

# TERMOGRAFIA STIMOLATA

Richiede una **sorgente di calore esterna per stimolare il materiale** per l'ispezione. Se il **flusso termico è disturbato da un difetto** lungo lo spessore, in superficie avremo una **diffusione di temperatura diversa**.

## Tecniche Termografiche Stimolate

### Termografia Pulsata

**Sorgente di calore ad impulso e di breve durata**

### Termografia Lock-in

**Sorgente di calore modulata con un periodo e frequenza specifica**

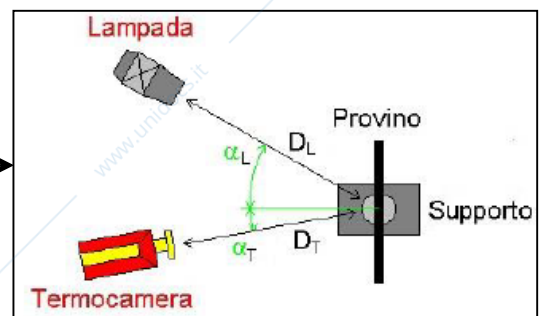
### Thermoelastic Stress Analysis (TSA)

**Come la Lock-in, ma il calore proviene da stress meccanici**

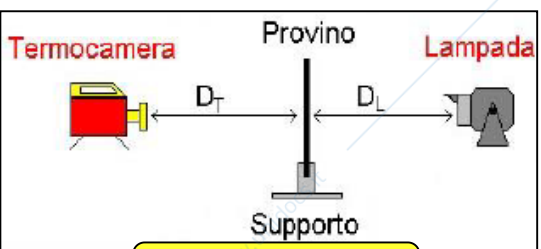
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

- Tutte le tecniche comprendono 4 step:**
- Fase di acquisizione dei dati (sequenze termografiche) con impostazione set up
  - Fase di processing dei dati (algoritmi di analisi, filtri, ecc)
  - Fase di Identificazione dei difetti
  - Fase di caratterizzazione dei difetti (tipologia, dimensione, profondità, forma)

## Parametri e Set-up sperimentale



**RIFLESSIONE**  
(meglio avere due lampade sorgente e la telecamera in mezzo per riscaldare il provino in maniera simmetrica e omogenea!)



**TRASMISSIONE (o metodo di Parker)**

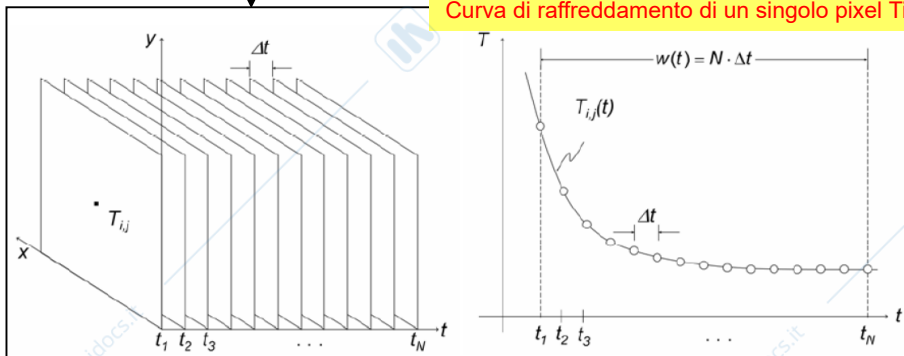
- ### PARAMETRI E ACCORGIMENTI PER IL SET-UP
- **Parametri geometrici:** Distanza e Angolazione lampada, Distanza e Angolazione termocamera (soprattutto in riflessione)
  - **Parametri della strumentazione:** Numero e potenza delle sorgenti, Tipologia e caratteristiche del sensore IR e dell'ottica
  - **Scelta del set-up** dipende principalmente dalla **disponibilità di spazio** su entrambi i lati del componente e se questi sono **entrambi accessibili**, nonché dalla **forma e dimensione** del pezzo.
  - In trasmissione, **il sensore IR deve essere protetto** dalla sorgente. Per pezzi piccoli è opportuno mascherare adeguatamente la sorgente.
  - Il problema delle **angolazioni** si presenta nel set-up in riflessione:
    - Dobbiamo **evitare le riflessioni dovute alle sorgenti** scegliendo un opportuno **angolo sorgenti-termocamera**
    - La **termocamera è preferibile posizionarla con angolo 0°**, così da non avere immagini troppo deformate che possono dare problemi di caratterizzazione della dimensione del difetto.
    - Le sorgenti vanno posizionate per garantire una uniformità nel riscaldamento (si preferisce posizionare correttamente la sorgente e poi il sensore IR)
      - **Set-up ottimale con 2 lampade posizionate simmetricamente**
      - Con 1 lampada: sorgente al centro e termocamera leggermente angolata
  - **Distanza sorgenti-componente:** dipende dal tipo e dalla potenza della sorgente.
    - Per le alogene, la distanza incide sulla densità di energia applicata al pezzo (maggiore distanza, minore energia, a parità di potenza). Non vale per Laser!
    - Devo scegliere una distanza tale da avere un riscaldamento significativo e uniforme, senza danneggiare il materiale.
  - **Distanza termocamera-componente:** è stabilita in base alla dimensione del difetto minimo che voglio rilevare. Incide sulla risoluzione geometrica e sull'area di analisi (elevata risoluzione, area di analisi piccola).
  - **La potenza della sorgente** deve essere tale da introdurre nel pezzo, la quantità di energia idonea per la rilevazione di difetti di determinate dimensioni, profondità e forma. Devo garantire un  $\Delta T$  di almeno  $5^\circ C$  per poter vedere difetti significativi.
  - Per **stimare la potenza** da usare: **Modelli fisici semplificati** (1 D), analisi FEM, **provino campione dello stesso materiale** del pezzo da analizzare. La potenza deve essere tale da non danneggiare il componente.
  - Scelta della **tipologia di sensore** stessi range MW (3-5  $\mu m$ ) e LW (7,5-14  $\mu m$ )
    - **Microbolometrico:** NETD <30 mK ; costante di tempo 10 ms
    - **Fotoelettrico** (raffreddato): più costoso, NETD <20mK ; costante di tempo 1  $\mu s$
  - La vera discriminante tra i due sensori è la velocità di acquisizione che è maggiore nei fotoelettrici raffreddati. Questi ultimi sono idonei per rilevare fenomeni molto rapidi, come per esempio prove di fatica su materiali metallici (elevata diffusività termica).
  - NETD (Noise Equivalent Temperature Different): rappresenta il  $\Delta T$  minimo che riesco a rilevare con il sensore.

