



Applicazioni della Termografia nel settore industriale Diagnostica e Manutenzione Predittiva

TERMOGRAFIA

Ogni oggetto con temperatura maggiore dello zero assoluto emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche; più è alta la temperatura dell'oggetto, maggiore è l'energia emessa.

Con il termine termografia si intende la rilevazione e la misura dell'energia termica emessa da un oggetto sotto forma di immagine termica a falsi colori per mezzo di appositi strumenti (telecamere sensibili all'infrarosso, dette termocamere) che permette di risalire alla sua temperatura.

Le termocamere visualizzano quello che l'occhio umano non può vedere e permettono precise misure di temperatura senza contatto.

Praticamente ogni componente elettrico o meccanico presenta anomalie di comportamento termico in prossimità di un guasto o malfunzionamento, per cui le termocamere possono fornire un ottimo strumento diagnostico in varie applicazioni.

COS'È UNA TERMOCAMERA?

Una termocamera è un dispositivo che visualizza l'energia infrarossa (calore) non a contatto in una determinata banda di frequenza (o lunghezza d'onda) e la converte in un segnale elettrico.

Questo segnale viene poi processato, per produrre un'immagine su un monitor ed ottenere una misura di temperatura.

PERCHÉ MISURARE LA TEMPERATURA?

Spesso la sola visualizzazione dell'immagine termica non è sufficiente ai fini diagnostici.

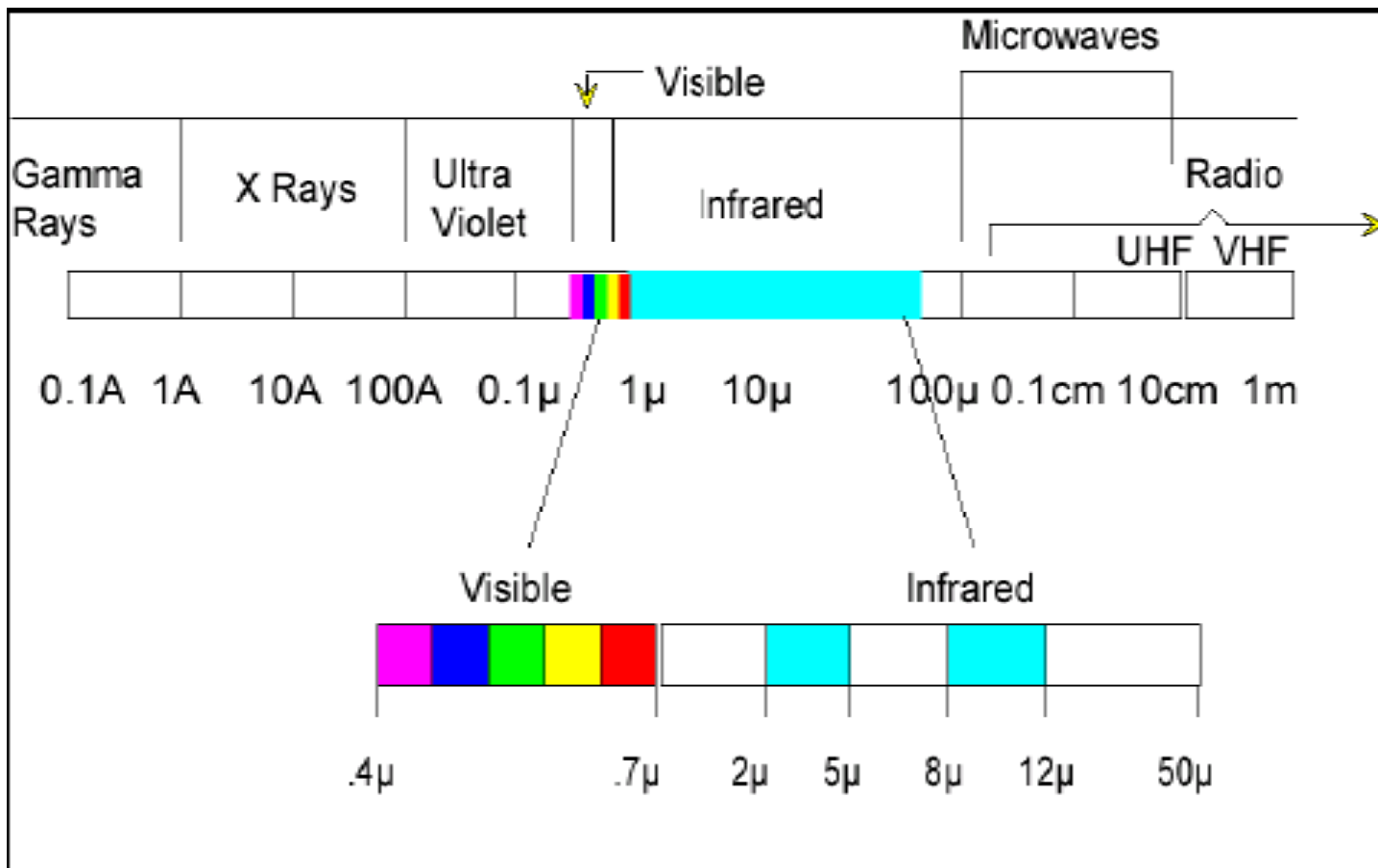
Le termocamere producono immagini termiche radiometriche che contengono 19.200 pixel (160x120), 76.800 pixel (320x240) o 307.200 pixel (640x480)

Ogni pixel rappresenta una misura di temperatura indipendente

PERCHÉ UTILIZZARE UNA TERMOCAMERA?

- Per eseguire ispezioni e misurazioni senza perturbare il sistema
- Per ottenere in tempo reale una indicazione dell'energia emessa da un oggetto
- Per misurare la temperatura senza contatto
- Per ottenere una immagine che equivale all'utilizzo contemporaneo di migliaia di strumenti
- Per identificare e localizzare con rapidità un problema
- Per mantenere nel tempo le informazioni e recuperarle durante ispezioni successive
- Per individuare eventuali problemi prima che si manifestino in maniera evidente

SPETTRO ELETTROMAGNETICO



CORPO NERO IDEALE

Qualsiasi corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazioni, in quantità e modalità diverse in funzione della temperatura.

Un corpo capace:

1. di assorbire completamente qualsiasi radiazione che lo investe;
2. di emettere la massima quantità possibile di radiazione per quella temperatura;

è detto corpo nero.

LEGGE DI PLANK

Descrive l'emissione del corpo nero:

$$W_{BB}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \left[e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1 \right]}$$

$W_{BB}(\lambda, T)$ = intensità della radiazione emessa da una superficie piana di un corpo nero in una semisfera per unità di area, alla lunghezza d'onda λ e temperatura T [W/m³].

c = velocità della luce nel vuoto [300000 km/s]

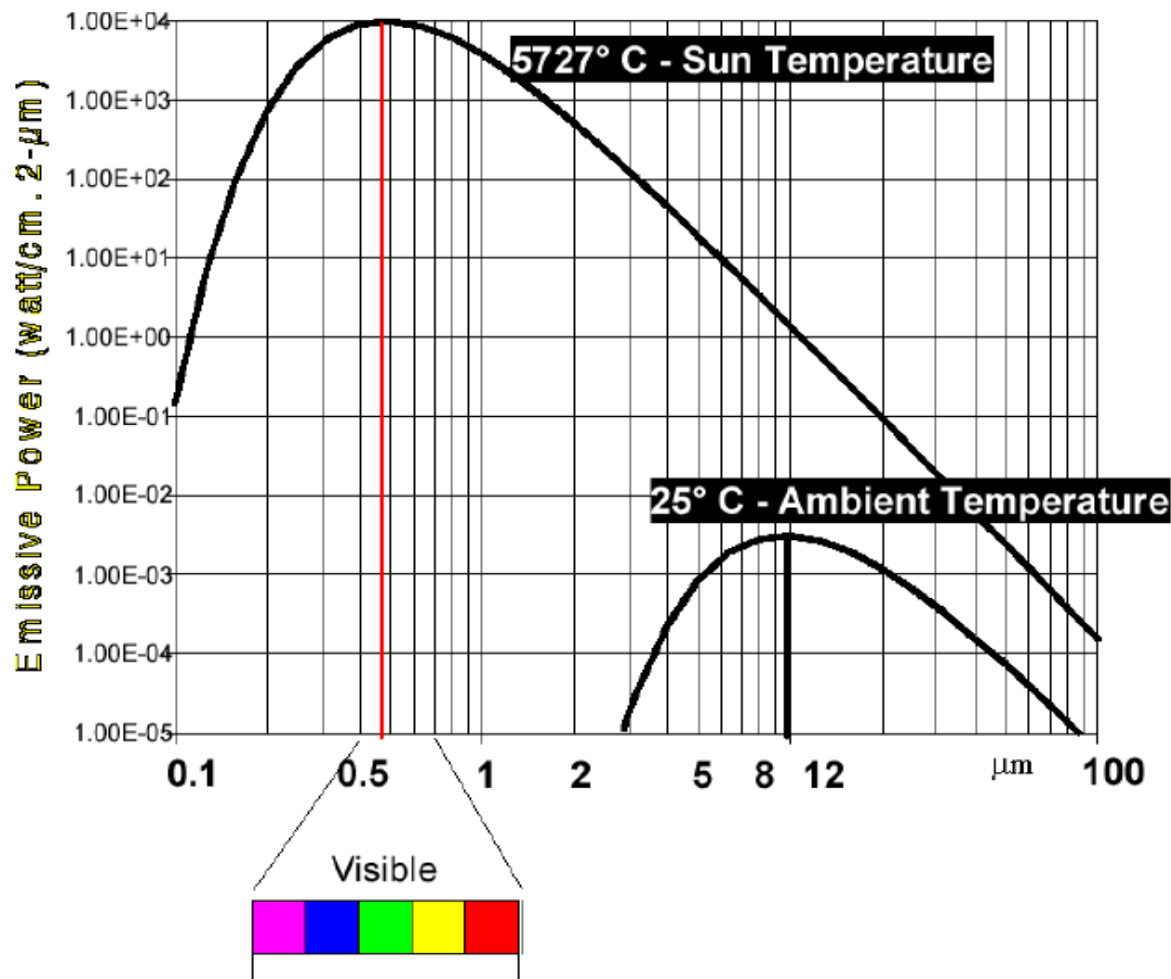
h = costante di Plank [6,625*10⁻³⁴ Js]

λ = lunghezza d'onda della radiazione [m]

k = costante di Boltzman [1,3806505 *10⁻²³ J/K]

T = temperatura assoluta del corpo nero [K]

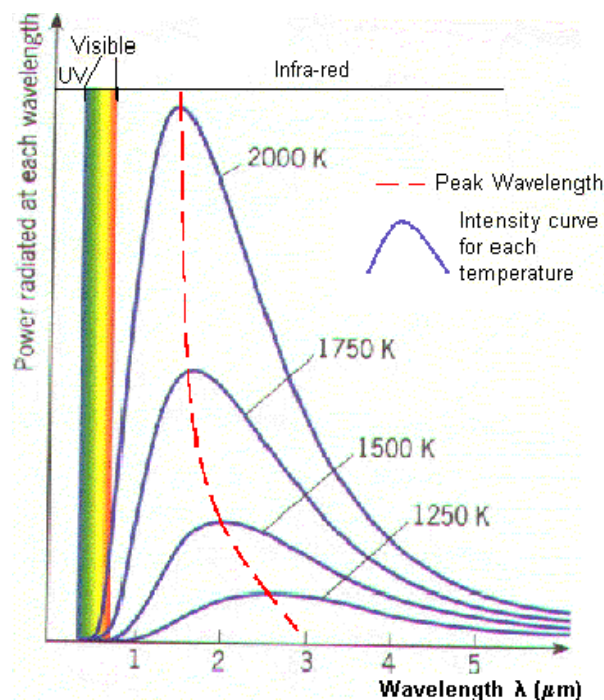
EMISSIONI DEL CORPO NERO



LEGGE DI WIEN

Questa legge stabilisce una corrispondenza semplice tra la temperatura del corpo nero e la lunghezza d'onda in corrispondenza al massimo di emissione:

$$\lambda_{MAX} = \frac{2891}{T} \quad [\mu\text{m}]$$

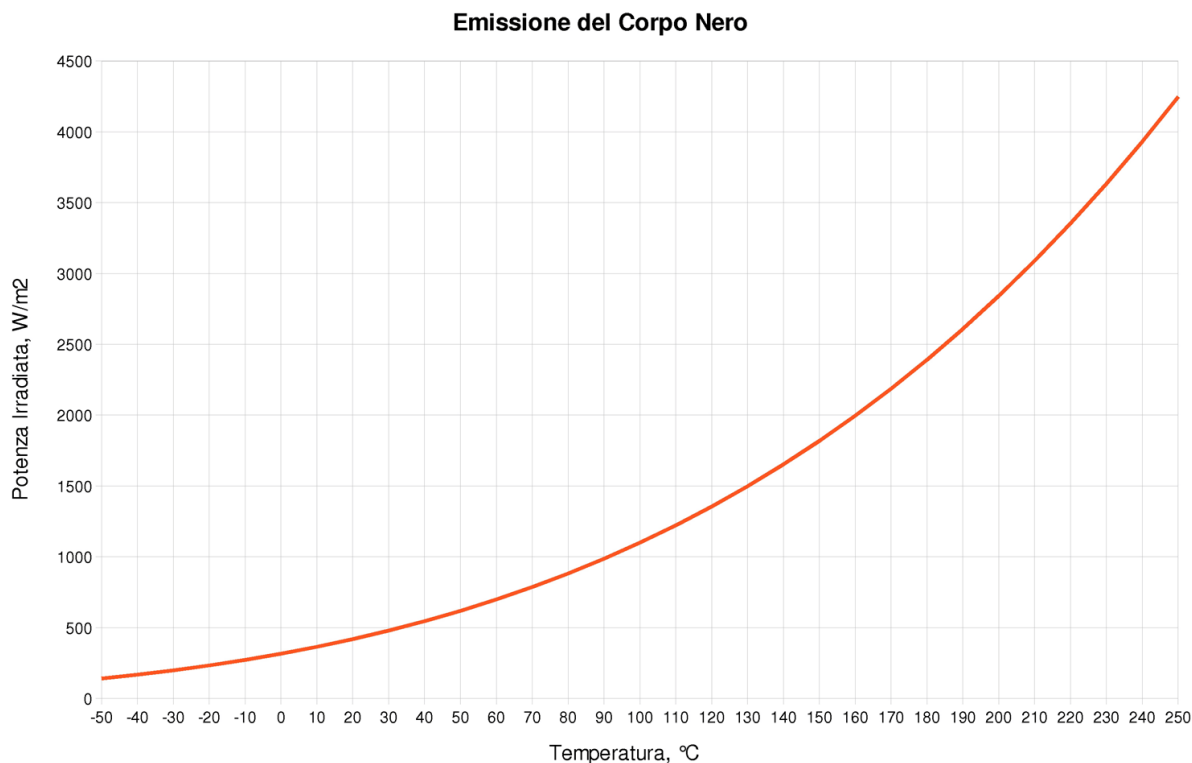


Tale lunghezza d'onda diminuisce all'aumentare della temperatura.

