

# Tecniche e metodologie diagnostiche non-invasive

## Termografia IR

Cristiano Riminesi

**Consiglio Nazionale delle Ricerche**  
*Istituto per la Conservazione e Valorizzazione  
dei Beni Culturali – Firenze*



7-8 Maggio 2012

# Obiettivi diagnostici

---

- Misura della temperatura superficiale di manufatti e strutture (anche in situ);
- Diagnosi non invasiva, valutazione dell'efficacia di impianti e di efficienza energetica;
- Monitoraggio e controllo periodico dello stato di conservazione e dell'efficacia di interventi di risanamento

# Definizioni

---

## Termografia IR (IR Thermography)

misura della temperatura di un oggetto mediante rilevazione della radiazione elettromagnetica (IR) emessa

L'immagine termica mostra la distribuzione della temperatura sulla superficie di un oggetto



**non è possibile vedere dentro o addirittura attraverso gli oggetti**

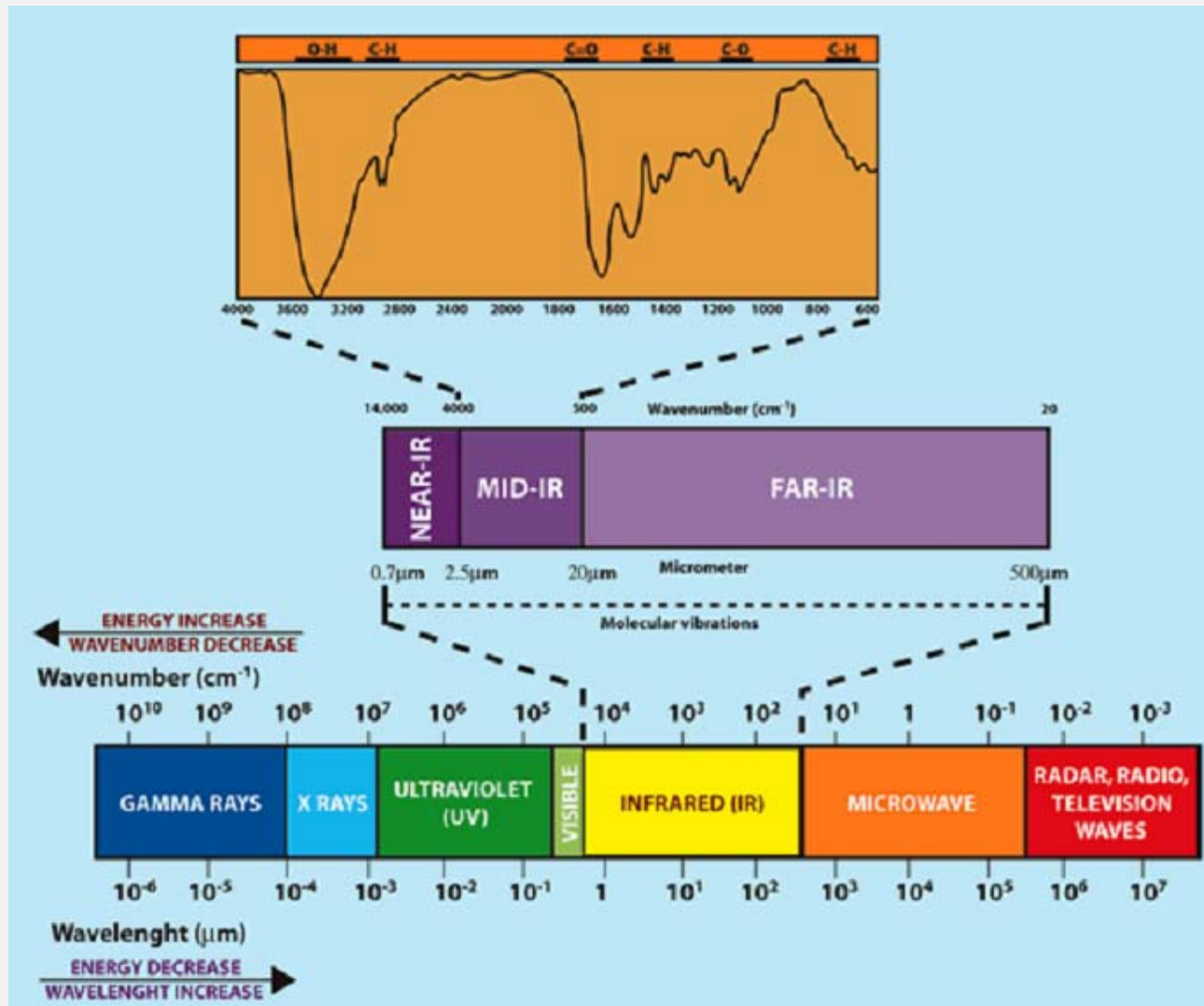
# Definizioni

---

Ogni corpo con temperatura ( $T$ ) maggiore dello zero assoluto ( $0^\circ\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$ ) emette energia nell'infrarosso (IR).

La temperatura del corpo emettitore è proporzionale alla radiazione emessa (Legge di Planck).

# Principi di base



# Principi di base

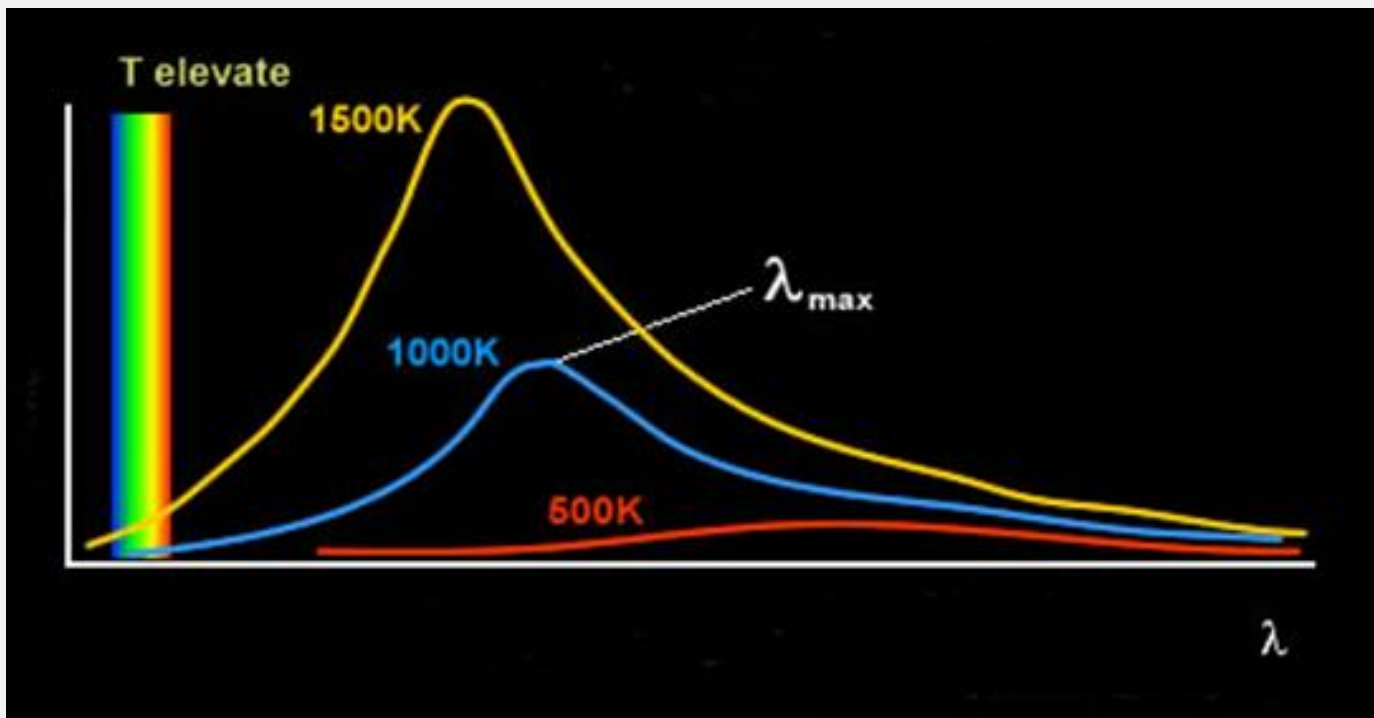
L'energia media per lunghezza d'onda è:

$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{Legge di Planck}$$

- La termocamera misura i raggi IR ricevuti nel suo campo visivo (7-15 $\mu\text{m}$  -> 600-1400 $\text{cm}^{-1}$ );
- e calcola la temperatura dell'oggetto tenendo conto di:
  - emissività ( $\epsilon$ ) dell'oggetto;
  - e compensazione della temperatura riflessa (RTC = reflected temperature compensation).

