

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA**

**CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe: L-9**

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In: Diagnostica Strutturale

**LA TERMOGRAFIA:
UNA TECNICA DI CONTROLLO NON DISTRUTTIVO**

CANDIDATO

Danilo Baraccani

RELATORE

Vincenzo Dal Re

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

INDICE

1. CONTROLLI NON DISTRUTTIVI	6
2. INTRODUZIONE ALLA TERMOGRAFIA	
2.1. Cos'è la termografia	11
2.2. Le origini: dall'infrarosso alle termocamere	12
3. PRINCIPI FISICI	
3.1. Fondamenti di trasmissione del calore	15
3.2. La trasmissione del calore per irraggiamento	16
3.3. La teoria dell'infrarosso e la legge di Kirchhoff	19
4. MISURAZIONE: FONTI DI ERRORE	
4.1. Valutazione dell'emissività dell'oggetto di misura	24
4.2. Legge di Lambert e impostazione temperatura della radiazione riflessa	26
4.3. Il mezzo interposto	28
4.4. Area di misura	30
5. LE TERMOCAMERE	
5.1. Termocamere raffreddate	32
5.2. Termocamere non raffreddate	35
5.3. Elementi di caratterizzazione: come scegliere una termocamera	37
5.4. Immagine termografica	39

5.5. Software per l'interpretazione e correzione delle immagini termografiche	43
6. APPLICAZIONI	
6.1. Ambiti di utilizzo	44
6.2. Alcuni esempi applicativi	46
6.2.1. Sistemi elettrici	46
6.2.2. Installazioni meccaniche	50
6.2.3. Settore edile	54
6.2.4. Termografia negli impianti fotovoltaici	56
7. TECNICHE IN CAMPO INDUSTRIALE	
7.1. Termografia passiva	59
7.2. Termografia attiva	60
7.2.1. Termografia pulsata (PT – Pulsed Thermography)	60
7.2.2. Termografia Lock-in (LT – Lock-in Thermography)	63
7.2.3. Riscaldamento a gradini (SH – Step Heating)	64
7.2.4. Transient Thermography	65
7.2.5. Vibrotermografia (VT - VibroThermography)	65
8. CONCLUSIONI	66
9. BIBLIOGRAFIA	68

1. CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

Nel settore industriale ogni prodotto di importanza critica (travi per l'edilizia, viti di sostegno, componenti aeronautici, componenti automobilistici, corpi a pressione) deve essere controllato per la verifica della sua integrità e conformità alle norme vigenti.

I Controlli Non Distruttivi (CND) sono il complesso di esami, prove e rilievi condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame, finalizzati alla ricerca ed identificazione di difetti strutturali della struttura stessa.

Definizione secondo McGonagle:

“Applicazione di principi fisici per la rivelazione della presenza di disomogeneità nei materiali senza che ne sia compromesso l'utilizzo”

Cricche e difetti di varia natura possono influenzare in modo devastante le prestazioni di componenti e strutture a tal punto che la loro individuazione è parte essenziale del controllo di qualità in tutti i campi dell'ingegneria.

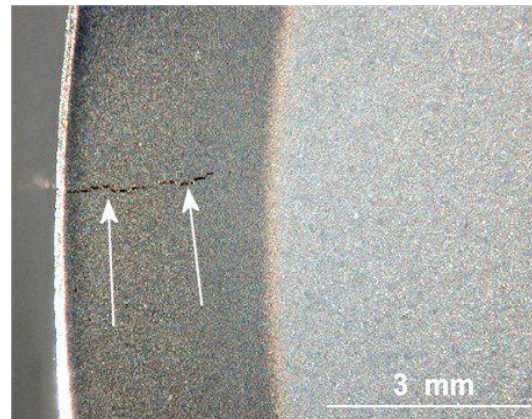


Figura 1.a - Cricca di quasi 3 mm



Figura 1.b - Esempio di cricca

Lo scopo dei controlli non distruttivi è quello di emettere un giudizio di accettazione/rifiuto di un materiale o di un componente, a seguito di uno studio che abbia determinato quali tipi di difetti sono inaccettabili, la loro dimensione e orientamento, le posizioni che possono far sì che questi difetti diventino inaccettabili.

Il tipo, la dimensione, l'orientamento e la posizione dei difetti che causano un rifiuto devono essere determinati, se possibile, utilizzando analisi delle tensioni e/o calcoli di meccanica della frattura. Se i calcoli definitivi non sono economicamente fattibili, il tipo, la dimensione e l'orientamento del difetto che causerà lo scarto dell'oggetto vengono stimati con un opportuno fattore di sicurezza.

E' evidente quale sia il grande vantaggio dei metodi di controllo non distruttivo, infatti questi permettono non solo di non alterare materiale, e di evitare l'asportazione o la fabbricazione di campioni, ma permettono inoltre di ispezionare, controllare, ed eventualmente scartare il prodotto lungo tutto l'arco della produzione, non semplicemente a prodotto terminato (es. controllo dei semilavorati prima che da essi vengano realizzati i prodotti finiti), riducendo i costi di produzione.

In molti campi vengono perciò utilizzati i metodi di controllo non distruttivo per l'analisi di ogni singolo pezzo, sostituendo il più incerto "controllo distruttivo a campione".

In base al momento produttivo in cui vengono effettuati, i Controlli Non Distruttivi, individuati con l'acronimo NDE (Non Destructive Evaluation), si suddividono in:

- _ in-process NDE: determinazione dell'accettabilità di un prodotto dopo ogni step di fabbricazione;
- _ final NDE: determinazione dell'accettabilità di un prodotto finito;
- _ in-service NDE: determinazione dell'accettabilità per utilizzo continuativo di un prodotto già in uso.

Le metodologie di controllo non distruttivo sono varie, e ognuna di esse si adatta, per caratteristiche o per tipo di strumentazione, ad essere utilizzata con efficacia nelle diverse situazioni, a seconda delle caratteristiche del prodotto da analizzare. C'è da precisare che nella maggior parte dei casi non ci si affida ad un'unica tecnica, ma al confronto e alla sovrapposizione dei dati messi a disposizione dall'utilizzo di metodi differenti.

Ciò che rimane sempre identico è la procedura di controllo, riassunta nello schema:

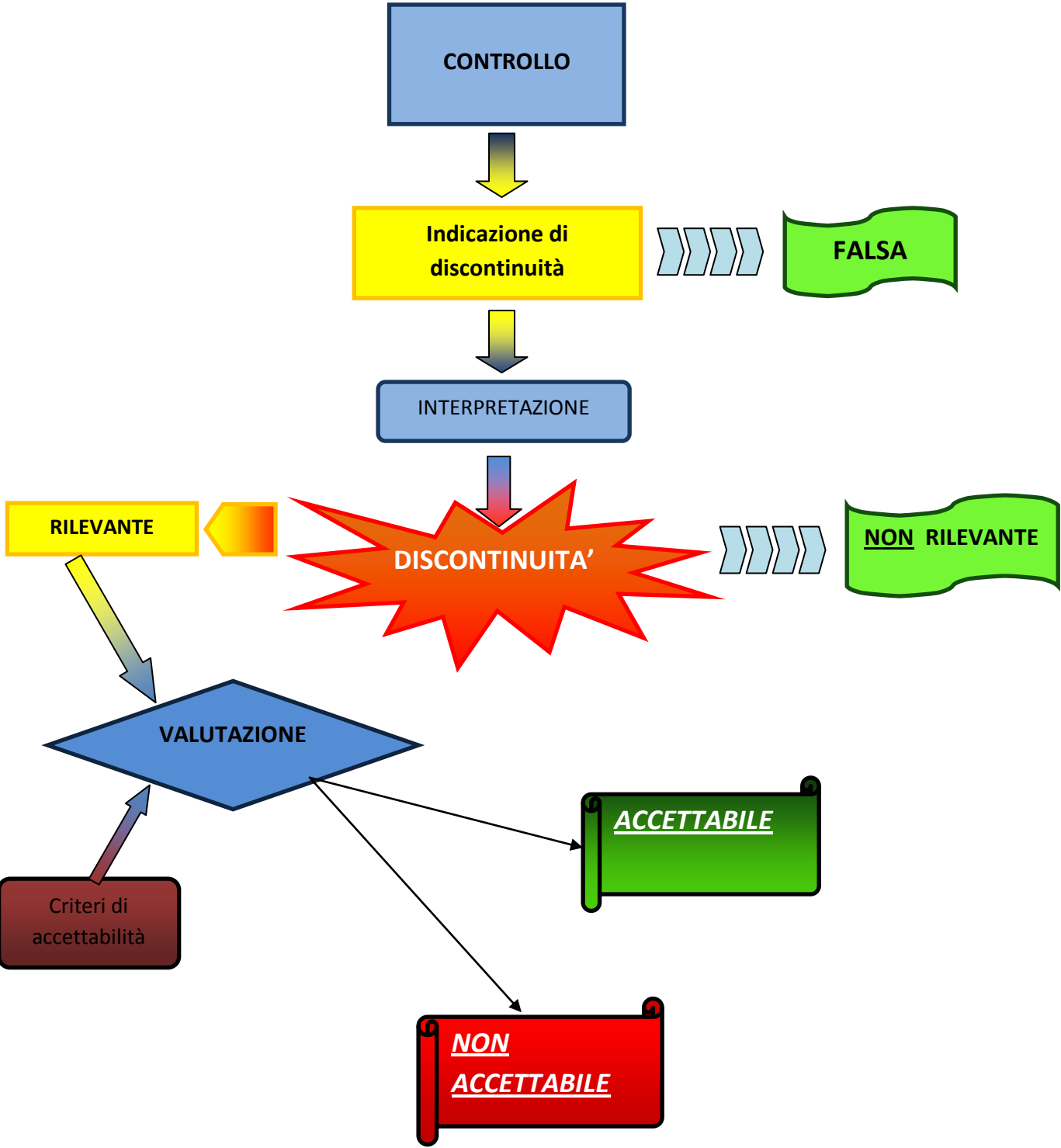
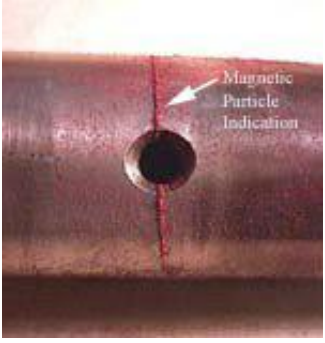

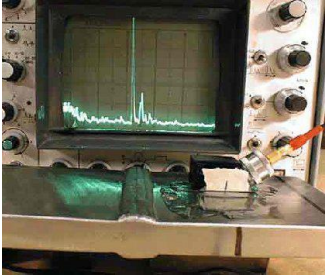


Figura 1.c – Procedura di controllo

Cito le tecniche più diffuse proponendo una tabella:

<p style="text-align: center;">Radiografia (RT)</p> 	<p style="text-align: center;">Impiego di radiazioni X o gamma. Risultato visibile su una pellicola.</p> <p>Rileva variazioni di densità originate dalla presenza di vuoti, inclusioni, o materiali differenti.</p>
<p style="text-align: center;">Magnetoscopia (MPI, MT)</p> 	<p style="text-align: center;">Applicazione di un campo magnetico su materiali ferromagnetici. I difetti introducono variazioni delle linee di flusso del campo visualizzabili con speciali polveri.</p> <p>Rileva variazioni nel campo magnetico causate da difetti superficiali o subsuperficiali quali cricche, inclusioni, ecc.</p>
<p style="text-align: center;">Liquidi penetranti (LPI, PT)</p> 	<p style="text-align: center;">Applicazione di un liquido che penetra nei difetti per capillarità. Esaltazione della visibilità del difetto mediante contrasto cromatico.</p> <p>Rileva aperture superficiali causate da cricche, porosità ecc.</p>
<p style="text-align: center;">Ultrasuoni (UT)</p> 	<p style="text-align: center;">Analisi delle onde ultrasoniche riflesse o trasmesse all'interno del componente.</p> <p>Rileva variazioni di impedenza acustica causate dalla presenza di cricche, interfacce, inclusioni ecc.</p>

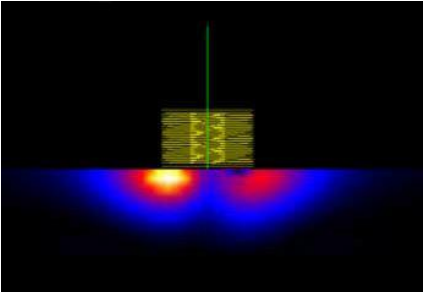
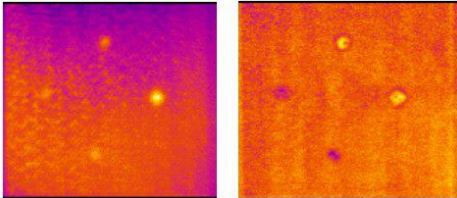
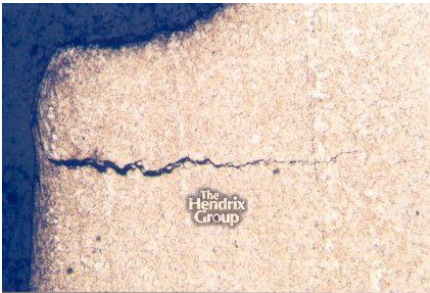
<p>Correnti indotte (ET)</p> 	<p>Analisi delle correnti indotte in un corpo (conduttore) a seguito dell'accostamento di una sonda che genera un campo magnetico alternato. Il difetto è visto come "disturbo" nella propagazione delle correnti indotte.</p> <p>Rileva variazioni nella conduttività elettrica causate da cricche, vuoti o inclusioni.</p>
<p>Termografia infrarossa (IT)</p> 	<p>Analisi dell'emissione termica nella banda dell'infrarosso da parte di un corpo. Il difetto genera un'alterazione del campo termico.</p> <p>Rileva anomalie termiche causate da cricche, bonding, vuoti, discontinuità del materiale, porosità, ecc.</p>
<p>Eddy-Current testing (ECT)</p>	<p>Test che si basa sull'esame delle correnti parassite indotte mediante un campo magnetico alternato.</p>
<p>Emissione acustica (AT)</p>	<p>Sistema per l'identificazione di propagazione delle difettologie.</p>
<p>Esame visivo (VT)</p> 	<p>Analisi condotta ad occhio nudo da un operatore esperto nella difettologia del componente esaminato.</p> <p>Rileva caratteristiche superficiali quali graffi, cricche o variazioni cromatiche; corrosione, deformazioni nei materiali plastici.</p>

Figura 1.d – Tabella delle principali tecniche di Controllo Non Distruttivo

Questi metodi hanno in comune la proprietà di non influire in alcun modo sulle caratteristiche fisico-meccaniche del componente testato.

2. INTRODUZIONE ALLA TERMOGRAFIA

2.1. Cos'è la termografia

I controlli termici comprendono tutti i metodi in cui vengono utilizzati dispositivi per il rilevamento di calore al fine di misurare la variazione di temperatura in componenti, strutture, sistemi o processi fisici.

Uno di questi metodi è la TERMOGRAFIA: una tecnica di telerilevamento, effettuata tramite l'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso.

Più precisamente questa tecnica permette di misurare l'energia nell'infrarosso emessa da corpi a temperatura diversa dallo zero assoluto mediante opportuni sensori, e di correlarla alla temperatura superficiale del corpo stesso.