LEGGE DI STEFAN-BOLTZMAN

Questa legge deriva dalla legge di Plank, integrata nella lunghezza d'onda, e permette di ricavare l'energia totale irradiata da un corpo nero in funzione della sua temperatura:

$$W_T = \sigma \cdot T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$



σ è la costante di Stefan-Boltzman [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$].

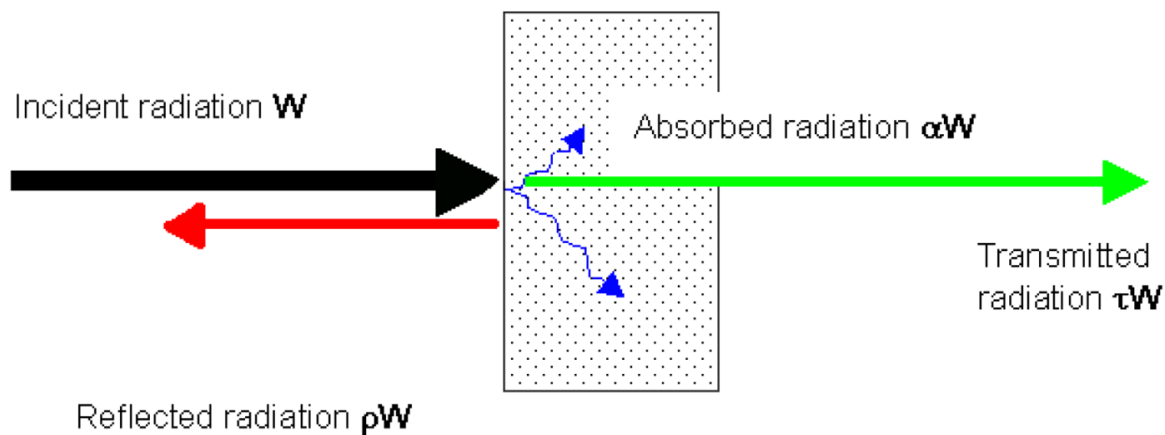
EMISSIVITÀ

- L' emissività di un corpo (ϵ) è la sua capacità di irradiare energia termica, in relazione alla sua temperatura reale.
- È rappresentata da un numero compreso tra 0 e 1, e indica l'efficienza del radiatore con riferimento all'emissione del corpo nero
- Solo il corpo nero ha $\epsilon = 1$
- Il corpo nero è un oggetto ideale e non esiste in realtà; tutti gli oggetti in natura avranno quindi $\epsilon < 1$

CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

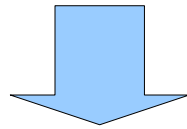
Il principio di conservazione dell'energia ci permette di concludere che l'energia della radiazione incidente è pari alla somma della energia della radiazione riflessa, assorbita e trasmessa:

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

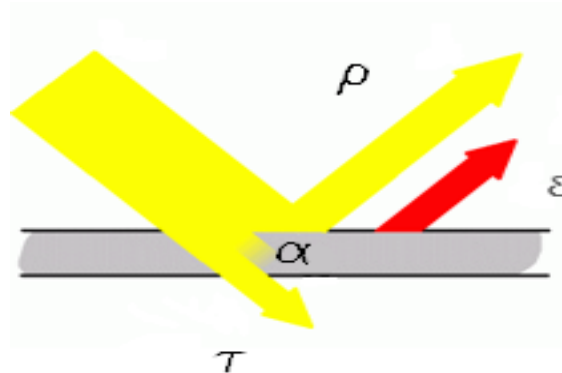


LEGGE DI KIRCHHOFF

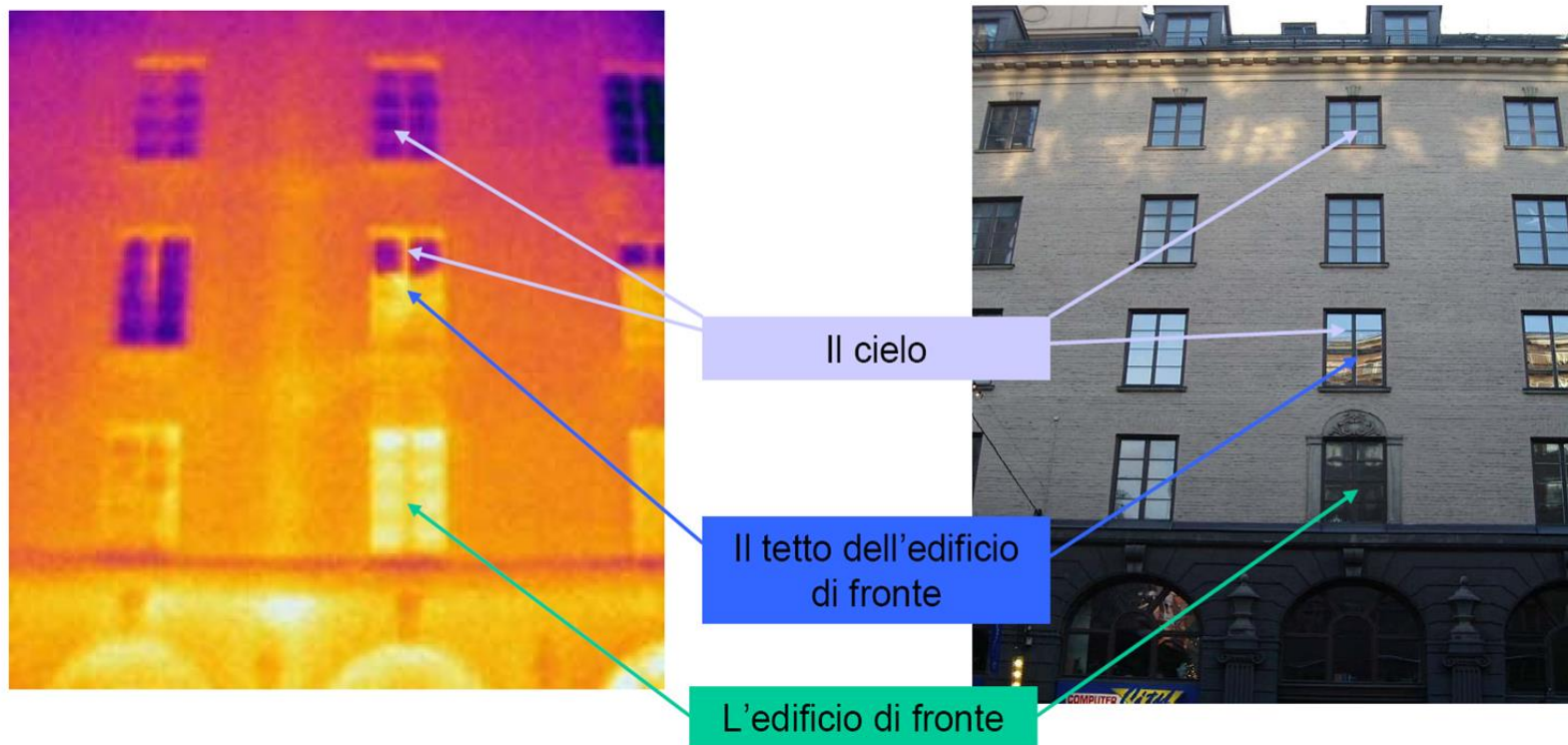
Per ogni sostanza il comportamento rispetto all'emissione e all'assorbimento, a parità di temperature, è il medesimo



Il coefficiente di emissività e quello di assorbimento coincidono



$$\alpha = \epsilon$$



Gli oggetti che incontriamo normalmente non sono corpi neri ($\varepsilon < 1$) e nella maggior parte dei casi sono opachi (non trasparenti) alle radiazioni IR ($\tau = 0$), pertanto si ottiene:

$$\varepsilon + \cancel{\tau} + \rho = 1$$

La termocamera quindi visualizza le radiazioni emesse e riflesse dall'oggetto inquadrato, oltre ad una componente emessa dall'atmosfera che è normalmente trascurabile.

RADIAZIONE INCIDENTE SULLA TERMOCAMERA

La radiazione percepita dal sensore è costituita da tre componenti di cui una sola dipende dalla temperatura del corpo:

radiazione emessa dal corpo

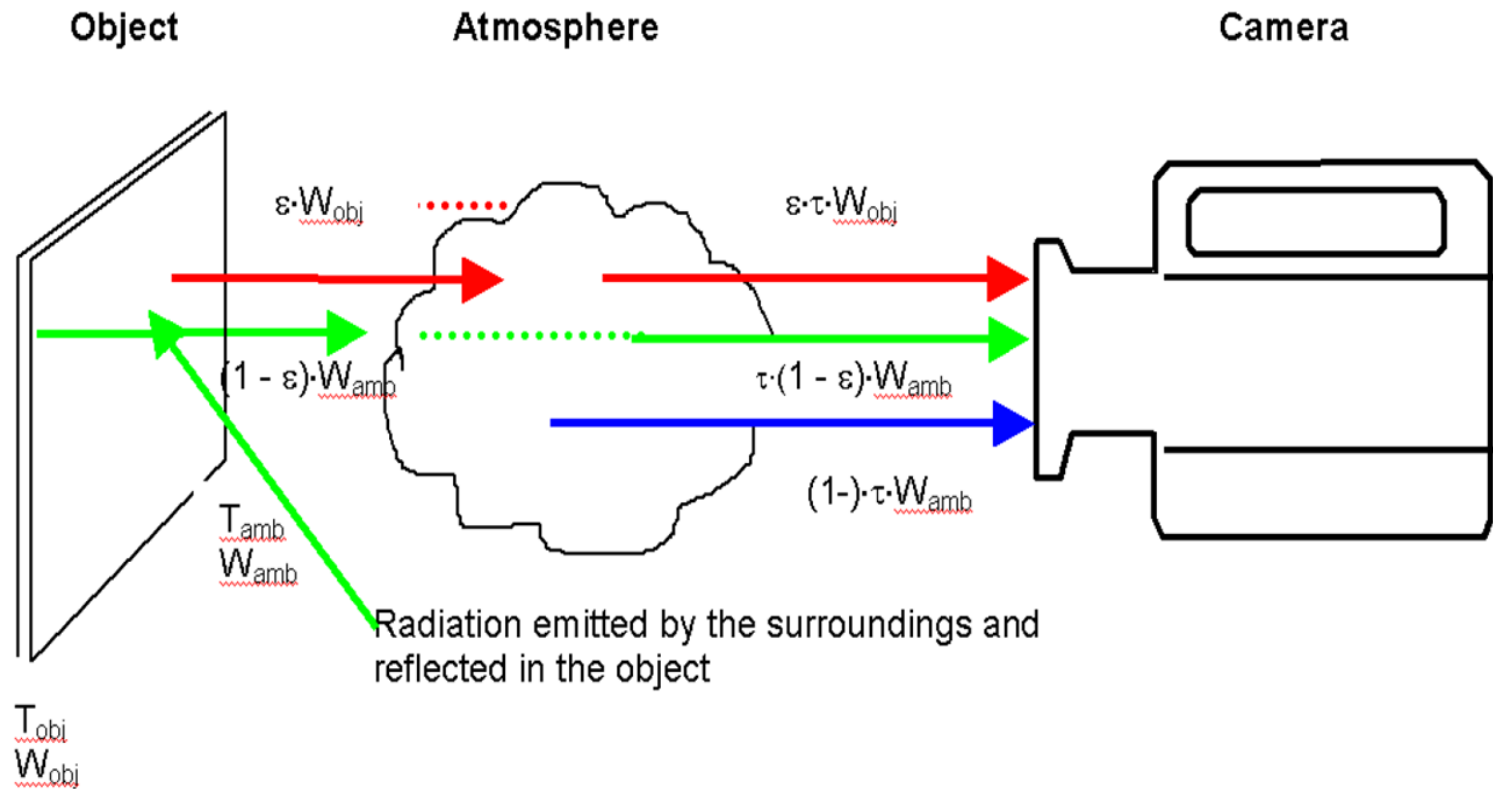
tale radiazione giunge al sensore filtrata dall'atmosfera

radiazione riflessa dal corpo

un corpo generico riflette una parte della radiazione incidente su di esso a sua volta filtrata dall'atmosfera

radiazione emessa dall'atmosfera

l'atmosfera stessa irradia in campo IR e attenua



EMISSIVITÀ

L'emissività di un corpo dipende da più fattori quali:

- tipo di materiale
- angolo di vista (quindi la forma)
- rugosità superficiale (lavorazione)
- temperatura
- lunghezza d'onda

EMISSIVITÀ E MATERIALI

Nella tabella qui sotto viene riportato il valore di ε di alcuni materiali di utilizzo comune

METALLI	Emissività
acciaio laminato a freddo	0,7 ÷ 0,9
acciaio lamiera molata	0,4 ÷ 0,6
acciaio lucido	0,1
acciaio ossidato	0,7 ÷ 0,9
acciaio inox lucido	0,16
acciaio inox ossidato	0,7 ÷ 0,8
alluminio lucido	0,05
alluminio ossidato	0,2 ÷ 0,4
ghisa ossidata	0,6 ÷ 0,95
ghisa non ossidata	0,2
inconel ossidato	0,7 ÷ 0,95
inconel sabbiato	0,3 ÷ 0,6
molibdeno ossidato	0,2 ÷ 0,6
nickel lucido	0,05
nickel ossidato	0,2 ÷ 0,5
ottone brunito	0,3
ottone ossidato	0,5
rame lucido	0,05
rame ossidato	0,4 ÷ 0,8
titanio ossidato	0,5 ÷ 0,6

NON METALLI	emissività
acqua	0,93
argilla	0,95
asfalto	0,95
basalto	0,7
calcare	0,98
carta	0,95
cemento	0,95
ceramica	0,95
gesso	0,8 ÷ 0,95
ghiaccio	0,98
ghiaia	0,95
gomma	0,95
legno	0,9 ÷ 0,95
neve	0,9
plastica opaca	0,95
sabbia	0,9
suolo	0,9 ÷ 0,98
tessuto	0,95
superfici verniciate (escluso alluminio)	0,8 ÷ 0,95
vetro	0,85

EMISSIONE E TEMPERATURA

Il valore di ε va determinato sull'oggetto della misura, mediante confronto tra misura convenzionale della temperatura e misura dell'irraggiamento (possibilmente con la temperatura dell'oggetto almeno 30 °C superiore a quella ambiente per limitare il disturbo della riflessione ambientale).