# Principi di base

al crescere di T il picco di massima emissione cresce e il corpo emette luce

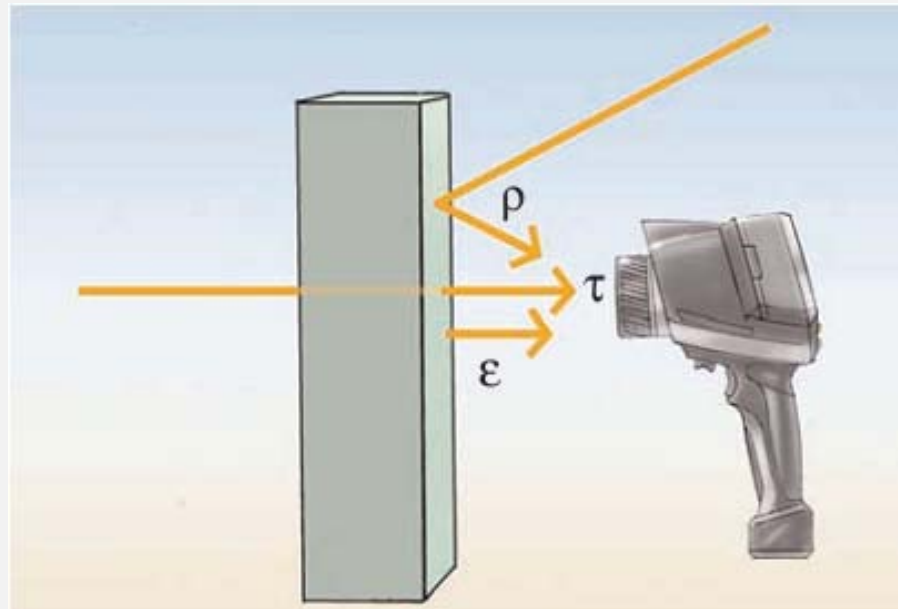


- lampade a incandescenza: 3500 K;
- tubi fluorescenti: 7000 K;
- lampada allo Xenon: 5500 K (prossima a quella del Sole).

# Principi di base

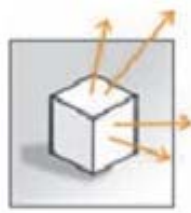
La radiazione IR registrata dalla termocamera è data dalla sovrapposizione di 3 contributi:

radiazioni emesse ( $\varepsilon$ ), riflesse ( $\rho$ ) e trasmesse ( $\tau$ )





# Principi di base



**Emissività ( $\epsilon$ )** = è la capacità di un materiale di emettere radiazioni IR.

- $\epsilon$  dipende dalle caratteristiche superficiali, dal tipo di materiale e dalla temperatura;
- $\epsilon$  max. = 1 (radiazione corpo nero, non si verifica mai);
- Corpi reali:  $\epsilon < 1$ , infatti questi non solo emettono ma riflettono ed eventualmente trasmettono le radiazioni;
- Molti materiali non metallici (PVC, cemento, sostanze organiche, etc.) hanno  $\epsilon$  elevata che non dipende da  $T$  ( $\epsilon \approx$  da 0,8 a 0,95).
- I metalli, in particolare quelli con una superficie lucida, hanno una bassa  $\epsilon$  che dipende da  $T$ .

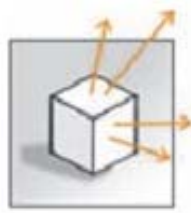
# Materiale, (temperatura del materiale), Emissività

- Alluminio, laminato lucido (170 °C) 0,04
- Alluminio, non ossidato (25 °C) 0,02
- Alluminio, non ossidato (100 °C) 0,03
- Alluminio, molto ossidato (93 °C) 0,20
- Alluminio, molto lucidato (100 °C) 0,09
- Cotone (20 °C) 0,77
- Cemento (25 °C) 0,93
- Piombo, ruvido (40 °C) 0,43
- Piombo, ossidato (40 °C) 0,43
- Piombo, ossidato grigio (40 °C) 0,28
- Cromo (40 °C) 0,08
- Cromo, lucidato (150 °C) 0,06
- Ghiaccio, liscio (0 °C) 0,97
- Ferro, smerigliato (20 °C) 0,24
- Ferro con pelle del getto (100 °C) 0,80
- Ferro con pelle di laminazione (20 °C) 0,77
- Gesso (20 °C) 0,90
- Vetro (90 °C) 0,94
- Granito (20 °C) 0,45
- Gomma, dura (23 °C) 0,94
- Gomma, morbida, grigia (23 °C) 0,89
- Ghisa, ossidata (200 °C) 0,64
- Legno (70 °C) 0,94

# Materiale, (temperatura del materiale), Emissività

- Sughero (20 °C) 0,70
- Corpo, nero, anodizzato (50 °C) 0,98
- Rame, ossidato (20 °C) 0,04
- Rame, ossidato (130 °C) 0,76
- Rame, lucidato (40 °C) 0,03
- Rame, laminato (40 °C) 0,64
- Plastica: PE, PP, PVC (20 °C) 0,94
- Vernice, blu su foglio di Al (40 °C) 0,78
- Vernice, nera, opaca (80 °C) 0,97
- Vernice, gialla, 2 rivestimenti
- su foglio di alluminio (40 °C) 0,79
- Vernice, bianca (90 °C) 0,95
- Marmo, bianco (40 °C) 0,95
- Mattoni (40 °C) 0,93
- Ottone, ossidato (200 °C) 0,61
- Vernici a olio (90 °C) 0,92-0,96
- Carta (20 °C) 0,97
- Porcellana (20 °C) 0,92
- Arenaria (40 °C) 0,67
- Acciaio, sup. trattata term. (200 °C) 0,52
- Acciaio, ossidato (200 °C) 0,79
- Acciaio, laminato a freddo (93 °C) 0,75-0,85
- Argilla, bruciata (70 °C) 0,91
- Mattone, malta, intonaco (20 °C) 0,93
- Zinco, ossidato 0,1