Questa procedura, che si conclude con la conversione dell'energia emessa in segnale video, risulta particolarmente utile in diversi ambiti: dall'industria siderurgica e dei processi termici all'impiantistica civile, dall'industria elettronica all'impiantistica industriale, fino ad applicazioni nel campo della prevenzione e diagnosi medica.

Attraverso l'utilizzo di una termocamera, strumento per eseguire controlli di tipo termografico, è perciò possibile risalire alla mappa termica della "scena" inquadrata mediante l'interpretazione della radiazione percepita dall'elemento sensibile della termocamera stessa, il detector. Le principali caratteristiche che rendono la termografia una tecnica sempre più utilizzata sono:

- Permette di analizzare la temperatura di qualsiasi corpo senza entrarvi in contatto, cioè in modo non invasivo, permettendo la ripetizione delle misure nel tempo [assenza dell'effetto di carico, monitoraggio di corpi ad alta temperatura (es. bagni di fusione), studio in aree pericolose (es. alta tensione) e in campo meccanico, monitoraggio di un fenomeno con cadenza temporale prefissata per verificare l'usura di un componente sotto stress];

- Può valutare differenze di temperatura dell'ordine dei centesimi di grado;
- Permette il rilevamento dei dati in un campo di misura molto esteso [macchine standard di laboratorio raggiungono un range dai 20°C ai 1500°C];
- Aumenta le probabilità di individuare in modo preciso il guasto o gli elementi difettosi, anche qualora non fossero ancora critici;
- Non richiede il fermo degli impianti, anzi va fatta con impianti a regime e possibilmente in condizioni di massima sollecitazione [ispezioni di cuscinetti, motori, cabine di trasformazione dell'alta tensione];
- Consente interventi mirati e preventivi, quindi riduzione dei costi di manutenzione;
- Può ridurre il pericolo di eventi catastrofici come incendi o blocchi produttivi improvvisi.

Le limitazioni all'uso della termografia invece sono legate all'alto costo dell'apparecchiatura, alla necessità di un operatore qualificato e ad alcuni impedimenti di tipo tecnico: la difficoltà di ottenere dati precisi e veritieri per materiali con bassa emissività, la necessità in alcuni casi di schermare la termocamera dalle emissioni ambientali e l'influenza delle condizioni climatiche nel caso di utilizzo in ambito edile architettonico.

2.2. Le origini: dall'infrarosso alle termocamere

La scoperta dell'infrarosso risale all'inizio del 1800, grazie a Sir William Herschel, l'astronomo reale di re Giorgio III d'Inghilterra. Egli era alla ricerca di un nuovo materiale che potesse fare da filtro ottico in grado di ridurre la luminosità durante le osservazioni del sole mediante telescopio: iniziò ad utilizzare alcuni tipi di vetri colorati e si rese conto che alcuni di questi filtravano quantità ridotte di calore solare. Riprese l'esperimento di Newton del 1670 andando a scomporre mediante un prisma la luce solare nei sette colori dello spettro: con un termometro si accorse che a colori

differenti corrispondevano temperature differenti. Notò poi che collocando il termometro oltre la zona del rosso, in una zona non visibile all'occhio umano, vi era un ulteriore aumento della temperatura: egli chiamò questo fenomeno "spettro termometrico". Sir Herschel si rese inoltre conto che il vetro non è completamente trasparente all'infrarosso, ma che vi è un'attenuazione al passaggio di calore.



Figura 2.2.a - L'astrologo Sir William Herschel

Nel 1830 fu l'italiano Melloni a condurre studi sulla trasparenza del vetro e scoprì che cristalli sufficientemente grandi di salgemma risultano trasparenti all'infrarosso: questa applicazione venne usata per diversi anni, fino all'entrata in uso di nuove lenti ottiche nei primi anni del ventesimo secolo. Un altro passo decisivo nell'evoluzione dei sistemi di misura della temperatura fu l'invenzione della termocoppia, ad opera di Nobili nel 1829: il suo strumento aveva una precisione mai raggiunta in precedenza, si avvicinava a sensibilità del centesimo di grado.

Attraverso l'utilizzo di differenti termocoppie collegate in serie e grazie ai suoi studi sull'infrarosso, Melloni fu in grado di realizzare la prima termopila, grazie alla quale



Figura 2.2.b - Il fisico Macedonio Melloni

era possibile (tramite lenti in salemma) rilevare il calore di una persona a circa 3 m di distanza.

La prima immagine del calore, ovvero il primo termogramma, è opera del figlio di Sir William Herschel, Sir John, che fu in grado di produrre la prima immagine termica grazie all'evaporazione dell'olio racchiuso in una sottile pellicola: tale immagine era visibile in luce riflessa. Riuscì qualche anno più tardi, a produrre anche la prima immagine termica su carta, ossia la prima vera *termografia*.



Figura 2.2.c - Samuel Pierpont Langley

Le termocamere moderne però, montano sensori la cui paternità può essere imputata a Samuel Langley, l'inventore del bolometro. Questo strumento era costituito da una striscia di platino preventivamente annerito, collegato ad un circuito elettrico: il platino, esposto alla radiazione infrarossa, dava una risposta elettrica. Tramite questo strumento Langley riuscì a rilevare una mucca a trecento metri di distanza.

Come descritto nel cap. 5, una tipologia di termocamere è caratterizzata da un rilevatore di radiazione infrarossa e necessita di un sistema di raffreddamento del sensore, fino ad una temperatura di -196°C . Ciò è possibile tramite l'utilizzo dell'azoto liquido, tenuto in contenitori a chiusura ermetica inventati dallo scienziato Sir James Dewar, inglese che per primo utilizzò questo tipo di contenitore in grado di conservare gas liquefatti. Lo sviluppo della tecnologia relativa all'infrarosso è stato legato per gran parte del ventesimo secolo all'ambito militare, solo dagli anni 60 in poi è iniziato lo sviluppo tecnologico legato a scopi civili.

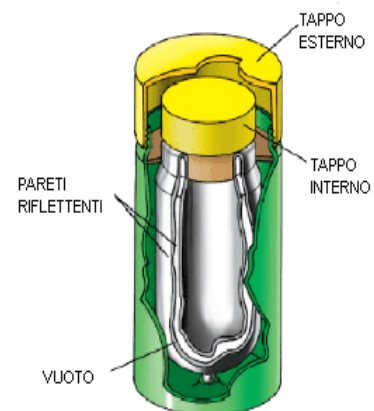


Figura 2.2.d - Schema del vaso di Dewar

3. PRINCIPI FISICI

3.1. Fondamenti di trasmissione del calore

Il calore viene trasmesso mediante tre principi:

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

Possono verificarsi tutti e tre allo stesso momento o indipendentemente l'uno dall'altro. Se all'interno di uno stesso ambiente sono presenti oggetti con diversa temperatura, quelli più caldi tenderanno a cedere calore e quindi a "riscaldare" quelli più freddi, in modo tale da ottenere nell'ambiente l'equilibrio termico.

Come detto, questo trasferimento può avvenire in tre modi:

Conduzione: è in stretta relazione alla conduttività termica della superficie dell'oggetto, maggiore è questa e minore sarà la resistenza termica (inverso della conduttività).

La quantità di calore che si sposta mediante la differenza di temperatura attraverso la parete è descritta dalla legge di Fourier per la conduzione del calore:

$$Q = k (T_i - T_e) / l$$

Dove Q è il calore; k è la conducibilità termica; T_i e T_e rappresentano le temperature interna ed esterna e l la lunghezza della parete.

Convezione: avviene solo in presenza di fluidi, questi possono essere di due tipi: liquidi o gassosi. Rappresenta la differenza di temperatura fra quella dell'oggetto e quella dell'ambiente nel quale è immerso.

La convezione è descritta mediante l'equazione di Newton sul raffreddamento:

$$Q = \alpha (T_o - T_f)$$

Dove Q rappresenta il flusso di calore, α il coefficiente di trasferimento del calore per convezione, T_o la temperatura dell'oggetto e T_f la

temperatura del fluido in cui è immerso (solitamente aria). L'effetto di convezione aumenta se si aumenta la velocità del fluido nel quale è immerso l'oggetto, in questo caso si parla di convezione forzata, quando invece non è presente nessuna forzatura, si parla di convezione naturale.

Irraggiamento: rappresenta la radiazione che proviene dall'oggetto preso in considerazione verso l'ambiente o verso un altro corpo.

La teoria dell'irraggiamento molto importante nelle indagini termografiche e verrà approfondita nel paragrafo successivo.

3.2. La trasmissione del calore per irraggiamento

Si consideri un corpo caldo collocato in una camera a vuoto, con pareti a temperatura ambiente: il corpo si raffredda e raggiunge l'equilibrio termico con l'ambiente, perdendo calore fino a che la sua temperatura è la medesima delle pareti. Considerando che la trasmissione di calore tra corpo e camera non può avvenire per conduzione o per convezione, poiché entrambi necessitano di un mezzo materiale per verificarsi, deve esistere un altro fenomeno di trasmissione: questo fenomeno è detto *irraggiamento*, ed è legato all'emissione di energia del corpo.

L'irraggiamento inoltre ha luogo generalmente contemporaneamente alle altre due forme di trasmissione, ma a differenza di esse non subisce attenuazione, avviene anche nel vuoto, ed è il fenomeno più veloce, poiché si verifica alla velocità della luce.

La trasmissione di calore per irraggiamento tra due corpi inoltre può avvenire anche in presenza di un mezzo di separazione più freddo di entrambi i corpi (a differenza di conduzione e convezione).

Fu nel 1864 che il fisico James Clerk Maxwell gettò le basi del fondamento teorico dell'irraggiamento, ipotizzando che cariche accelerate o correnti elettriche variabili danno luogo a campi elettrici e magnetici in rapido movimento, chiamati *onde elettromagnetiche*, che rappresentano l'energia emessa dalla materia in conseguenza dei cambiamenti nelle configurazioni elettroniche degli atomi e molecole.

Una ventina d'anni più tardi l'esistenza delle onde elettromagnetiche venne dimostrata sperimentalmente da Heinrich Hertz, che stabilì il legame tra le caratteristiche fondamentali delle onde:

$$\lambda = c / \nu$$

dove λ è la lunghezza d'onda, c la velocità della luce nel mezzo di trasmissione (ovvero il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e l'indice di rifrazione del mezzo), e ν la frequenza. La frequenza e la lunghezza d'onda sono perciò inversamente proporzionali, e la prima, al contrario della seconda e della velocità di propagazione, dipende solo dalla sorgente, indipendentemente dal mezzo in cui si propaga l'onda.

Le onde elettromagnetiche, dette anche *radiazione elettromagnetica*, trasportano energia, e possono quindi essere considerate come propagazione di un insieme di pacchetti discreti di energia, chiamati da Max Planck *fotoni* o *quanti*, ciascuno caratterizzato dalla frequenza λ e dall'energia:

$$e = h\nu = hc / \lambda$$

dove h è la *costante di Planck*.

Questa relazione ci permette di concludere che, essendo h e c costanti, l'energia di ogni fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda, e che quindi la radiazione di più piccola lunghezza d'onda possiede la maggiore energia.

Le onde elettromagnetiche, pur avendo tutte la stessa natura, differiscono nel loro comportamento proprio al variare della lunghezza d'onda. Le radiazioni elettromagnetiche coprono un campo esteso di lunghezze d'onda, variabile da meno di 10^{-10} μm per i raggi cosmici fino a più di 10^{10} μm per le onde elettriche di potenza.

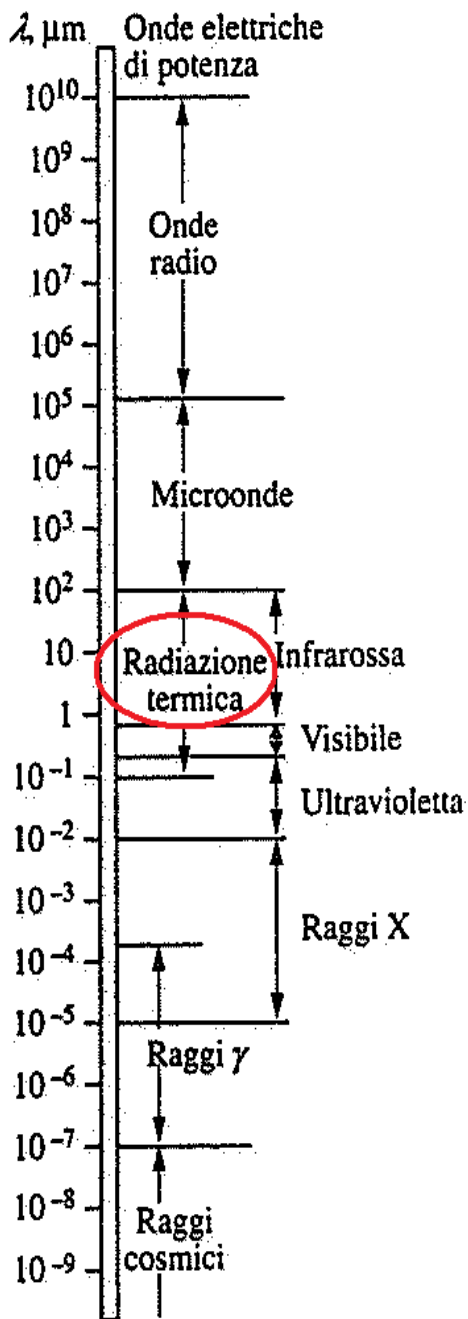


Figura 3.2.a - Spettro della radiazione elettromagnetica

La radiazione che corrisponde alla trasmissione di calore è la *radiazione termica* emessa a causa dei moti vibratori e rotatori delle molecole, atomi ed elettroni di una sostanza.

Poiché la temperatura è una misura dell'intensità di questi processi a livello microscopico, all'aumentare della temperatura aumenta l'emissione di radiazione termica, che è continuamente emessa da tutta la materia che si trovi a temperatura superiore allo zero assoluto (0° Kelvin, corrispondenti a -273.15° Celsius): tutti gli oggetti e le persone emettono (e assorbono) continuamente radiazione. Nello spettro elettromagnetico la radiazione termica è la parte che va da circa 0.1 a 100 μm, poiché la radiazione emessa dai corpi a causa della loro temperatura cade quasi interamente in questo campo di lunghezze d'onda.

La radiazione termica include perciò l'intera radiazione visibile ed infrarossa (IR) e parte della radiazione ultravioletta (UV).

3.3. La teoria dell' infrarosso e la legge di Kirchhoff

La radiazione infrarossa è quella che interessa per lo studio della termografia poiché la radiazione emessa dai corpi a temperatura ambiente cade proprio nel campo dello spettro che va da 0.76 a 1000 μm ; solo a temperature superiori agli 800° Kelvin gli oggetti iniziano ad emettere radiazione nel campo del visibile in quantità apprezzabile.

Lo spettro IR, a seconda del livello di agitazione molecolare, può essere diviso in 3 zone principali:

- Vicino IR (lunghezze d'onda comprese tra 0.78 e 1.5 μm)
- Medio IR (lunghezze d'onda comprese tra 1.5 e 20 μm)
- Lontano IR (lunghezze d'onda comprese tra 20 e 1000 μm)

Per l'approccio attraverso le prove termografiche non distruttive (TNDT, Thermographic NonDestructive Test) il campo più interessante è quello del *vicino e medio IR*, nella banda delle radiazioni infrarosse con lunghezze d'onda comprese tra 0.75 e 14 micron. Dalla misurazione di tale radiazione è possibile ottenere la temperatura superficiale dei corpi in esame.

