

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

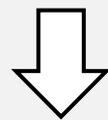
- Misura della temperatura superficiale di manufatti e strutture (anche in situ);
- Diagnosi non invasiva, valutazione dell'efficacia di impianti e di efficienza energetica;
- Monitoraggio e controllo periodico dello stato di conservazione e dell'efficacia di interventi di risanamento

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



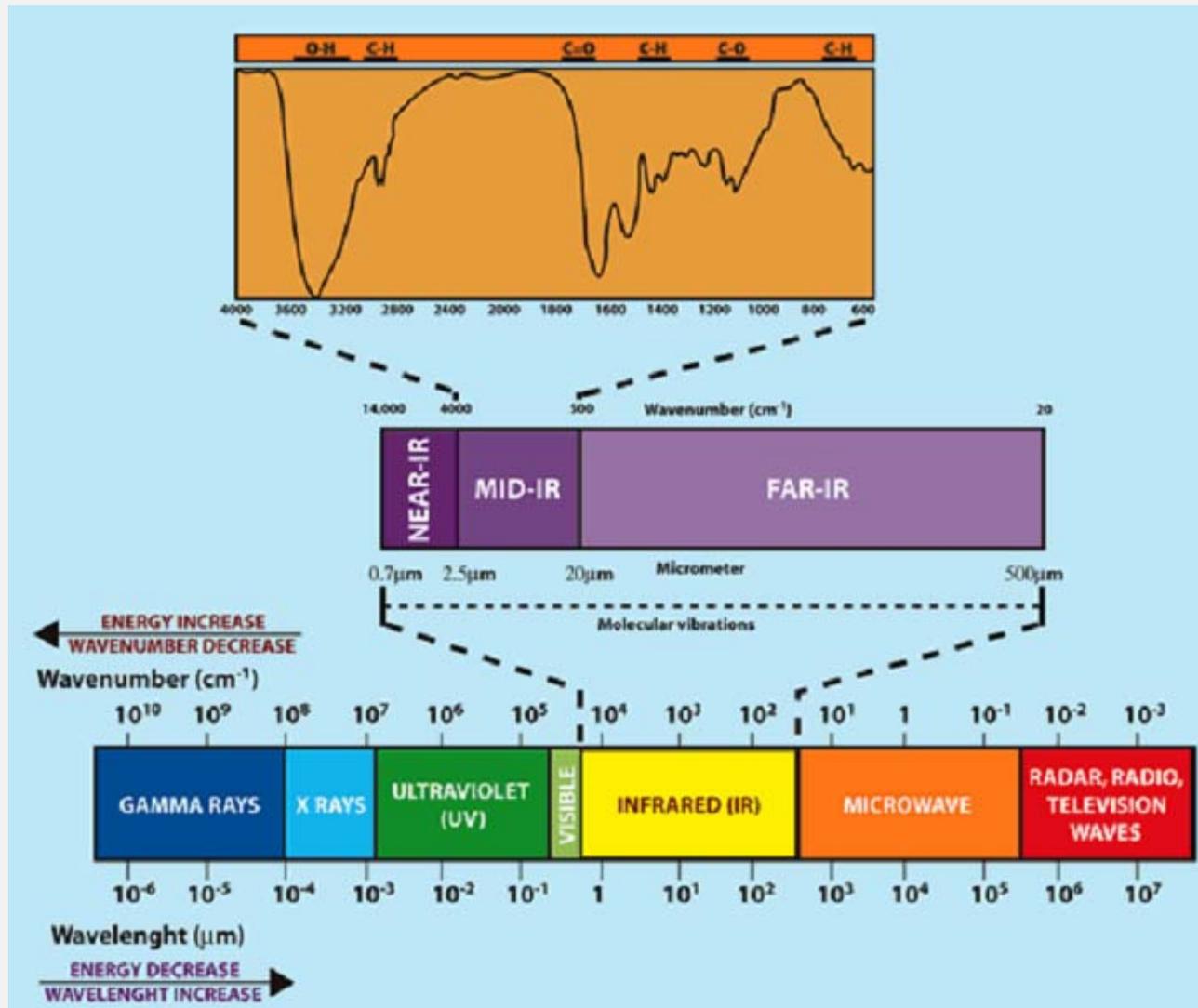
non è possibile vedere dentro o addirittura attraverso gli oggetti

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

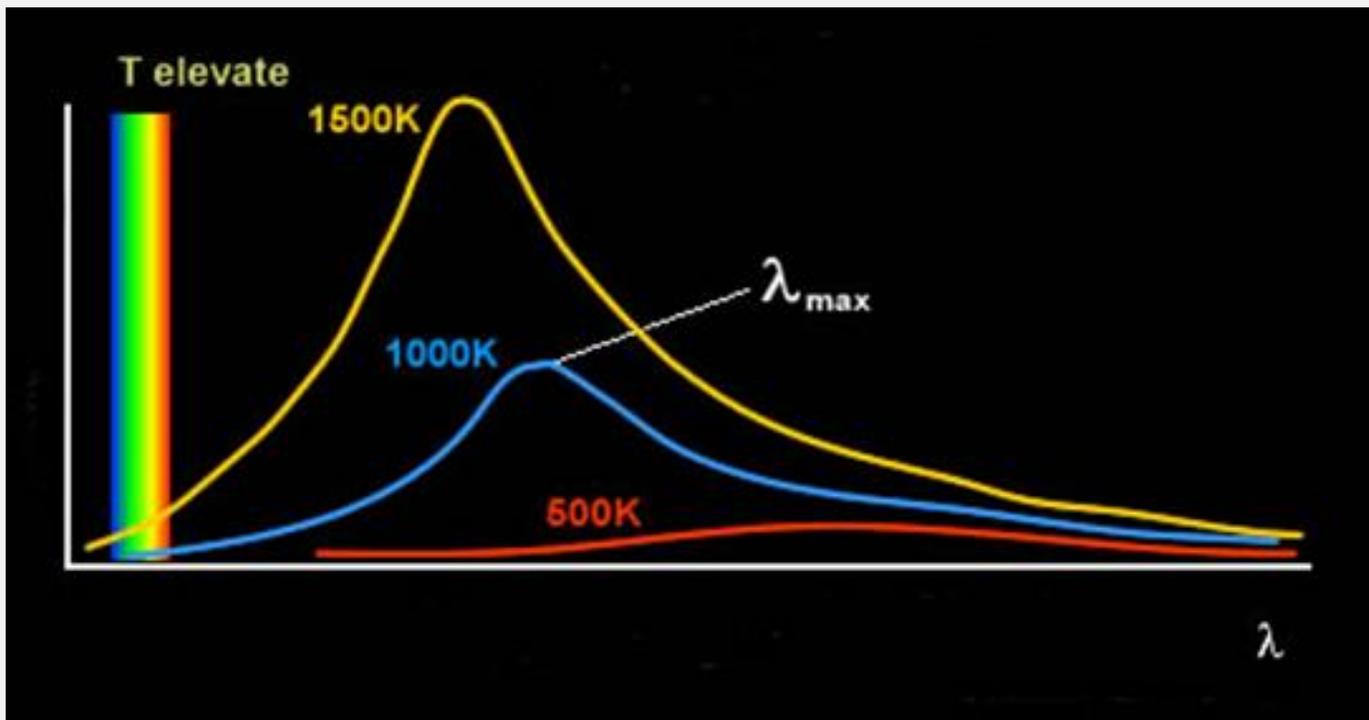
L'energia media per lunghezza d'onda è:

