



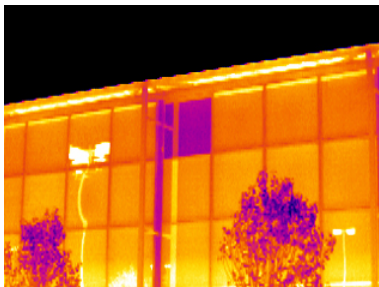
# Fondamenti di Termografia

## Corso di Geofisica applicata e Controlli non Distruttivi per l'Architettura

**Carlo Piga**

Università degli Studi di Cagliari  
Dipartimento di Ingegneria del Territorio  
Sezione di Geofisica e Geologia Applicata

24 Novembre 2008



## Termografia

La Termografia è un tipo di acquisizione immagini nel campo dell' infrarosso. Con termogramma si intende la visualizzazione bidimensionale della misura di irraggiamento.

Realizzata attraverso "termocamere" in grado di focalizzare attraverso un sistema di lenti la radiazione infrarossa su un elemento sensibile e convertirla in un'immagine i cui colori sono rappresentativi della temperatura superficiale dell'oggetto inquadrato

Fondamenti  
di  
Termografia

Carlo Piga

Introduzione e

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography



Lo spettro elettromagnetico é stato convenzionalmente diviso in funzione della lunghezza d'onda della radiazione.

E' possibile classificare le onde elettromagnetiche in base alla loro lunghezza d'onda. Procedendo secondo valori di lunghezza d'onda  $\lambda$  decrescenti:

- 1 raggi  $\gamma$ ;
- 2 raggi X ;
- 3 raggi ultravioletti;
- 4 banda del visibile;
- 5 banda infrarossa;
- 6 micro onde;
- 7 onde radio.

# Lo spettro elettromagnetico



Fondamenti  
di  
Termografia

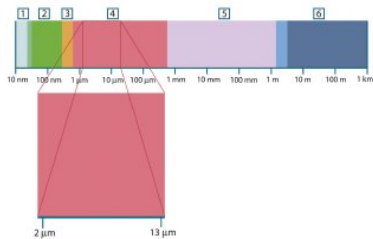
Carlo Piga

Introduzione e

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography



La termografia è una tecnica che consente di evidenziare e misurare a distanza il calore rilasciato dalle radiazioni infrarosse emesse da tutti i corpi caldi e si serve della banda delle radiazioni infrarosse. La banda delle radiazioni infrarosse è stata a sua volta divisa in *basso infrarosso* (0.75-3  $\mu\text{m}$ ), *medio infrarosso* (6-15  $\mu\text{m}$ ), *alto infrarosso* (15-100  $\mu\text{m}$ ).



## Definizione di Corpo Nero

Un corpo nero è definito come un corpo capace di assorbire radiazioni che incidono su di esso indipendentemente dalla loro lunghezza d'onda.

Tecnicamente un contenitore vuoto in cui sia presente una piccola apertura che comunica con una cavità interna mantenuta a temperatura costante può essere assimilato ad un corpo nero.

Le radiazioni che entrano nella cavità subiscono una serie di riflessioni multiple attenuandosi progressivamente e una parte trascurabile dell'energia entrante lascia la cavità attraverso l'apertura.



# Legge di Plank

L'espressione che descrive la radiazione emessa da un corpo nero si deve a Max Planck (1858-1947):

$$W = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Dove:

- 1  $W$ : emittanza di corpo nero alla lunghezza d'onda  $\lambda$
- 2  $T$ : temperatura assoluta
- 3  $\lambda$ : lunghezza d'onda
- 4  $c$ : velocità della luce
- 5  $h$ : costante di Plank
- 6  $k$ : costante di Boltzmann

Fondamenti  
di  
Termografia

Carlo Piga

Introduzione

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

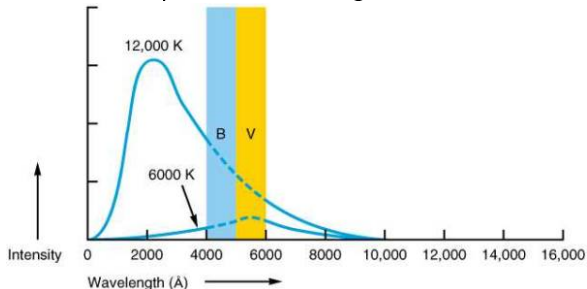
Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography



# Legge di Plank

La formula di Plank può essere calcolata per differenti valori di temperatura e consente di determinare una curva che lega l'emittanza spettrale alla lunghezza d'onda.