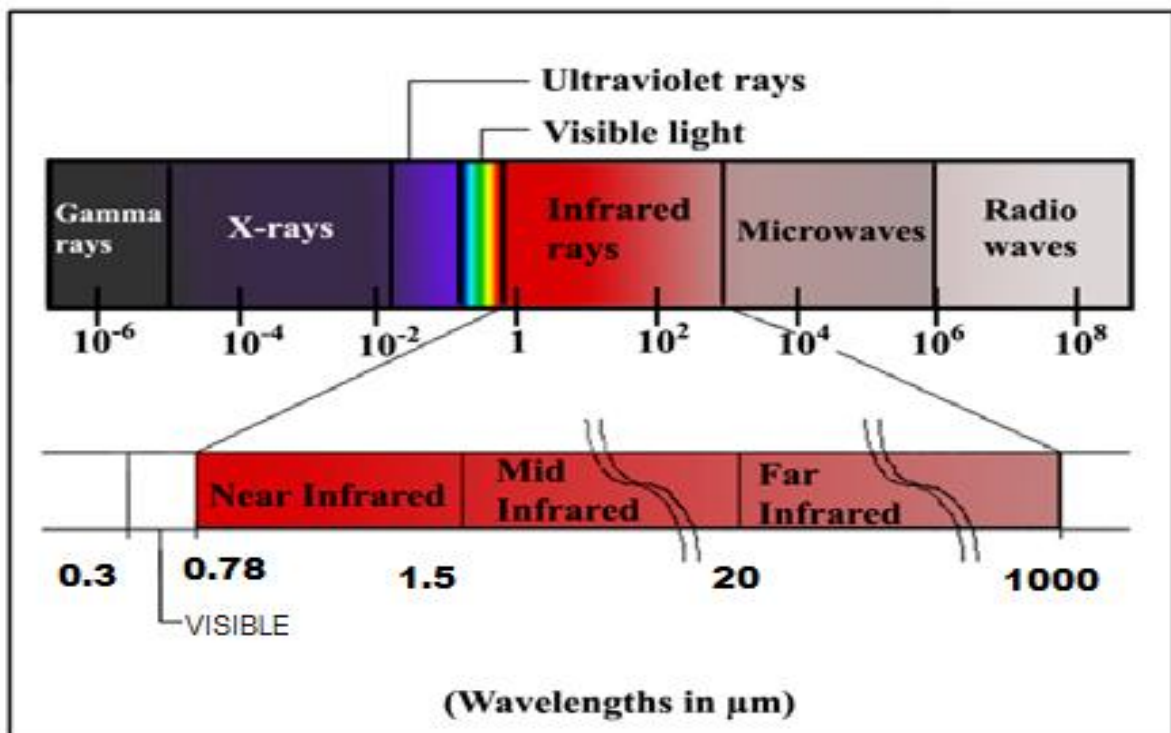


Figura 3.3.a - Spettro IR

Al fine di capire come sia possibile ottenere una buona immagine termografica è necessario introdurre una delle leggi fondamentali che regolano l'irraggiamento: la legge di Kirchhoff. Questa stabilisce che se una superficie viene investita da un'onda elettromagnetica, alla quale è associata una certa quantità di energia E (detta energia specifica incidente), una parte del fascio delle radiazioni verrà reinviato verso la sorgente (E_r), un'altra parte attraversa il corpo (E_t), e la restante parte viene assorbita dal corpo (E_a).

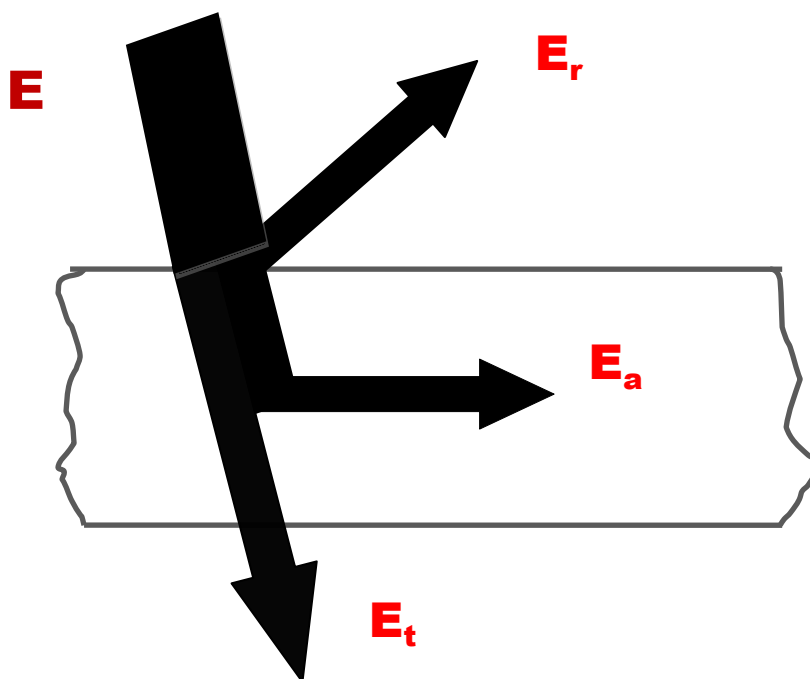


Figura 3.3.b – Schema trasmissione calore

Le frazioni di energia incidente che vengono riflesse, trasmesse o assorbite, sono definite attraverso specifici coefficienti:

- $\rho = E_r / E$ coefficiente di riflessione o riflettenza
- $\tau = E_t / E$ coefficiente di trasmissione o trasmittenza
- $\alpha = E_a / E$ coefficiente di assorbimento o emittenza

Conseguentemente al fatto che vale $E_r + E_t + E_a = E$, questi coefficienti sono legati dalla relazione:

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

Essi sono funzioni della lunghezza d'onda, della temperatura e della natura della superficie del corpo e assumono valori compresi tra 0 e 1; a seconda dei valori che assumono si distinguono i principali tipi di superfici:

- superfici riflettenti: [$\rho = 1$] → riflettono l'intera energia incidente ($E_r=E$);
- superfici trasparenti: [$\tau = 1$] → si lasciano attraversare dall'intera energia incidente ($E_t=E$);
- superfici opache: [$\tau = 0$] → l'energia incidente viene in parte riflessa e in parte assorbita ($E_t=0$).

Discorso a parte invece meritano quei corpi che presentano un coefficiente di assorbimento $\alpha=1$ per tutte le lunghezze d'onda, chiamati *corpi neri*. Un corpo nero non esiste in natura, è un'astrazione teorica molto utilizzata come riferimento rispetto alla quale confrontare le proprietà radiative delle superfici reali. Un corpo nero è un perfetto assorbitore di radiazione, poiché non riflette e non trasmette alcuna radiazione ($\rho = 0, \tau = 0$); di conseguenza, per la legge di conservazione dell'energia, questo re-irradia tutta la quantità di energia assorbita ed ha pertanto un coefficiente di emissività pari a 1 (uguale a quello di assorbimento). La quantità di energia irradiata da un corpo nero per unità di superficie, detta potere emissivo del corpo nero, è espressa dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

Dove T è la temperatura assoluta (K) e $\sigma = 5.76 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$ è la costante di Stefan-Boltzmann.

Questo potere emissivo, che altro non è che il calore trasmesso per irraggiamento, è dunque proporzionale alla quarta potenza della temperatura, al contrario che nel caso di conduzione e convezione, ove invece c'è proporzionalità diretta; per questo motivo, a parità di temperatura dei corpi che interagiscono, l'irraggiamento è la forma di trasmissione del calore più importante.

Come detto però, il corpo nero è solamente un'astrazione teorica, occorre perciò definire il concetto di emissività per corpi non neri (oggetti reali):

L'emissività di una superficie è definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura; viene indicata con $0 < \epsilon < 1$ ed è una misura di quanto una superficie reale approssima un corpo nero.

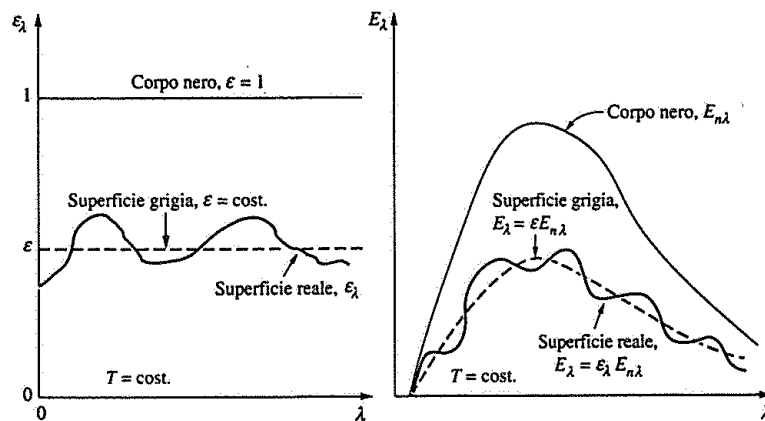


Figura 3.3.c – Confronto dell'emissività e del potere emissivo di una superficie reale con quella di una sup. grigia e di un corpo nero alla stessa temperatura

Quando ci si occupa di un corpo reale perciò l'espressione della legge di Stefan-Boltzmann diventa:

$$E_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

dove:

- E_r = energia ceduta per irraggiamento [W]
- σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- ϵ = emissività del corpo considerato, funzione delle caratteristiche della sua superficie e della sua temperatura
- S = superficie del corpo radiante [m^2]
- T_1 = temperatura assoluta del corpo più caldo [K]
- T_2 = temperatura assoluta dei corpi circostanti [K]

Un'altra legge importante è la legge di Wien, supportata dalle curve di Plank. Essa afferma che:

$$\lambda_{\max} = b / T$$

dove T è la temperatura del corpo nero, $b = 2898$ è la costante di proporzionalità di Wien, λ_{\max} è la lunghezza d'onda espressa in metri.

Le curve di Plank mettono in evidenza che ad ogni temperatura il corpo irradia energia in un vasto intervallo di lunghezze d'onda; rappresentano che l'intensità di energia elettromagnetica emessa alle varie lunghezze d'onda (ad una fissata temperatura), detta anche curva del corpo nero, ha un picco che si sposta verso le alte frequenze all'aumentare della temperatura stessa.

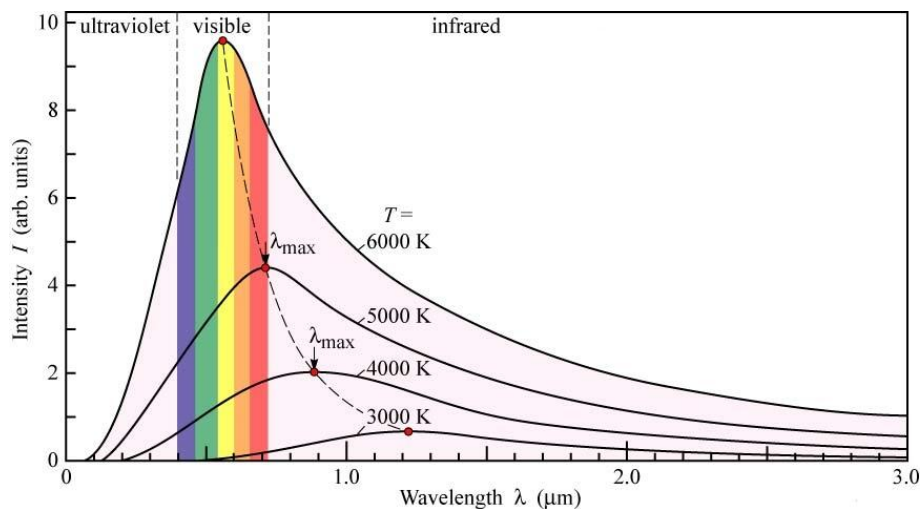


Figura 3.3.d - Curve di Planck

In poche parole la legge di Wien esprime il concetto che più un oggetto è caldo e minore è la lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione.

Poiché l'irraggiamento è un fenomeno complesso, reso ancora più complesso dalla dipendenza delle proprietà dei materiali dalla lunghezza d'onda e direzione della radiazione, nei calcoli si utilizzano comunemente le approssimazioni di superfici *grigie e diffondenti*: una superficie è grigia se le sue proprietà risultano indipendenti dalla lunghezza d'onda e diffondente se queste sono indipendenti dalla direzione.

4. MISURAZIONE: FONTI DI ERRORE

Riassumendo, la radiazione registrata dalla termocamera è composta da raggi emessi, riflessi e trasmessi, provenienti dagli oggetti all'interno del campo visivo dello strumento.

I raggi infrarossi registrati dalla termocamera sono quindi composti:

- ✓ dalla radiazione emessa dall'oggetto di misura;
- ✓ dalla riflessione della temperatura ambiente;
- ✓ dalla trasmissione della radiazione da parte dell'oggetto di misura.

Poiché la trasmissione ai fini pratici risulta spesso irrilevante, si assume

$$\rho + \varepsilon = 1$$

Per la termografia questo significa che quanto minore è l'emissività, tanto maggiore è la quota di raggi infrarossi riflessi, tanto è più difficile effettuare una misura precisa della temperatura e tanto più importante è che la compensazione della temperatura riflessa (RTC), parametro regolabile sullo strumento, sia impostata correttamente.

Gli oggetti di misura con emissività elevata ($\varepsilon \geq 0.8$):

_ hanno un fattore di riflessione basso → la loro temperatura può essere misurata molto facilmente con la termocamera.

Gli oggetti di misura con emissività media ($0.8 > \varepsilon > 0.6$):

_ hanno un fattore di riflessione medio → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera.

Gli oggetti di misura con emissività bassa ($\varepsilon \leq 0.6$):

_ hanno un fattore di riflessione elevato → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera ma i risultati devono essere esaminati molto attentamente, bisogna tenere conto nel calcolo della T della compensazione della temperatura riflessa (RTC).

4.1. Valutazione dell'emissività dell'oggetto di misura

Come accennato, la valutazione dell'emissività dell'oggetto è una procedura fondamentale per poter effettuare un'indagine termografica. Assicurarsi che l'impostazione dell'emissività sia corretta è

particolarmente importante se vi sono grandi differenze di temperatura tra l'oggetto di misura e l'ambiente di misura. Se infatti la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente basse e viceversa; se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente alte e viceversa.

La termocamera deve quindi, in ogni momento, conoscere la tipologia di oggetto che sta rilevando per poter fornire la temperatura dell'oggetto stesso, avvicinandosi più possibile a quella reale. Qualora ci si trovasse a dover analizzare un oggetto la cui emissività non è nota, si può effettuare la stima dell'emissività dell'oggetto mediante l'utilizzo di una targhetta ad emissività nota. La procedura consiste nel posizionare sull'oggetto da indagare un target, tipicamente nastro isolante nero per elettricisti, per poi procedere a innalzare la temperatura dell'oggetto di misura e, utilizzando il puntatore della termocamera, misurare la temperatura sul target impostando l'emissività di quest'ultimo a 0,97 (valore noto). L'operatore andrà poi a fissare un punto di misura sull'oggetto ad emissività non nota e modificherà il dato dell'emissività in termocamera fino ad ottenere la stessa temperatura rilevata sul target; a questo punto è possibile stimare l'emissività dell'oggetto da rilevare. Una procedura analoga consiste nell'utilizzo di un termometro a contatto: l'operatore andrà a misurare la temperatura reale dell'oggetto da rilevare, per poi posizionare un punto di misura con la termocamera sull'oggetto stesso e modificherà il valore dell'emissività della termocamera fino ad ottenere la temperatura rilevata col termometro a contatto. Se invece tale operazione non è possibile, si ricorre alle tabelle di emissività.