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

- La termocamera misura i raggi IR ricevuti nel suo campo visivo (7-15 μm -> 600-1400 cm^{-1});
- e calcola la temperatura dell'oggetto tenendo conto di:
 - emissività (ϵ) 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

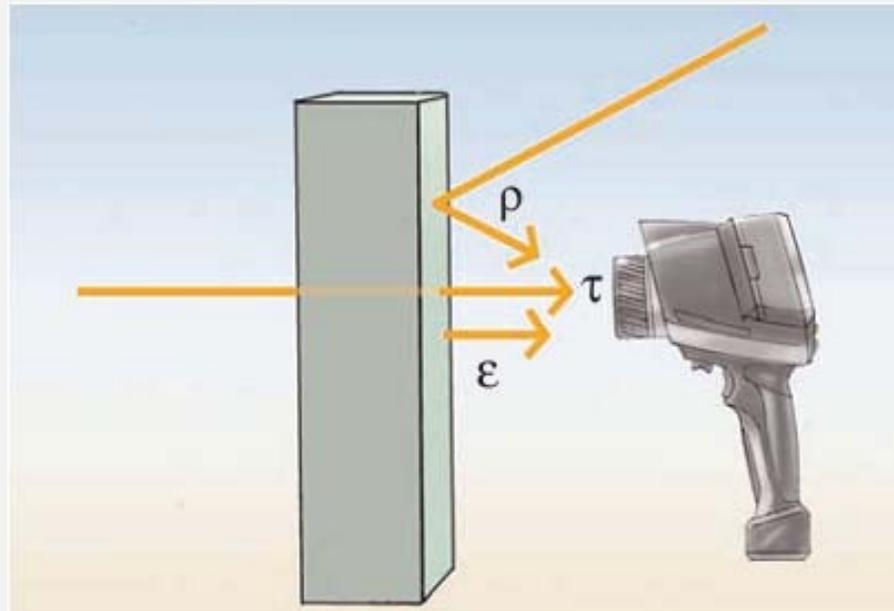


- lampade a incandescenza: 3500 K;
- tubi fluorescenti: 7000 K;
- lampada allo Xenon: 5500 K (prossima a quella del Sole).

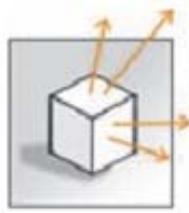
Principi di base

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

radiazioni emesse (ϵ), riflesse (ρ) e trasmesse (τ)



Principi di base



Emissività (ϵ) = è la capacità di un materiale di emettere radiazioni IR.

- ϵ dipende dalle caratteristiche superficiali, dal tipo di materiale e dalla temperatura;
- ϵ 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 ϵ 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 ϵ che dipende da T .

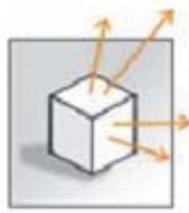
Materiale, (temperatura del materiale), Emissività

- 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

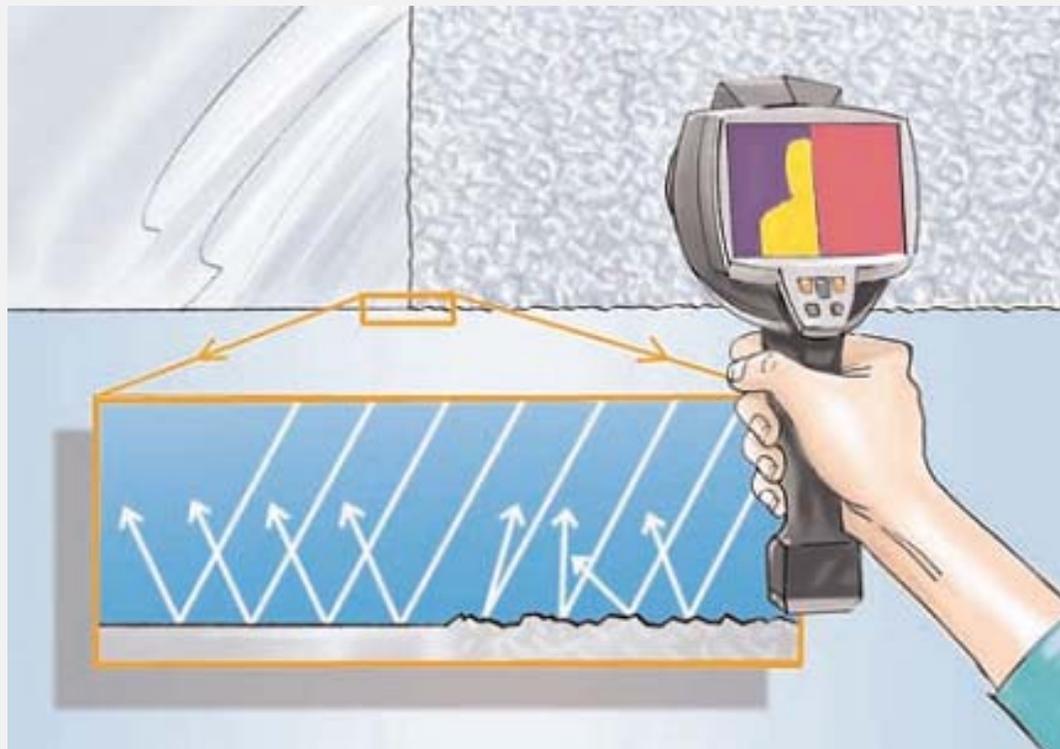


Riflettività (ρ) = è la capacità del materiale di riflettere le radiazioni IR.