L'incertezza su ε è la principale causa di incertezza nelle misure di temperatura per irraggiamento.

Spesso è conveniente ricoprire il corpo di cui si vuole conoscere la temperatura (o una sua piccola superficie) con una pellicola ad emissività nota (nastro adesivo, etichette o vernici ad emissività nota, etc.).

LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN PER I CORPI REALI

È possibile correggere la legge di Boltzman adattandola al generico corpo reale:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

ε = fattore di emissività del corpo

$\varepsilon = 1$	per i corpi neri
$0 < \varepsilon < 1$	per un corpo generico
$\varepsilon = 0$	per uno specchio all'infrarosso

COMPONENTI DELL'ENERGIA IRRADIATA - EMISSIVITÀ

Osservate le conseguenze sulla misura di temperatura dello stesso oggetto ripreso con due immagini termiche che hanno un diverso valore impostato di emissività, a parità di tutte le altre impostazioni (temp. riflessa, obiettivo, distanza ecc).



Foto visiva del particolare

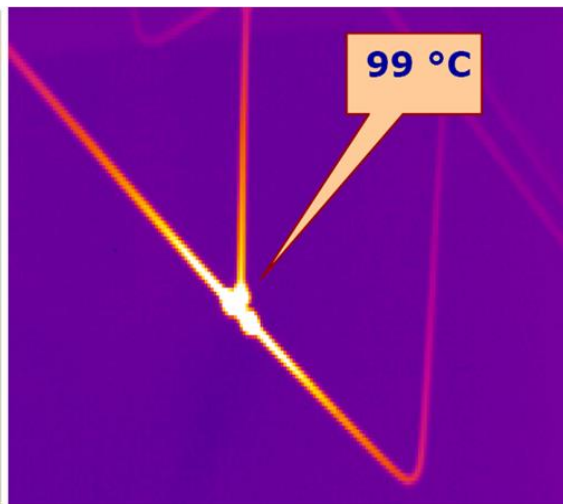


Foto termica 1:
Emissività = 0,50

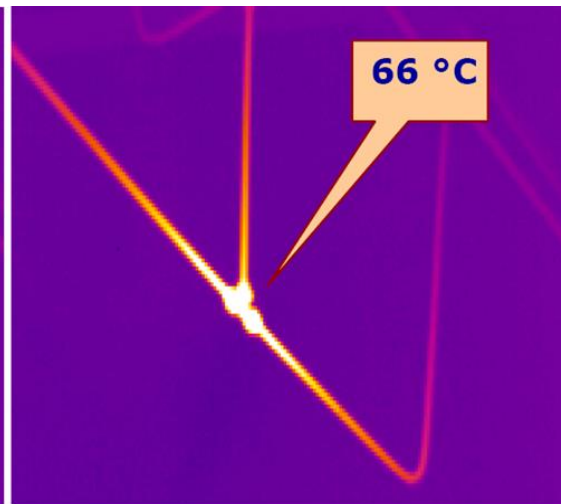
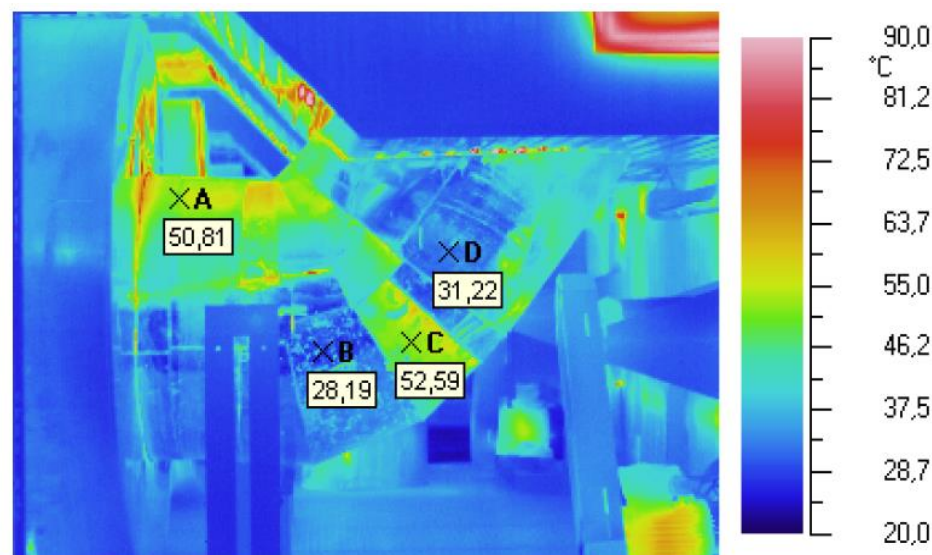
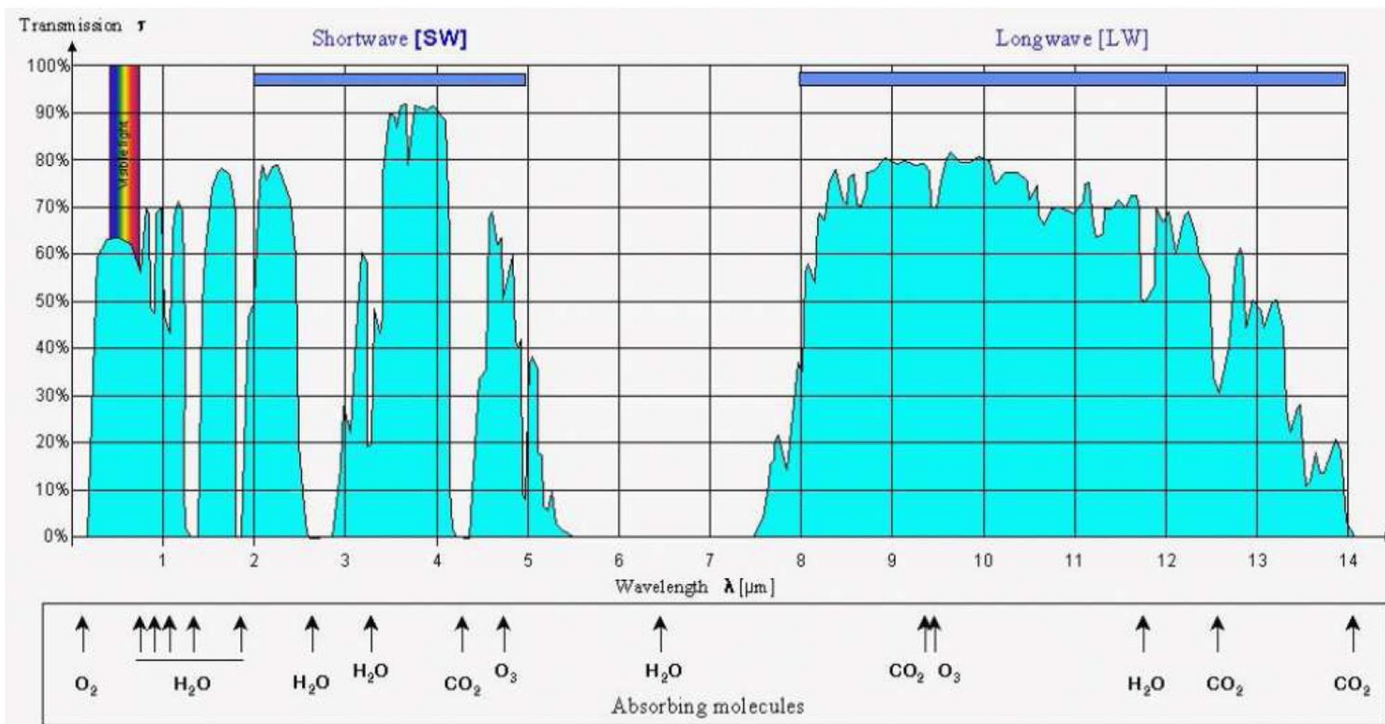


Foto termica 2
Emissività = 0,90

ESEMPIO DI UN SUPERFICI CON DIFFERENTE EMISSIVITÀ

In questa condotta uscita fumi viene misurata sulla superficie lucida la temperatura di 28,19°C mentre sulla superficie opaca si misurano 52,59°C. Tale differenza di misura è dovuta alla differente emissività delle due superfici.

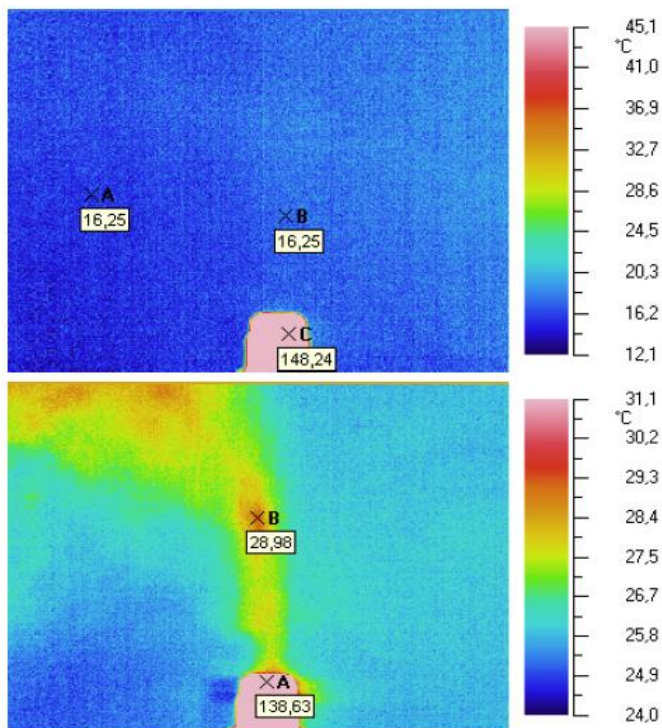




Trasmittanza dell'atmosfera valutata alla distanza di un miglio nautico (1852 m) con indicazione dei componenti dell'aria maggiori responsabili dell'assorbimento della radiazione nei punti indicati.

L'ARIA È TRASPARENTE ALL'INFRAROSSO

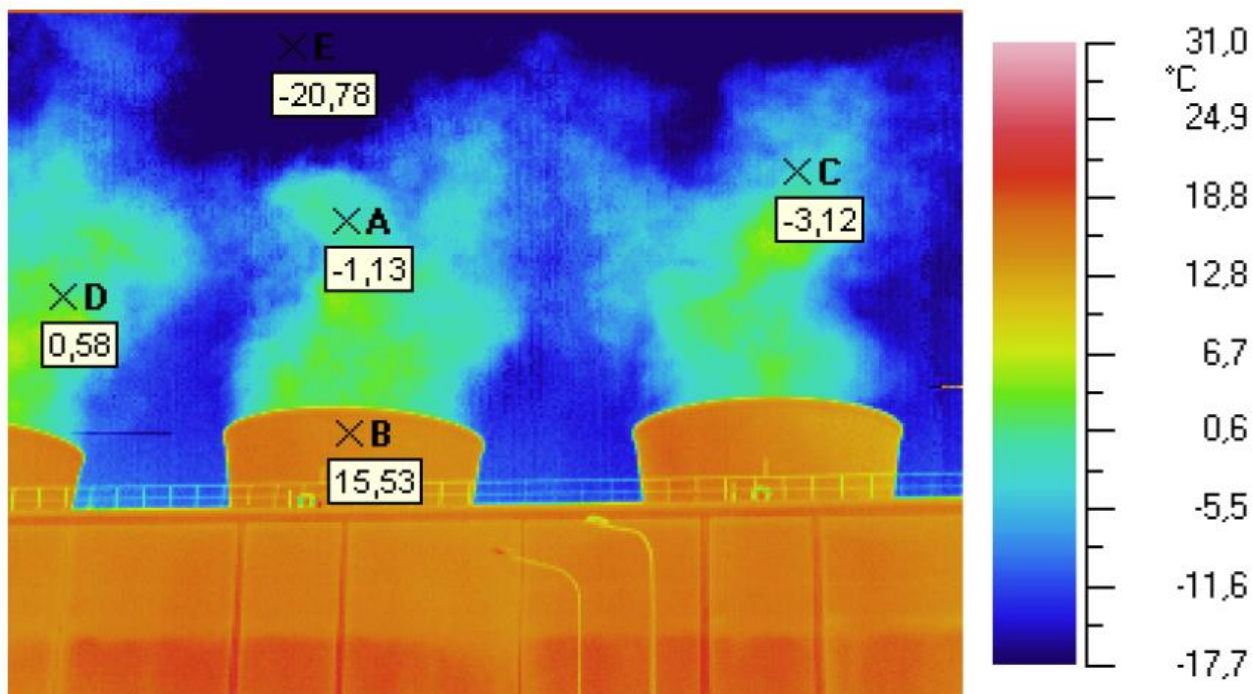
Nell'immagine termica sopra riprodotta si vede che l'aria calda in uscita dal riscaldatore non è visualizzabile, l'unico modo per la visualizzazione è di utilizzare dei traccianti (es. borotalco).