È da precisare che questo tipo di procedure vengono ignorate in alcune applicazioni nelle quali ciò che importa è la differenza di temperatura rilevata tra due zone, non la precisione del dato in un punto.

4.2. Legge di Lambert e impostazione temperatura della radiazione riflessa

Le emissioni elettromagnetiche non sono uniformi in tutte le direzioni. Fatta eccezione per il corpo nero, chiamato per questo motivo anche radiatore perfetto, l'intensità delle radiazioni non è costante, varia in funzione della direzione.

Per descrivere questo aspetto si introduce la legge di Lambert, che definisce il potere angolare dato da $i = dq / d\omega$, dove q è il potere emissivo e $d\omega$ è l'angolo solido mostrato in figura 4.2.a.

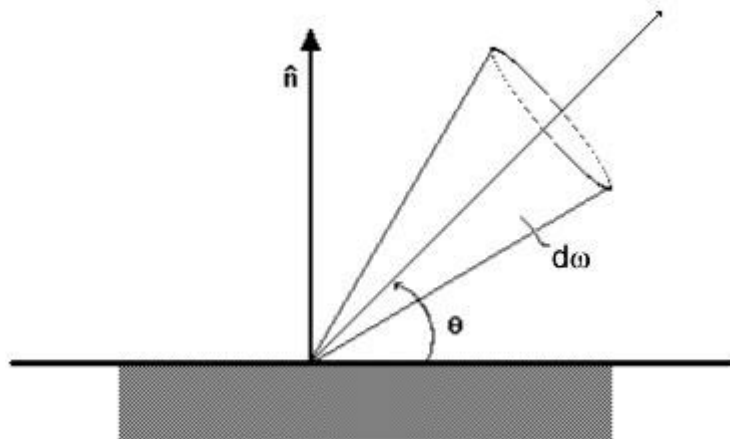


Figura 4.2.a - Rappresentazione dell'angolo θ e $d\omega$

La legge di Lambert descrive l'andamento angolare di i in funzione dell'angolo θ (vedi figura 4.2.a), che rappresenta l'allontanamento dal vettore n normale alla superficie.

$$i = i_n \cos\theta$$

dove i_n è il massimo valore di potere emissivo angolare ottenuto in corrispondenza della normale n .

I vettori di i non sono quindi uniformi, ma il loro valore cala con la legge del coseno, ed in corrispondenza della tangente alla superficie ($\theta=90^\circ$), è nullo. L'involuppo totale è quindi descritto da una circonferenza.

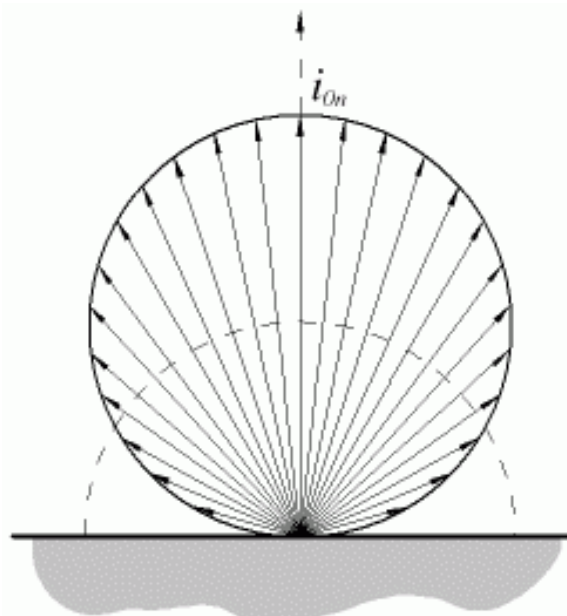


Figura 4.2.b - Comportamento del potere angolare i

Se il corpo avesse un'emissione angolare uniforme in ogni direzione, l'involuppo sarebbe una semicirconferenza ed il vettore i sarebbe costante e pari a $i = i_n / 2$, la metà del valore massimo del potere emissivo integrale ottenuto da un corpo nero (figura 4.2.c).

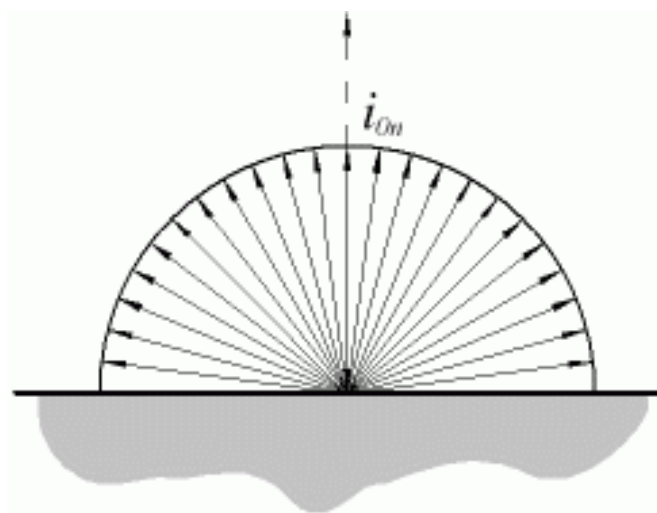


Figura 4.2.c - Comportamento del potere angolare i per un'emissione uniforme

Nella pratica gli involucri dei vettori non sono circonferenze, assumono forme assai irregolari in funzione del materiale e delle caratteristiche della superficie.

Come spiegato, per effettuare le misurazioni si ricorre ad approssimazioni, tuttavia è necessario impostare un corretto valore di temperatura della radiazione riflessa come parametro per la termocamera: il metodo più comune per farlo presuppone la conoscenza della sopra descritta legge di Lambert.

Viene definito radiatore di Lambert un oggetto che riflette la radiazione incidente con diffusione ottimale, in altre parole con la stessa forza in tutte le direzioni. Un pezzo di foglio di alluminio accartocciato e quindi disteso è un sostituto adatto di un radiatore di Lambert per questo scopo. Il foglio ha un elevato fattore di riflessione e, grazie alla struttura accartocciata, la riflessione diffusa della radiazione è quasi perfetta.

Per misurare la temperatura della radiazione riflessa, si posiziona il radiatore di Lambert vicino all'oggetto di misura o idealmente sulla superficie dell'oggetto di misura. Quindi si misura la temperatura sul radiatore con l'emissività impostata su uno. La termocamera calcolerà adesso la temperatura della radiazione incidente; a questo punto si inserisce questo valore come temperatura riflessa nella termocamera e si misura la temperatura dell'oggetto da rilevare con l'emissività impostata per la superficie dell'oggetto stesso.

4.3. Il mezzo interposto

Dobbiamo ricordare che tra il corpo che stiamo inquadrando e il sensore della termocamera, che ci permette di rilevare la radiazione emessa, c'è sempre un mezzo interposto: l'aria.

L'aria è il principale mezzo interposto nelle operazioni di misura: essa presenta delle zone di buona trasparenza, dette finestre atmosferiche, alternate ad altre di assoluta opacità. Per spessori di pochi metri l'aria risulta sufficientemente trasparente alla radiazione infrarossa ma per spessori maggiori, a volte necessari in applicazioni in campo

architettonico, la sua presenza non è trascurabile. Il coefficiente di trasparenza spettrale varia in funzione della lunghezza d'onda e dello spessore del mezzo interposto. Quindi affinché l'atmosfera sia sufficientemente trasparente è necessario lavorare su una distanza d'inquadramento di pochi metri oppure scegliere opportunamente una lunghezza d'onda λ tale che sia contenuta all'interno di una finestra atmosferica. L'atmosfera si comporta quindi da filtro, perciò alcune lunghezze vengono trasmesse altre invece vengono assorbite, la figura 4.3.a ci mostra tale comportamento:

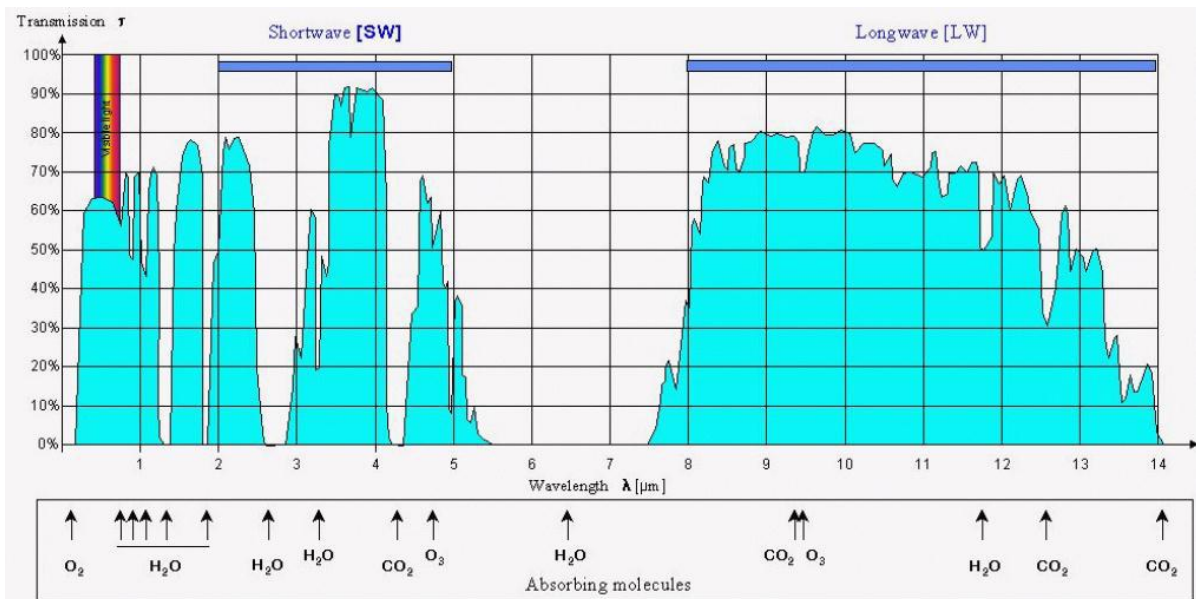


Figura 4.3.a - Trasmittanza dell'atmosfera valutata alla distanza di un miglio marino e componenti dell'aria maggiori responsabili dell'assorbimento della radiazione nei punti indicati

Possiamo quindi dividere due finestre infrarosse corrispondenti ai due intervalli:

- SW Short Wave onde con λ da 3 a 5 μm
- LW Long Wave onde con λ da 8 a 12 μm

Nell'intervallo dello spettro che va da 5 a 8 μm l'atmosfera assorbe le onde infrarosse, quindi esisteranno termocamere che funzionano nell'intervallo SW e altre che funzionano nell'intervallo LW.

Non è possibile trascurare il fatto che l'aria non è l'unico mezzo interposto, infatti tra l'oggetto di misura e il sensore sono presenti pure le ottiche montate sulla termocamera. Tuttavia queste non sono fonte di errore, poiché sono realizzate in materiali come germanio e silicio, opachi alle radiazioni nella banda del visibile ma trasparenti a quelle dell'infrarosso.

4.4. Area di misura

Per evitare banali errori legati all'area di misura è necessario introdurre le definizioni di FOV (field of view) e di IFOV (instantaneous field of view).

FOV: Campo visivo.

È una piramide a base rettangolare che ha per vertice la matrice che costituisce il sensore della termocamera, e per base il campo visivo della termocamera (Horizontal-FOV x Vertical-FOV).

E' espresso in gradi, e rappresenta l'area che la termocamera è in grado di vedere in funzione della distanza.

IFOV: Campo visivo istantaneo.

Un sensore è costituito da una matrice di tanti elementi, o pixel, che danno luogo all'immagine completa; per esempio, un sensore da 320X240 cellette ha in totale 76.800 pixels.

L'IFOV viene definito come un angolo solido, una piramide con base rettangolare il cui vertice corrisponde ad un pixel del sensore, mentre la base costituisce la grandezza del pixel ad una certa distanza.

Essendo un angolo solido, viene espresso in milliradiani e rappresenta in pratica la porzione di campo visivo che corrisponde ad ogni singolo pixel (nell'esempio considerato, 1/76.800 del campo visivo totale).

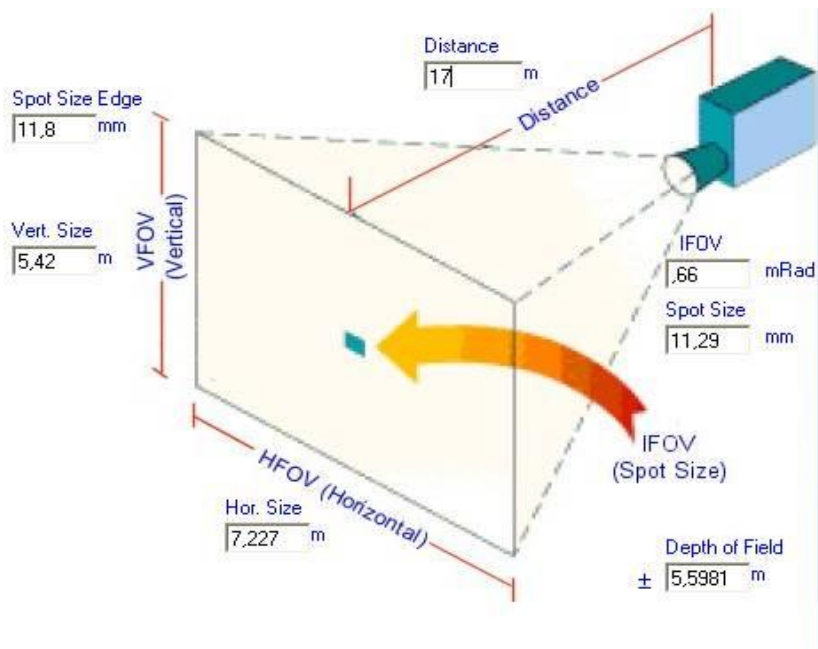


Figura 4.4.a - Schema FOV e IFOV

Tali indicatori sono in relazione stretta alla caratteristica dell'obiettivo e alla dimensione della matrice. E' fondamentale che l'IFOV sia molto più piccolo della superficie del soggetto proiettata sul sensore.

E' quindi importante scegliere l'obiettivo e la risoluzione adeguati al soggetto di ripresa per non incorrere in immagini termografiche assolutamente scadenti e non interpretabili.

5. LE TERMOCAMERE

La termocamera è uno strumento che rileva l'intensità della radiazione all'infrarosso di un corpo, non è quindi uno strumento che vede o rileva la temperatura. Tale radiazione viene poi elaborata dall'elettronica della macchina fino a sviluppare un'immagine di tipo radiometrica digitale nella quale è possibile visualizzare la temperatura dell'oggetto.

Tale immagine potrà essere visualizzata come foto digitale o come video a seconda dell'utilizzo della macchina e dei software che elaborano il risultato dell'elettronica. La termocamera è quindi uno strumento, come le macchine fotografiche digitali, che memorizza l'immagine o il fotogramma convertendo l'infrarosso, invisibile all'occhio umano, in un'immagine visibile rappresentata in falsi colori.