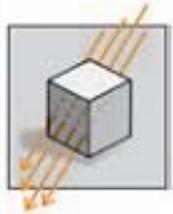
- ρ dipende dalle proprietà superficiali, dalla temperatura e dal tipo di materiale;
- superfici lisce e lucide riflettono più delle superfici ruvide e opache fatte dello stesso materiale;
- Per superfici lisce l'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza (Riflessione speculare);
- RTC può 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 (τ) = è la capacità di un materiale di trasmettere radiazioni IR.

- τ 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, τ 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 (ρ): $\rho = 1 - \epsilon$.
- 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 (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$.
- la loro temperatura può essere misurata con la termocamera.

Principi di base

Correlazione tra emissione e riflessione

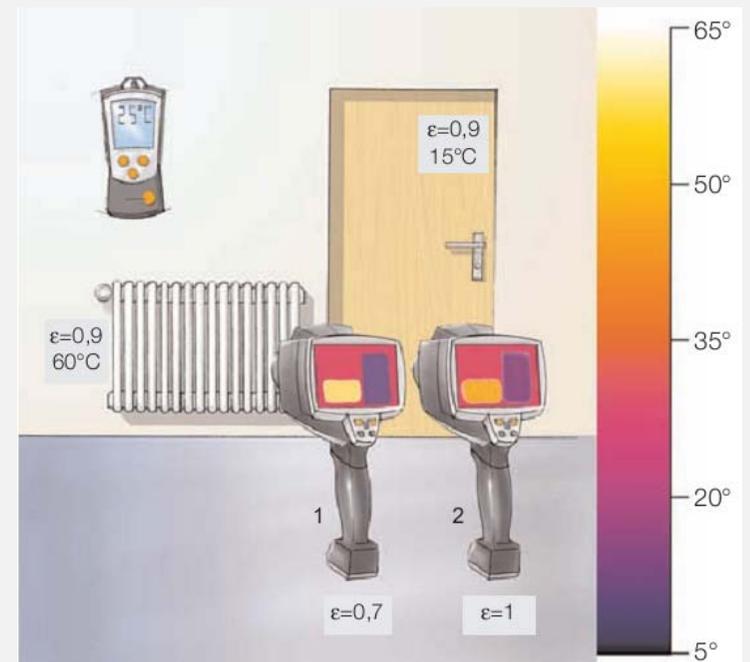
3. Gli oggetti di misura con emissività bassa ($\epsilon \leq 0,6$)

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

Principi di base

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

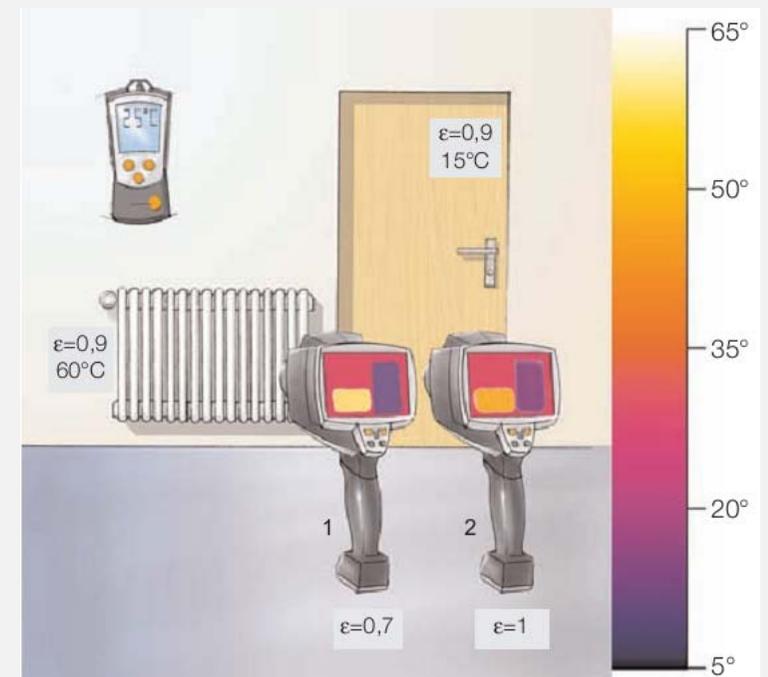
- Se la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla $T_{amb.}$:
 - ϵ alte determinano letture di T basse (cfr. 2);
 - ϵ basse determinano letture di T alte (cfr. 1).