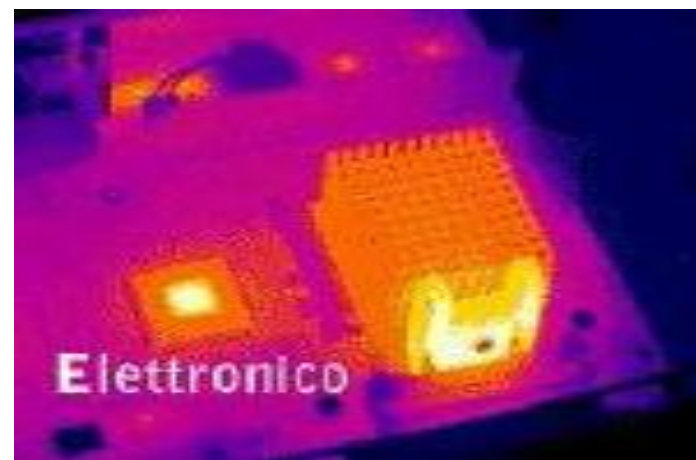
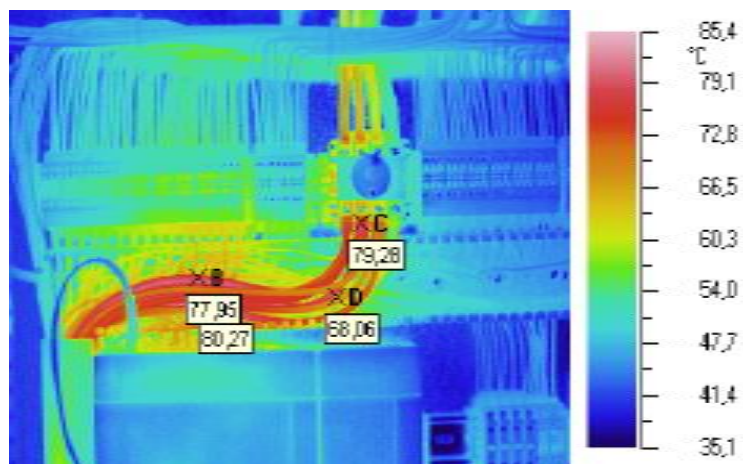
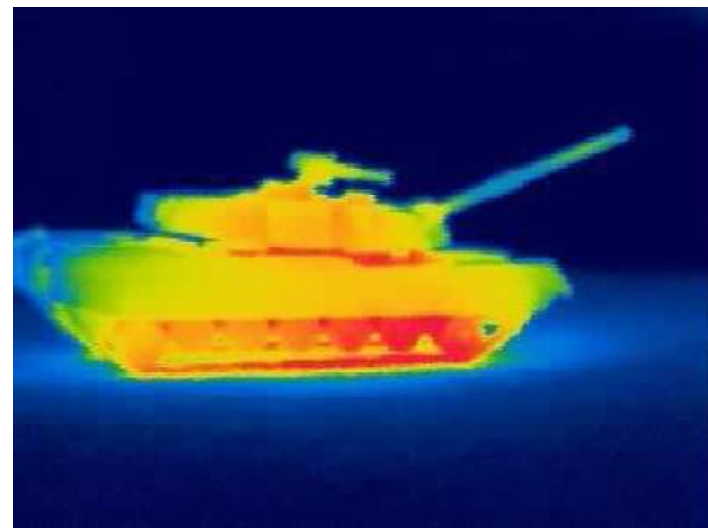
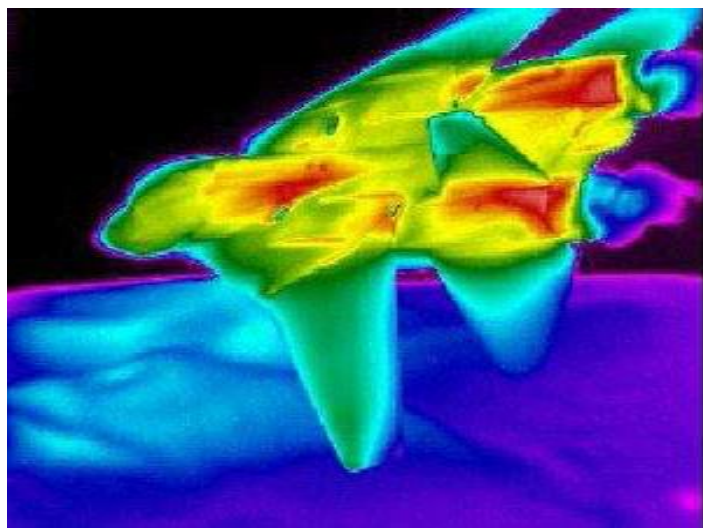


IMPOSSIBILITÀ DELLA MISURA DI TEMPERATURA DEL VAPORE

Il vapore è semitrasparente all'infrarosso.

E' impossibile misurarne la temperatura poiché ha valori differenti di τ ed ϵ in funzione della densità e miscelazione con l'aria.





SPECIFICHE TECNICHE FONDAMENTALI PER UNA TERMOCAMERA

- Tipo di sensore
- Numero pixel del sensore
- Risoluzione termica
- Risoluzione spaziale o geometrica
- Frequenza immagine

SENSORE MICROBOLOMETRICO

Il sensore microbolometrico ha la funzione di trasformare l'energia infrarossa che colpisce ogni singolo elemento del sensore in un grandezza fisica misurabile.

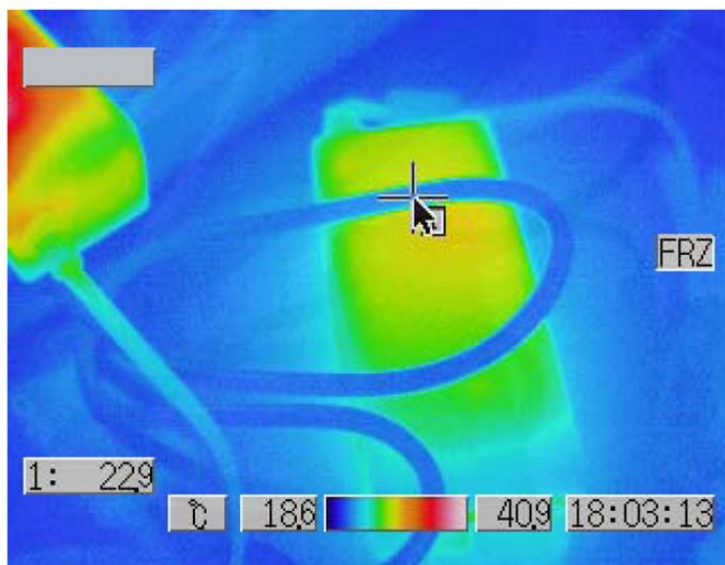
In particolare il sensore varia il proprio valore di resistenza elettrica, in funzione dell'energia IR, quindi temperatura dell'oggetto inquadrato; detta variazione viene letta dal circuito di misura integrato e, mediante una tabella di calibrazione, viene calcolata la temperatura

DIMENSIONI STANDARD DEL SENSORE

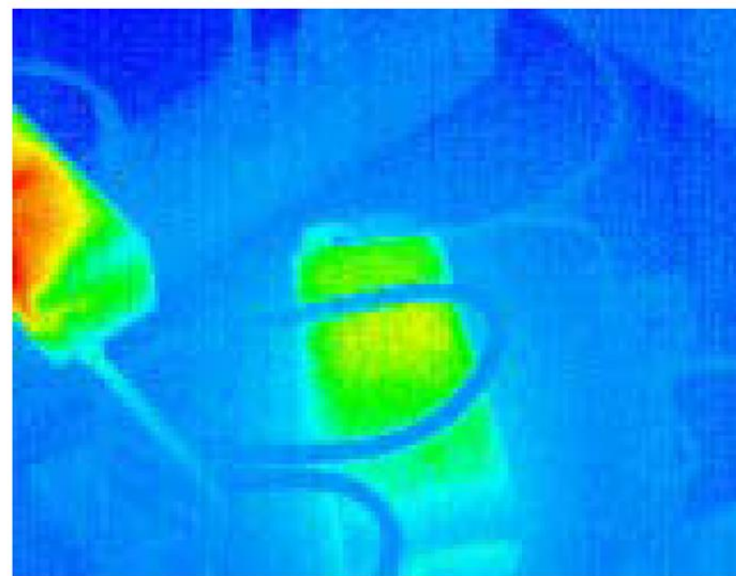
- 160 x 120 pixel
- 320 x 240 pixel
- 640 x 480 pixel

DIFFERENZA SENSORI 320X240 VS. 160X120

L'immagine radiometrica con i sensori professionali risulta essere di gran lunga più definita e permette misure su oggetti molto più piccoli.



320 x 240 pixel

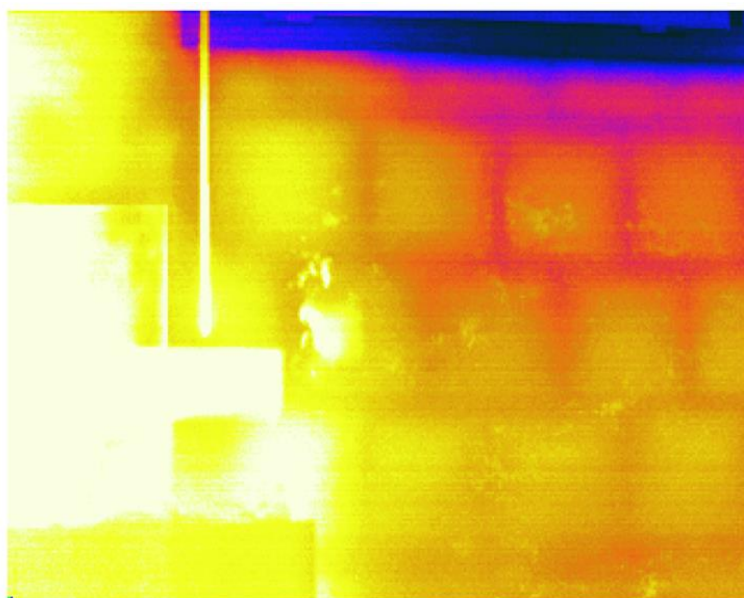


160 x 120 pixel

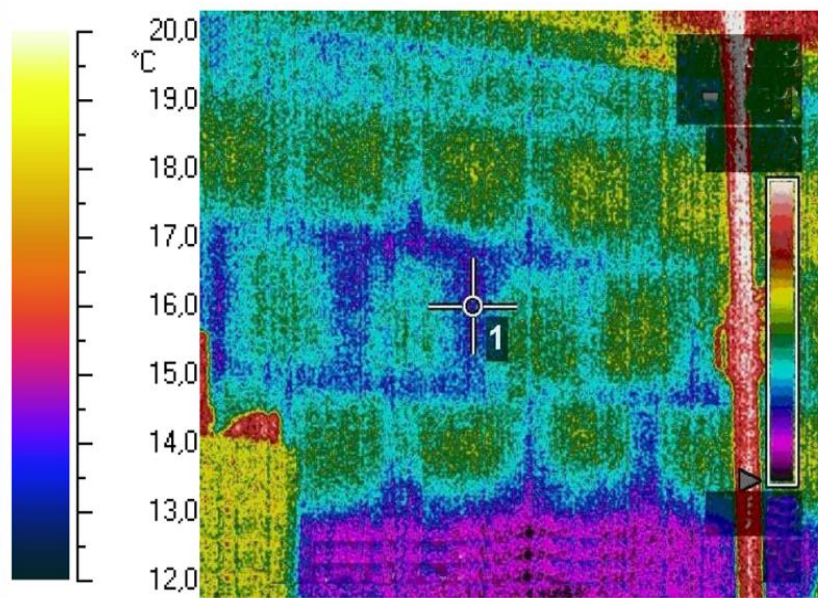
RISOLUZIONE TERMICA

La risoluzione termica di un'immagine termografica indica la minima differenza di temperatura distinguibile dalla termocamera.

Qui sotto sono riportate due immagini riprese con termocamere aventi differente risoluzione termica.



Risoluzione 0,05°C



Risoluzione 0,1°C

CALCOLO RISOLUZIONE SPAZIALE

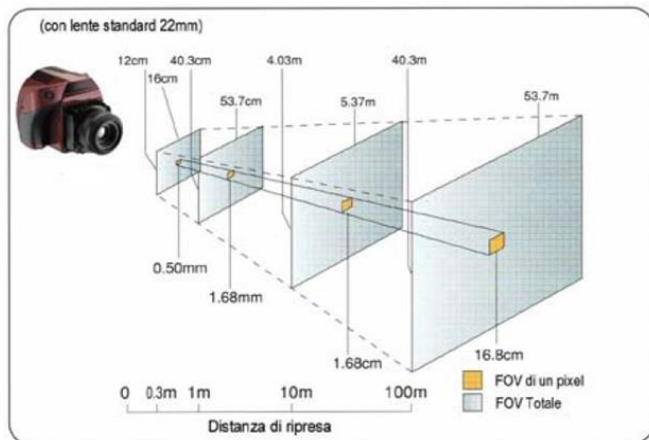
Ogni obiettivo ha una risoluzione geometrica che definisce le dimensioni dell'oggetto più piccolo di cui si può misurare la temperatura alle varie distanze.