# TERMOGRAFIA PULSATA

Principio Generale

Modalità di prova

Curva di raffreddamento di un singolo pixel  $T_{ij}$



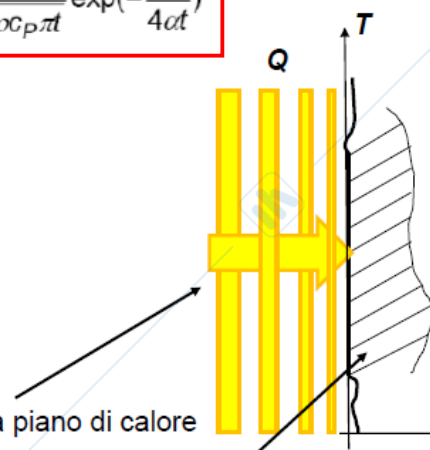
- **Breve riscaldamento** dell'ordine di qualche ms del provino,
- **Registrazione della curva di raffreddamento** dello stesso.
- La temperatura del materiale prima aumenta rapidamente per poi decadere perché l'energia propaga per diffusione sotto la superficie e si disperde attraverso i fenomeni dell'irraggiamento e della convezione.
- **La presenza di un difetto** sub-superficiale riduce/aumenta la diffusione, perché **variano localmente le proprietà termofisiche** del materiale (densità, capacità e conducibilità termica).
- **Il difetto appare come un'area a temperatura differente** rispetto all'area non difettata.
- Ad esempio, la riduzione di diffusione si tramuta in "accumulo di calore" e da qui in poi si riscontrerà una più alta temperatura nella zona del difetto.

- Consiste **nell'acquisire tramite una termocamera una sequenza termica** che corrisponde ad acquisire un certo numero di frame  $N$  in un tempo totale  $tN$ .
- **Il tempo  $tN$  è il tempo totale di osservazione** necessario per descrivere completamente il fenomeno fisico.
- **Il numero di frame  $N$  dipende dal tempo di campionamento  $\Delta t$**  (inverso della frequenza di acquisizione) che si vuole utilizzare per campionare il fenomeno.
- si acquisisce fino al termine del fenomeno fisico (ma non è una regola fissa)

## Modello fisico raffreddamento monodimensionale 1D

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

- $Q$ = energia in input [ $J/m^2$ ]
- $e$ = effusività termica  $e = \sqrt{k\rho c_p}$
- $\rho$ = densità del materiale [ $kg/m^3$ ]
- $\alpha$ = diffusività termica [ $m^2/s$ ]  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$
- $c_p$ = calore specifico a pressione costante [ $J/kgK$ ]
- $k$ = conducibilità termica [ $W/mK$ ]
- $z$ = profondità



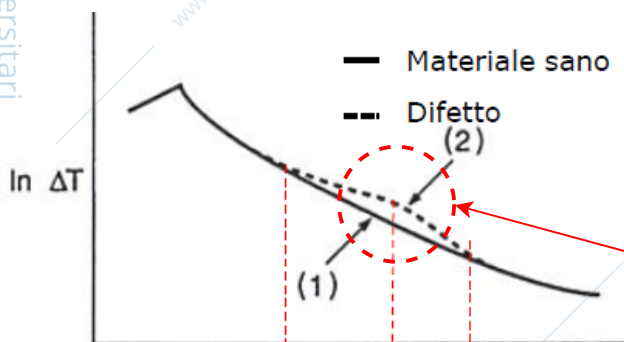
### IPOSTESI:

- Corpo semi-infinito
- Omogeneo
- Isotropo meccanicamente e termicamente (sono costanti  $K, \rho, C_p$  in tutte le direzioni)
- Condizioni adiabatiche
- Assorbimento di un impulso di Dirac

Sono interessato all'andamento della temperatura superficiale ( $z=0$ )

$$\Delta T = T(0,t) - T_0 = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}$$

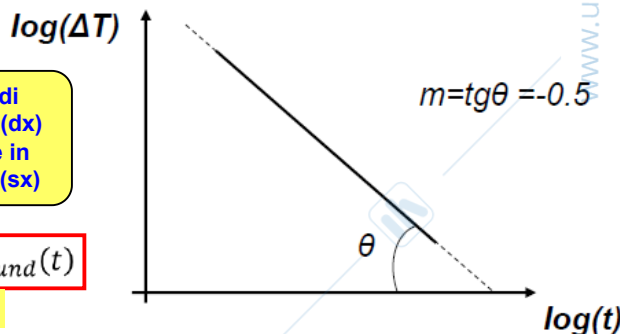
$$\log(\Delta T) = \log\left(\frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}\right) = \log Q - (\log e + \log \sqrt{\pi t}) = \log \frac{Q}{e} - \frac{1}{2} \log \pi t$$



Confronto tra curva di raffreddamento ideale ( $dx$ ) sotto le ipotesi fatte e in presenza di un difetto ( $sx$ )

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

Contrasto termico



$t$  per il quale il difetto comincia ad essere visibile

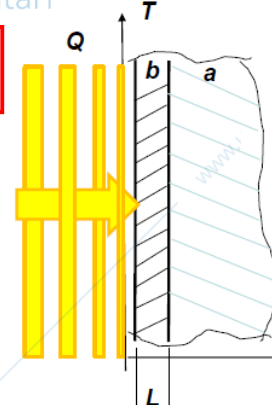
$t$  per il quale il difetto svanisce

$t$  per il quale si ha il massimo contrasto termico

- Se è presente un difetto, la curva di raffreddamento presenta una deviazione dal comportamento lineare in quanto c'è una disomogeneità all'interno del componente.
- Il difetto sarà visibile perché la temperatura superficiale in corrispondenza dello stesso risulterà differente rispetto a quella del materiale sano (sound).
- I difetti più profondi sono osservati dopo e con un ridotto contrasto termico. Vedrà una "gobba" più distante perché ho perdita di energia e influiscono di più gli effetti di diffusività.