Le termocamere presenti oggi sul mercato si dividono in due tipologie, quelle raffreddate e quelle non raffreddate. Le precisioni più alte si ottengono con le termocamere raffreddate, che presentano però problematiche inesistenti nell'altro gruppo e spesso costi più elevati; questi i motivi per i quali, soprattutto in campo edile (dove è richiesta una precisione minore per molti parametri) le termocamere non raffreddate hanno una maggior diffusione.

5.1. Termocamere raffreddate

Come accennato, le termocamere raffreddate sono quelle che garantiscono la più alta precisione nella misurazione. Esse sono costituite da:

- un sensore;
- un sistema di raffreddamento;
- un sistema di scansione;
- un obiettivo.

Le termocamere raffreddate montano sensori miniaturizzati, detti foto-rilevatori, dispositivi realizzati con materiali semiconduttori nei quali il rilascio di cariche elettriche è direttamente proporzionale all'assorbimento dei fotoni. Il motivo del raffreddamento in questo tipo di strumenti, è

legato proprio all'efficienza dei sensori, infatti al diminuire della temperatura del rilevatore aumenta la precisione. I foto-rilevatori sono inoltre caratterizzati da un ristretto spettro di lunghezza d'onda ma da una risposta di frequenza molto elevata. Uno dei foto-rilevatori più utilizzati è l'antimoniuro di indio (InSb), raffreddato alla temperatura dell'azoto liquido a 77 K (-196°C), è caratterizzato da un tempo di risposta inferiore a 1μs e da uno spettro d'onda limitato all'intervallo tra i 2 e i 5μ. Un altro sensore utilizzato è il tellurato di cadmio e mercurio, che ha il compito di analizzare in maniera puntuale tutta la superficie e riuscire a delineare una mappa termica accurata.

Per avere un'immagine priva di disturbi e con una buona risoluzione termica, è necessario che la temperatura del rilevatore sia la più bassa possibile, stabile e indipendente dalla temperatura ambientale. La necessità di raffreddare il sensore deriva dal fatto che se per definizione è freddo, allora non emette radiazioni ma ne assorbe in maniera inversamente proporzionale alla sua temperatura, riuscendo a delineare una mappatura delle varie temperature con una precisione maggiore quanto più è freddo. La bassa temperatura del sensore, inoltre, va ad attenuare in maniera sensibile il rumore (disturbo) delle schede elettroniche e del sensore stesso.

Esistono quattro diversi tipi di sistemi di raffreddamento:

- 1) Sistema criogenico a circuito aperto (-196°C).

Nel circuito, nel vaso di Dewar, viene periodicamente inserito dell'azoto liquido: viene aperta la termocamera, viene posizionato un imbuto e l'operatore versa azoto liquido all'interno della termocamera stessa. La temperatura viene garantita dall'evaporazione dell'azoto che, nel passaggio di stato da liquido a gassoso, raffredda il sensore.

- 2) Sistema aperto (-186°C).

Nel vaso di Dewar viene inserito dell'argon allo stato liquido.

L'inconveniente di questi due metodi è che le termocamere che utilizzano questi sistemi di raffreddamento necessitano di frequenti rabbocchi di liquido refrigerante.

3) Sistema termoelettrico (-70°C).

Sfrutta l'effetto Peltier: tale sistema è molto pratico ma ha l'inconveniente che i sensori, rispetto alle altre tecnologie, sono mantenuti a temperature più alte e ciò comporta una precisione inferiore di lettura termica.

4) Sistema a ciclo Stirling (-197°C).

Mediante dei cicli frigoriferi di compressione ed espansione in un circuito di gas di elio questo sistema sottrae una grande quantità di calore mantenendo il sensore ad una temperatura di -197°C . Nonostante la scarsa durata del sistema Stirling (frequenti rotture della pompa refrigerante) e l'ingente consumo elettrico, tale sistema è, dopo l'azoto, il più usato nelle moderne termocamere raffreddate.

Per poter acquisire le immagini è necessario che a bordo delle termocamere raffreddate sia presente un sistema di scansione, ossia un sistema di specchi che sia in grado di scansionare l'immagine e focalizzare ogni suo punto sul sensore stesso. Il sistema di scansione è composto da due specchi e da alcuni prismi rotanti con un numero di facce uguali alla risoluzione geometrica della termocamera: ad esempio in una termocamera con risoluzione 320×240 pixel, il sistema è costituito da due prismi rotanti, uno su asse orizzontale con 240 facce che scansiona la colonna, e uno su asse verticale con 320 facce che scansiona la riga. Con la rotazione completa del prisma orizzontale verrà scansionata la prima riga dell'immagine termica, a questo punto avviene la rotazione, di una sola posizione, del prisma verticale, per poi continuare con una rotazione completa del prisma orizzontale. Tale procedura consente, tramite la rotazione alternata dei due prismi, di analizzare l'intera immagine termica e focalizzare tutti i pixel su un unico rilevatore.

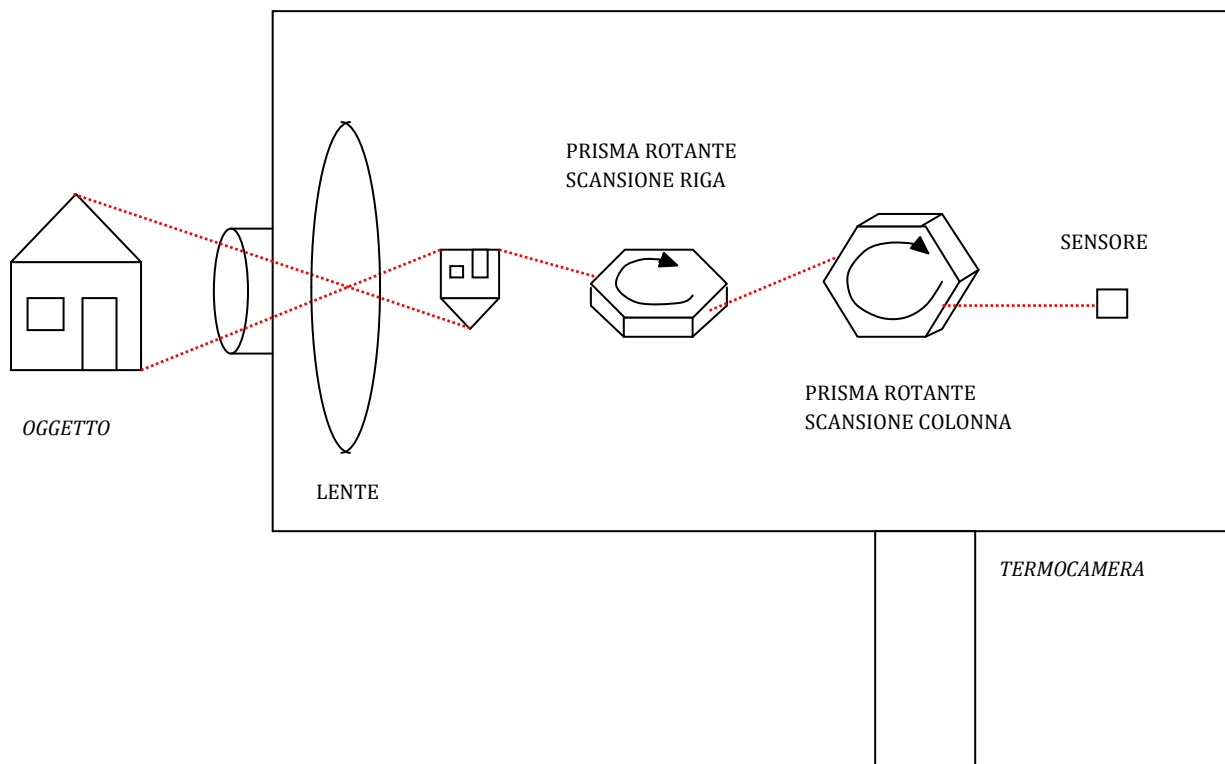


Figura 5.1.a – Schema del sistema di scansione

La termocamera deve avere un'adeguata ottica in relazione ai campi di intervento che si vogliono analizzare. Le ottiche sono costituite da lenti al germanio, materiale che impedisce l'ingresso allo spettro della radiazione visibile, mentre è trasparente al passaggio della banda dell'infrarosso (con lunghezza d'onda compresa tra 2 e 14 micron). La messa a fuoco è controllata elettronicamente dall'unità di elaborazione o effettuata manualmente dall'operatore mediante ghiera sull'ottica.

5.2. Termocamere non raffreddate

Dal 1997 sono arrivate sul mercato le termocamere non raffreddate. Chiamate microbolometriche, differiscono dalle precedenti perché non necessitano di un sistema di raffreddamento. Il sensore, il microbolometro, è assimilabile ai sensori delle moderne macchine fotografiche digitali, è costituito da una matrice di rilevatori che vanno a comporre il sensore stesso. Rispetto alle termocamere raffreddate dove un unico sensore, tramite il sistema di scansione, analizza i pixel dell'immagine termica, nelle non raffreddate vi è una correlazione diretta

tra il pixel del sensore ed il pixel analizzato sull'immagine termica. La risoluzione geometrica del sensore e cioè il numero di pixel analizzati sull'immagine, corrisponde al numero di pixel sensibili da cui è formato il microbolometro.

I sensori microbolometrici sono divisibili in due categorie distinte: i sensori termici e i sensori a quanti. I sensori termici sono generalmente più economici rispetto agli altri e hanno una buona risposta su tutta la lunghezza d'onda dello spettro; essi sono generalmente costituiti da materiali metallici o semiconduttori. Tale tipologia di sensore ha un tempo di risposta superiore rispetto ai sensori a quanti (foto-rilevatori) e viene utilizzata in genere nelle termocamere non raffreddate con caratteristiche di impiego molto ampie. I sensori a quanti, invece, operano in base all'effetto fotoelettrico, ovvero sono costituiti da materiali che assorbono fotoni sono in grado aumentare il livello energetico degli elettroni determinando la formazione di un potenziale elettrico.

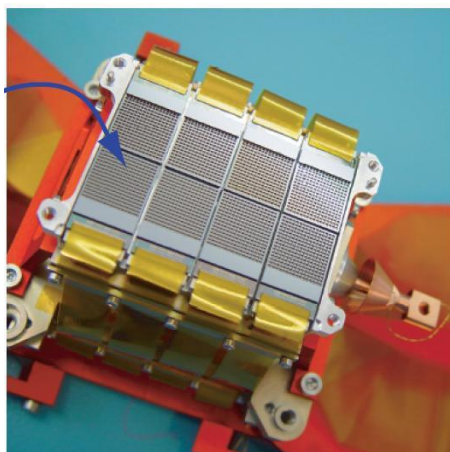


Figura 5.2.a - Microbolometri in matrice

Anche per le termocamere non raffreddate le ottiche sono costituite da lenti al germanio, opaco alla radiazione visibile ma trasparente all'infrarosso. Analogamente la messa a fuoco può essere controllata elettronicamente o manualmente.

5.3. Elementi di caratterizzazione: come scegliere una termocamera

La scelta di una camera è estremamente complessa e va ponderata in base alle specifiche esigenze e all'ambito di applicazione: l'offerta è sempre più ampia sia in termini di modelli che di marche, è perciò necessario valutare alcuni elementi caratterizzanti al fine di capire quale tipologia di strumento sia più adatta alle proprie necessità.

Un primo parametro da considerare nella scelta di una termocamera è il *range di temperatura*, ovvero la scala termica all'interno della quale presumibilmente l'operatore dovrà lavorare. Tipicamente le termocamere sono caratterizzate da range che vanno dai -20 a +120°C, estremi che individuano sostanzialmente tutte le applicazioni in campo edile; tuttavia per altri ambiti sono necessari intervalli ben più ampi, ed è per questo che si trovano in commercio termocamere per applicazioni industriali con range fino a 2000°C.

Un secondo importante parametro per la scelta della camera è la *risoluzione termica*, cioè la massima differenza in termini di gradi che il sensore è in grado di percepire su una medesima immagine: maggiore è la risoluzione termica, migliore sarà il sensore e di conseguenza la risposta termica che il sensore stesso riuscirà a fornire. Sensibilità tipiche sono 0.3, 0.12, 0.1, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.03°C.

È fondamentale non confondere il concetto di risoluzione con quello di *precisione termica*, definita come l'accuratezza della misura in scala assoluta della temperatura di un oggetto. La precisione termica è in genere piuttosto bassa, nell'ordine di $\pm 2^\circ$ o del $\pm 2\%$, poiché la termografia non ha come obiettivo la misurazione della temperatura di un oggetto (per la quale si usano i termometri a contatto), ma va piuttosto considerata un'analisi per comparazione.

Altro parametro fondamentale nella scelta della camera è la *risoluzione geometrica del sensore*, che nel caso delle non raffreddate, la maggior parte delle termocamere in commercio, coincide con il numero di pixel che compongono la matrice del microbolometro. In assoluto, più grande è la matrice, migliore è la capacità della termocamera di rappresentare

graficamente il soggetto. Le matrici più diffuse variano da 4x4, 16x16, 120x120, fino a 160x160, 200x150, 320x240 e 680x420. In generale utile, ma in modo particolare sulle macchine che hanno risoluzioni sotto i 320x240, la possibilità di sostituzione delle ottiche permette ovviamente una maggiore libertà operativa. La possibilità di montare un'ottica stretta (teleobiettivo) piuttosto che una aperta (grandangolo) permette di ottenere la migliore distribuzione del soggetto sull'elemento sensibile.

Da tenere in considerazione per l'acquisto di una termocamera è inoltre il *range spettrale* di lavoro del suo sensore, ossia la finestra dell'infrarosso che la termocamera va ad analizzare. In commercio esistono due differenti range, il vicino infrarosso (short wave) ed il lontano infrarosso (long wave), rispettivamente da 2 a 5 μm e da 8 a 12-14 μm .

Come detto nel cap. 4.4. un fondamentale elemento di caratterizzazione per una termocamera, spesso trascurato, è l'IFOV, ovvero il *campo visivo istantaneo*, che va considerato in base alla situazione per evitare immagini non interpretabili correttamente.

La *frequenza di acquisizione* del sensore può essere un parametro significativo per la scelta della camera: tipicamente le frequenze di acquisizione delle immagini termica vanno da 9 a 50 Hz. Esistono però strumenti che sono in grado, collegati a un PC, di acquisire veri e propri filmati termici, ovvero sequenze di immagini termiche che vanno a rappresentare un fenomeno termico. Questo parametro non è molto rilevante in ambito edile-architettonico, ma assume importanza in campo industriale e meccanico, poiché in queste applicazioni si vanno spesso ad analizzare oggetti in movimento, sia fisico che termico (ad esempio un motore su banco di prova).

Ultimo aspetto da tenere in considerazione nella scelta della termocamera, nonostante spesso sia ritenuto il più importante, è il *prezzo*: ovviamente le termocamere considerate il top di gamma relativamente alle caratteristiche analizzate finora hanno costi molto elevati. Una valutazione deve essere fatta sulla velocità di obsolescenza: la tecnologia all'infrarosso è una tecnologia di derivazione militare, ad intervalli di tempo molto lunghi

vengono rilasciati alcuni brevetti per scopi civili. Un sensore con una risoluzione di 640x480 pixel è un sensore, ad oggi, al top di gamma, ma è un sensore che è stato rilasciato dai militari già dal 2005. Risulta evidente che i componenti fondamentali di una termocamera sono l'obiettivo ed il sensore, per questo motivo se il sensore ha un'evoluzione molto lenta, la termocamera ha un tempo di obsolescenza estremamente lungo. Per esempio sono presenti da oltre dieci anni sul mercato termocamere che lavorano con sensori di altissima precisione, considerate ancora oggi estremamente performanti.

