nondestructive testing with thermography. *Eur J Phys* 34:S91–S109. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/6/S91>.
10. P. J. Withers, C. Bouman, S. Carmignato, V. Cnudde, D. Grimaldi, C. K. Hagen, E. Maire, M. Manley, A. Du Plessis, e S. R. Stock, "X-ray computed tomography," *Nature*

Reviews Methods Primers, vol. 1, n. 1, Art. n. 15, pp. 1-21, Gennaio 2021, doi: 10.1038/s43586-021-00015-4.

- 11.** F. Ciampa, P. Mahmoodi, F. Pinto, e M. Meo, "Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components," *Sensors*, vol. 18, n. 2, art. n. 609, Febbraio 2018, doi: 10.3390/s18020609.
- 12.** Lecompanion J, Hirsch PD, Rupprecht C, Ziegler M (2023) Nondestructive thermographic detection of internal defects using pixel-pattern based laser excitation and photothermal super resolution reconstruction. *Sci Rep* 13:3416. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30494-2>.
- 13.** Connolly MP (1991) A review of factors influencing defect detection in infrared thermography: applications to coated materials. *J Nondestruct Eval* 10:89–96. <https://doi.org/10.1007/BF00567440>.
- 14.** Kolb CG, Zier K, Grager J-C et al (2021) An investigation on the suitability of modern nondestructive testing methods for the inspection of specimens manufactured by laser powder bed fusion. *SN Appl Sci* 3:713. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04685-3>.
- 15.** Moskovchenko A, Švantner M, Vavilov V, Chulkov A (2022) Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography. *NDT and E Int* 130:102673. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102673>.
- 16.** Sauer C, Höfflin D, Schiffler A, Hartmann J (2024) Active thermography in PBF-LB/M with the synchronized path infrared thermography. *Procedia CIRP* 124:283–286. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.118>.
- 17.** D'Accardi E, Ulbricht A, Krankenhagen R et al (2021) Capability of active thermography to detect and localize pores in metal additive manufacturing materials. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 1038:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1038/1/012018>.
- 18.** Usamentiaga R, Ibarra-Castaneda C, Maldague X (2018) More than fifty shades of grey: quantitative characterization of defects and interpretation using SNR and CNR. *J Nondestruct Eval* 37:25. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0479-z>.