La risoluzione si esprime in milliradiani (mrad) e permette in modo semplice di ottenere la dimensione corrispondente ad un pixel alle varie distanze.

Un obiettivo con risoluzione geometrica 1,4 mrad. permette di misurare un oggetto con le dimensioni minime pari a:

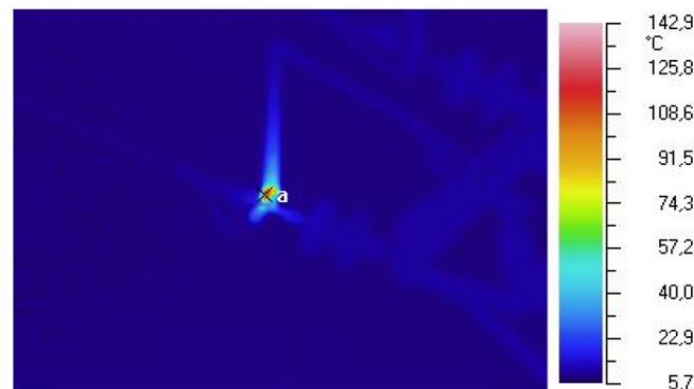
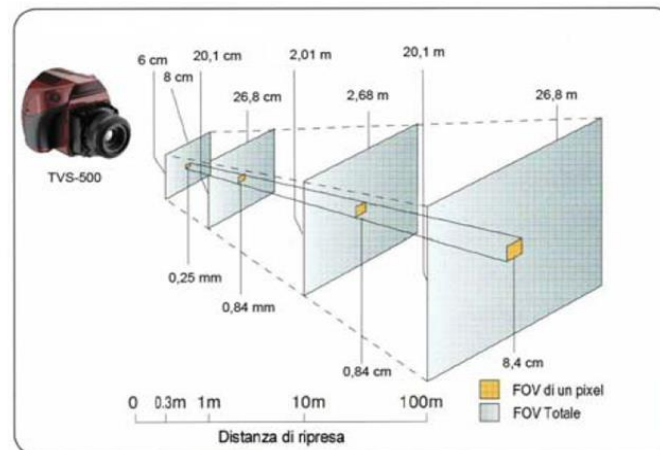
risoluzione in mm.= $(1,4 \times \text{distanza in metri})$

Ripresa con ottica standard



Temperatura punto a) 99,3°C

Ripresa con teleobiettivo



Temperatura punto a) 141,5°C

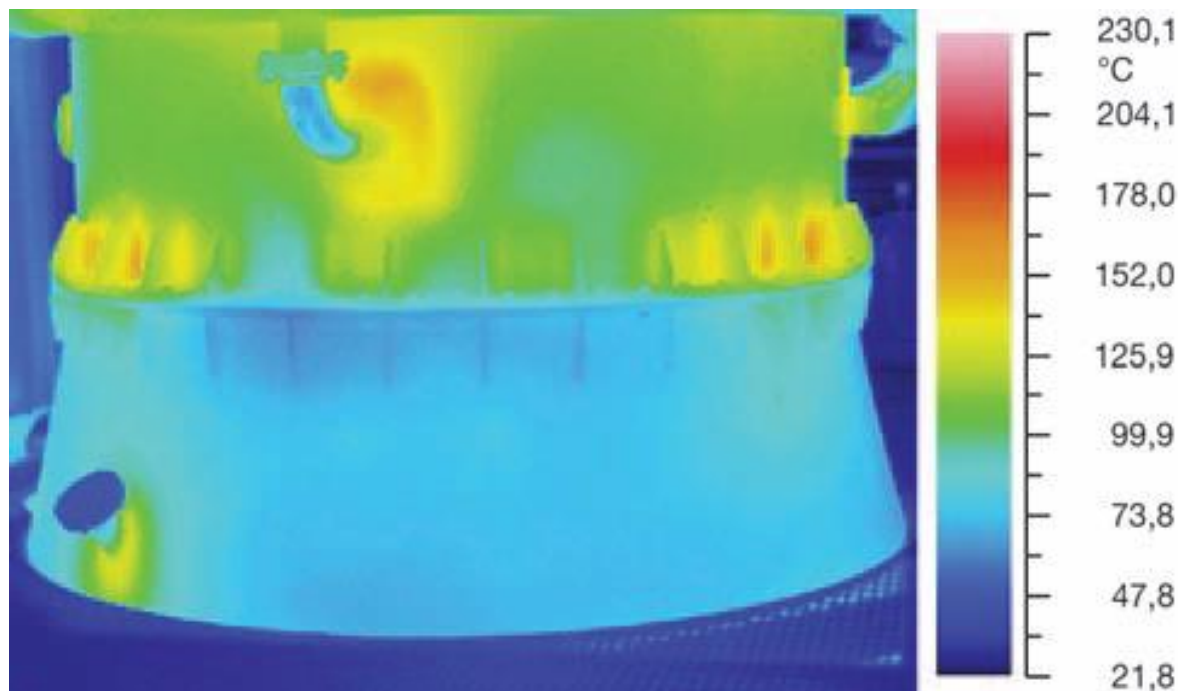
FREQUENZA IMMAGINE

Le termocamere con frequenza di quadro non televisiva, sotto i 30 Hz, non sempre permettono di avere una ripresa con l'immagine ferma, se l'oggetto non è fermo possono avere un effetto mosso.

Sono comunque adeguate all'utilizzo per rilevazioni che non richiedano una analisi dinamica.

DIAGNOSI MEDIANTE TERMOGRAFIA

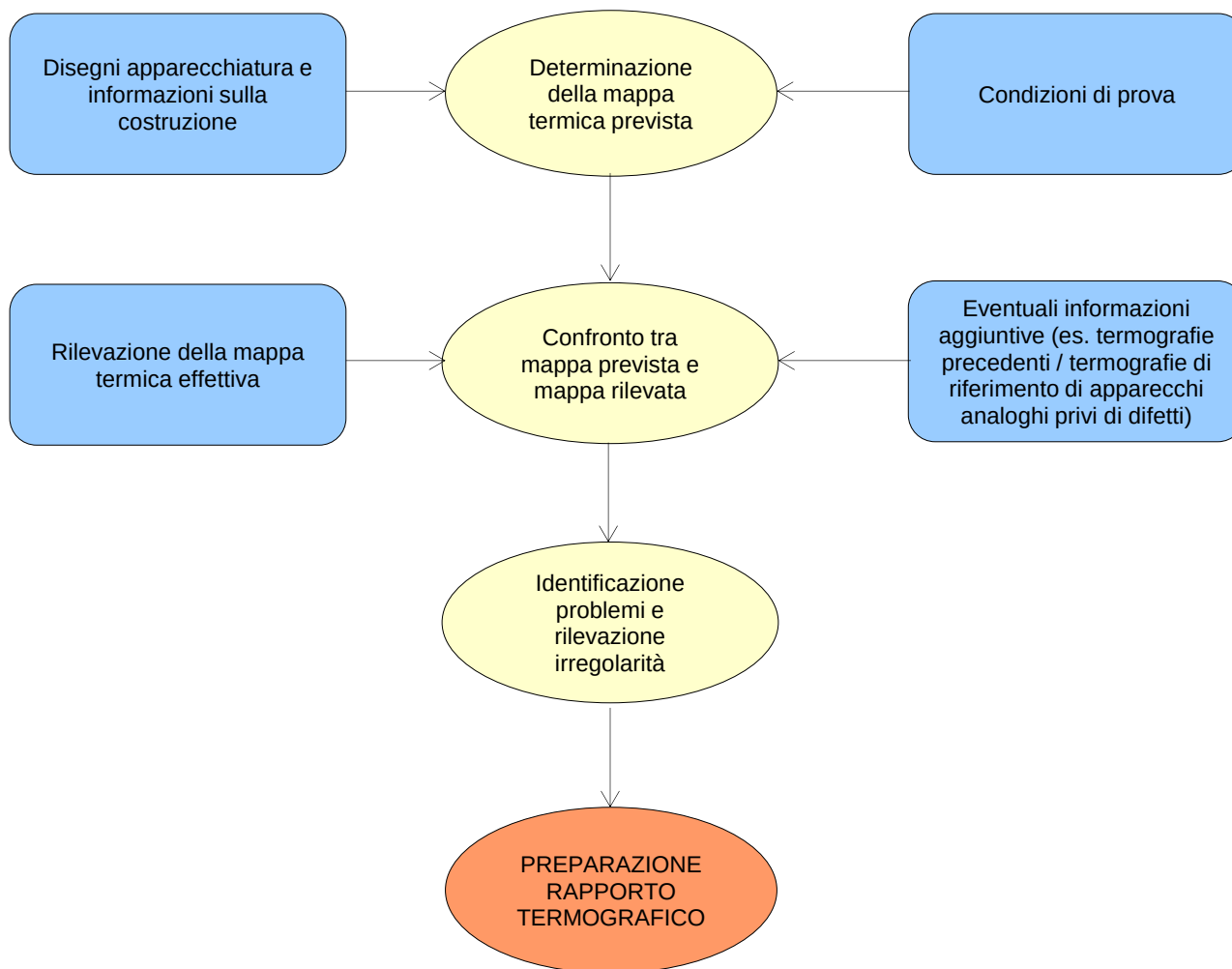
La termografia normalmente permette di identificare l'anomalia mediante paragone delle temperature o distribuzioni termiche non regolari o senza alcuna ragione d'essere.



UTILIZZO DELLA TERMOGRAFIA IN IMPIANTO

- Individuazione di irregolarità nella continuità dei materiali di rivestimento refrattario e antiacido (distacchi, fessurazioni, etc.)
- Verifica fenomeni di corrosione/erosione/assottigliamento/occlusione
- Verifica delle perdite energetiche da difetti di isolamento/scarso isolamento
- Analisi corretto funzionamento apparecchiature elettriche (motori, quadri, connessioni)
- Analisi corretto funzionamento dispositivi meccanici (cuscinetti, lubrificazione, etc.)
- Verifica corretto funzionamento scaricatori di condensa e valvole
- Individuazione livello in serbatoi
- Individuazione perdite

PROCEDURA GENERALE PER ISPEZIONE TERMOGRAFICA IMPIANTI



REQUISITI DI PROVA

I requisiti e le condizioni di prova vanno definiti sulla base del tipo di esame da eseguire e del tipo di difetto da rilevare.

In generale l'apparecchiatura viene verificata in esercizio, possibilmente a regime nominale; a seconda del tipo di analisi e dell'entità del difetto è possibile eseguire la rilevazione anche in condizioni di marcia a regime intermedio e/o di transitorio.

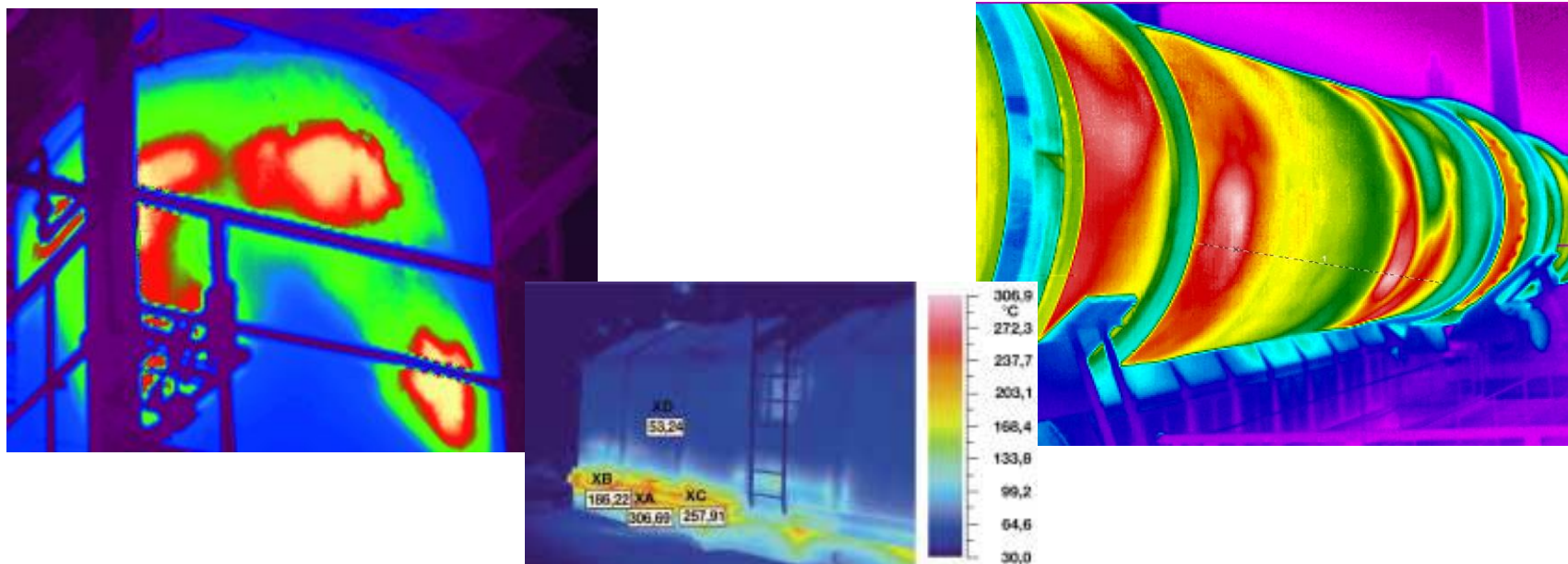
Le condizioni atmosferiche dovranno essere, per quanto possibile, favorevoli, e cioè:

- ventilazione moderata
- umidità ambiente non eccessiva
- irraggiamento solare limitato

In caso di superfici a bassa emissività si potrà verificare l'opportunità, caso per caso, di applicare un rivestimento temporaneo che migliori le prestazioni della rilevazione (vernici o targhette adesive ad emissività nota, etc) o una schermatura che attenui il disturbo esterno.