Principi di base

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

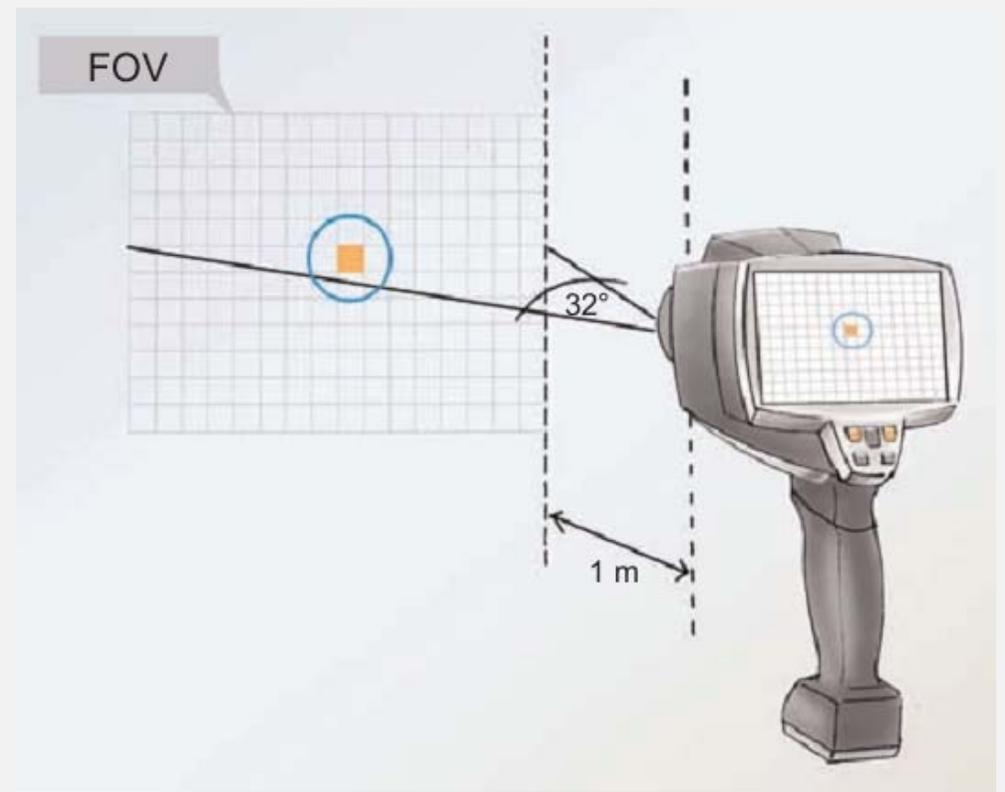
- Se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla $T_{amb.}$:
 - ϵ alte determinano letture di T alte (cfr. 2);
 - ϵ basse determinano letture di T basse (cfr. 1).



Principi di base

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

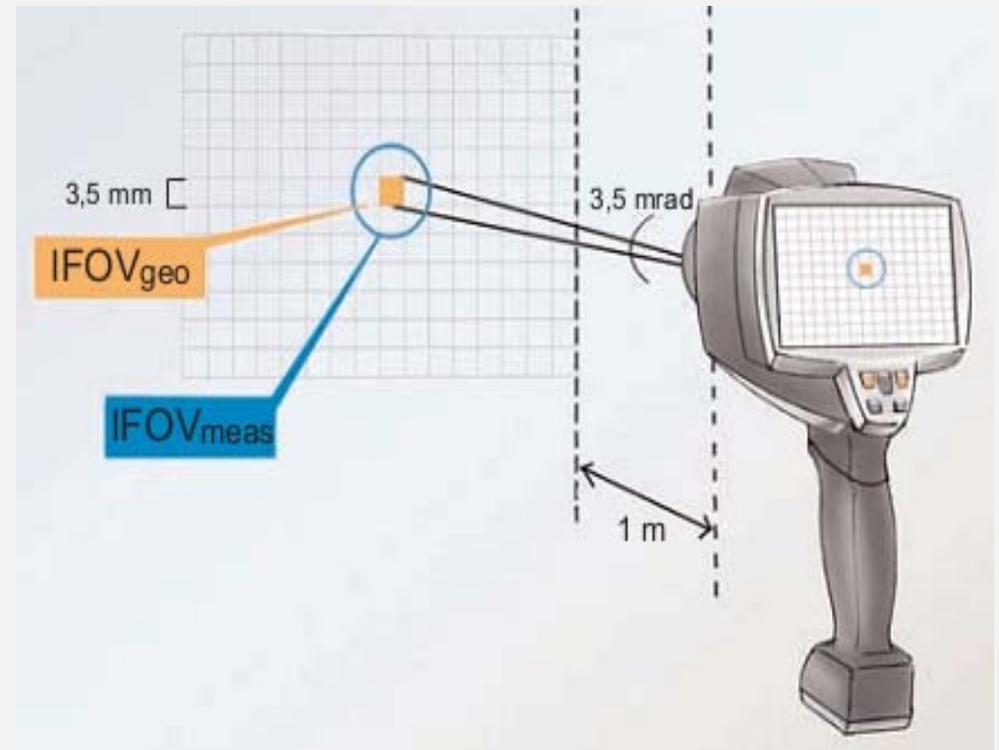
- Campo visivo (FOV);
- Il più piccolo oggetto identificabile ($IFOV_{geo}$);
- Il più piccolo oggetto/area misurabile ($IFOV_{mis}$)



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.