# Principi di base

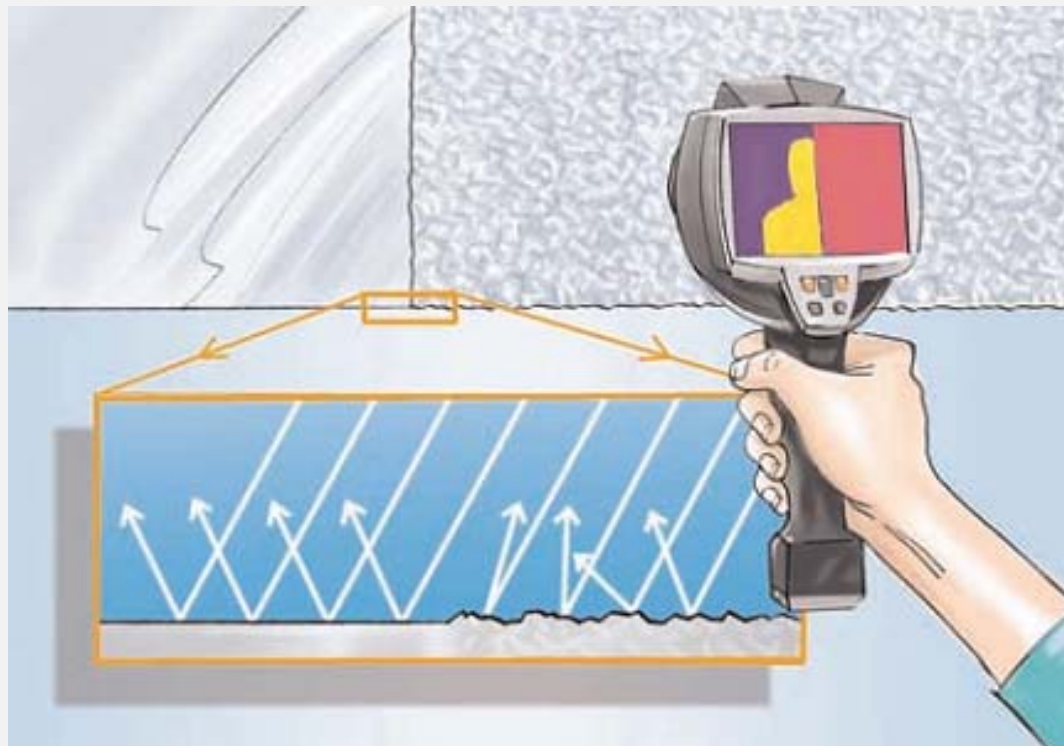


**Riflettività ( $\rho$ )** = è la capacità del materiale di riflettere le radiazioni IR.

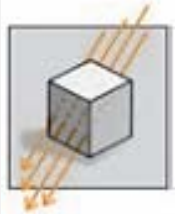
- $\rho$  dipende dalle proprietà superficiali, dalla temperatura e dal tipo di materiale;
- superfici lisce e lucide riflettono più delle superfici ruvide e opache fatte dello stesso materiale;
- Per superfici lisce l'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza (Riflessione speculare);
- RTC può corrispondere alla temperatura ambiente.

# Principi di base

Tutte le radiazioni sono sempre riflesse con la stessa angolazione con la quale colpiscono la superficie



# Principi di base



**Trasmissione ( $\tau$ )** = è la capacità di un materiale di trasmettere radiazioni IR.

- $\tau$  dipende dal tipo e dallo spessore del materiale;
- La maggior parte dei materiali non sono trasmissivi

# Principi di base

## Legge di Kirchhoff

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Poiché la trasmissione è spesso irrilevante nella pratica ai fini della misura,  $\tau$  è omessa

$$\varepsilon + \rho = 1$$

tanto maggiore è la quota di raggi IR riflessi, quanto più difficile è effettuare una misura precisa della temperatura e tanto più importante è che RTC sia impostata correttamente

# Principi di base

---

## Correlazione tra emissione e riflessione

1. Gli oggetti di misura con emissività elevata ( $\epsilon \geq 0,8$ ):

- hanno un fattore basso di riflessione ( $\rho$ ):  $\rho = 1 - \epsilon$ .
- La loro temperatura può essere misurata molto facilmente con la termocamera.



# Principi di base

---

## Correlazione tra emissione e riflessione

2. Gli oggetti di misura con emissività media ( $0,8 < \varepsilon < 0,6$ ):

- hanno un fattore medio di riflessione ( $\rho$ ):  $\rho = 1 - \varepsilon$ .
- la loro temperatura può essere misurata con la termocamera.

# Principi di base

---

## Correlazione tra emissione e riflessione

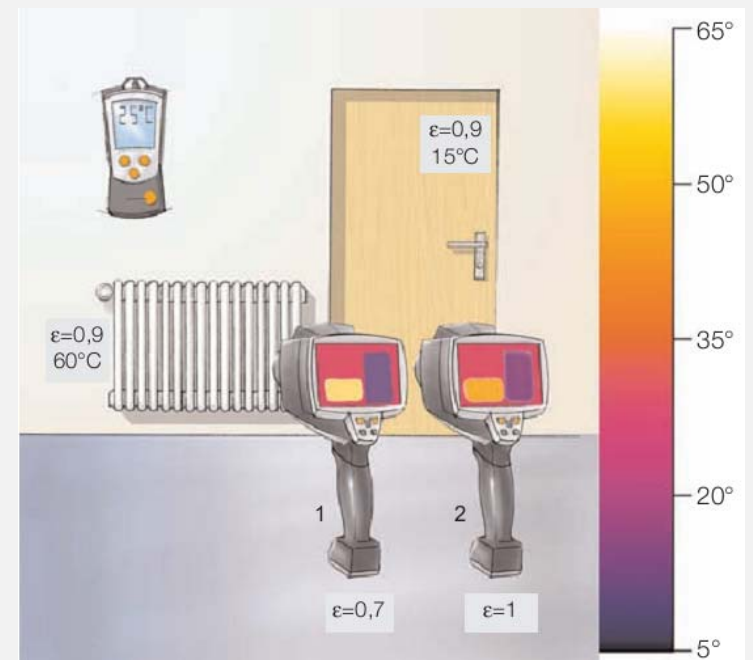
### 3. Gli oggetti di misura con emissività bassa ( $\epsilon \leq 0,6$ )

- hanno un fattore elevato di riflessione ( $\rho$ ):  $\rho = 1 - \epsilon$ .
- la loro temperatura può essere misurata con la termocamera, ma è fondamentale impostare correttamente la RTC

# Principi di base

L'impostazione corretta di  $\varepsilon$  è fondamentale nel caso di grandi differenze di  $T$  tra l'oggetto di misura e l'ambiente

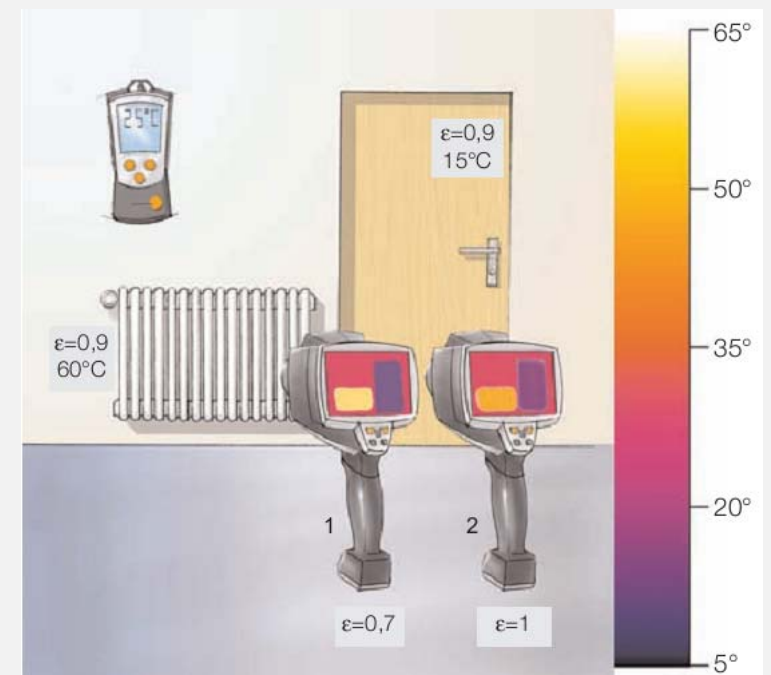
- Se la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla  $T_{amb.}$ :
  - $\varepsilon$  alte determinano letture di  $T$  basse (cfr. 2);
  - $\varepsilon$  basse determinano letture di  $T$  alte (cfr. 1).