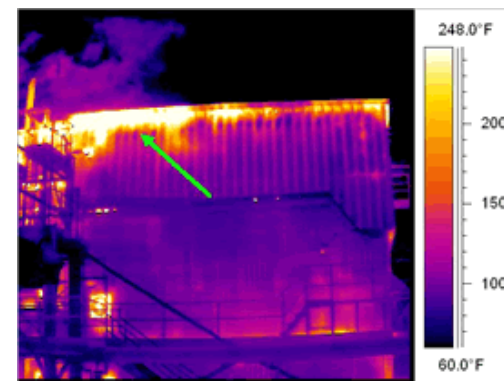
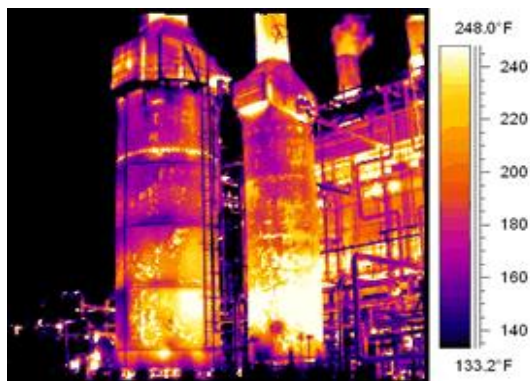
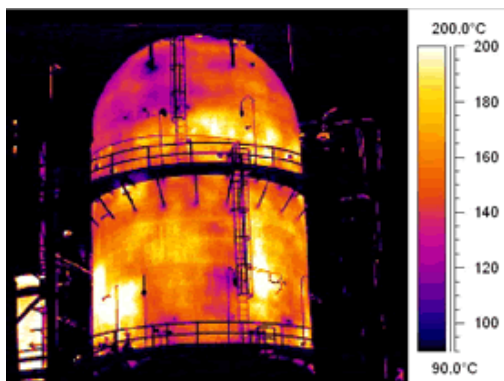
INDIVIDUAZIONE DI IRREGOLARITÀ NELLA CONTINUITÀ DEI RIVESTIMENTI

La differente temperatura di pelle, ove non giustificata dai dettagli costruttivi dell'apparecchiatura, mostra eventuali problemi al rivestimento refrattario o antiacido.



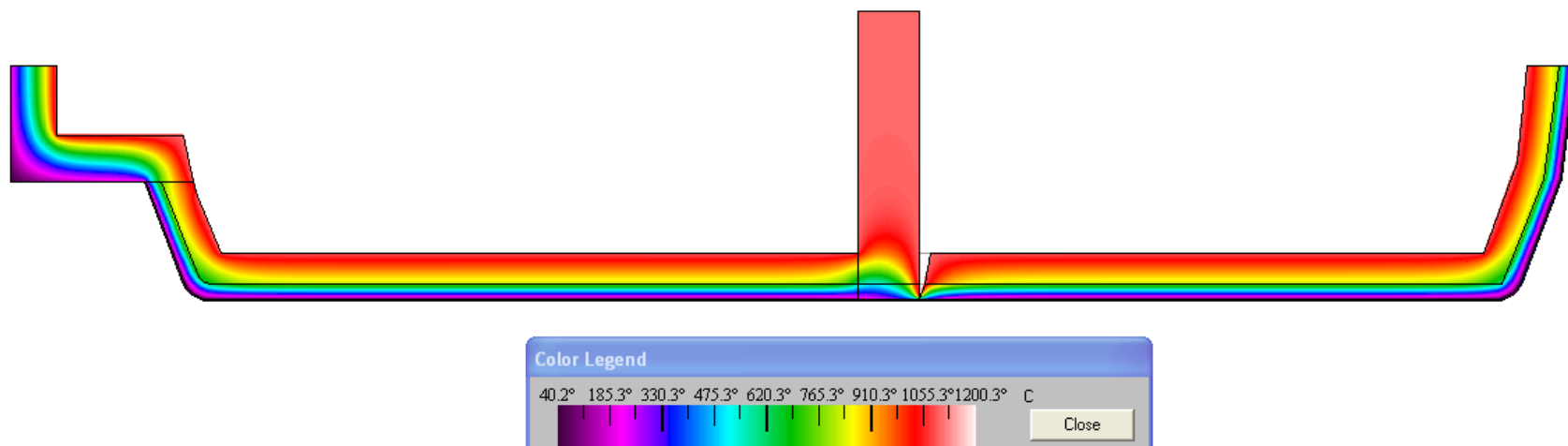
INDIVIDUAZIONE DI IRREGOLARITÀ NELLA CONTINUITÀ DEI RIVESTIMENTI

La differente temperatura di pelle, ove non giustificata dai dettagli costruttivi dell'apparecchiatura, mostra eventuali problemi al rivestimento refrattario o antiacido.



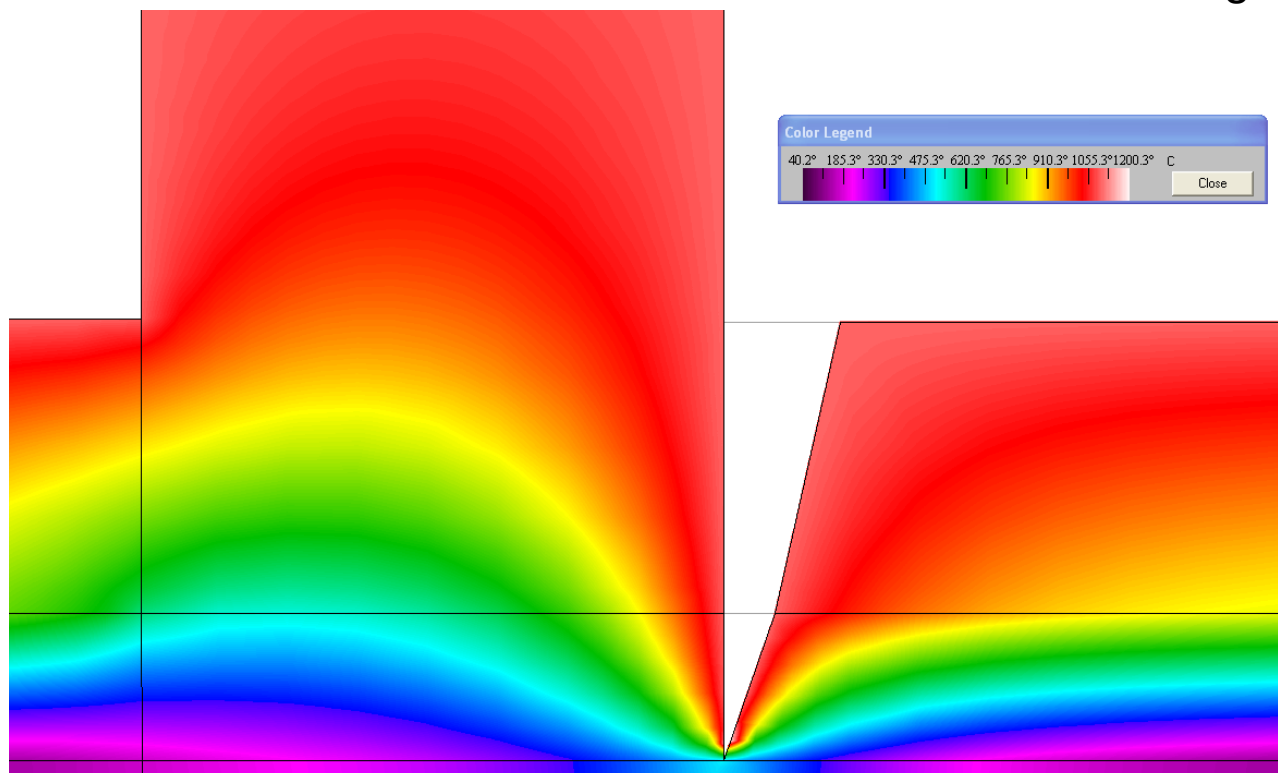
INDIVIDUAZIONE DI IRREGOLARITÀ NELLA CONTINUITÀ DEI RIVESTIMENTI

Se necessario si può ricostruire la temperatura di pelle attesa e/o stimare l'entità del difetto/danno tramite simulazione con software agli elementi finiti.

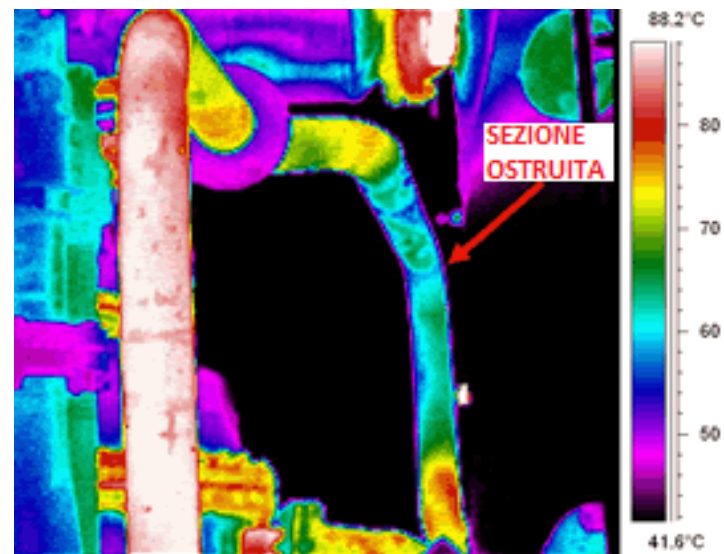
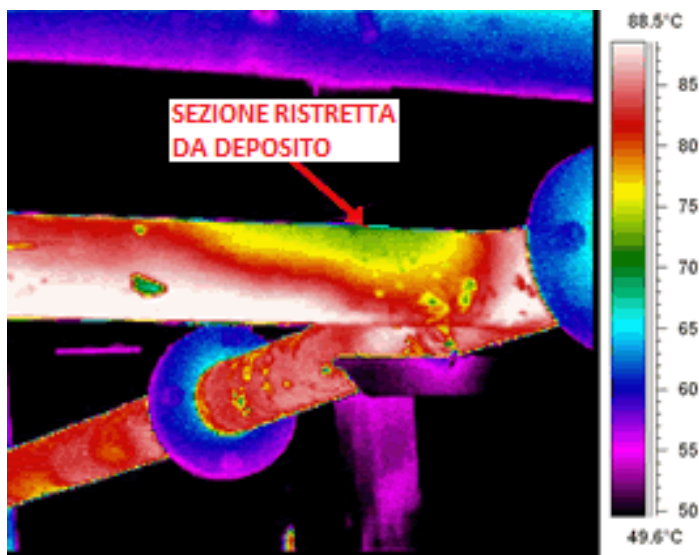


INDIVIDUAZIONE DI IRREGOLARITÀ NELLA CONTINUITÀ DEI RIVESTIMENTI

Se necessario si può ricostruire la temperatura di pelle attesa e/o stimare l'entità del difetto/danno tramite simulazione con software agli elementi finiti.