## Modello fisico con simulazione del difetto monodimensionale 1D

$$T(0, t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(-n^2 \frac{L^2}{at}\right) \right]$$



- IPOTESI:**
- Il calore propaga in una sola direzione
  - Simulo il difetto a profondità L
  - Materiale b omogeneo e isotropo
  - Condizioni adiabatiche
  - Assorbimento di un impulso di Dirac
  - Difetto planare, parallelo alla superficie

- $b =$  Materiale sano di spessore finito L
- $a =$  Difetto di dimensione semi-infinita che si trova a profondità L
- $R =$  Coefficiente di riflessione
- $e_a =$  Effusività termica materiale
- $e_b =$  Effusività termica difetto

$R \uparrow$  tanto maggiore è  $e_b - e_a$ . Vedrò meglio un difetto se ha caratteristiche molto diverse dal materiale base

La capacità di diagnosticare un difetto dipende dal coefficiente di riflessione

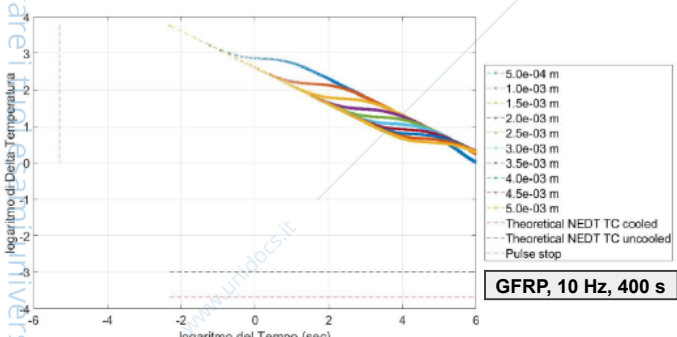
$$R = \frac{e_b - e_a}{e_b + e_a}$$

Uso dei modelli per stima dei parametri di prova e set-up

## Considerazioni e scelta dei parametri per eseguire una PT

Material	k (W/m K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (J/kg K)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-7</sup>	e (Ws <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> K)	e/e <sub>air</sub> (-)	e/e <sub>teflon</sub> (-)
Aluminum (pure)	237	2702	903	971	24047	4468	32
Steel							
Mild	46	7900	440	132	12645	2349	17
AINSI 302 @ 300 K	15.1	8055	480	39	7641	1420	10
CFRP							
fibers	7	1600	1200	36.5	3666	681	5
⊥ fibers	0.8	1600	1200	4.2	1239	230	1.6
GFRP							
fibers	0.38	1900	1200	1.7	931	173	1.2
⊥ fibers	0.3	1900	1200	1.3	827	154	1.1
Plexiglas®	0.19	1190	1470	1.1	577	107	0.76
Kevlar®	0.04	1440	1400	0.2	284	53	0.38
Air	0.024	1.2	1006	1988	5	1	0.01
Teflon®	0.25	2170	1050	1.1	755	140	1

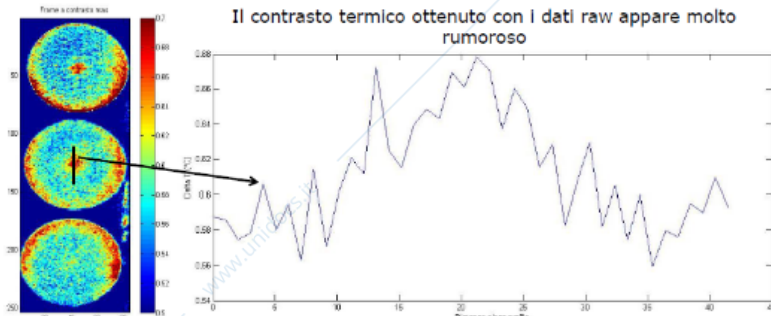
- Analizzando la diffusività, si può constatare che la PT è una **tecnica superficiale per i materiali metallici** (hanno una diffusività alta quindi non riesco a distinguere difetti più profondi). Risulta una **tecnica volumetrica**, invece, **per i compositi** in quanto hanno una diffusività bassa. Nei compositi è importante la direzione di propagazione del calore, soprattutto nei CFRP (fibra di carbonio conducono calore in direzione ortogonale,  $\alpha$  è minore che in direzione parallela. Questo fa dire che si ha una forte diffusione nel piano (perdo energia), e questo si traduce che non riusciamo a vedere difetti in profondità come nei GFRP).
- Per **simulare i difetti** nei provini campione, **si usa l'aria e il teflon**. L'aria ha una **grande diffusività**, perciò un difetto è simulato utilizzando più foglio di teflon con aria interposta, così da far emergere il difetto essendoci una migliore riflessione.
- Se **ho una grande diffusività, non sarò in grado di distinguere bene i difetti**.
- Parametri che caratterizzano una PT:
  - **Tempo di osservazione**
  - **Densità di energia**
  - **Durata dell'impulso** (dipende dalle lampade: 5 ms per le flash)
  - **Frequenza di campionamento**
- Ogni curva rappresenta un difetto posto a profondità differenti
- Se le curve intersecano le rette orizzontali degli NEDT della termocamera, vuol dire che l'energia non è sufficiente (bisogna aumentare)
- Il **tempo di osservazione** deve essere **tale da poter vedere tutti i difetti** (non devo avere le curve tagliate)
- In generale, partendo da dati di primo tentativo, avremo:
  - Per **materiali a bassa diffusività, una frequenza di campionamento bassa (10Hz) e un tempo di osservazione lungo (400 s)**
  - Per **materiali alto diffusivi (metalli) una frequenza alta (1000 Hz) e un tempo breve di osservazione (2 s),** nonché anche una **energia maggiore**
- Spesso nei metalli, i difetti sono "visibili" già in fase di riscaldamento, prima che finisca l'impulso, ecco perchè abbiamo tempi brevi e frequenze alte



## ALGORITMI DI ANALISI DEI DATI

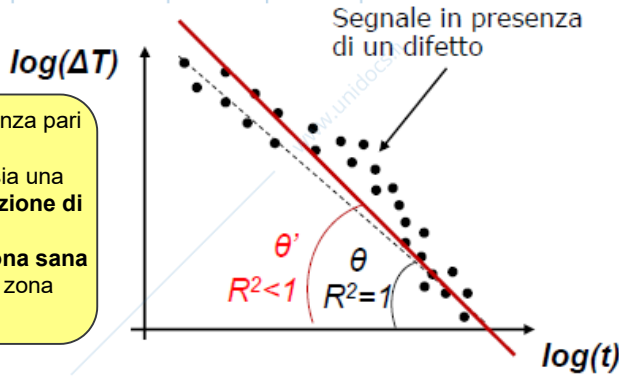
- **Pendenza e R<sup>2</sup>** (info solo su dimensione difetto)
- **Pulse Phase Thermography (PPT)** (info su dim. e profondità difetto)
- **Thermal Signal Reconstruction (TSR)** (info su dim. e profondità difetto)
- **Principal Component Thermography (PCT)** (info solo su dimensione difetto)

- Si usano per migliorare il rapporto segnale-rumore, in quanto con i raw-data risulta difficile diagnosticare i difetti più piccoli e profondi.
- I raw-data spesso sono usati in prima battuta per analizzare l'andamento del contrasto termico nel tempo.