Fondamenti  
di  
Termografia

Carlo Piga

Introduzione

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography



Dall'analisi di queste curve è possibile individuare la lunghezza d'onda a cui corrisponde l'emittanza massima. La legge di Wien esprime questa relazione.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2)$$

in cui

- 1  $T$ : temperatura assoluta espressa in  $^{\circ}\text{K}$
- 2  $\lambda$ : lunghezza d'onda espressa in  $\mu\text{m}$



# Legge di Wien



Fondamenti  
di  
Termografia

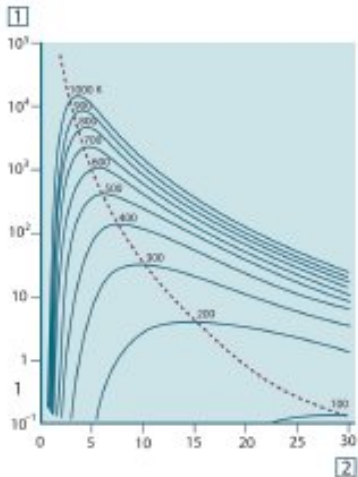
Carlo Piga

Introduzione

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography





L'espressione della legge di Plank può essere integrata tra  $\lambda = 0$  e  $\lambda = \infty$  ottenendo la legge di Stefan-Boltzmann che esprime la radianza totale emessa da un corpo nero.

$$W_{tot} = \sigma T^4 \quad (3)$$

La formula, ricavata da Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), indica che la potenza totale emessa da un corpo nero  $W_{tot}$  è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta  $T$ .



Quanto visto finora ha validità per un corpo nero. Un corpo nero esiste però solo da un punto di vista concettuale ed un comportamento simile può essere associato solo a dispositivi particolari. Tuttavia i corpi reali si comportano secondo modalità diverse da quelle che caratterizzano un corpo nero. Sono fondamentalmente tre i processi che differenziano un corpo reale da un corpo nero:

- 1 l'assorbimento non risulta uniforme in tutto lo spettro della radiazione;
- 2 la radiazione incidente viene parzialmente riflessa in misura dipendente dalla sua lunghezza d'onda;
- 3 la radiazione che non viene assorbita o riflessa viene trasmessa attraverso il mezzo.



Si definiscono pertanto:

- 1 **assorbanza spettrale**  $\alpha_\lambda$  : rapporto tra la potenza radiante assorbita e quella incidente;
- 2 **riflettanza spettrale**  $\rho_\lambda$  : rapporto fra la potenza radiante riflessa e quella incidente;
- 3 **trasmissione spettrale**  $\tau_\lambda$  : rapporto fra la potenza radiante trasmessa attraverso il mezzo e quella incidente.

L'indice  $\lambda$  indica il fatto che tali grandezze dipendono dalla lunghezza d'onda.



Inoltre vale la relazione:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (4)$$

Per un materiale opaco  $\tau_{\lambda} = 0$  pertanto

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (5)$$



Per poter descrivere la quantità di energia radiante emessa da un oggetto generico, non necessariamente un corpo nero, ad una specifica temperatura si definisce il parametro  $\varepsilon_\lambda$  dipendente dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  pari al rapporto tra la potenza termica emessa da un corpo che si trovi ad una specifica temperatura e quella emessa da un corpo nero che si trovi alla medesima temperatura.