# Principi di base

L'impostazione corretta di  $\epsilon$  è fondamentale nel caso di grandi differenze di  $T$  tra l'oggetto di misura e l'ambiente

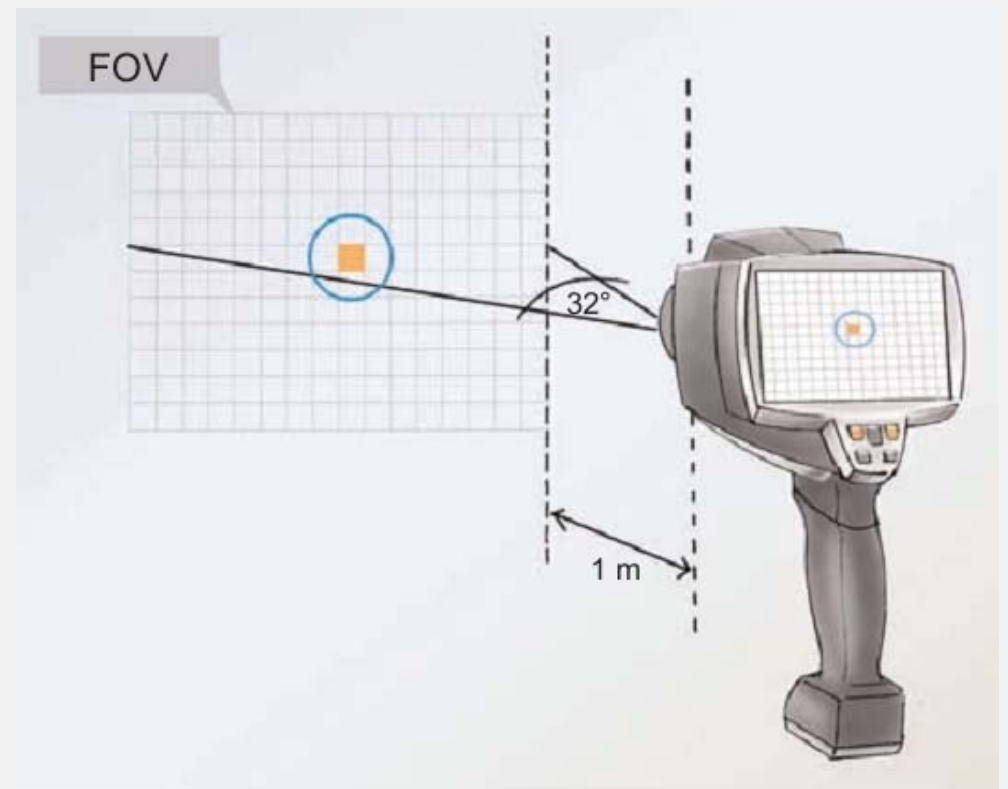
- Se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla  $T_{amb.}$ :
  - $\epsilon$  alte determinano letture di  $T$  alte (cfr. 2);
  - $\epsilon$  basse determinano letture di  $T$  basse (cfr. 1).



# Principi di base

Occorre considerare 3 variabili per determinare la distanza di misura appropriata e l'oggetto di misura massimo visibile o misurabile

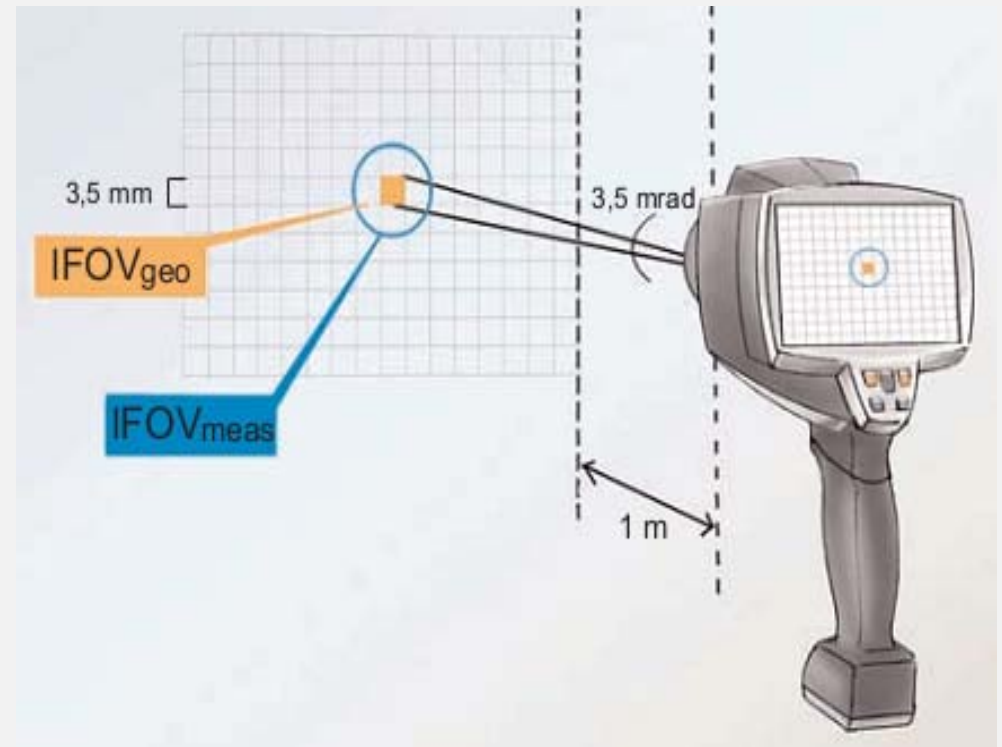
- Campo visivo (FOV);
- Il più piccolo oggetto identificabile ( $IFOV_{geo}$ );
- Il più piccolo oggetto/area misurabile ( $IFOV_{mis}$ )



# Principi di base

Le dimensioni di un pixel in base alla distanza determinano le dimensioni del più piccolo oggetto identificabile

- Una risoluzione spaziale della lente di 3,5 mrad e una distanza di 1m
- Il più piccolo oggetto identificabile ha lato 3,5mm
- Per ottenere una misura precisa l'oggetto deve avere dimensioni  $3 \times \text{IFOV}_{\text{geo}}$



# Condizioni ottimali per la misura in interno

---

- Condizioni ambientali stabili, al fine di identificare le fonti d'interferenza;

# Condizioni ottimali per la misura in esterno

- Condizioni atmosferiche stabili e cielo nuvoloso prima e durante la misura (per misure all'aperto);
- Assenza di luce solare diretta prima e durante la misura;
- Assenza di precipitazioni;
- Superficie dell'oggetto di misura asciutta e priva di fonti termiche d'interferenza (es. assenza di foglie sulla superficie);
- Assenza di vento o correnti d'aria;
- Assenza di fonti d'interferenza nell'ambiente di misura o nel percorso di trasmissione;
- Emissività della superficie dell'oggetto di misura nota;
- Per la termografia edile, è raccomandata una differenza di almeno 15 °C tra la temperatura ext e int.