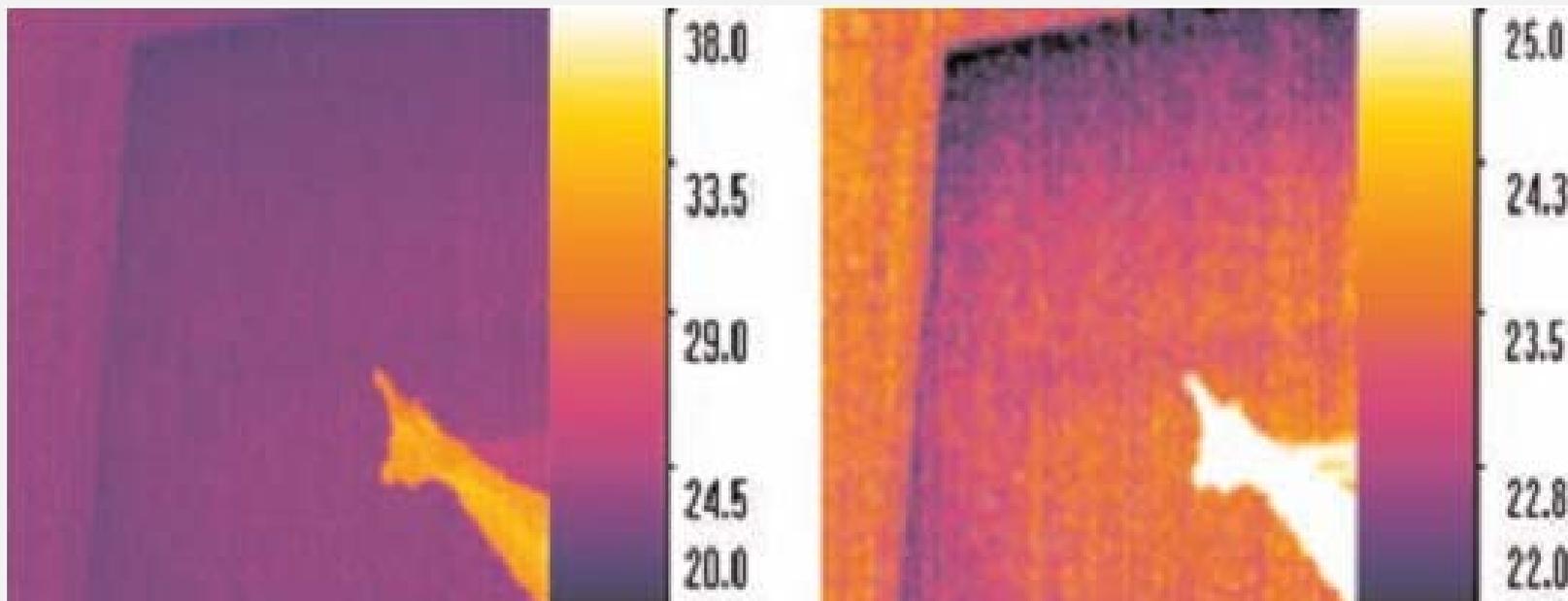
Qualità dell'immagine IR

- 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.

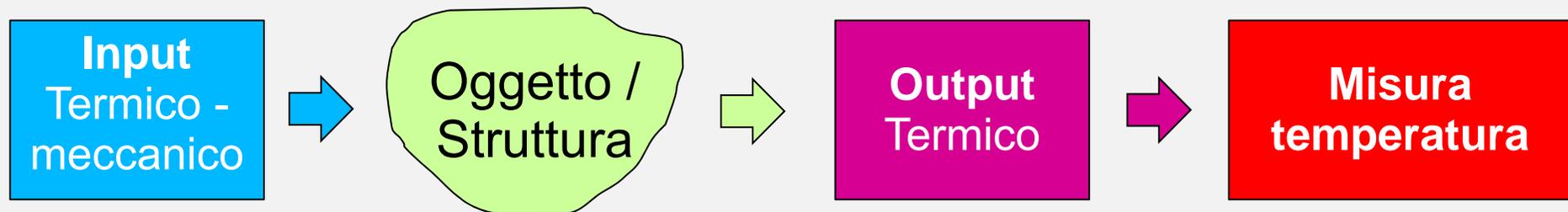
Qualità dell'immagine IR

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.



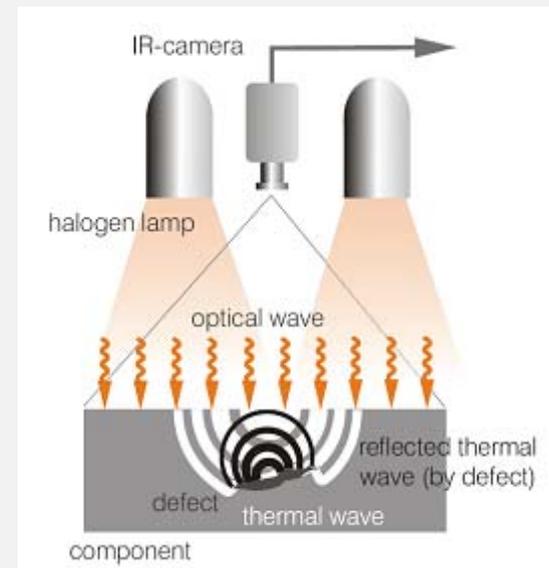
Metodi Termici di Analisi delle Strutture



- 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.