Nella generalità dei casi un corpo si definisce:

- 1 **corpo nero** se  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$ ;
- 2 **corpo grigio** se  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon < 1$ ;
- 3 **radiatore selettivo** se  $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$ .



Applicando la formula di Stefan-Boltzmann ad un corpo grigio otteniamo:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

un corpo grigio, a differenza di un corpo nero, emette un potenza radiante ridotta del fattore  $\varepsilon$ .



La termocamera è un strumento di misura sensibile alla radiazione infrarossa. La misura della temperatura è una misura indiretta resa possibile tramite la modellizzazione del caso reale per ricavare la variabile di interesse. Consideriamo un **corpo nero** disposto a una breve distanza dalla termocamera. Allora se  $T_{sorgente}$  è la temperatura della sorgente, essa emetterà l'energia  $W = W(T_{sorgente})$ . La termocamera rivelerà un segnale in ingresso  $U_{sorgente}$  proporzionale all'energia ricevuta:

$$U_{sorgente} = CW(T_{sorgente}) \quad (7)$$

con  $C$  costante di proporzionalità.





Oppure nel caso di corpo grigio:

$$U_{sorgente} = C\varepsilon W (T_{sorgente}) \quad (8)$$

Poichè la radiazione infrarossa emessa da un oggetto si trasmette attraverso l'atmosfera, allora indicando con  $\tau$  la trasmittanza dell'atmosfera, l'emissione dell'oggetto rilevata dalla termocamera sarà espresso dalla relazione:

$$U_{oggetto} = C\tau\varepsilon W (T_{oggetto}) \quad (9)$$



Il corpo grigio considerato, sorgente della radiazione, riflette inoltre la radiazione proveniente dagli oggetti circostanti. Supponendo che questi ultimi si trovino alla temperatura  $T_{rifl}$  e che la riflettanza della sorgente sia  $1 - \varepsilon$  allora

$$W_{oggetto} + W_{riflessa} = \tau [\varepsilon W(T_{oggetto}) + (1 - \varepsilon) W(T_{riflessa})] \quad (10)$$



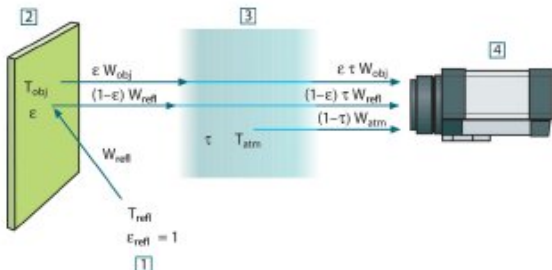
E' necessario inoltre tenere in considerazione l'emissione dell'atmosfera. Se  $(1 - \tau)$  è l'emittanza dell'atmosfera allora introducendo un termine che tenga conto del fenomeno nella formula precedente

$$\begin{aligned} W_{totale} &= W_{oggetto} + W_{riflessa} + W_{atmosfera} = \\ &= \tau \varepsilon W(T_{oggetto}) \\ &\quad + \tau (1 - \varepsilon) W(T_{riflessa}) \\ &\quad + (1 - \tau) W(T_{atmosfera}) \end{aligned} \tag{11}$$



Semplificando

$$\begin{aligned} W_{totale} = & \tau \varepsilon W_{oggetto} \\ & + \tau (1 - \varepsilon) W_{rifl} \\ & + (1 - \tau) W_{atmosfera} \end{aligned} \quad (12)$$





Moltiplicando per la costante  $C$

$$\begin{aligned} CW_{totale} = & C\tau\varepsilon W_{oggetto} \\ & + C\tau(1 - \varepsilon) W_{riflessa} \\ & + C(1 - \tau) W_{atmosfera} \end{aligned} \quad (13)$$



Essendo

$$\begin{aligned}U_{\text{oggetto}} &= CW_{\text{oggetto}} \\U_{\text{riflessa}} &= CW_{\text{riflessa}} \\U_{\text{atmosfera}} &= CW_{\text{atmosfera}} \\U_{\text{totale}} &= CW_{\text{totale}}\end{aligned}\tag{14}$$



allora

$$\begin{aligned} U_{totale} = & \tau \varepsilon U_{oggetto} \\ & + \tau (1 - \varepsilon) U_{riflessa} \\ & + (1 - \tau) U_{atmosfera} \end{aligned} \quad (15)$$