### Pendenza e R<sup>2</sup>

E' basato sull'ipotesi di linearità e pendenza pari a -0,5 della curva di raffreddamento. La presenza di un difetto provocherà sia una **variazione di pendenza** che una **variazione di linearità** (coeff. di Pearson R<sup>2</sup> ≠ 1). In realtà **basta confrontare con una zona sana la differenza di pendenza** (anche se la zona sana ha pendenza ≠ -0,5)



Andamento zona sana  
 $m = \text{tg}\theta = -0.5$  (zona sana)

• punti campionati

Retta di regressione lineare

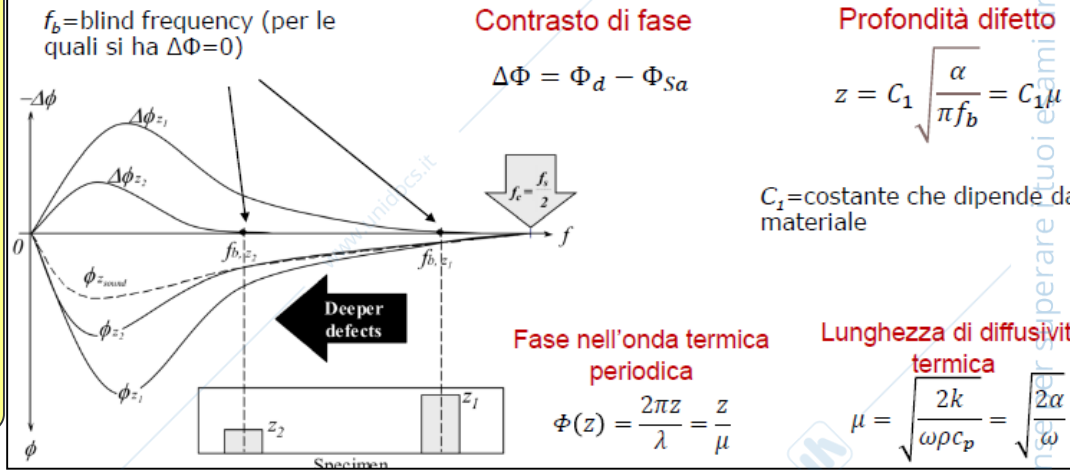
$n = \text{tg}\theta' \neq -0.5$  (zona difettata)

### Pulse Phase Thermography (PPT)

Si scompone in serie di Fourier il segnale termografico (come somma di onde sinusoidali periodiche) e si **analizza l'andamento della Fase**. (l'ampiezza è meno studiata). Avrò N/2+1 mappe e ogni mappa di fase corrisponde a una frequenza di fase. Abbiamo **contrasto di fase** quando c'è una **differenza di fase tra zona sana e zona difettata**. Il massimo della curva di fase ci fornisce informazioni circa la dimensione del difetto. **La blind frequency** (freq. a cui si annulla il contrasto di fase) **ci da informazioni sulla profondità** dello stesso (maggiore è, e minore è la profondità)

### Trasformata discreta di Fourier (DFT)

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta T) e^{-i2\pi nk/N} = Re_n + Im_n \rightarrow \begin{matrix} \text{Ampiezza} & \text{Fase} \\ A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} & \phi_n = \arctg\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \end{matrix}$$



### Thermal Signal Reconstruction (TSR)

Si utilizza una **legge polinomiale per "fittare" i raw-data** della curva di raffreddamento. Il grado utilizzato va da 4 a 7. Viene migliorato il rapporto segnale-rumore andando ad **analizzare le derivate 1° e 2°**, perchè andiamo ad **amplificare le differenze** e posso vedere meglio i difetti. E' possibile **stimare la profondità** del difetto, perchè con il polinomio è più facile individuare il **tempo tw in cui comincia la deviazione** dalla pendenza -0,5. Tale tempo può essere anche individuato **considerando il massimo della derivata 2°**. Il legame con tw e la profondità è anche funzione della diffusività (scritto sotto)

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

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + \dots + a_N \ln^N(t)$$

$$\frac{d}{dt} \ln(\Delta T) = \sum_{n=1}^N n a_n \ln^{(n-1)}(t)$$

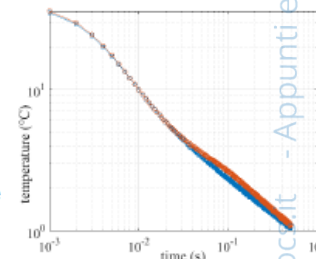
$$\frac{d^2}{dt^2} \ln(\Delta T) = \sum_{n=2}^N (n-1) a_n \ln^{(n-2)}(t)$$

polyfit

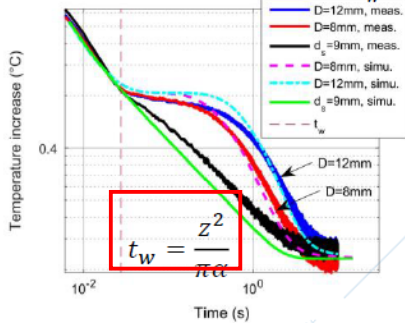
1st derivative

2nd derivative

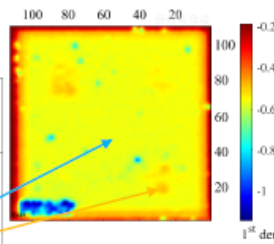
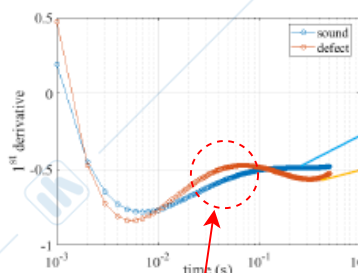
Temperatura - tempo log-log, fitting 5° grad