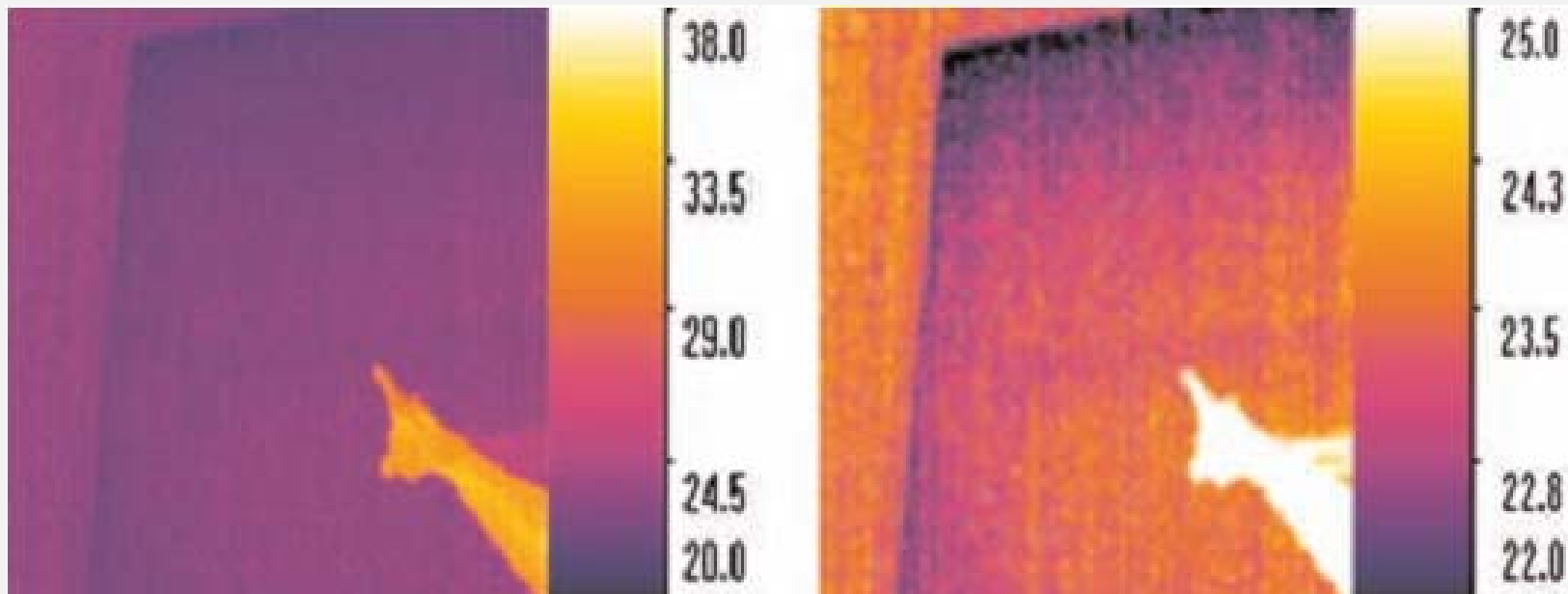
# Qualità dell'immagine IR

- Scegliere il giusto campo d'inquadratura;
- Mettere a fuoco correttamente l'immagine IR;
- Considerare, prevenire o schermare tutte le fonti d'interferenza;
- Cambiare la posizione di ripresa al fine di individuare qualsiasi riflessione;
- Mantenere la distanza di misura quanto più piccola possibile;
- Per una misura esatta dei dettagli usare un cavalletto;
- Le caratteristiche dell'oggetto di misura devono essere note al fine di poter identificare le caratteristiche termiche;
- Utilizzare una termocamera con fotocamera digitale integrata per consentire l'elaborazione in un momento successivo;
- Annotare tutte le condizioni ambientali per un'analisi successiva delle immagini termiche.

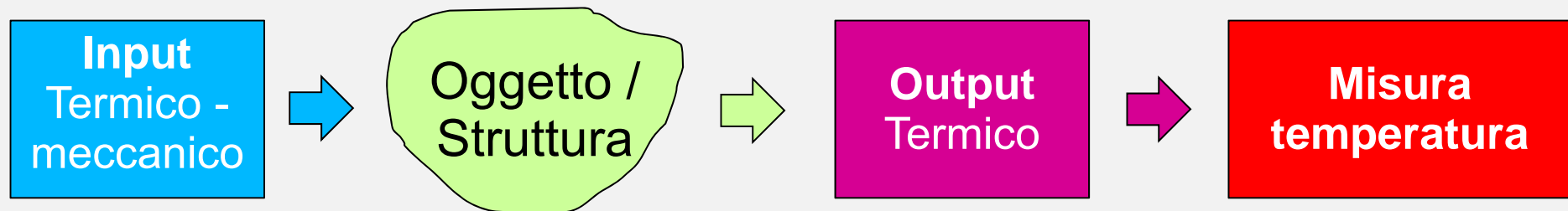
# Qualità dell'immagine IR

Modifiche a posteriore mediante software dedicati:

- Modifica dell'impostazione dell'emissività e della RTC;
- Scelta adeguata della paletta di colori (ferro, arcobaleno, ecc.);
- Regolazione manuale della scala di temperatura.



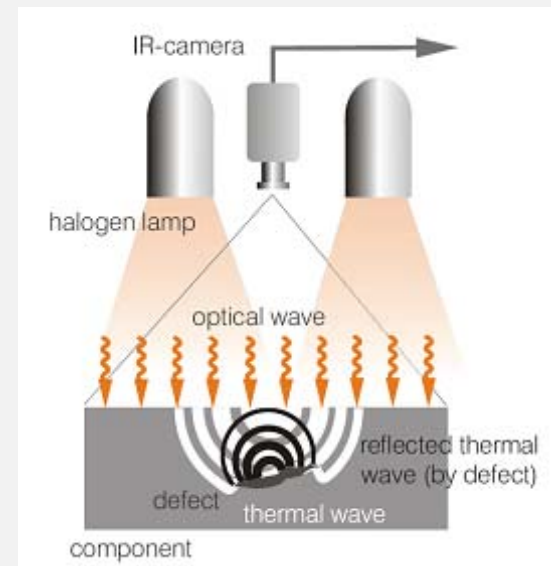
# Metodi Termici di Analisi delle Strutture



- Termografia Attiva – input meccanico o termico
  - Input Termico – Pulsed Thermography (PT), Step-Heating Thermography (ST), Lock-in Thermography (LT);
  - Input Meccanico - Ultrasound Lock-in Thermography (ULT), Thermoelastic Stress Analysis (TSA)
- Termografia Passiva – nessun input.