Il segnale in uscita dalla termocamera è  $U_{totale}$  ma, poichè la finalità della misura è la determinazione della temperatura dell'oggetto, il segnale di interesse è  $U_{oggetto}$  attraverso il quale determinare il valore della temperatura.

$$U_{oggetto} = \frac{1}{\tau\varepsilon} U_{totale} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{riflessa} - \frac{1-\tau}{\tau\varepsilon} U_{atmosfera} \quad (16)$$



In cui:

- $U_{oggetto}$  rappresenta la temperatura che misurerebbe la termocamera per un corpo nero di temperatura  $T_{oggetto}$ ;
- $U_{totale}$  è il valore misurato dalla termocamera per il caso specifico;
- $U_{riflessa}$  è la tensione di uscita teorica per un corpo nero alla temperatura  $T_{riflessa}$ ;
- $U_{atmosfera}$  è la tensione di uscita per un corpo nero alla temperatura  $T_{atmosfera}$ .



La trasmissività dell'atmosfera ( $\tau$ ) può essere calcolata nota la temperatura ( $T_{atmosfera}$ ), l'umidità relativa ( $u_{rel}$ ) e la distanza dell'oggetto ( $d$ ). Da questi quattro parametri è possibile ricavare  $U_{atmosfera}$  servendosi dell'equazione (3) e (7). Con le medesime equazioni e la temperatura effettiva dell'area circostante l'oggetto o la temperatura ambientale riflessa ( $T_{riflessa}$ ) è possibile ricavare il valore di  $U_{riflessa}$ . Il valore  $U_{totale}$  rivelato dalla termocamera e  $\varepsilon$ , emissività dell'oggetto inquadrate, consentono infine di ricavare il valore di temperatura dell'oggetto mediante l'espressione:

$$T = \sqrt[4]{\frac{U_{oggetto}}{C\sigma}} \quad (17)$$



Quindi i parametri necessari per la misura della temperatura, oltre al segnale rilevato della termocamera, sono:

- 1  $T_{atmosfera}$ : temperatura atmosferica;
- 2  $u_{rel}$ : umidità relativa;
- 3  $d$ : distanza dell'oggetto dall'obiettivo della termocamera;
- 4  $T_{riflessa}$ : temperatura riflessa.

Tali parametri vengono impostati nella termocamera per calcolare indirettamente il valore di temperatura a partire dal segnale misurato dalla termocamera. Questi consentono al software "embedded" nella termocamera di operare i calcoli necessari alla determinazione della temperatura registrata nei file che contengono i termogrammi.



A seconda della specifica applicazione i metodi di prospezione termografica possono essere classificati in due grandi categorie:

- 1 Metodi Termografici Attivi
- 2 Metodi Termografici Passivi

Nella configurazione *passiva* la termocamera inquadra la scena, puntata verso gli oggetti da ispezionare e non è applicata alcuna perturbazione termica. Nella configurazione *attiva* gli oggetti ispezionati vengono sottoposti ad una perturbazione termica per generare il necessario contrasto termico per evidenziare la presenza di anomalie al di sotto della superficie inquadrata.



I metodi termografici attivi prevedono l'utilizzo di una stimolazione termica del materiale sotto esame. Una classificazione delle differenti tecniche di indagine termografica attiva é eseguita proprio tenendo conto del tipo di stimolazione in:

- Pulsed Thermography (PT);
- Lockin Thermography (LT);
- Vibrothermography (VT).