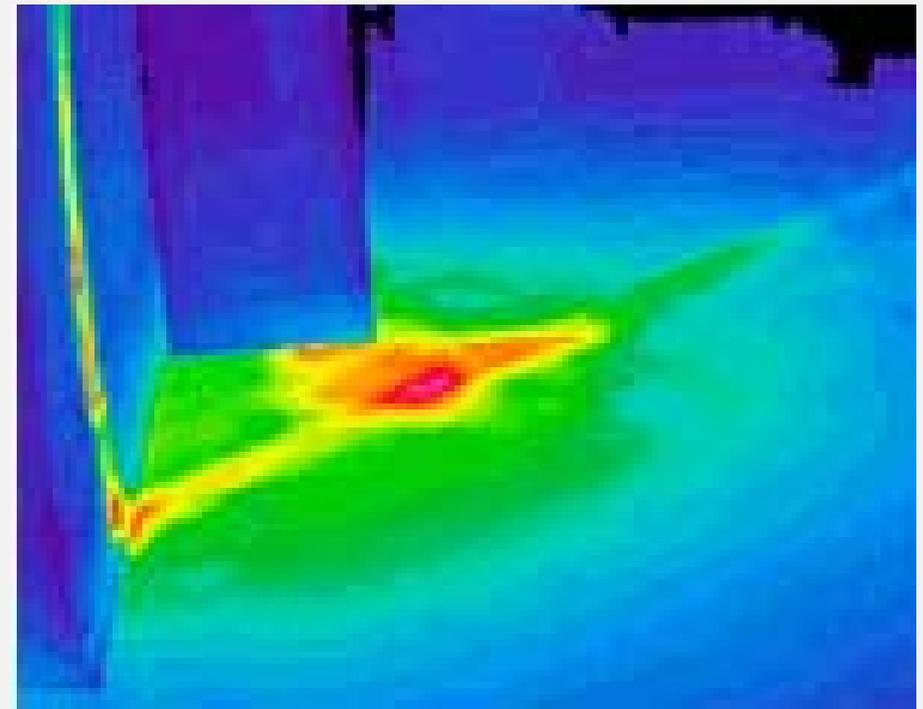
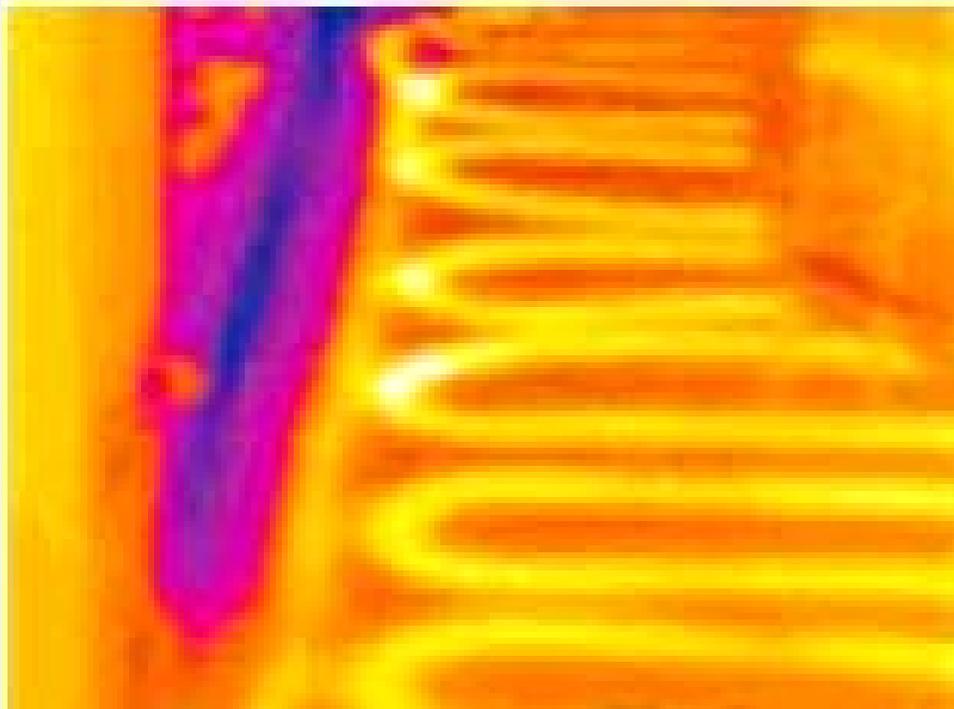
Metodi Termici di Analisi delle Strutture

- 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



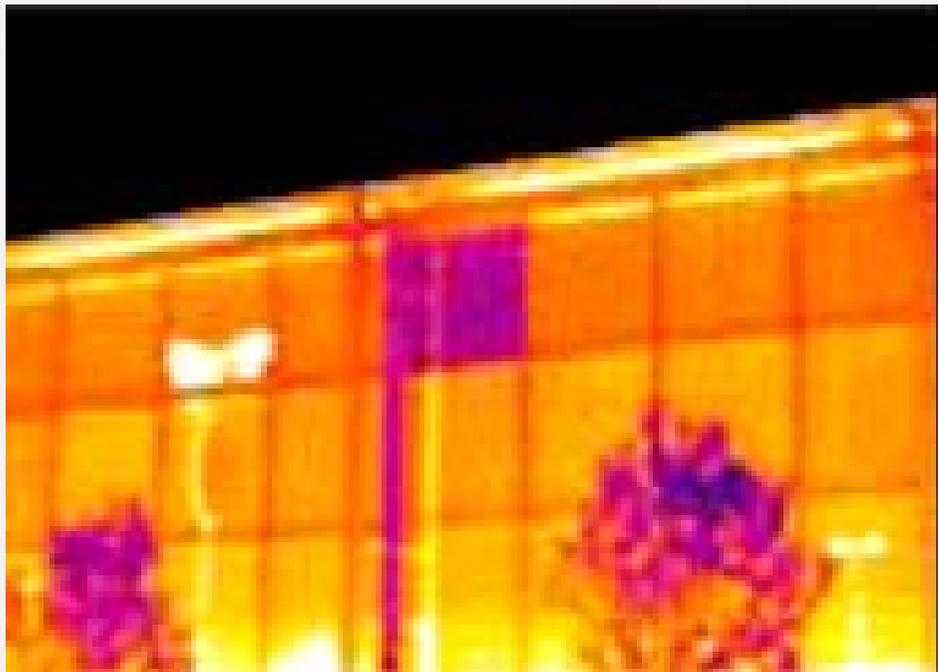
Individuazione di una perdita su tubatura acqua calda