### Effetto del diametro del difetto sulla valutazione di t<sub>w</sub>

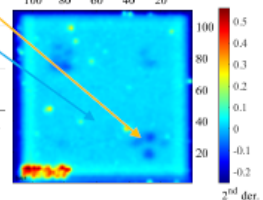
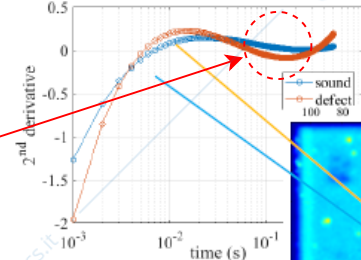


### Derivata prima

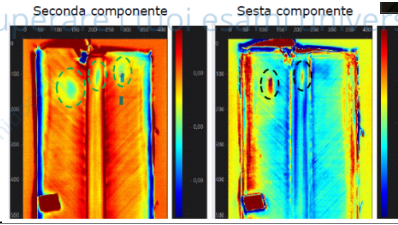


Differenze amplificate

### Derivata seconda

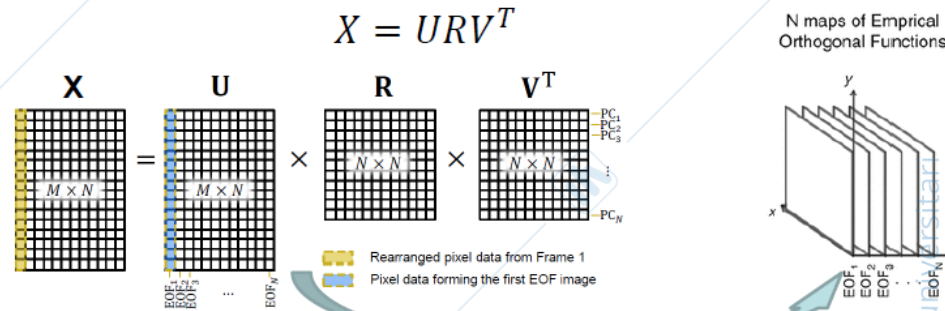


## Principal Component Thermography (PCT)



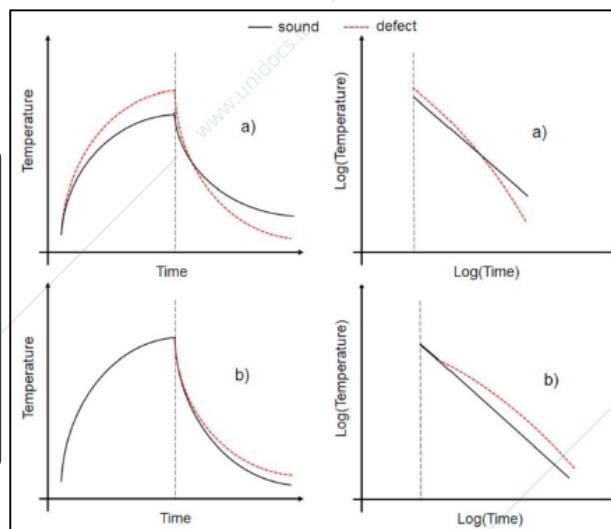
Algoritmo **rapido** che va ad **enfaticare le differenze di contrasto** che si hanno nell'immagine termica **tramite una trasformazione SVD** (Singular Value Decomposition).  
 Il riassunto di **tutti i dati è contenuto in una matrice U** che contiene delle **componenti EOF** (Empirical Orthogonal Functions) che contengono le informazioni più interessanti relative ai difetti.  
**Non fornisce informazioni sulla profondità del difetto.**  
 Si vanno a investigare le prime componenti che contengono la maggior variabilità dei dati originali. Agisce come gli altri algoritmi da filtro, andando a migliorare la qualità dei dati raw.

Viene quindi applicata la trasformazione SVD (Singular Value Decomposition). La SVD di una matrice  $M \times N$  con  $M > N$  può essere calcolata come segue:



## Eccitazione ad impulso lungo

Tale approccio **si utilizza quando è richiesta elevata energia** in quanto si vogliono **raggiungere difetti in profondità con materiali con bassa diffusività termica**. Sia **per questione di costi** (elevate potenze), sia **per non danneggiare il materiale**, si preferisce **usare potenze più basse ma prolungare il tempo di riscaldamento** (anziché qualche millisecondo si passa a qualche secondo). L'analisi, in questo caso, può essere fatta nella fase di riscaldamento (stepped thermography) o nella fase di raffreddamento (analisi long pulse). Si usano gli stessi algoritmi di analisi visti prima.



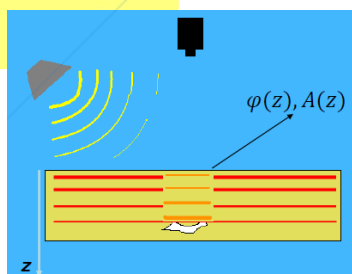
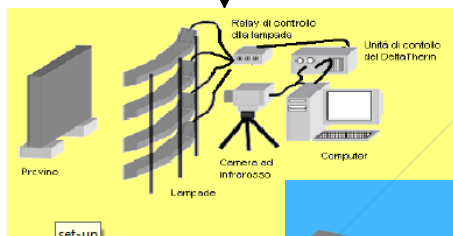
Caso in cui l'onda termica raggiunge il difetto durante il riscaldamento

Caso in cui l'onda termica non raggiunge il difetto dopo la fine del riscaldamento

## TERMOGRAFIA LOCK-IN

Principio Generale

Modalità di prova



- **Riscaldamento** sotto forma di onda sinusoidale modulata con una frequenza  $\omega$  e ampiezza. Si può usare anche una sorgente di eccitazione a onda quadra (modalità ON-OFF delle lampade)
- **Registrazione della risposta del provino.**
- La risposta termica sarà **alterata di ampiezza e sfasata** di una fase  $\phi$ , ma stessa frequenza, per la **presenza di un difetto** che ne varia **localmente le proprietà termofisiche** del materiale.
- **Il difetto viene caratterizzato analizzando le mappe di fase.**