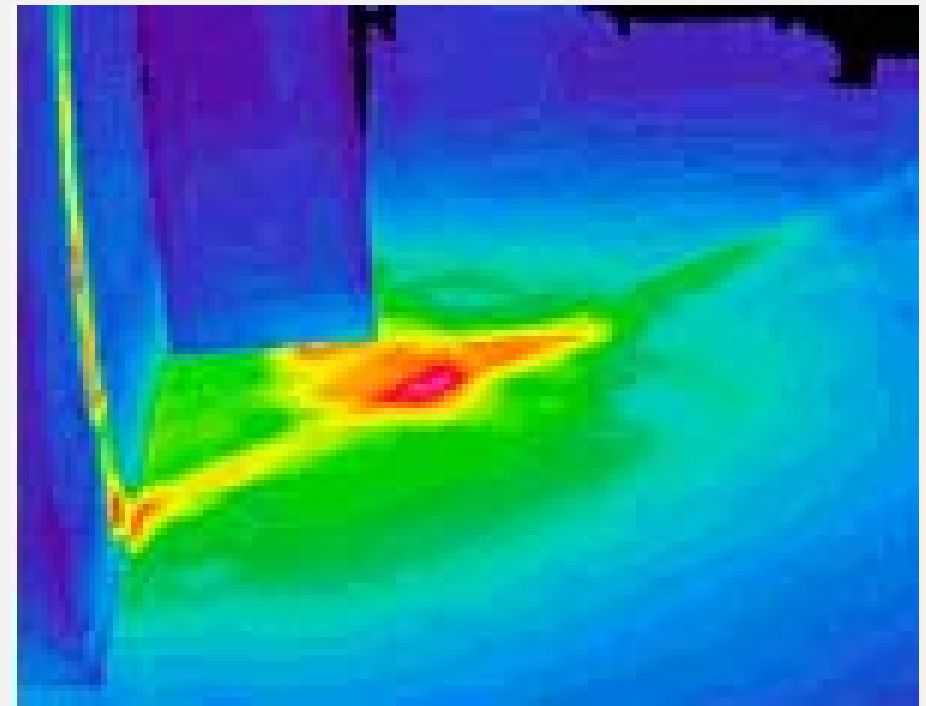
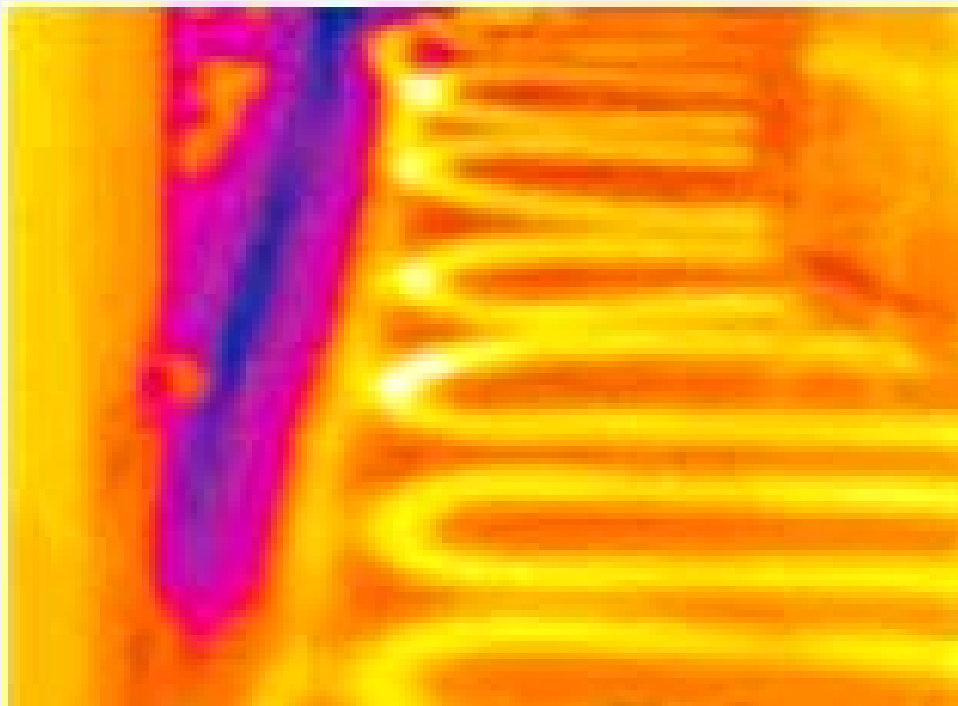
# Metodi Termici di Analisi delle Strutture

- Termografia Attiva – input meccanico o termico
  - Input Termico – Pulsed Thermography (PT), Step-Heating Thermography (ST), Lock-in Thermography (LT);
  - Input Meccanico - Ultrasound Lock-in Thermography (ULT), Thermoelastic Stress Analysis (TSA)



# Verifica e controllo di impianti idraulici

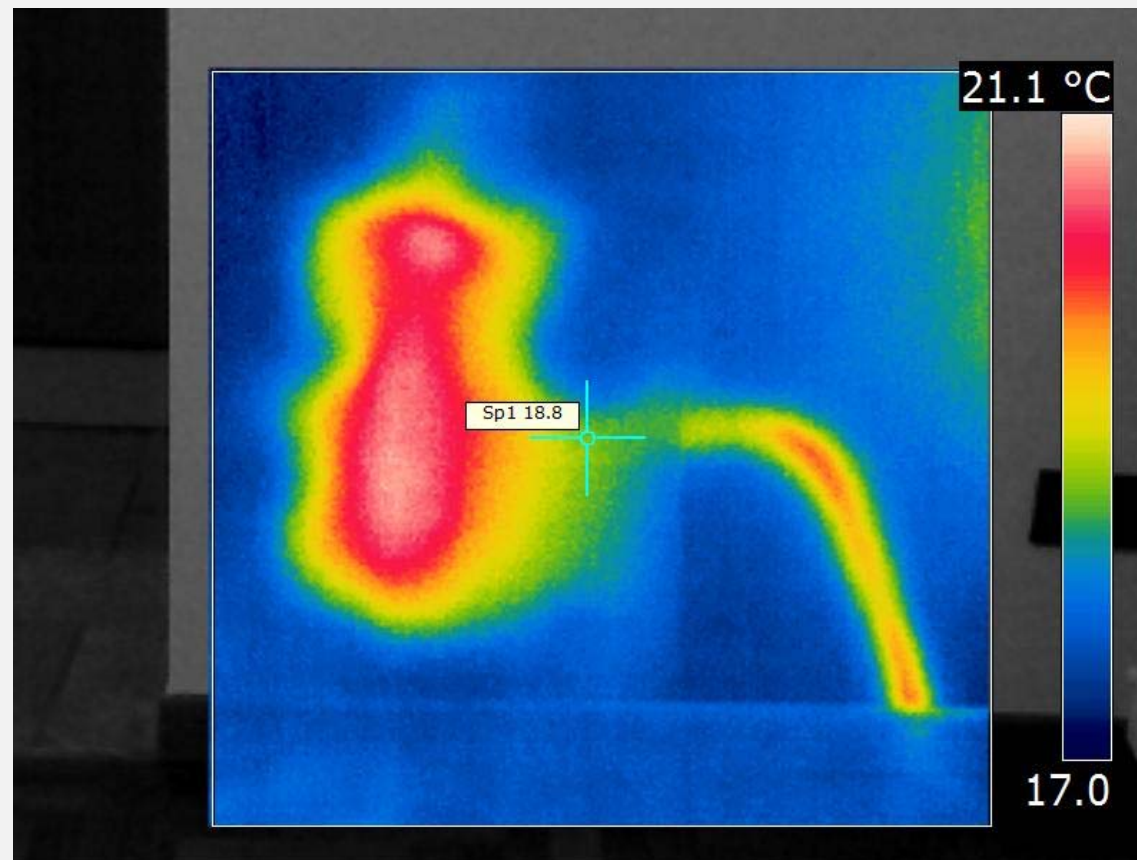
Riscaldamento con sistema radiante a pavimento