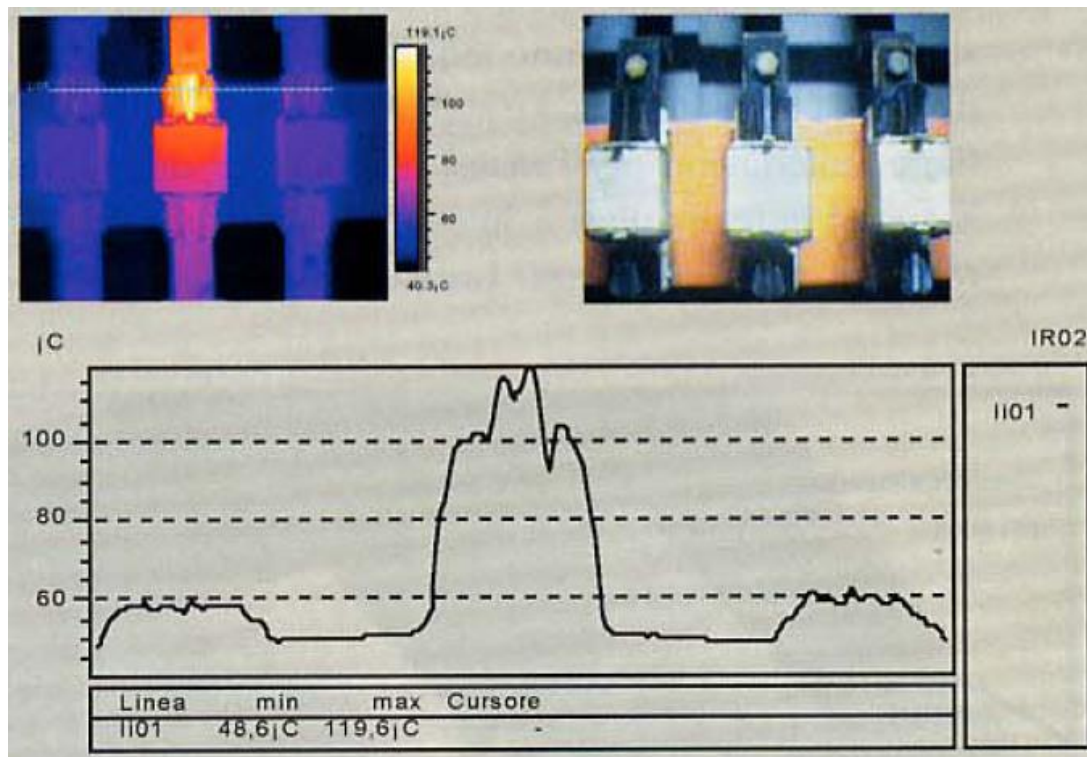


VERIFICA FENOMENI DI CORROSIONE, EROSIONE, ASSOTTIGLIAMENTO, OCCLUSIONE



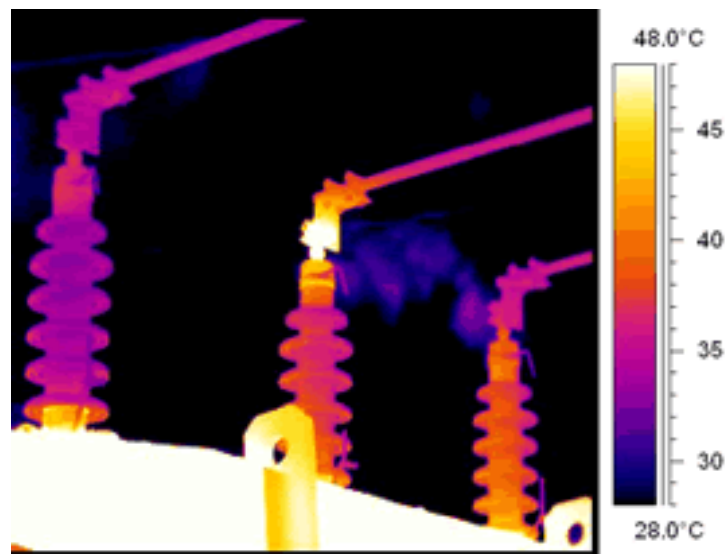
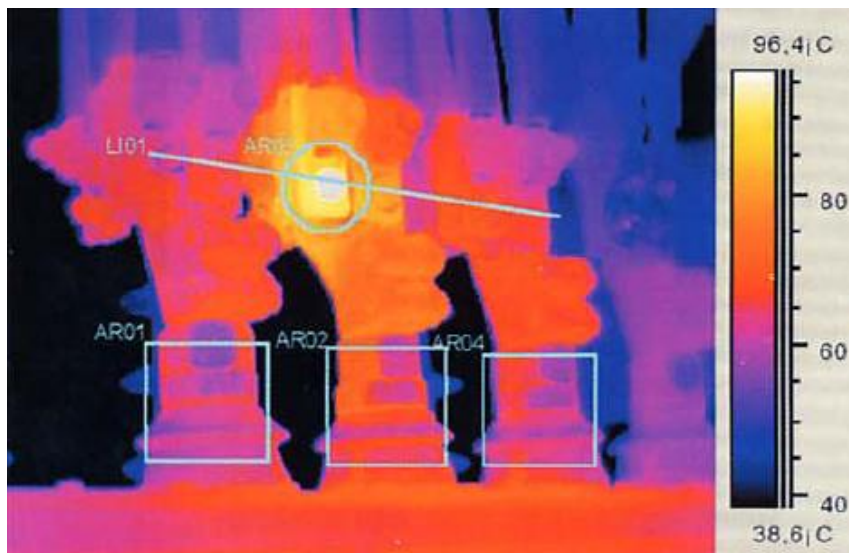
ANALISI CORRETTO FUNZIONAMENTO APPARECCHIATURE ELETTRICHE

In questa immagine si vede un problema di surriscaldamento su un fusibile



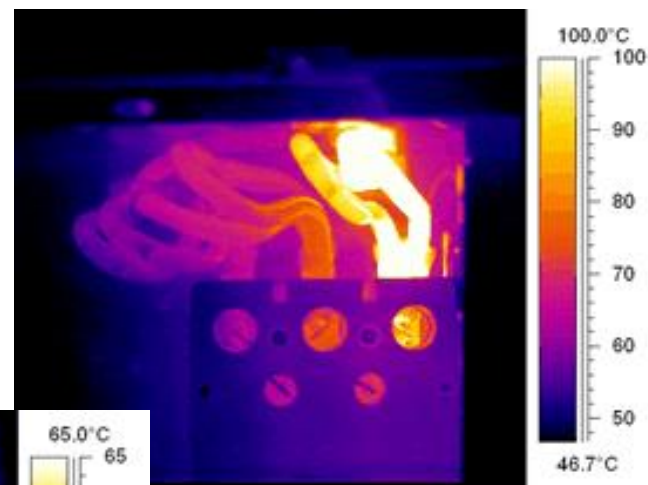
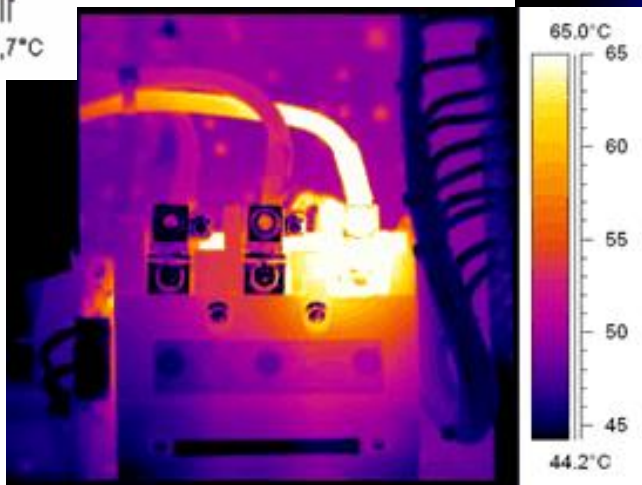
ANALISI CORRETTO FUNZIONAMENTO APPARECCHIATURE ELETTRICHE

In queste immagini si vedono difetti dovuti a problemi di connessione tra trasformatore e cavo, ed in particolare all'allentamento del morsetto di connessione.



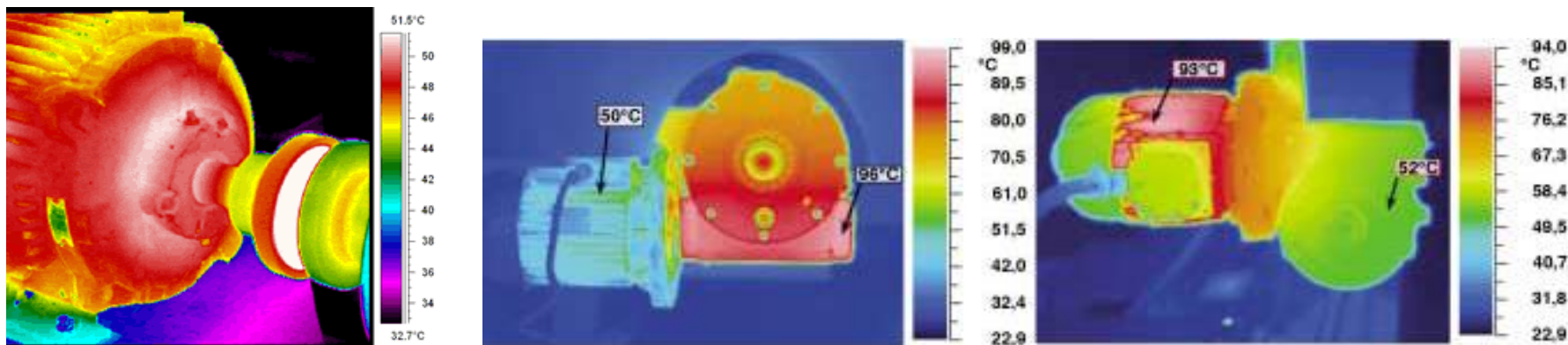
ANALISI CORRETTO FUNZIONAMENTO APPARECCHIATURE ELETTRICHE

In queste immagini si possono riscontrare sbilanciamenti di carico, problemi di connessione e cavi danneggiati.



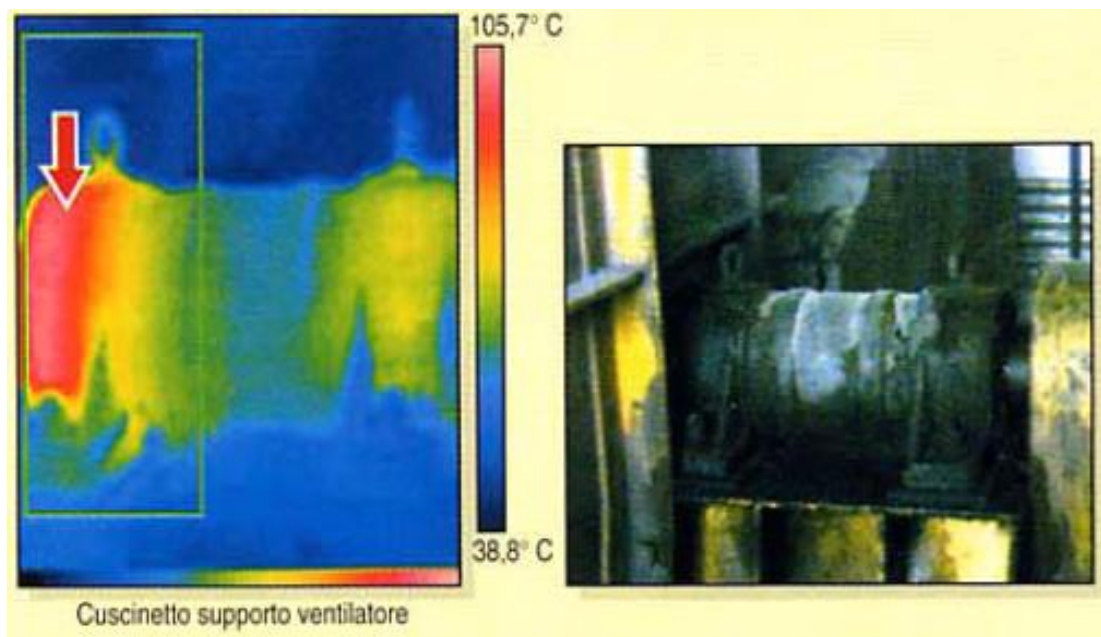
ANALISI CORRETTO FUNZIONAMENTO DISPOSITIVI MECCANICI (CUSCINETTI, LUBRIFICAZIONE, ETC.)

L'immagine a sinistra mostra un problema di allineamento di una pompa, mentre al centro e a destra si vedono due motoriduttori con comportamenti termici opposti. Nell'immagine centrale si nota individua il riduttore con una temperatura di quasi 100°C (probabile mancanza d'olio) mentre nell'immagine di destra il riduttore è a 52°C mentre il motore è più caldo (93°C). In questo caso il problema è sul motore elettrico

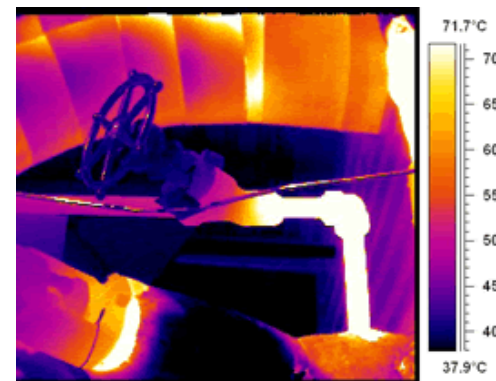
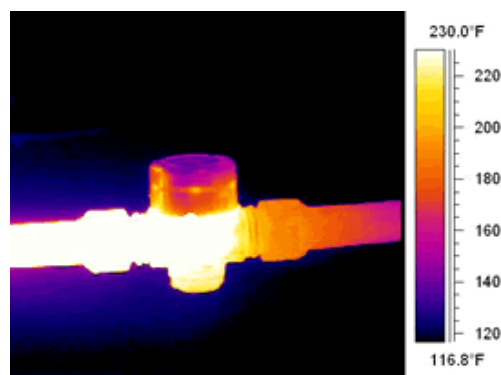
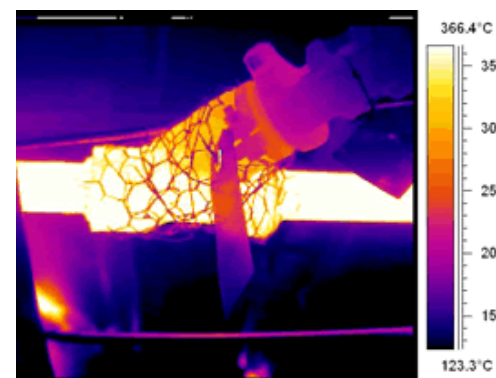
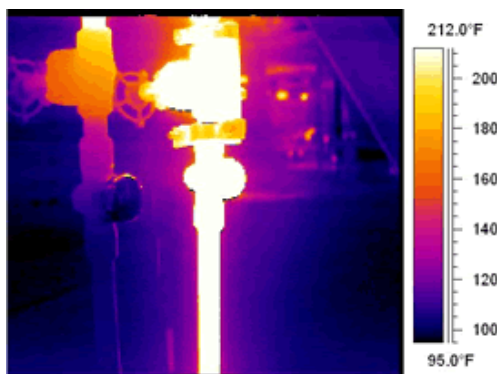


ANALISI CORRETTO FUNZIONAMENTO DISPOSITIVI MECCANICI (CUSCINETTI, LUBRIFICAZIONE, ETC.)

In questa immagine si vede il cuscinetto di supporto di un ventilatore, che mostra evidenti segni di surriscaldamento.