La termografia pulsata consiste nel riscaldare con un impulso termico intenso e di breve durata il materiale sotto esame e nel monitorare l'evoluzione temporale della temperatura superficiale del provino. Fisicamente il fenomeno è legato alla propagazione per conduzione del fronte termico all'interno del materiale, congiuntamente agli effetti secondari di convezione e irraggiamento che si verificano all'interfaccia provino-aria. Solitamente l'impulso termico viene trasmesso sulla medesima superficie su cui viene eseguita l'acquisizione termografica e la presenza di anomalie causa in prossimità di esse un'alterazione del fronte di propagazione del calore, comportando la generazione di un contrasto di temperatura sulla superficie circostante evidenziabile nell'immagine termica come aree a temperatura differente rispetto alle regioni circostanti.

Fondamenti  
di  
Termografia

Carlo Piga

Introduzione

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

**Pulsed Ther-  
mography**  
Lockin Ther-  
mography  
Vibro Ther-  
mography



Il fronte di calore avanza nel materiale con un velocità legata alla diffusività del materiale  $\alpha$ , quindi iniziando l'acquisizione di immagini termiche immediatamente al cessare dell'impulso con una prefissata cadenza temporale, le prime immagini riveleranno le anomalie più superficiali e, col trascorrere del tempo, le immagini successive quelle maggiormente profonde. Il tempo di osservazione  $t$  è in prima approssimazione una funzione del quadrato della profondità  $z$  mentre la perdita di contrasto  $c$  è proporzionale al cubo della profondità.





La metodica così descritta, con applicazione del calore e registrazione dei termogrammi sulla stessa superficie, viene detta comunemente per riflessione. Essa ha una buona risoluzione ma una ridotta capacità di penetrazione.

Disponendo invece sorgente termica e rivelatore termico su lati opposti del provino si realizza una termografia per trasparenza che consente una maggiore penetrazione ma una risoluzione inferiore in quanto la maggiore distanza percorsa dal fronte termico rende i termogrammi maggiormente sfumati e con un inferiore contrasto.



La tecnica termografica pulsata LP utilizza impulsi di riscaldamento di inferiore intensità rispetto alla termografia PT ma di durata molto maggiore. L'analisi quindi non si concentra sul ramo discendente della curva tempo-temperatura ma sulla parte crescente della curva durante la fase di riscaldamento conseguente la somministrazione termica, realizzata mediante la scansione di un fascio laser.



L'impulso di breve durata della termografia pulsata può essere analizzato nel dominio della frequenza, evidenziandone la composizione spettrale. L'avanzamento del fronte d'onda conseguente all'impulso può quindi essere scomposto in una serie di onde termiche a differente frequenza, che si propagano nel provino.

Tale considerazione ha ispirato una variante alla tecnica della termografia pulsata chiamata Pulsed Phase Thermography (PPT) che, analoga per tecnica di energizzazione alla termografia pulsata, analizza separatamente le varie frequenze che compongono l'impulso termico.



Richiamando la teoria delle onde termiche, poichè la riduzione di ampiezza che un'onda termica subisce durante la sua propagazione è proporzionale alla sua lunghezza d'onda, è possibile affermare che le componenti dell'impulso di minore lunghezza d'onda, subendo una rapida attenuazione all'avanzare nel materiale, subiranno l'influenza di anomalie presenti nelle regioni più superficiali, mentre quelle a maggiore lunghezza d'onda di anomalie presenti nelle regioni più profonde.

La scomposizione del fenomeno termico nelle sue componenti nel dominio della frequenza consente di esaltare gli effetti di onde che interessano profondità differenti e quindi ricavare importanti informazioni circa la profondità dell'anomalia.



La termografia Lockin è caratterizzata da un'energizzazione realizzata mediante un'onda termica a carattere periodico sinusoidale con frequenza predeterminata. La strumentazione necessaria all'energizzazione è costituita, nella maggioranza dei casi, da proiettori cinematografici o lampade ad incandescenza, la cui modulazione alla frequenza richiesta è realizzata o da sistemi elettronici che ne pilotano l'alimentazione o con strumenti meccanici che parzializzano la fonte luminosa. Si tratta di una tecnica per riflessione in cui l'acquisizione dei termogrammi e la sollecitazione termica avvengono sulla medesima superficie del provino.