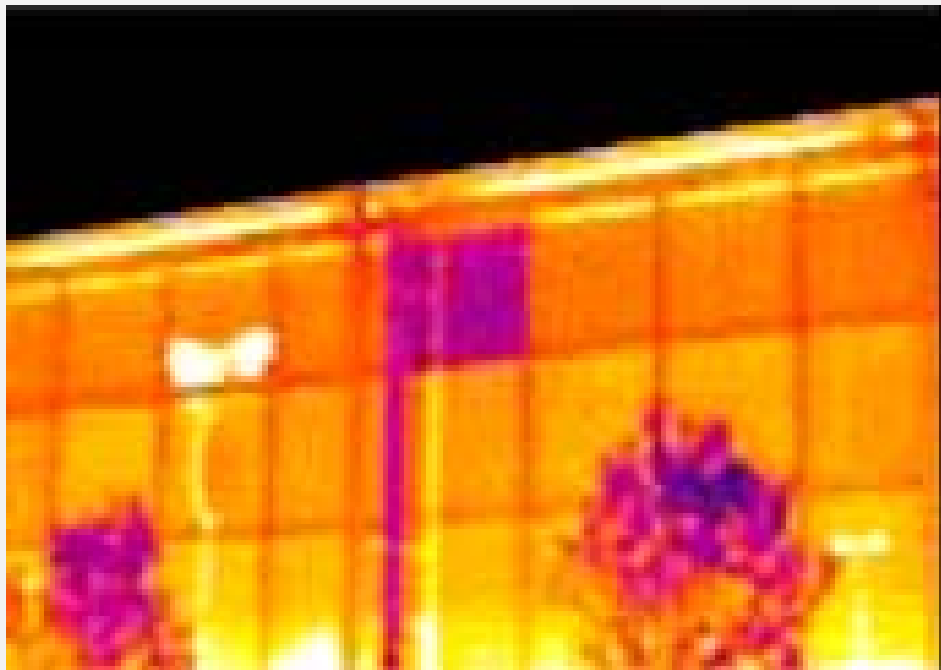
Individuazione di una perdita su tubatura acqua calda

# Verifica e controllo di impianti idraulici

Identificazione mediante IR/digitale del circuito di alimentazione di un calorifero

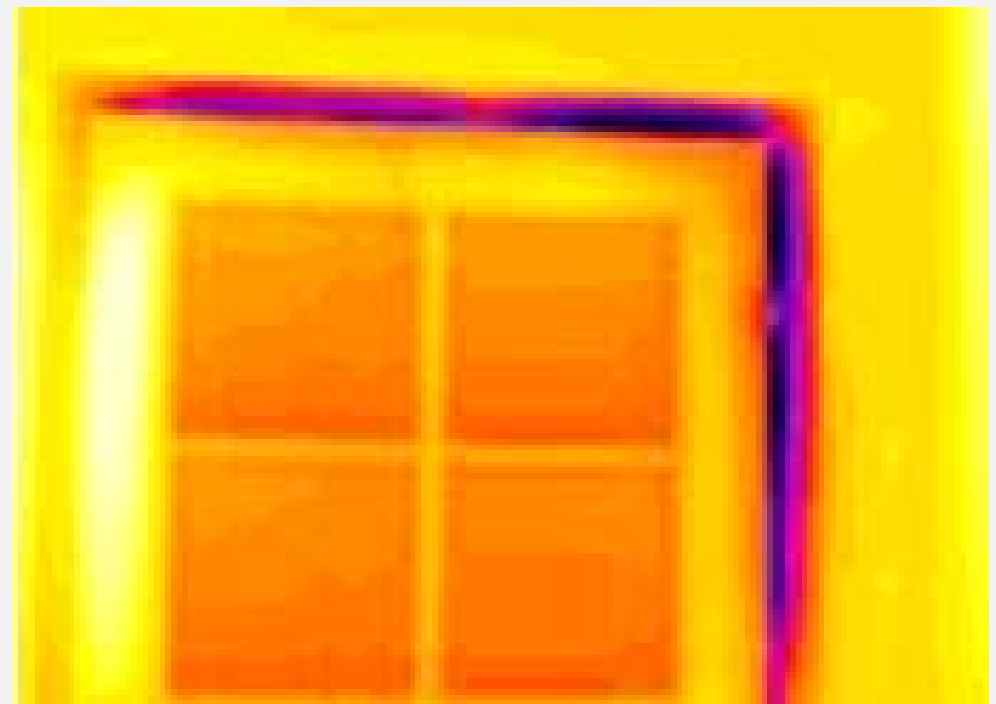


# Individuazione di difetti strutturali



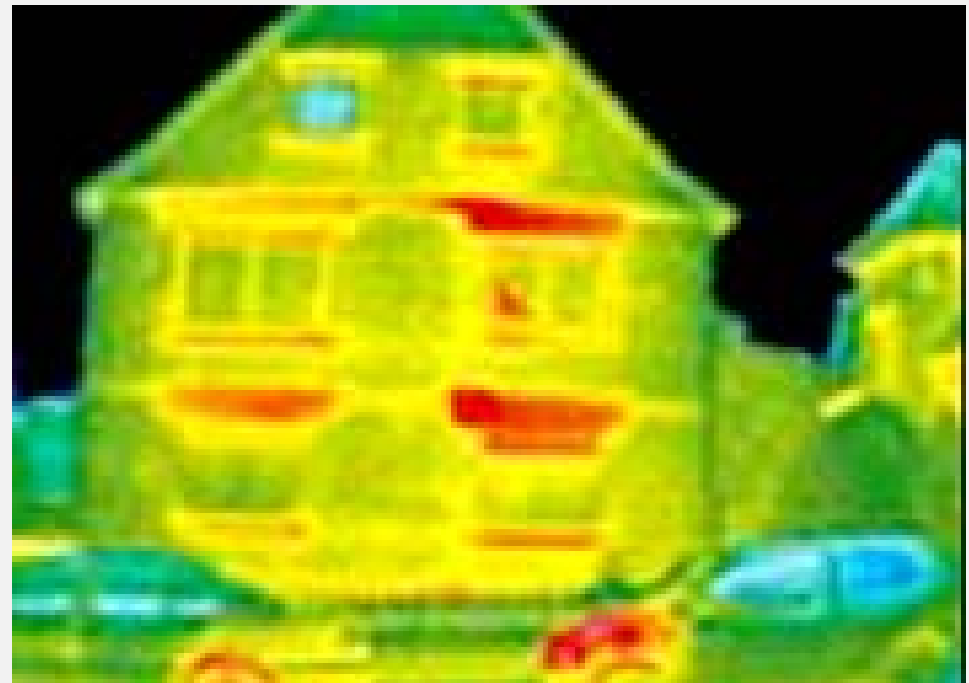
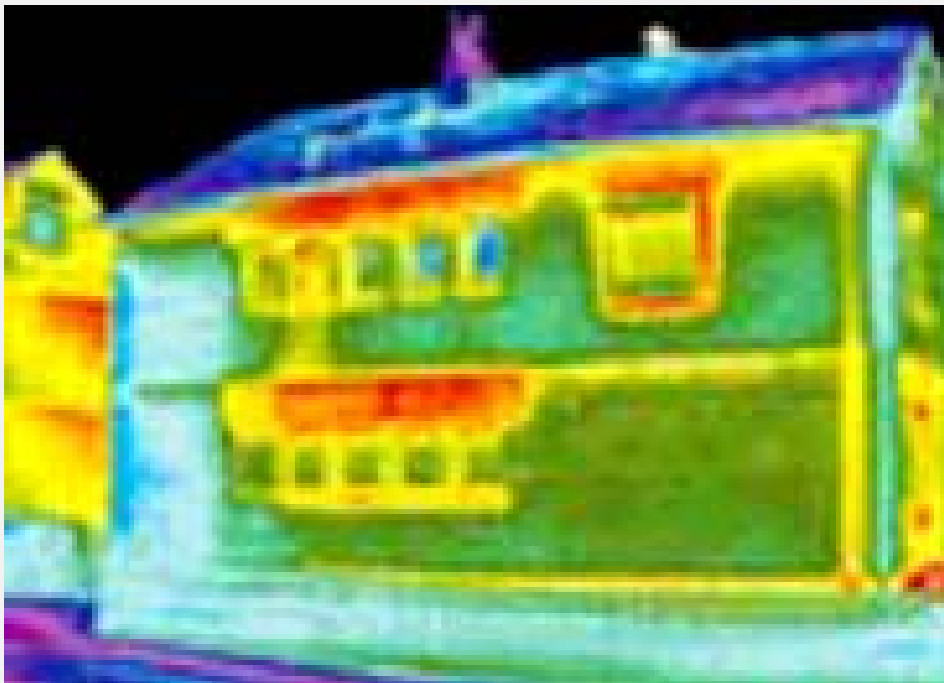
Valutazione della tenuta termica della finestratura