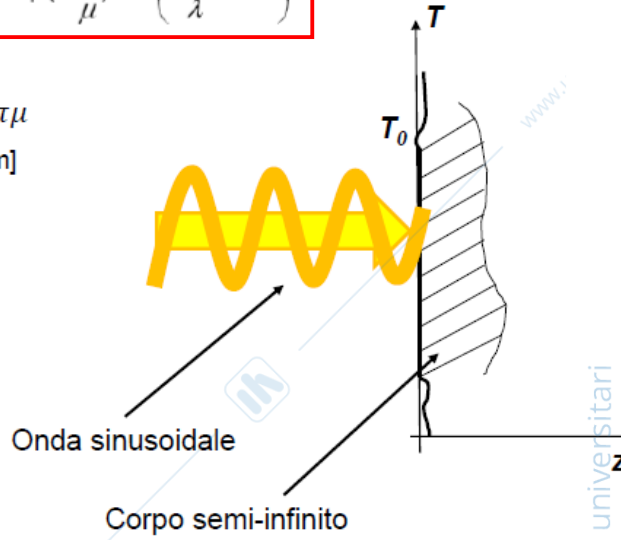
- **Onda termica propaga;** quando incontra un difetto, avviene uno sfasamento. Analizzo la variazione di fase tra sound e zona difettata
- **Fase di acquisizione:** rispetto alla pulsata, devo avere un controllore alle lampade in modo da riprodurre l'onda termica sinusoidale.
- Una termocamera acquisisce durante la fase di eccitazione (anche a più cicli)
- **Fase di processing:** si usano gli stessi algoritmi visti per ricavare le mappe di ampiezza e fase.

**Modello fisico raffreddamento monodimensionale 1D**

$$T(z,t) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right)$$

- IPOSTESI:**
- Corpo semi-infinito
  - Omogeneo e isotropo meccanicamente e termicamente
  - Condizioni adiabatiche
  - Sorgente uniforme di calore con frequenza pulsata  $\omega$

- $T_0$  = Temperatura iniziale [K]
- $\lambda$  = lunghezza d'onda [m]  $\lambda = 2\pi\mu$
- $\mu$  = lunghezza di diffusività termica [m]
- $k$  = conducibilità termica [W/mK]
- $z$  = profondità [m]
- $f$  = frequenza di eccitazione [Hz]



$\mu$  mi da una idea a che profondità sono arrivato se eccito con una onda termica a frequenza  $f$  (se  $f \uparrow$ ;  $\mu \downarrow$ )

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho c_p}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

La fase  $\phi$  dell'onda è legata direttamente alla profondità  $z$  del difetto. Se uso alte frequenze, mi mantengo in superficie; a basse freq. propago in profondità ma più lentamente

$$\phi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \Rightarrow z = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} = C_1 \mu$$

Valutazione profondità difetto

**ANALISI DEI DATI**

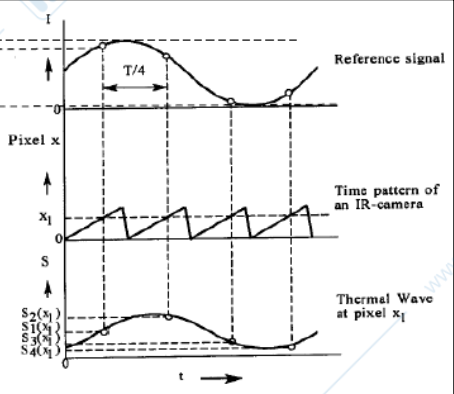
- Risposta termica del materiale è un segnale periodico sinusoidale
- Devo conoscere ampiezza e fase pixel per pixel
- Sono presi in considerazione di più i dati di fase perchè meno sensibili a variazioni locali di emissività e non uniforme riscaldamento.
- Metodi più utilizzati:
  - Trasformata di Fourier discreta
  - Metodo dei 4 punti
  - Ricostruzione del segnale mediante metodo dei minimi quadrati
  - Metodo di integrazione duale

**Metodo dei 4 punti**  
Campiono 4 punti equidistanti e ricostruisco il segnale

Vettore rotante di ampiezza  $A$  e fase  $\phi$

$S_1, S_2, S_3$  e  $S_4$  sono i segnali acquisiti e sfasati di  $T/4$  ( $90^\circ$ ).

$S_1 = A \sin \phi$   
 $S_2 = A \sin(\phi + \frac{\pi}{2}) = A \cos \phi$   
 $S_3 = A \sin(\phi + \pi) = -A \sin \phi$   
 $S_4 = A \sin(\phi + \frac{3\pi}{2}) = -A \cos \phi$



$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad \phi = \arctan\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right)$$

**Metodo di integrazione duale**  
Moltiplico il segnale termico per le funzioni seno e coseno con la stessa frequenza  $\omega$  del segnale di partenza

Parto da un segnale sinusoidale generico

$$s(t) = K + A \sin(\omega t + \phi)$$

Può essere riscritto come:

$$s(t) = K + A \sin \omega t \cos \phi + A \sin \phi \cos \omega t$$

$$B = A \cos \phi \quad \text{e} \quad C = A \sin \phi$$

$$s(t) = K + B \sin \omega t + C \cos \omega t$$

Moltiplicando  $s(t)$  per  $\sin(\omega t)$  e per  $\cos(\omega t)$  e integrando sul periodo  $T$

$$S_{\sin}(t) = B \frac{T}{2} \quad S_{\cos}(t) = C \frac{T}{2}$$

Da cui:

$$\phi = \arctg \frac{C}{B} \quad A = \sqrt{B^2 + C^2}$$

Come Analisi Quantitativa è possibile eseguire la valutazione della dimensione del difetto con il contrasto di fase e, conoscendo il materiale anche la valutazione della diffusività

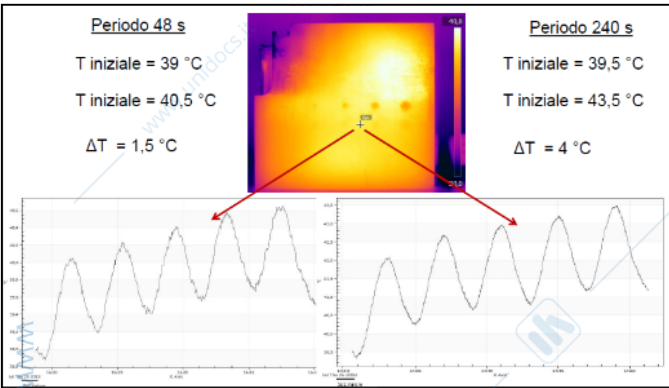
$$\Delta\phi = \phi_d - \phi_{Sa}$$

Contrasto di fase

$$\alpha = \pi f_b \left(\frac{L}{C_1}\right)^2$$

Diffusività

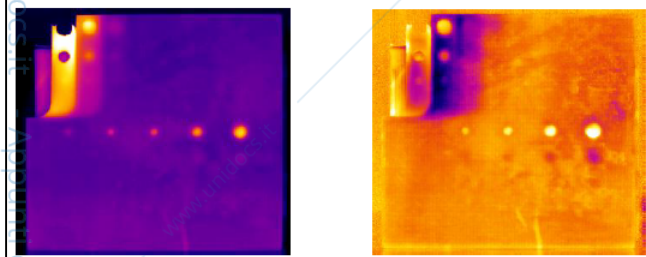
## Considerazioni e scelta dei parametri per eseguire una Lock-in