Verifica e controllo di impianti idraulici

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

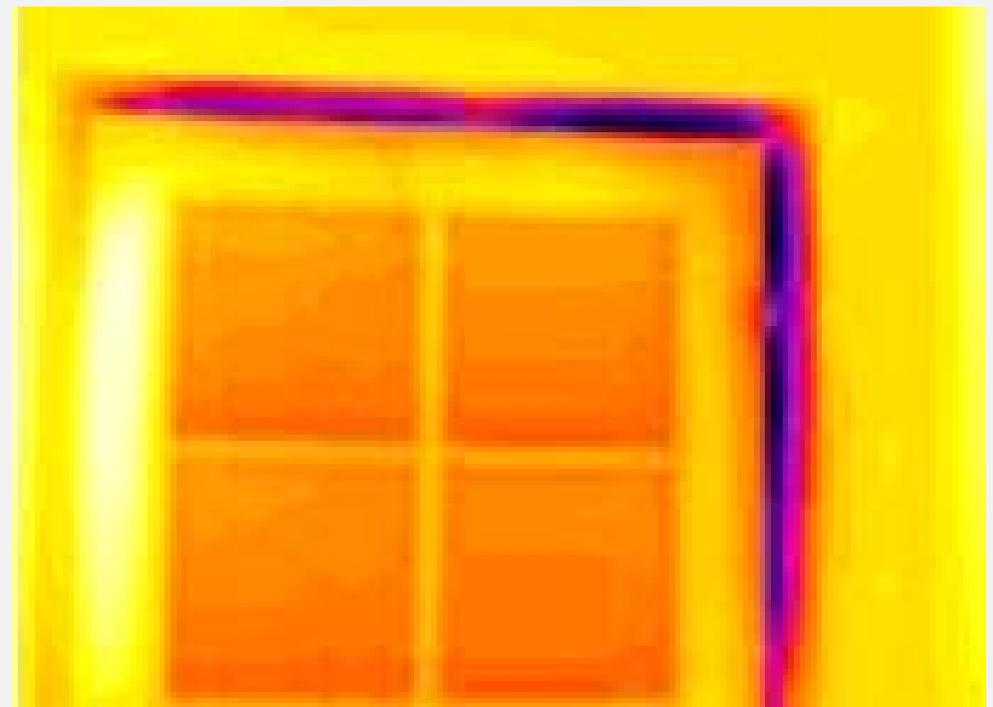


Individuazione di difetti strutturali



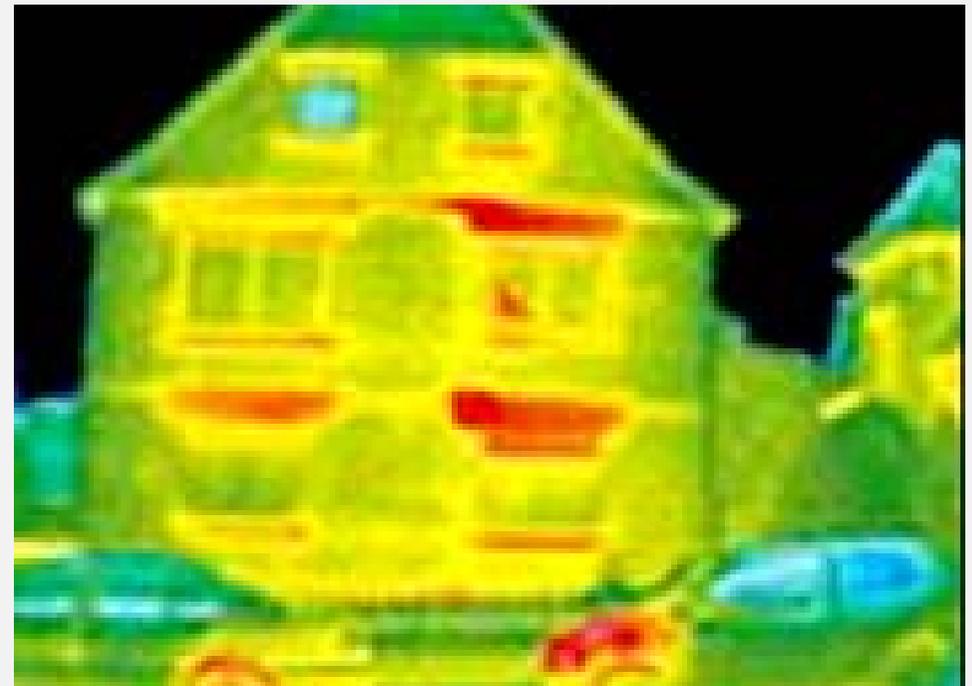
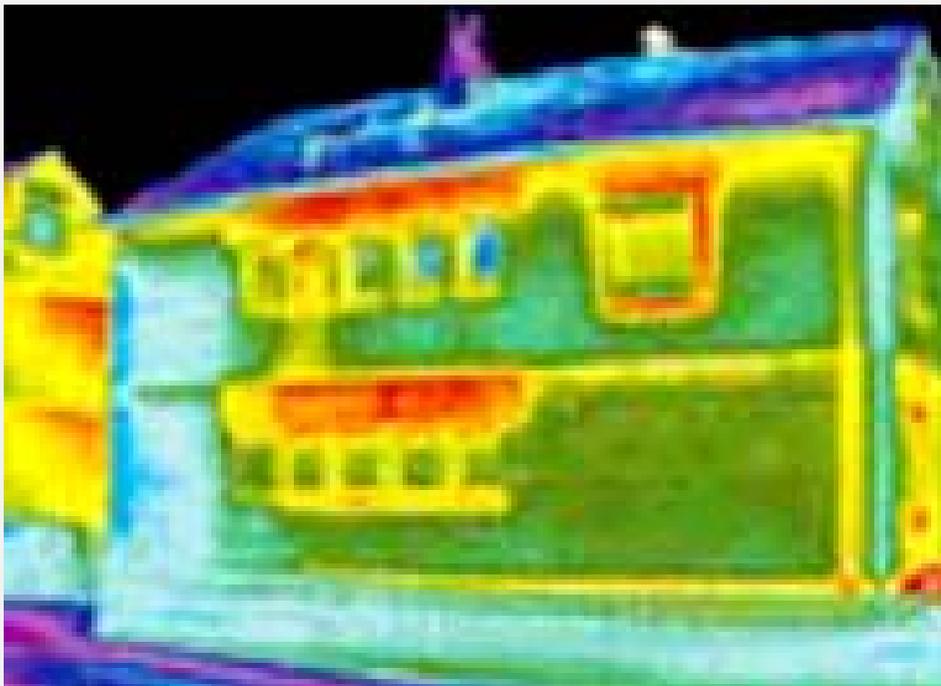
Valutazione della tenuta termica della finestratura