Verifica della tenuta termica della doppia finestra e del telaio



# Visualizzazione di dispersioni energetiche

Valutazione dell'efficienza energetica di un edificio con identificazione delle zone di dispersione del calore





# Diagnostica e Restauro

Rilievo di disomogeneità  
architettoniche nel supporto

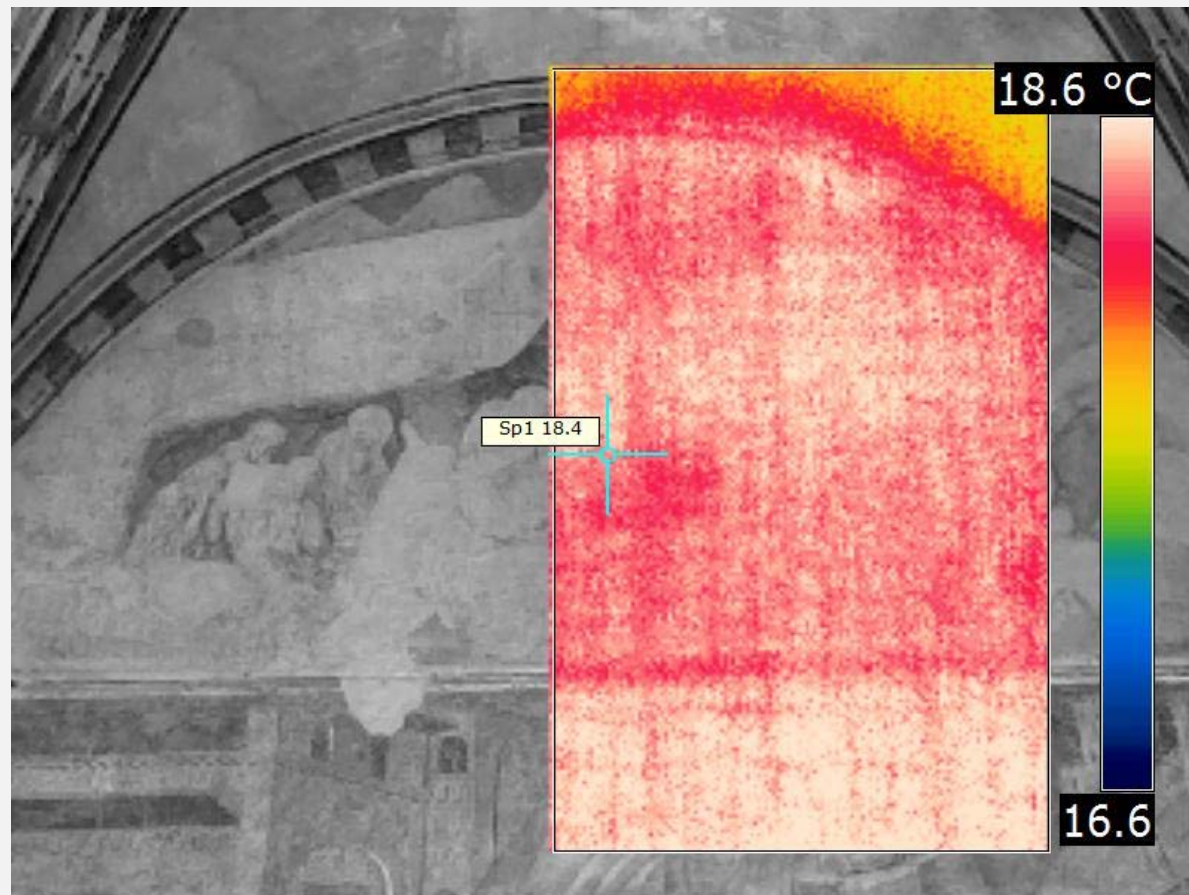


Rilievo di umidità da



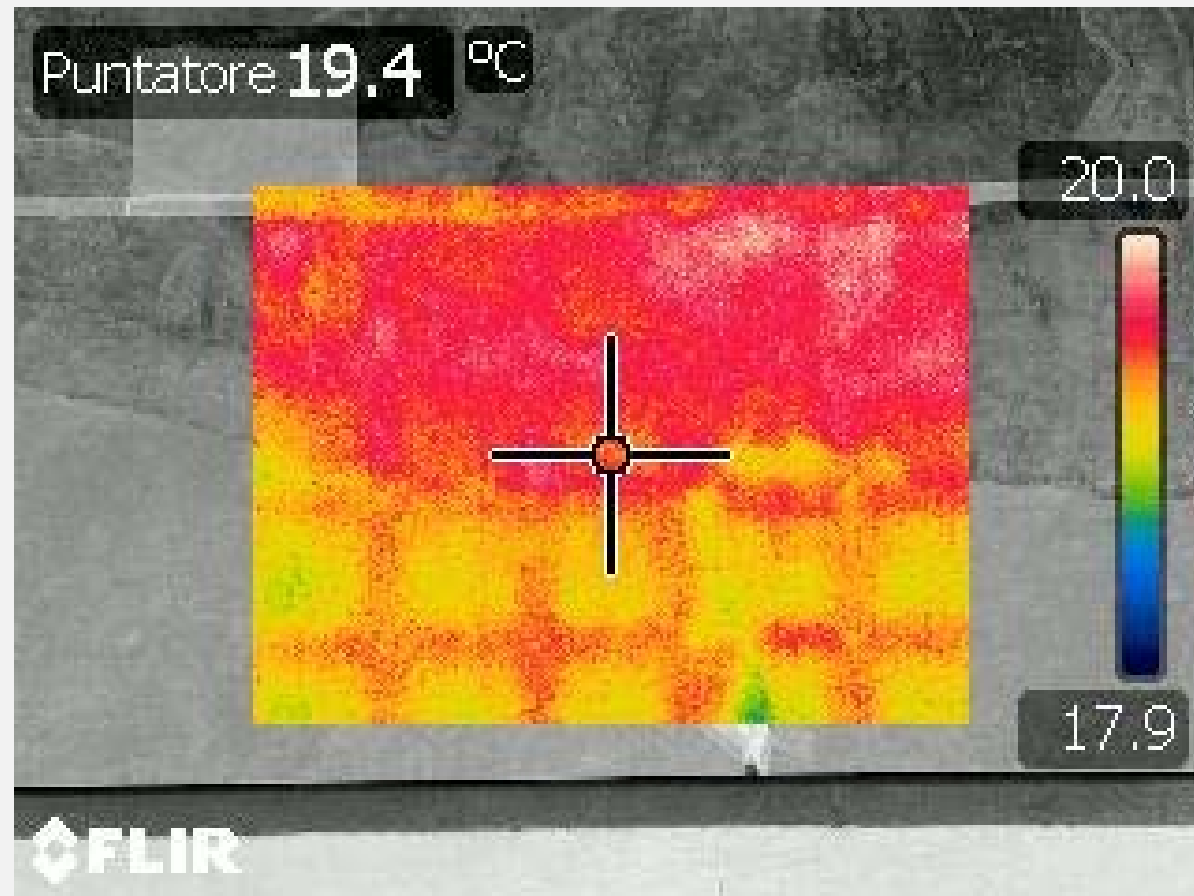
# Diagnostica e Restauro

Identificazione dello stato di conservazione del supporto di affreschi strappati



# Diagnostica e Restauro

Identificazione dello stato di conservazione del supporto di affreschi strappati



# Diagnostica e Restauro

Identificazione dello stato di conservazione del supporto di affreschi strappati