5.4. Immagine termografica

Per rendere visibile l'immagine dell'oggetto analizzato all'infrarosso, la termocamera effettua una conversione con falsi colori, cioè viene adottata una palettatura di colori tramite la quale l'immagine viene resa visibile.

Esistono principalmente quattro palettature per la visualizzazione dell'immagine ed esse possono essere scelte all'interno del software della macchina o in quello del computer durante l'analisi delle immagini:

1. Palettatura "FERRO": solitamente è quella standard con la quale vengono visualizzate le immagini. La scala dei colori parte dal nero per indicare i punti o le parti più fredde, man mano che la temperatura aumenta troviamo il blu, il rosso, l'arancio, il giallo ed infine il bianco per i punti più caldi. Per punti caldi e punti freddi s'intendono i punti più vicini al massimo o al minimo del delta di temperatura impostata durante l'analisi. Solitamente questa palettatura è utilizzata per l'analisi e la manutenzione industriale.



Figura 5.4.a - Palettatura "FERRO"

2. Palettatura “ARCOBALENO”: utilizzata solitamente per l’edilizia per mettere in risalto l’umidità o i distacchi di intonaco. Si utilizzano, per rappresentare l’immagine termografica, i colori dell’arcobaleno (da cui il nome); le zone più fredde sono indicate con il viola mentre quelle più calde con il rosso.

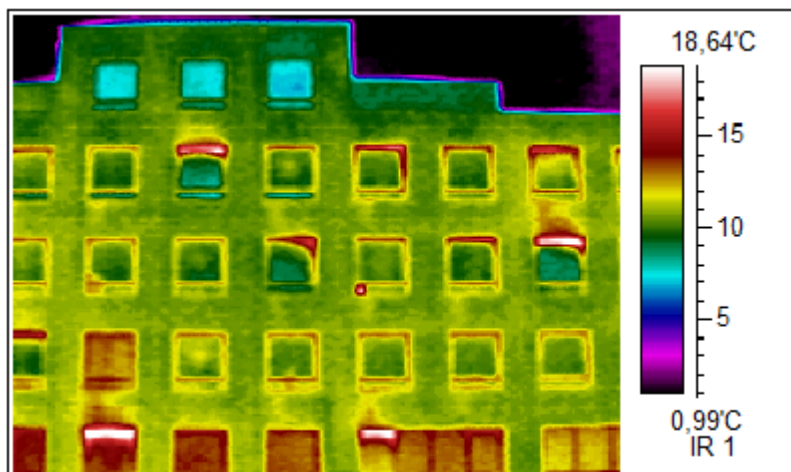


Figura 5.4.b - Palettatura "ARCOBALENO"

3. Palettatura “SCALA DI GRIGI”: questa palettatura mostra l’immagine in bianco e nero e nel mezzo le sfumature di grigio, indicando con il nero la temperatura minima mentre con il bianco la temperatura massima.

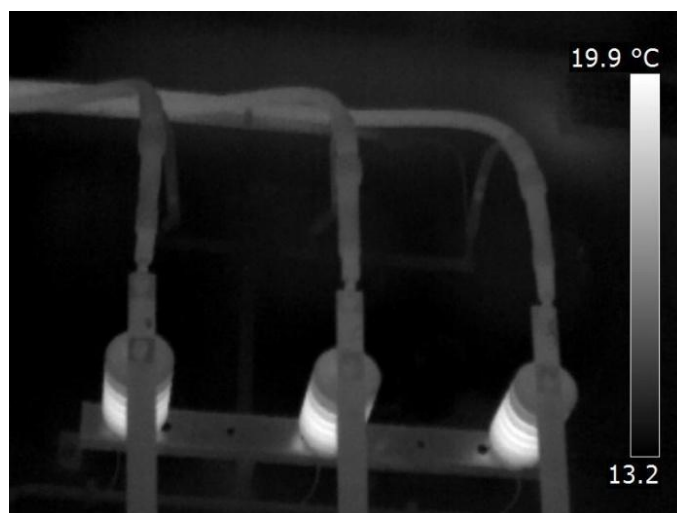


Figura 5.4.c - Palettatura "SCALA DI GRIGI"

4. Palettatura “ISOTERMICA”: questa palettatura è individuata con vari nomi a seconda del software che si sta usando nella macchina o nel computer. È formata da una serie di colori prestabiliti che rappresentano l'immagine con aree isoterme, cioè si stabiliscono sottointervalli di temperatura (solitamente 10) ai quali viene assegnato un colore specifico, non visualizzando sfumature tra un colore ed un altro.

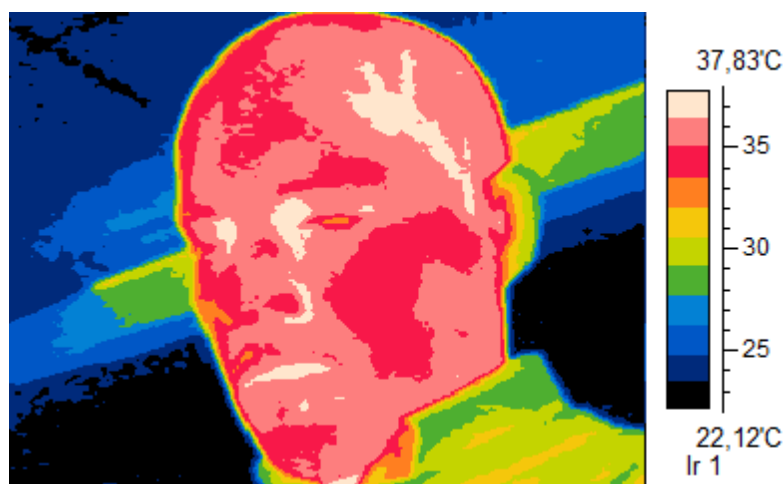


Figura 5.4.d - Palettatura "ISOTERMICA"

Esistono altri tipi di palettatura oltre alle quattro elencate sopra anche se la loro applicazione per l'analisi è più rara:

- o Palettatura “GRIGIO-ROSSO”;
- o Palettatura “GIALLO”;
- o Palettatura “FIAMMATO”.

Per una corretta visualizzazione termica dell'oggetto in analisi è necessario tener conto del *campo di temperature*. Questo parametro, che può essere modificato durante l'osservazione, ma in molti casi anche in un momento successivo tramite software per la visualizzazione delle immagini termografiche, va regolato modificando il ΔT dell'immagine visualizzata, decidendo se ampliarlo o restringerlo.

Con un ampio ΔT infatti, possiamo visualizzare un numero maggiore di componenti a temperature diverse: di solito operare con un intervallo ampio è utile per un'indagine superficiale, quando cioè l'indagine è mirata all'individuazione di anomalie termiche o punti caldi (figura 5.4.e).

L'utilizzo invece di intervalli più piccoli avviene quando, una volta individuata l'anomalia o il punto caldo, si vuole mettere in risalto solo quel particolare termico, perdendo così la geometria dell'intera foto (figura 5.4.f).

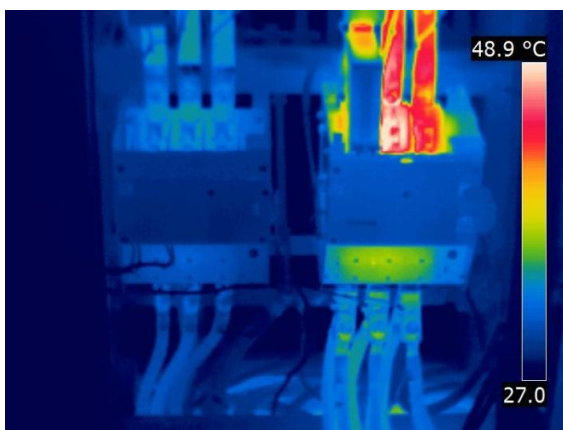


Figura 5.4.e

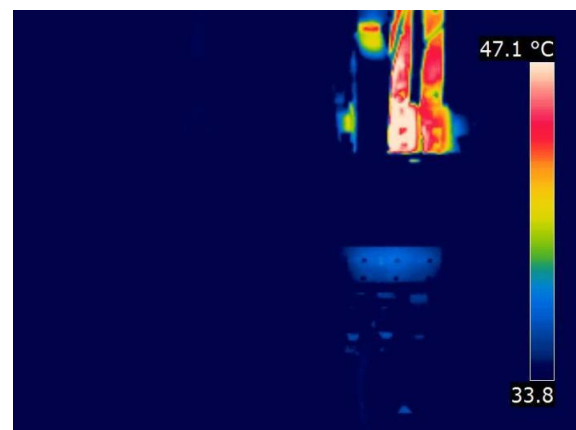


Figura 5.4.f

Come si vede dalle foto sopra mentre nell'indagine a sinistra con un ΔT più ampio, è presente anche il rumore esterno e la radiazione dell'ambiente circostante al componente caldo, nell'immagine di destra invece, il ΔT è stretto, eliminando il rumore esterno o in parte riducendolo man mano che l'intervallo si riduce; la geometria dell'oggetto invece si va via via perdendo, evidenziando così solo l'anomalia termica o il punto caldo.

Solitamente per un'analisi qualitativa si va quindi ad analizzare il componente con intervalli ampi, per fare invece analisi quantitative e più precise si utilizzano ΔT piccoli.

5.5. Software per l'interpretazione e correzione delle immagini termografiche

Come è stato più volte detto l'immagine termografica che lo strumento realizza è in "falsi colori".

La visualizzazione del risultato dell'elaborazione del sensore potrà essere immediata, nel caso lo strumento abbia incorporato uno schermo, solitamente LCD (con grandezza variabile a seconda del tipo di macchina), sul quale si possa visualizzare in tempo reale l'immagine dell'oggetto in analisi.

Nel caso in cui la termocamera non abbia un display incorporato, in genere strumenti per la ricerca e lo sviluppo o il monitoraggio industriale, la visualizzazione è tramite analisi remota: l'elaborazione dell'immagine viene fatta in un secondo momento tramite software nei quali si possono "manipolare" le immagini precedentemente salvate.

Con tali software si possono quindi eliminare o correggere eventuali errori modificando alcuni parametri: ε , *temperatura ambiente*, *umidità relativa*, *distanza di misura dall'oggetto*, *intervallo di temperatura*, allo scopo di ottenere una corretta messa a fuoco termica o per evidenziare punti caldi. Non è invece possibile modificare la messa a fuoco della macchina e quindi in caso di foto sfocate è necessario ripetere l'analisi.

6. APPLICAZIONI

6.1. Ambiti di utilizzo

La termografia può trovare numerosi campi di applicazione grazie alla sua versatilità nell'analizzare elementi che possono essere molto diversi tra loro. Un'immagine termica che includa dati accurati di temperatura fornisce ad un esperto di manutenzione importanti informazioni sulle condizioni dei dispositivi ispezionati. Queste ispezioni possono essere svolte con il processo produttivo in azione a pieno ritmo, e, in molti casi, l'uso di una termocamera può addirittura ottimizzarlo.

Le termocamere sono strumenti talmente validi e versatili che non è possibile elencarne tutte le possibili applicazioni, continuamente vengono sviluppati nuovi ed innovativi metodi di utilizzo di questa tecnologia.

Un elenco dei principali campi applicativi:

✓ ***Industria siderurgica, meccanica, produzione, processi termici***

Rilevamento dei profili di temperatura di prodotti in fusione;

Ispezione dei rivestimenti di refrattari nei forni per l'individuazione di eventuali cedimenti;

Verifica dell'efficienza di scambiatori di calore;

Ricerche su processi produttivi di materiali compositi, vetro, tessili, carta;

Verifiche su materiali compositi sottoposti a trattamenti termici o cicli di fatica;

Verifiche su saldature di metalli;

Manutenzione preventiva di cuscinetti, analisi surriscaldamento motori, assiali, cinghie e parti in movimento;

Individuazione attriti anomali;

Controllo in linea dell'uniformità di distribuzione del calore e umidità sui nastri carta;

Rilevamento discontinuità, stacchi e incollaggi difettosi in materiali compositi irraggiati con infrarossi;

Studio dell'isolamento/conduktività termica di strutture con plastica, ceramica, legno, ecc.;

Monitoraggio temperature nei processi di produzione e trasformazione alimentare;

Verifica coibentazione di veicoli frigoriferi, celle frigorifere, silos;

Controllo del processo di incenerimento rifiuti.

✓ ***Industria della plastica***

Analisi della distribuzione termica nel sistema di riscaldamento e raffreddamento stampi;

Termoformatura: analisi distribuzione termica prima della formatura e del prodotto finito;

Rilevamenti termografici della proforma e del finito nella soffiatura a caldo;

Mappatura termica della matrice di estrusione plastica e nel prodotto estruso;

Controllo temperatura dei rulli per l'estrusione di pellicole per uniformare lo spessore del film.

- ✓ ***Impiantistica industriale***
 - Controllo dell'isolamento di tubazioni, ciminiere, canali caldi;
 - Controllo scambiatori di calore;
 - Individuazione di perdite da valvole, giunti e flange.
- ✓ ***Industria degli elettrodomestici***
 - Controllo dell'uniformità delle temperature delle piastre elettriche riscaldanti e del loro isolamento termico;
 - Progettazione di recipienti con distribuzione ottimale del calore;
 - Misura della distribuzione termica e controllo di temperature irregolari in ferri da stiro, stufe elettriche, riscaldatori ad aria, pannelli riscaldanti, coperte elettriche, ecc.
- ✓ ***Industria elettronica***
 - Misura delle temperature sulla mappa termica di circuiti integrati;
 - Ottimizzazione della dissipazione del calore per piastre elettroniche;
 - Analisi della generazione di calore nei circuiti stampati.
- ✓ ***Produzione e distribuzione elettrica***
 - Individuazione sovratemperature anomale conseguenti ad aumenti delle resistenze di contatto o al malfunzionamento di componenti;
 - Controllo di conduttori elettrici facenti parte di sistemi per la produzione e distribuzione dell'energia elettrica;
 - Controllo di componenti d'impianto quali trasformatori, interruttori, sezionatori, terminali cavi, giunti e morsetti;
 - Individuazione di punti caldi nei collegamenti interni di quadri di distribuzione;
 - Controllo della coibentazione dei corpi caldaia delle centrali termoelettriche;
 - Controllo preventivo del surriscaldamento dei fusibili nei quadri elettrici;
 - Verifica del surriscaldamento di blindo-sbarra e blindo-ventilati;
 - Individuazione di sottodimensionamento cavi elettrici;
 - Analisi degli statori in fase di "loop test".
- ✓ ***Costruzioni ed impiantistica civile***
 - Controllo edifici per l'individuazione di perdite di calore causa insufficiente coibentazione di facciate o tetti;
 - Studio della mappa termica di dighe per la verifica dell'integrità;
 - Controllo della de laminazione dei ponti;
 - Individuazione dei distacchi di intonaco e delle tamponature nelle pareti;
 - Individuazione di danni da umidità in pareti e solai;
 - Individuazione di armature di ferro nel cemento armato;
 - Individuazione di strutture sotto l'intonaco nel restauro di edifici di valore storico;
 - Individuazione di perdite o anomalie nel teleriscaldamento o negli impianti dei servo mezzi, anche interrati;
 - Verifica del funzionamento di impianti di riscaldamento pavimenti e di sgelamento del suolo;
 - Valutazione della produzione di biogas nelle discariche rifiuti;
 - Rilevamento aereo di alterazioni termiche in fiumi o laghi, irrigazione del suolo, perdite da acquedotti o canali;
 - Mappatura dell'umidità del terreno e studio infiltrazioni d'acqua sub-superficiali.