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

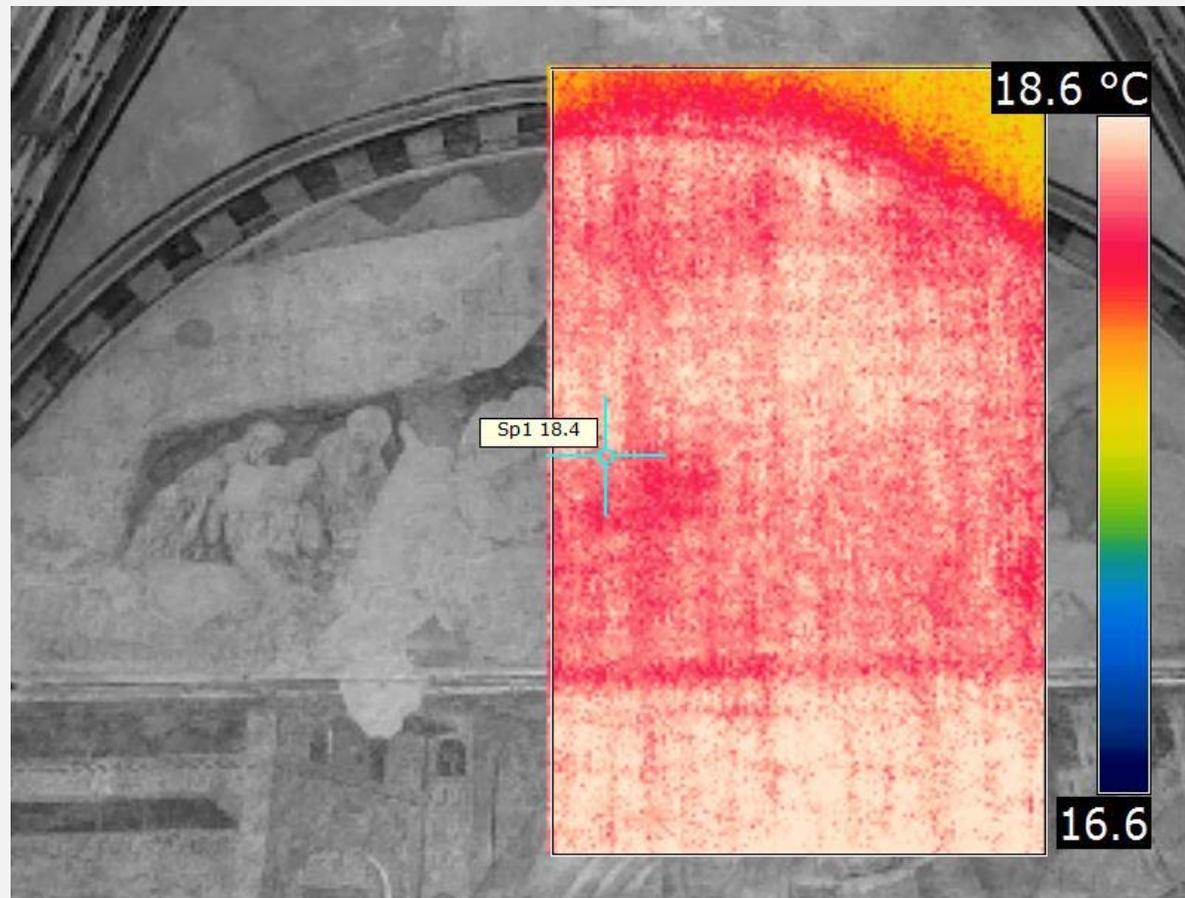


Rilievo di umidità da



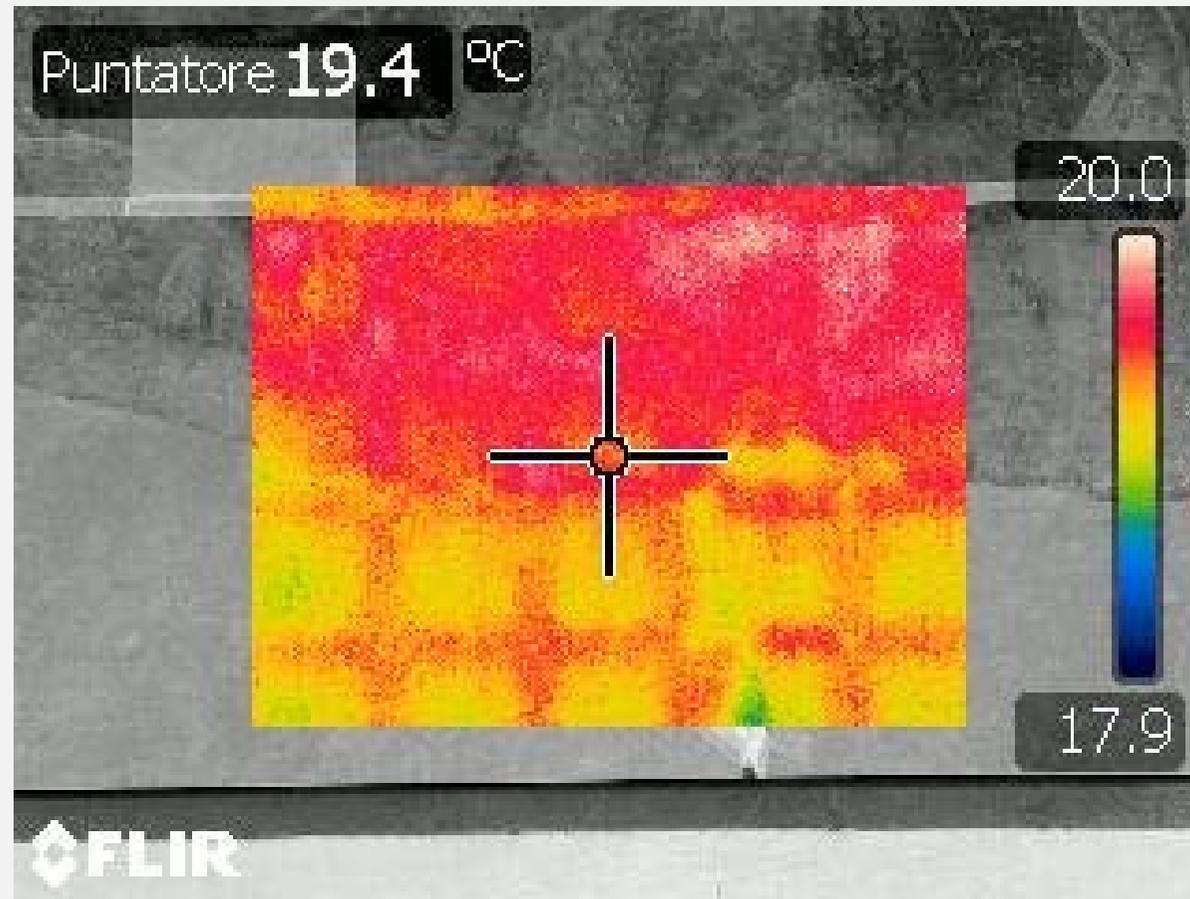
Diagnostica e Restauro

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