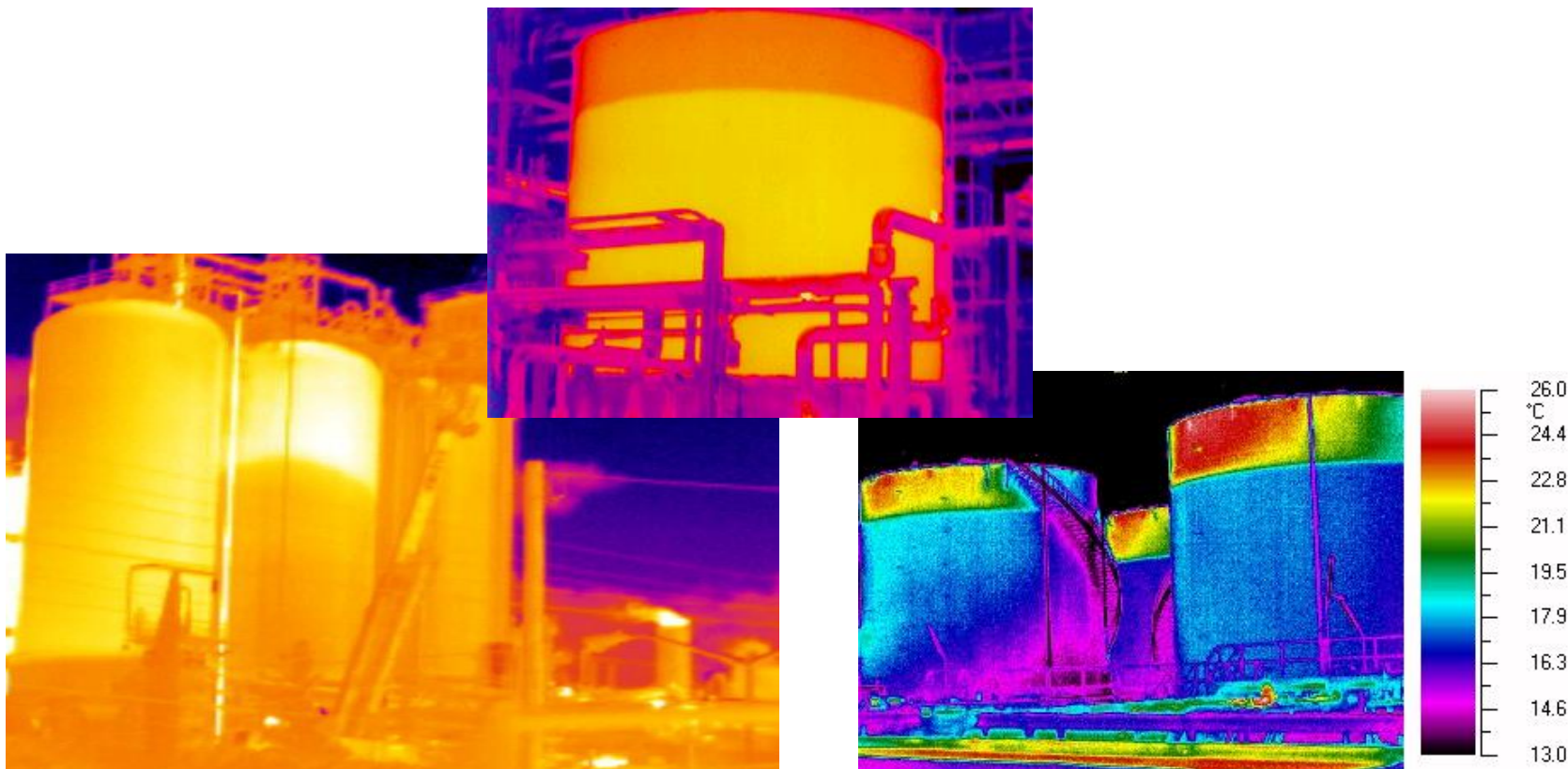


VERIFICA CORRETTO FUNZIONAMENTO SCARICATORI DI CONDENZA E VALVOLE



INDIVIDUAZIONE LIVELLO IN SERBATOI

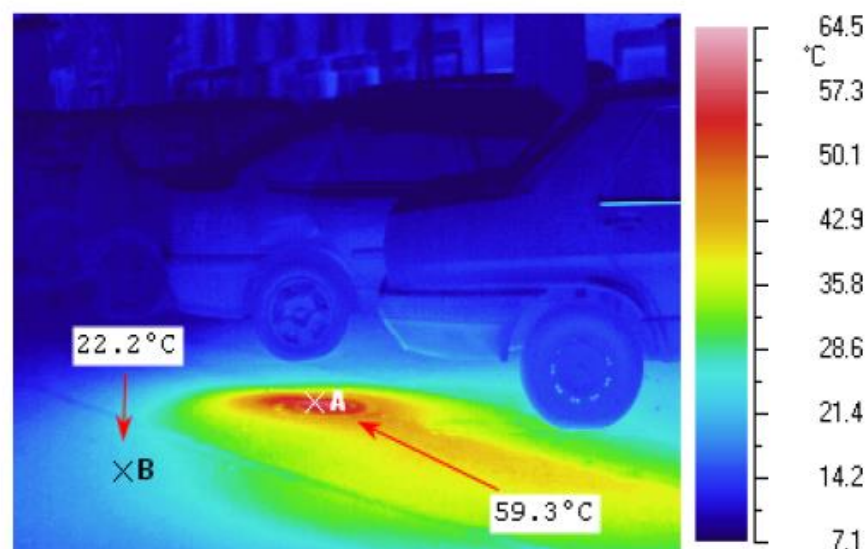
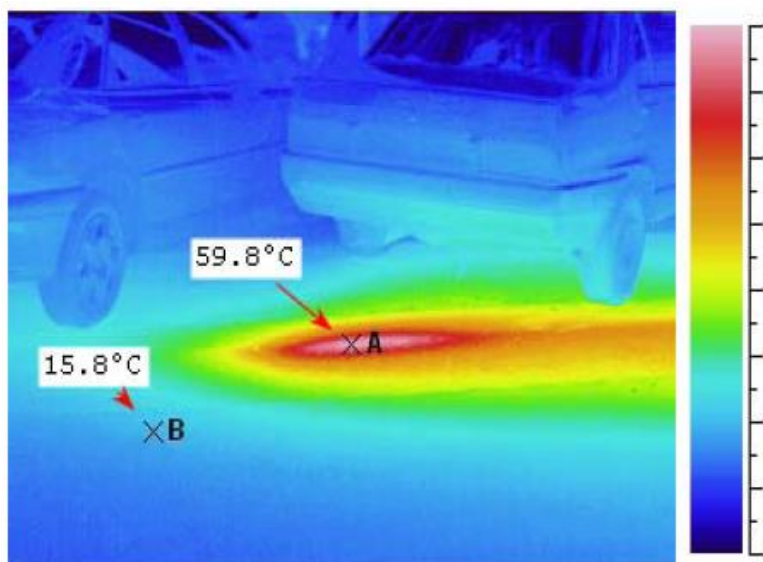
In queste immagini viene rilevato il livello del fluido contenuto in serbatoi di stoccaggio.



INDIVIDUAZIONE PERDITE TUBAZIONI NON ACCESSIBILI

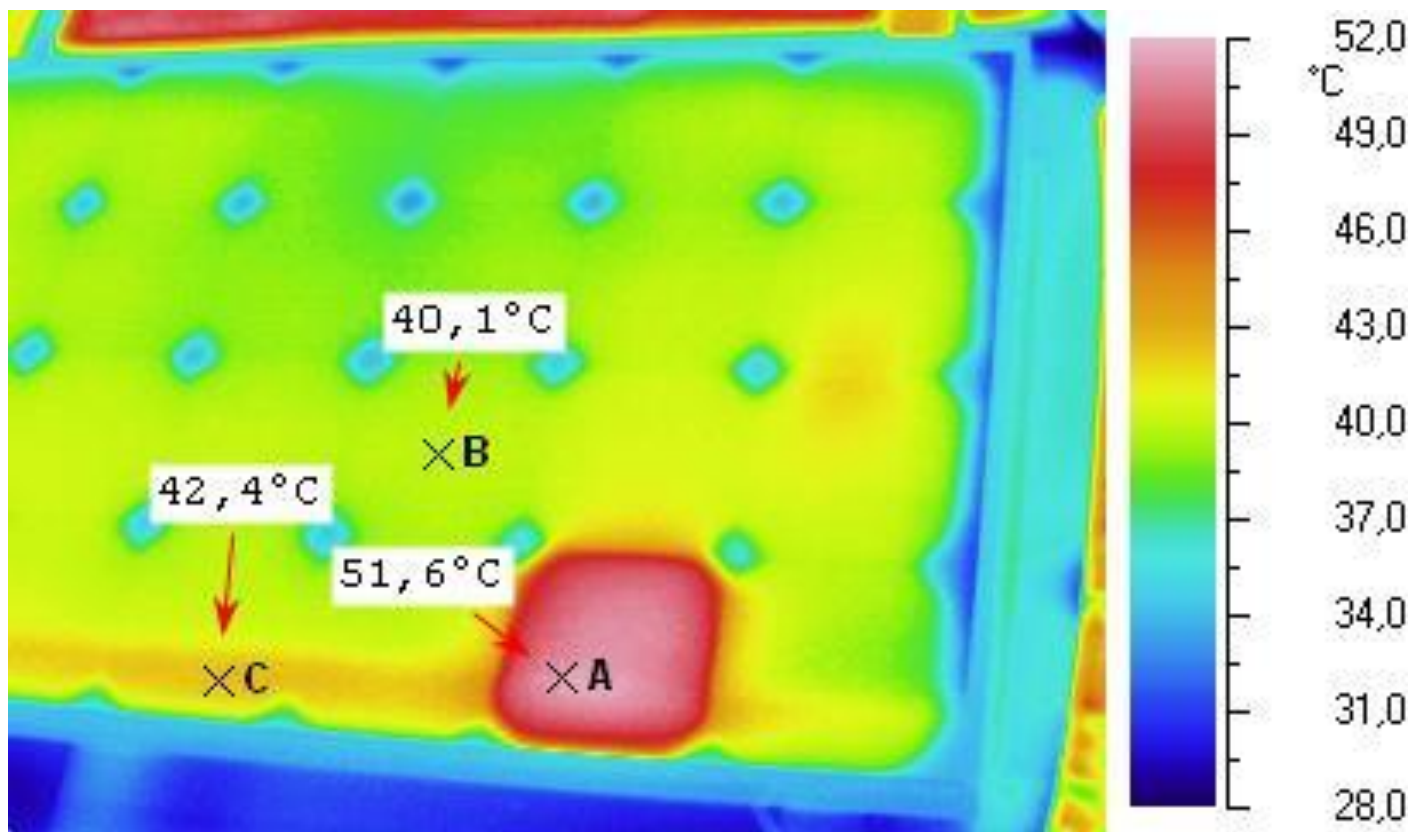
Se esiste una differenza di temperatura sufficiente è possibile individuare perdite di dalle tubazioni sotto il manto stradale, pavimentazioni, etc.

In figura qui sotto esempi di rilevazione perdite da tubazione di teleriscaldamento.



PANNELLI SOLARI FOTOVOLTAICI

E' possibile visualizzare l'eventuale presenza di celle difettose, che compaiono come zone a temperatura superiore.



LIMITAZIONI ALL'USO DELLA TERMOGRAFIA

1. **COSTO DELL'APPARECCHIATURA**
2. **NECESSITÀ DI UN OPERATORE QUALIFICATO E CERTIFICATO SECONDO LA NORMATIVA EN 473 E/O ISO 9712**
3. **GROSSI IMPEDIMENTI NEL CASO DI MATERIALI CON EMISSIVITÀ BASSA**

1. COSTO DELL'APPARECCHIATURA

In funzione del tipo di utilizzo e di applicazione, le termocamere hanno un costo di acquisto che varia da poche migliaia di euro dei modelli più economici fino a 50-100.000 Euro per i modelli più sofisticati.

Le termocamere inoltre devono essere periodicamente verificate e ricalibrate (idealmente una volta all'anno) da laboratori qualificati.

Il certificato di calibrazione rilasciato dal laboratorio va normalmente allegato alla perizia termografica.

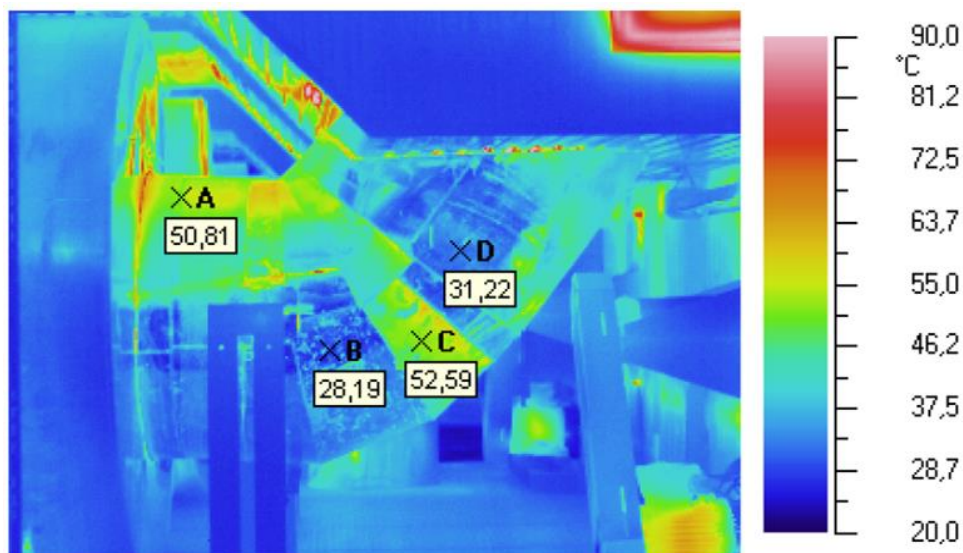
2. NECESSITÀ DI UN OPERATORE QUALIFICATO E CERTIFICATO SECONDO LA NORMATIVA EN 473 E/O ISO 9712

La certificazione viene rilasciata da Enti di Certificazione riconosciuti (in Italia: Istituto Italiano della Saldatura, RINA, CICPND) previa verifica delle esperienze acquisite, frequenza di un corso di formazione e superamento di un esame, e prevede tre livelli di qualifica.



3. MATERIALI A BASSA EMISSIVITÀ

Per i materiali a bassa emissività la rilevazione è piuttosto difficoltosa eD è difficoltoso ottenere misure affidabili al di fuori di ambienti controllati (laboratorio), come ad esempio nel caso delle superfici metalliche con finitura lucida.



CONCLUSIONI

- La termografia è uno strumento potente per la diagnosi e la manutenzione in ambito industriale
- Per poter correttamente interpretare le immagini termografiche è necessario conoscere il modello fisico sottostante l'oggetto dell'analisi, per cui sarà necessario preparare la rilevazione termografica mediante analisi di disegni e documentazione tecnica.
- Per poter ottenere risultati affidabili la rilevazione termografica deve considerare le condizioni ambientali al contorno e le caratteristiche intrinseche dei materiali, intervenendo se necessario per migliorare l'affidabilità della rilevazione.