6.2. Alcuni esempi applicativi

6.2.1. Sistemi elettrici

Le termocamere sono comunemente utilizzate per l'ispezione di sistemi e componenti elettrici di tutte le dimensioni e forme. La moltitudine di possibili applicazioni per le termocamere all'interno di sistemi elettrici può essere divisa in due categorie: installazioni ad alta e a bassa tensione.

Installazioni ad alta tensione

Il calore è un fattore importante nelle installazioni ad alta tensione. Quando la corrente elettrica attraversa un elemento che presenta resistenza, genera calore: ad una maggiore resistenza corrisponde un incremento di calore. Nel tempo la resistenza dei collegamenti elettrici aumenta, ad esempio a causa dell'allentamento e della corrosione, e il corrispondente incremento di temperatura può causare guasti ai componenti, determinando così inaspettate interruzioni di funzionamento e possibili incidenti, oltre che, inutili consumi dovuti all'energia spesa nel generare calore. Se non controllato, il calore può raggiungere un livello tale da far fondere i collegamenti e provocare guasti o incendi.

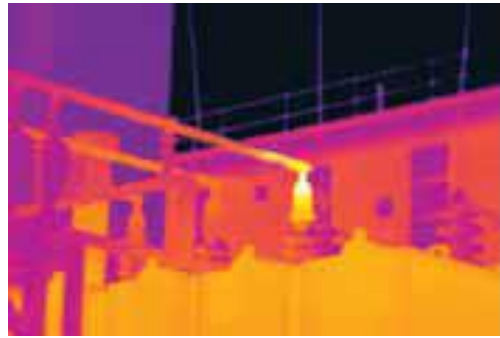


Figura 6.2.1.a - Immagine completa di una sottostazione che mostra rapidamente un'area con presenza di connessioni ad alta resistenza indesiderate

Tra gli esempi di guasti che sono rilevabili con le termocamere nelle installazioni ad alta tensione vi sono:

- Ossidazione di interruttori ad alta tensione
- Surriscaldamento dei collegamenti
- Fissaggio imperfetto dei collegamenti
- Guasto di isolatori

Una termocamera permette di identificare precocemente questi e molti altri problemi, può aiutare ad individuare con precisione il problema, valutarne la gravità ed aiutare a stabilire le tempistiche di intervento.

Uno dei principali vantaggi della termografia ad infrarossi in campo elettrico è la capacità di eseguire ispezioni con i sistemi elettrici sotto carico. Poiché la termografia ad infrarossi è un metodo di diagnosi senza contatto, un operatore termografico può ispezionare rapidamente un'apparecchiatura tenendosi a distanza di sicurezza, abbandonare poi l'area a rischio, ritornare nel proprio ufficio ed analizzare con calma i dati raccolti senza correre dei rischi.

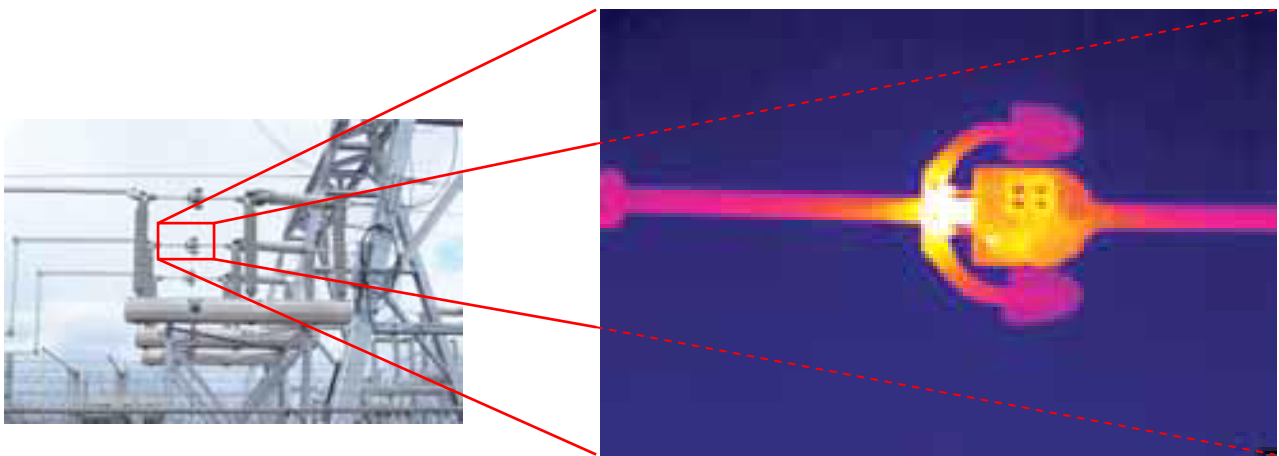


Figura 6.2.1.b - Le termocamere permettono di ispezionare installazioni ad alta tensione da una distanza di sicurezza, aumentando quindi la sicurezza dell'operatore

La continuità di esercizio è molto importante per i fornitori di servizi pubblici, perché vi fanno affidamento molte persone. Per questo motivo le ispezioni termografiche sono diventate il fulcro dei programmi di manutenzione predittiva dei fornitori di servizi pubblici di tutto il mondo.

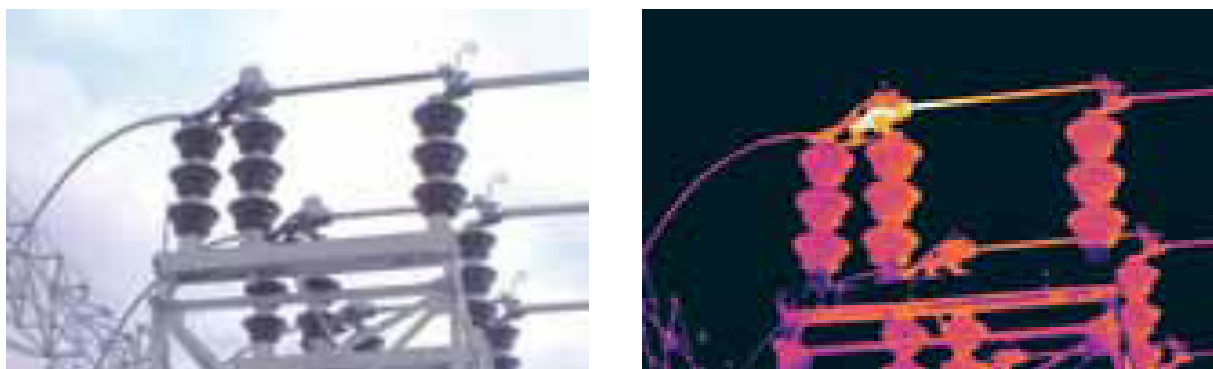


Figura 6.2.1.c - L'ispezione di una sottostazione rivela la presenza di componenti surriscaldati

Installazioni a bassa tensione

Le termocamere vengono utilizzate anche per il monitoraggio di impianti e componenti elettrici a bassa tensione: ad esempio quadri elettrici e quadri di controllo dei motori vengono regolarmente ispezionati con una termocamera. Se non controllati, il calore può raggiungere un livello tale da far fondere i collegamenti e provocare guasti o incendi.

Oltre ai collegamenti allentati, creano problemi ai sistemi elettrici anche gli squilibri di carico, fenomeni di corrosione, nonché incrementi nell'impedenza in rapporto alla corrente. Le ispezioni termografiche possono individuare rapidamente i punti caldi, valutare la gravità del problema ed aiutare a stabilire le tempistiche di intervento.

Tra gli esempi di guasti che sono rilevabili con le termocamere nei dispositivi a bassa tensione vi sono:

- Collegamenti ad alta resistenza
- Corrosioni dei collegamenti



Figura 6.2.1.d - Surriscaldamento dei collegamenti

- Danneggiamenti del fusibile interno

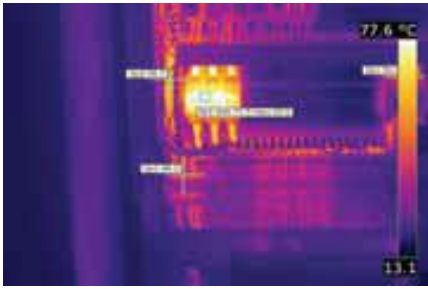


Figura 6.2.1.e - I fusibili visibili nell'immagine termica sono sovraccarichi e devono essere sostituiti

- Guasti interni agli interruttori automatici
- Collegamenti inefficienti e danni interni

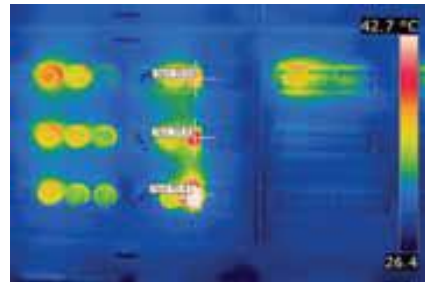


Figura 6.2.1.f - Questa immagine termica mostra un carico non equamente distribuito tra le scatole dei Fusibili

Una termocamera permette di identificare precocemente questi e molti altri problemi; ciò aiuta a prevenire costosi danni ed evitare situazioni di pericolo.

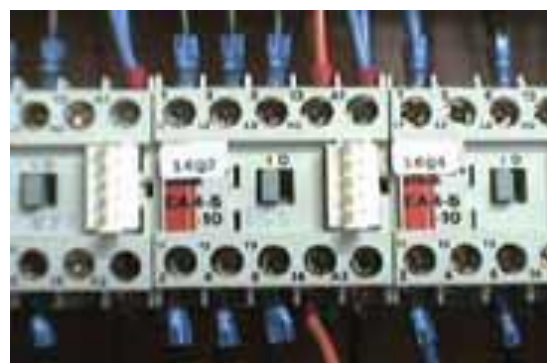
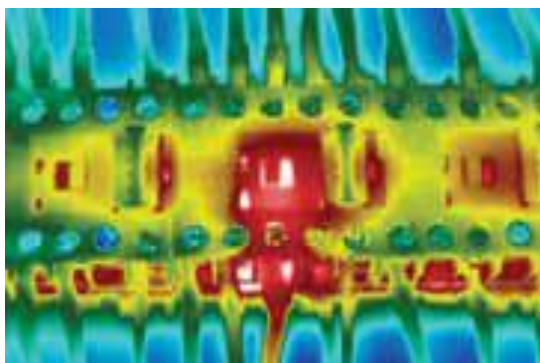


Figura 6.2.1.g - Il punto caldo indica un corto circuito, causa potenziale d'incendio

6.2.2. Installazioni meccaniche

Le applicazioni termografiche in campo meccanico sono generalmente caratterizzate da temperature di esercizio e di indagine molto elevate. L'indagine delle temperature necessita di particolari accorgimenti da parte dell'operatore; le applicazioni meccaniche si distinguono di solito per un accumulo di temperatura a seguito di fenomeni di attrito in corrispondenza del movimento di determinati componenti. Vengono spesso fatte indagini per la verifica di surriscaldamenti localizzati di cuscinetti a sfere o cinghie di trascinamento di componenti meccanici.

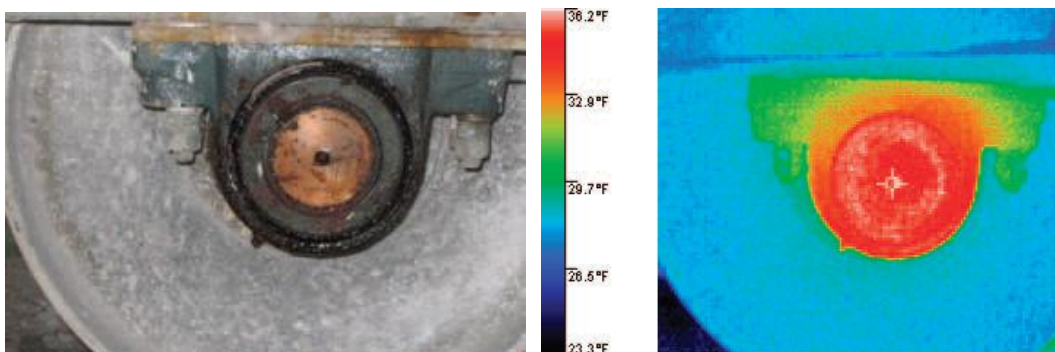


Figura 6.2.2.a - Il surriscaldamento localizzato può indicare difetto del cuscinetto, mancanza di lubrificazione, o disallineamento

L'indagine preventiva consente di ridurre in maniera significativa la quantità di ricambi presenti in azienda. Le aziende che non effettuano l'indagine termografica devono prevedere un adeguato magazzino ricambi in modo che, in caso di rottura di un componente, possano sostituire il pezzo senza dover fermare i macchinari e ritardare la produzione. L'azienda che invece effettua indagini termografiche, può verificare eventuali anomalie termiche in anticipo, ordinare il ricambio del componente interessato, e sostituirlo in occasione di interventi di manutenzione o fermi macchina programmati, evitando costose interruzioni della produzione.



Figura 6.2.2.b - Cuscinetto surriscaldato

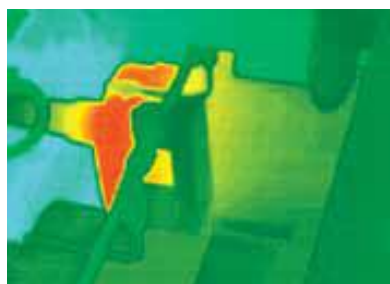


Figura 6.2.2.c - Motore: problema al cuscinetto

Dovendo l'operatore termografico effettuare riprese in ambiente dove sono presenti sorgenti ad alta temperatura, è necessario prevedere sistemi di schermatura per ridurre il più possibile gli effetti di riflessione sul componente da analizzare (figura 6.2.2.d), oltre che stimare al meglio l'emissività di quest'ultimo.

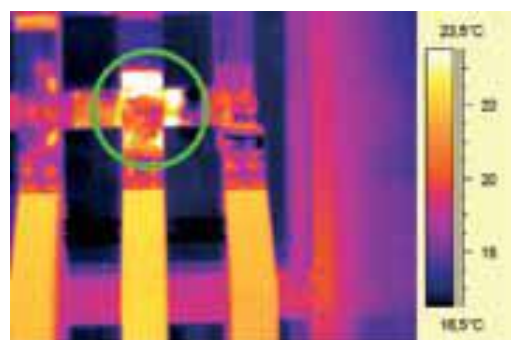
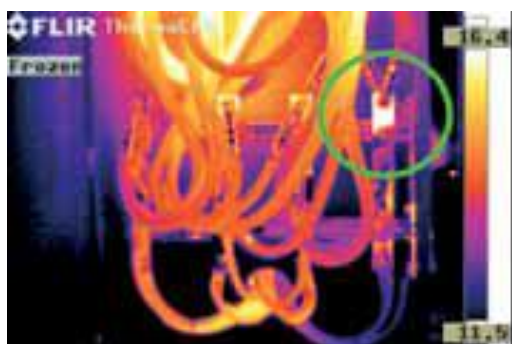


Figura 6.2.2.d - Questi due 'punti caldi' possono sembrare aree calde, ma si tratta di un riflesso di superfici metalliche non ossidate. Un segno distintivo è il fatto che i veri punti caldi mostrano solitamente una struttura uniforme, a differenza dei riflessi.