Mappe di Ampiezza e Fase ottenute pixel per pixel

ampiezza

fase



- Il periodo di eccitazione  $T$  dell'onda sinusoidale (o frequenza se considero il reciproco) deve essere **scelto in base al materiale e alla profondità** che voglio ispezionare. Si sa che **più è grande il periodo di eccitazione, più in profondità vado**. Vale lo stesso discorso per la PT, materiali basso diffusivi richiedono periodi di eccitazione alti, viceversa per i materiali alto diffusivi.
- E' possibile usare **come eccitazione un'onda sinusoidale o un'onda quadra**
- La frequenza massima di eccitazione è legata al fatto che devo garantire un  $\Delta T$  significativo (4-5°C) rispetto al rumore. Questo dipende anche dalla sensibilità della termocamera, più è sensibile, più riesce a distinguere  $\Delta T$  bassi.
- **Si eseguono più cicli di eccitazione (almeno 3) fino a quando non si raggiunge una fase stazionaria della T media** (in realtà gli algoritmi di post-processing riescono a tenere conto anche della variazione della T media)
- **Per ottenere un segnale più pulito, bisogna aumentare la potenza delle lampade** (me ne accorgo dal  $\Delta T$  e dal segnale).
- Effettuando prove con vari tempi di eccitazione, per **caratterizzare in maniera "nitida" un difetto**, devo prendere la **mappa di fase** che presenta il **maggior contrasto di fase**. **Attenzione alla frequenza di blind**, in cui il  $\Delta\phi = 0$  e non vedo nulla !
- Spesso si usa di più la mappa di fase, ma eventualmente può essere utilizzata anche la mappa di ampiezza perchè presenta contrasti più elevati e posso identificare altri difetti che non vedo nella mappa di fase.
- **Per valutare il contrasto di fase, è consigliato prendere il segnale di sound nella zona d'intorno al difetto.**
- **Per diminuire il numero di prove**, si può **eccitare il provino con una onda quadra** (on-off) anzichè sinusoidale, così eccito a varie frequenze contemporaneamente. Scomponendo con Fourier ottengo sinusoidi con freq. dispari.

### ONDA SINUSOIDALE

✓ **Migliore rapporto segnale rumore. Tutta la potenza è distribuita sull'armonica principale.**

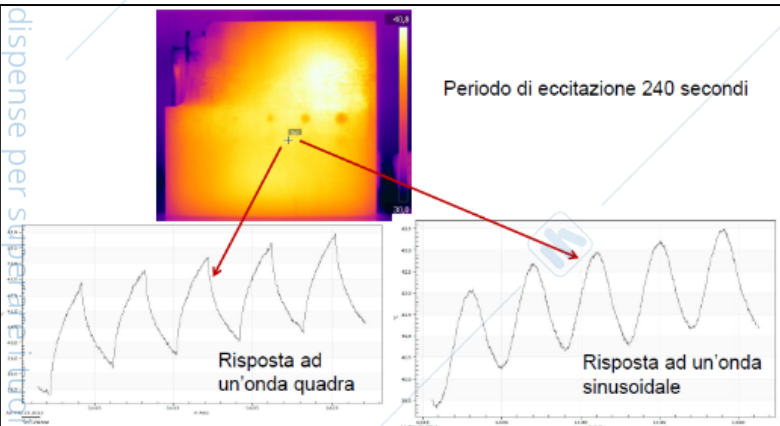
✗ **E' necessario fare più prove lock-in per avere informazioni alle varie frequenze.**

### ONDA QUADRA

✓ **Con un'unica prova ho informazioni sulle armoniche diverse dalla principale.**

✗ **Minor rapporto segnale rumore. Potenza distribuita su più armoniche.**

Esempio: Se faccio prova lock-in con onda quadra 240 s [240 s (1° arm.) - 80 s (3° arm.) - 48 s (5° arm.)], il segnale ottenuto a 48 s sarà molto più rumoroso rispetto a quello ottenuto se facessi una prova lock-in con onda sinusoidale a 48 s.



## TERMOGRAFIA TSA (Thermoelastic Stress Analysis)

### Principio Generale

- Usata in **meccanica sperimentale per valutare gli stress superficiali** dei componenti.
- **Si basa sull'effetto termoelastico** che avviene **nei solidi** quando sono sottoposti a carichi. Quando comprimo, aumento la temperatura; quando sono in trazione diminuisco la temperatura.
- **Le variazioni di volume sono legate alle variazioni di temperatura e di stress**

Per un corpo omogeneo e isotropo, vale la relazione costitutiva con le costanti di Lamè. Sostituendo e derivando e trascurando  $\partial\beta/\partial T$  rispetto a  $\beta$  e in condizioni Adiabatiche, si ottiene:

$$c_\epsilon \rho \frac{dT}{T} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial T} \epsilon_{kk} - \beta \right) d\epsilon_{kk} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial T} \epsilon_{ij} d\epsilon_{ij}$$

Esprimendo in termini di stress, si ottiene l'equazione generale dell'accoppiamento termoelastico che dipende dal primo invariante di stress ( $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ ). L'effetto termoelastico è legato solo alla variazione di volume (no sforzi di taglio)

**EQUAZIONE TERMOELASTICA** ottenuta per piccole deformazioni imponendo tra stato deformato e indeformato:

- conservazione della massa
- conservazione del momento
- conservazione dell'energia

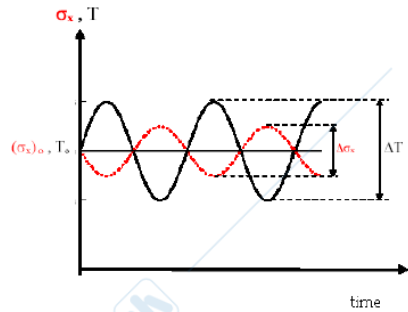
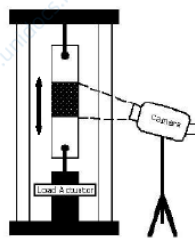
$$dT = \frac{T}{\rho c_\epsilon} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} d\epsilon_{ij} + \frac{\delta q}{c_\epsilon}$$