Un'onda termica che si propaghi nel materiale dalla superficie verso le regioni a maggiore profondità in presenza di anomalie, viene riflessa indietro verso la superficie. La legge fisica che governa la propagazione dell'onda nel materiale prevede la presenza di un ritardo di fase durante l'avanzamento del fronte d'onda proporzionale alla distanza percorsa dalla sorgente, con costante di proporzionalità legata alla diffusività del materiale. L'onda riflessa dalle anomalie osservabile in superficie subisce quindi uno sfasamento legato alla distanza percorsa, oltre un'attenuazione, e si somma in superficie all'onda energizzante. Il segnale rivelato dalla termocamera corrisponde pertanto a tale somma e presenterà rispetto al segnale energizzante - l'intensità dell'impulso luminoso - uno sfasamento e una variazione di ampiezza legata alla presenza di eventuali riflessioni.

Fondamenti  
di  
Termografia

Carlo Piga

Introduzione

Fisica della  
radiazione  
infrarossa

Metodi di  
prospezione  
termografica

Pulsed Ther-  
mography  
**Lockin Ther-  
mography**  
Vibro Ther-  
mography



Dall'analisi dei termogrammi è possibile ricavare per ciascun pixel dell'immagine tre informazioni significative:

- il valore di temperatura media;
- l'ampiezza dell'onda termica;
- la fase dell'onda termica.



## Temperatura media

Il valore di temperatura media consente di ricostruire il termogramma corrispondente alla risposta del provino a un'energizzazione di intensità pari alla media dell'oscillazione periodica, esprimendo quindi la componente continua del fenomeno. Il suo equivalente fisico è quindi assimilabile ad una somministrazione di energia termica con un tasso costante. Esso presenta quindi un'evoluzione temporale analoga a quella della termografia pulsata LP, e presenta un andamento temporale asintotico verso una situazione di stazionarietà dopo l'esaurimento del fenomeno transitorio iniziale. In ultima analisi esso fornisce un'immagine della distribuzione di potenza termica emessa evidenziandone la mancata uniformità.





## Ampiezza dell'onda termica

In condizioni di stazionarietà dopo il transitorio iniziale, in assenza di anomalie, l'onda termica generata in superficie, si propaga nel materiale attenuandosi e vedendo quindi la sua ampiezza decrescere con l'aumentare della distanza dalla superficie.

Dove invece sono presenti anomalie al di sotto della superficie, una parte dell'energia dell'onda termica viene riflessa, e si somma all'onda originaria alterandone il contenuto energetico e quindi l'ampiezza.

L'ampiezza dell'onda termica esprime quindi la variabilità locale di diffusività.



## Fase dell'onda termica

L'avanzare del fronte di un'onda termica all'interno di un materiale causa un ritardo di fase proporzionale alla distanza percorsa.

La variazione di fase dell'onda termica risulta pertanto proporzionale a questo valore e consente di stimare la profondità dei difetti che generano le anomalie evidenziate dall'immagine di fase.



L'idea che ha ispirato la vibrotermografia si deve al fisico tedesco W.E. Weber (1804-1891), il quale ha scoperto che un'incremento di lunghezza di un materiale causa una riduzione di temperatura

Tale concetto é stato poi formalizzato dal fisico inglese W. Kelvin (1824-1907) nel 1853 e da J. Joule(1818-1889) nel 1857. Data la reciprocità degli effetti, una riduzione di dimensione causa un incremento di temperatura.

Una sollecitazione meccanica periodica di un materiale causa pertanto un incremento di temperatura localizzato in corrispondenza di punti di concentrazione di sforzi.



La vibrotermografia é una tecnica di indagine termica che si basa su tale principio. L'azione di una sollecitazione meccanica periodica generata attraverso vibrazioni a frequenza compresa tra 0 e 25 kHz, per effetto della conversione diretta tra energia meccanica ed termica, causa un rilascio di calore in corrispondenza di rotture e delaminazioni, rendendole visibili attraverso l'imaging termico.