- $T$  è la temperatura del corpo
- $\rho$  è la densità
- $c_\epsilon$  è il calore specifico a deformazione costante
- $\sigma_{ij}$  è il tensore degli sforzi
- $\epsilon_{ij}$  è il tensore delle deformazioni
- $q$  è il calore scambiato dal sistema

### EQUAZIONE GENERALE DELL'ACCOUPLAMENTO TERMOELASTICO

$$c_\epsilon \rho \frac{dT}{T} = - \left[ \alpha + \left( \frac{\nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) \sigma_{kk} \right] d\sigma_{kk} + \left( \frac{1 + \nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) \sigma_{ii} d\sigma_{ii}$$

### Modalità di Prova



- Viene applicato un carico dinamico di tipo sinusoidale con un sistema di carico.
- La frequenza di carico dipende dal materiale:
  - Alto diffusivi (metalli) superiori a 10 Hz
  - Basso diffusivi (compositi) intorno a 5 Hz
- E' necessario misurare tramite termocamera il segnale di temperatura che sarà sinusoidale (simile alla Lock-in)
- Essendo i  $\Delta T$  molto piccoli (dai 0,5° fino a 1°C) si utilizzano quasi spesso termocamere molto sensibili raffreddate.
- Gli algoritmi di post-processing sono gli stessi, ma bisogna raffinarli e porre attenzione in quanto il segnale può essere annegato nel rumore (basso rapporto segnale/rumore).

Con l'ipotesi di carico uniassiale

$$\sigma_{11} = \sigma_m + \sigma_{amp} \sin \omega t; \quad \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0;$$

L'equazione generale diventa:

$$\rho_o C_o \frac{\delta T}{T_o} = \underbrace{\left( \alpha - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma_m \right) \sigma_{amp} \sin \omega t}_{\text{componente a frequenza } \omega} - \underbrace{\frac{1}{4E^2} \frac{\partial E}{\partial T} (\sigma_{amp})^2 \cos 2\omega t}_{\text{componente a frequenza } 2\omega}$$

Trascurando  $\partial E / \partial T$

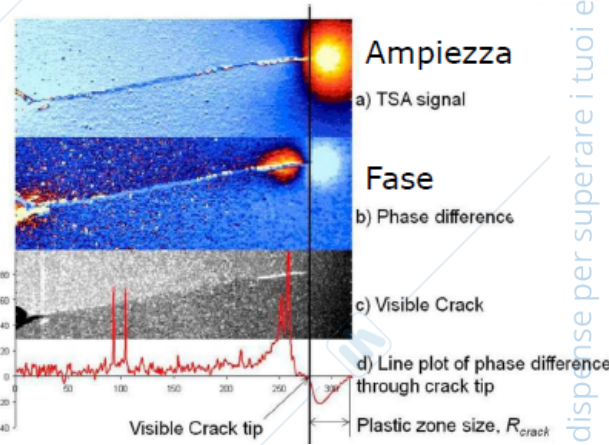
$$\Delta T = - \frac{\alpha}{\rho c_p} T (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2)$$

$K_0$  costante termoelastica con  $\alpha$  coefficiente di dilatazione lineare

Segno meno perché stress e temperatura sono in opposizione di fase

### Identificazione e valutazione delle cricche con la TSA

E' applicata in ambito NDT per il monitoraggio dell'avanzamento delle cricche. All'apice della cricca c'è una concentrazione di stress, maggiori sono gli stress, maggiori sono i  $\Delta T$ . Quindi è facile individuare, con la TSA, dalla mappa di ampiezza, l'apice della cricca. E' possibile anche individuare la zona plastica dell'apice della cricca mediante le mappe di fase, in quanto, la zona plastica è caratterizzata da una fase in ritardo rispetto alle zone elastiche dovuta ai fenomeni di conduzione di calore (perdita di adiabaticità). Individuato l'apice, è facile monitorarne l'avanzamento.



### Analisi Quantitativa: Resume

- Esistono vari metodi in letteratura (non normati) che consentono la valutazione della dimensione dei difetti
- Consentono di avere una stima della dimensione dell'area dei difetti o di una dimensione caratteristica.
- Sono sempre necessari provini campione per "calibrare" i dati ed avere un riferimento
- Gran parte dei metodi adottati utilizza i dati del contrasto di segnale (termico, di fase, di pendenza, ecc) per risalire alla dimensione dei difetti.
- Il contrasto di segnale di una determinata tipologia di difetto è funzione della:
  - Dimensione del difetto
  - Profondità del difetto
  - Forma del difetto

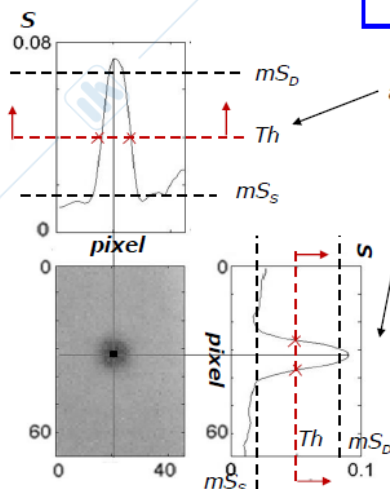
### Valutazione della dimensione: metodo dei valori di soglia

- Si applicano valori di soglia al contrasto di segnale
- I valori di soglia  $Th$  devono essere calibrati su provini campione
- Può essere usato il metodo del massimo semi-contrasto se non ho provini campione

$$\text{Il pixel appartiene ad un difetto se } S > \frac{mS_D - mS_S}{Th}$$

### Stima della profondità

- Per PT e Lock-in, grazie ai modelli 1D si stima la profondità
- Attenzione alle ipotesi: si commettono errori del 30% per difetti piccoli posti in profondità
- Devono essere note le caratteristiche termofisiche del materiale.



$S$  = segnale generico (temperatura, fase, pendenza)  
 $mS_D$  = media del segnale su difetto (area 3x3 pixel)  
 $mS_S$  = media del segnale sound (area attorno al difetto)  
 $Th$  = valore di soglia (se  $Th = 2$  si ha il metodo del max semi-contrasto)

### Pulsata TSR

$$t_w = \frac{z^2}{\pi \alpha}$$

### Pulsata PPT/ Lock-in

$$z = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} = C_1 \mu$$