In campo meccanico, oltre alle applicazioni sui cuscinetti e sulle cinghie di trasmissione, sono frequenti analisi di tubi di distribuzione di temperatura, analisi di caldaie, analisi di alternatori e sistemi di produzione di energia elettrica, verifiche di livelli di serbatoi.

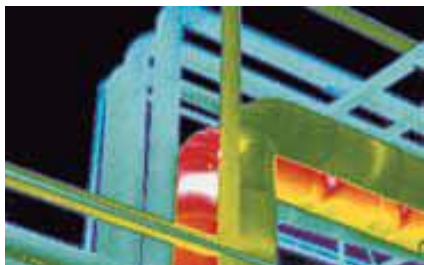


Figura 6.2.2.e - Isolamento danneggiato

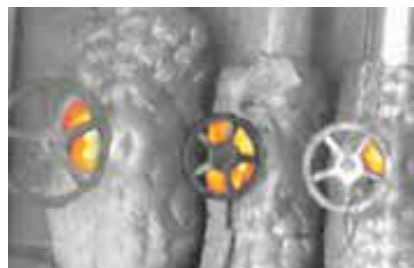


Figura 6.2.2.f - Fuoriuscita di calore in un'installazione a vapore causata da insufficiente isolamento

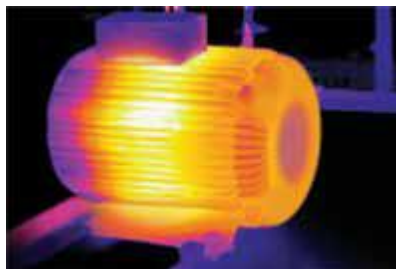


Figura 6.2.2.g - Motore: Problema nell'avvolgimento interno

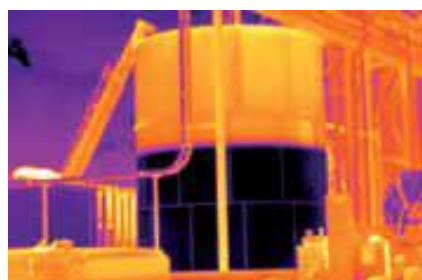
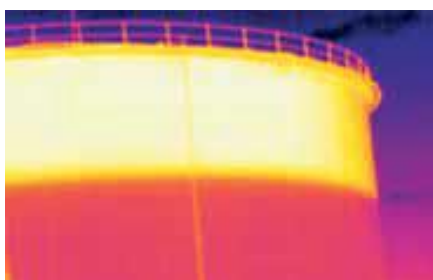


Figura 6.2.2.h - Queste immagini termiche mostrano chiaramente il livello dei liquidi nei serbatoi



Figura 6.2.2.i - Rulli a temperature sospette

Applicazioni interessanti di indagini termografiche in ambito meccanico sono quelle effettuate per le analisi di stampi per materie plastiche: le fasi di riscaldamento o raffreddamento dello stampo vanno a creare fessurazioni e tensioni nello stampo stesso, e l'analisi consente di mappare la distribuzione della temperatura per verificare eventuali anomalie.

Sono interessanti anche le applicazioni sui mattoni refrattari: vengono rilevate eventuali zone a temperatura anomala su forni di produzione di calce o cemento, causate da difetti del refrattario, che potrebbero causare fermi macchina se non addirittura il collasso del forno.



Figura 6.2.2.l - Ispezione dell'isolamento refrattario in un reattore petrolchimico

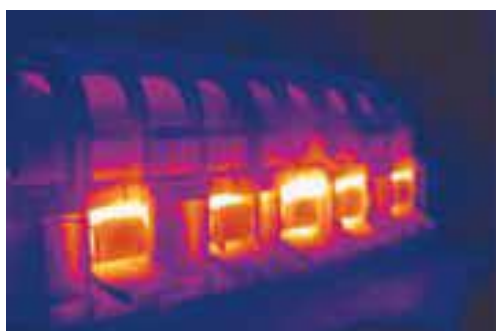


Figura 6.2.2.m - Difetto di isolamento in materiale refrattario



Figura 6.2.2.n - Decadimento di materiale refrattario in un forno rotativo per cemento



Figura 6.2.2.o - Ispezione del materiale refrattario nel camino di una camera di combustione

6.2.3. Settore edile

L'edilizia è uno dei campi in cui la termografia trova più spazio, grazie all'innumerabile varietà di interventi che può permettere o facilitare in questo settore. Di seguito ne viene citata una parte:

_ Difetti nascosti: la visione termografica di una struttura architettonica nel suo insieme, consente di visualizzare velocemente ed efficacemente

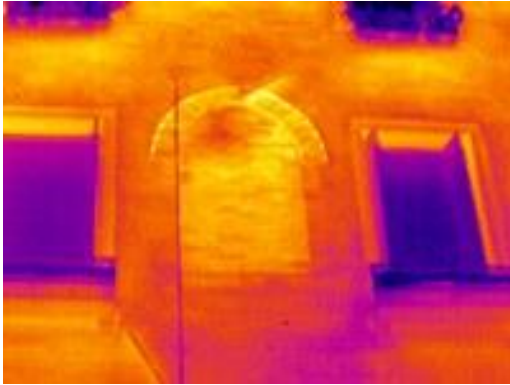


Figura 6.2.3.a - Esempio di struttura architettonica nascosta nella muratura

eventuali difetti strutturali. In questo modo è possibile mettere in evidenza la qualità e l'adeguata o l'inadeguata esecuzione dei lavori in opere edili. È possibile evidenziare strutture architettoniche nascoste nella muratura e successivamente tamponate, oppure risalire ad

interventi di manutenzione effettuati precedentemente al rilievo termografico stesso. Si può arrivare quindi a riprodurre la cronistoria dell'opera stessa, evitando sprechi di tempo ed azioni invasive per individuare le aree di possibile intervento.

_ Zone con umidità di risalita: la termografia è in grado d'individuare risalite d'umidità anche nella fase iniziale della loro manifestazione. Questa tecnica riesce ad individuare punti critici dal punto di vista igrometrico, evidenziando la presenza di zone non perfettamente asciutte e risulta indispensabile per documentare i collaudi delle nuove costruzioni, fornendo informazioni sul livello qualitativo generale.

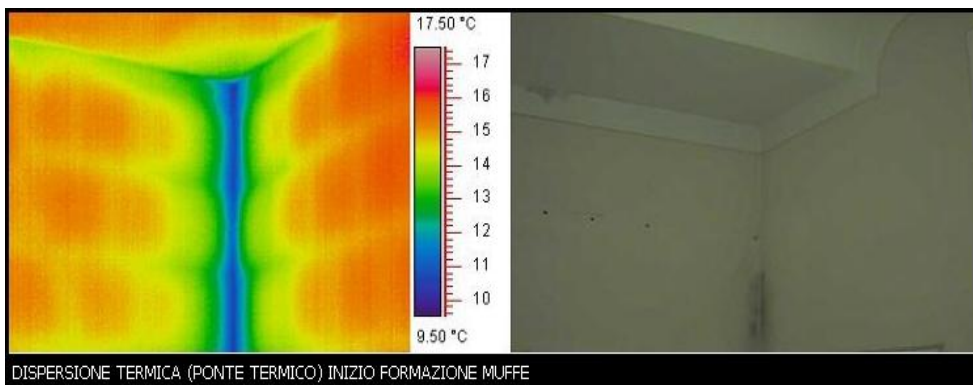


Figura 6.2.3.b

_ Risanamento delle opere: la termografia è uno strumento indispensabile per poter pianificare con precisione ed esattezza gli interventi nelle opere di risanamento. Attraverso l'immagine termografica è possibile verificare lo "stato di salute" della struttura da risanare: essendo un controllo non distruttivo consente infatti di non alterare lo stato in essere del complesso analizzato.

_ Valutazioni Energetiche: la termografia è in grado di evidenziare le zone degli immobili deboli dal punto di vista energetico. Individuare le zone con dispersioni d'energia importanti, permette di valutare l'efficienza energetica dello stabile pianificando gli interventi mirati al miglioramento energetico.

_ Restauro degli edifici: la termografia è in grado di fornire essenziali informazioni relativamente al restauro di edifici e monumenti. Le immagini termografiche, ad esempio, evidenziano le costruzioni reticolari ricoperte dall'intonaco. E' possibile quindi pianificare con assoluta precisione gli interventi di ripristino da effettuare.

_ Infiltrazioni d'acqua: le indagini termografiche sono in grado di rilevare punti dove l'acqua può infiltrarsi: sfruttando il principio dell'inerzia termica, si individuano le zone non perfettamente isolate, garantendo un intervento di ripristino relativamente economico e senza dover "distruggere alla cieca".



Figura 2.3.c - Infiltrazioni d'acqua

_ Ponti Termici: definiti come "parte di una struttura di un edificio con caratteristiche termiche e costruttive diverse da quelle degli elementi dell'edificio", incidono negativamente sull'isolamento di un edificio in quanto costituiscono una via privilegiata per gli scambi di calore da e verso l'esterno.

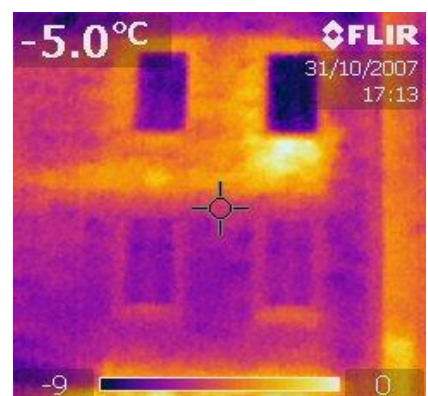


Figura 2.3.d

La termografia è in grado di rilevare suddette zone, dando precise indicazioni sulle zone interessate al fenomeno.

_ Serramenti: con una valutazione termografica e' possibile controllare e verificare sia se la validità termica della finestra corrisponde a quanto dichiarato dal produttore, sia se sia stata montata correttamente.

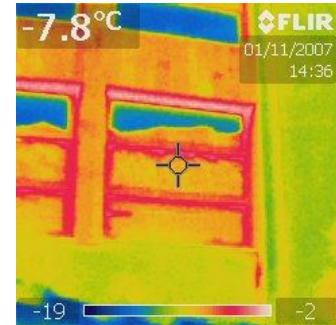


Figura 2.3.e – Verifica serramenti

Grazie all'indagine termografica condotta e' possibile inoltre, per le imprese di questo settore ma non solo, certificare il proprio operato.

6.2.4. Termografia negli impianti fotovoltaici

Le celle solari trasformano la luce solare in energia, tale processo genera anche calore. Le celle poco efficienti producono molto più calore, pertanto appaiono chiaramente come punti caldi nelle immagini termiche. Le cause di una scarsa efficienza in un pannello solare sono diverse: da impurità nel materiale semiconduttore dovute ad un difetto di fabbricazione, a celle rotte, vetro rotto, infiltrazione di acqua, punti di saldatura interrotti, file di celle consumate, diodi di bypass difettosi, connettori difettosi. Qualunque sia la causa, una termocamera aiuterà l'operatore a trovarne la locazione ed individuarne la natura.

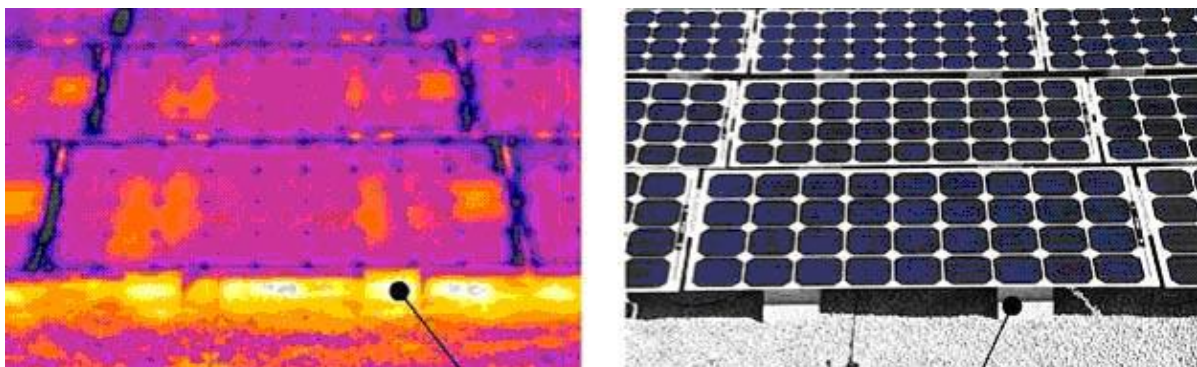


Figura 6.2.4.a – Celle difettose

Nel termogramma in figura 6.2.4.a si possono vedere le celle difettose, le quali sono di colore arancione, ben distinte dal resto del pannello. Gli impianti fotovoltaici funzionano al meglio ad una temperatura ambiente di 25°C, e temperature superiori riducono notevolmente il rendimento dell'impianto. Le celle al silicio, che compongono i moduli fotovoltaici, possono subire anche un calo di efficienza pari a circa 0,5% per °C.

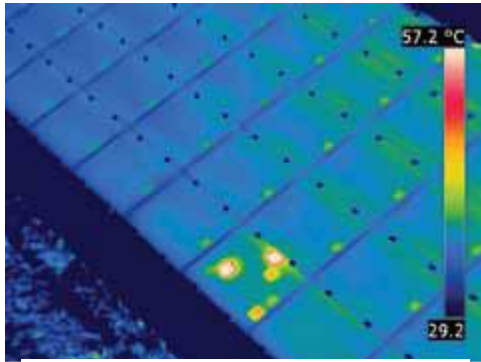


Figura 6.2.4.b - Presenza di più hot spots ravvicinati in un pannello

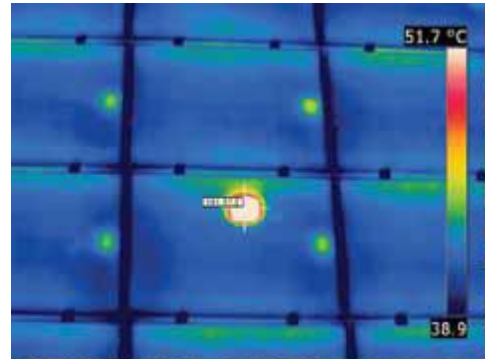


Figura 6.2.4.c – Singolo hot spot in un pannello

Le misurazioni termiche sulle superfici di vetro non sono facili da fare: si deve tenere in grande considerazione il corretto posizionamento della termocamera durante la misurazione. Le riflessioni sul vetro sono speculari, il che significa che oggetti rivestiti da vetro possono essere visti nell'immagine termica con temperature diverse da quelle reali. Nel peggiore dei casi questo si traduce in interpretazioni errate (falsi hot spots) ed errori di misura. Al fine di evitare la riflessione dello spettro termico, la termocamera non dovrebbe essere posizionata perpendicolarmente al modulo ispezionato. Tuttavia l'emissività è al suo livello più alto proprio quando la fotocamera è perpendicolare e diminuisce con un angolo crescente. Un angolo di visione che va dai 5 ai 60 gradi è un buon compromesso (ritenendo 0° la posizione perpendicolare).



Figura 6.2.4.d - Angolo di visione consigliato durante le ispezioni termografiche

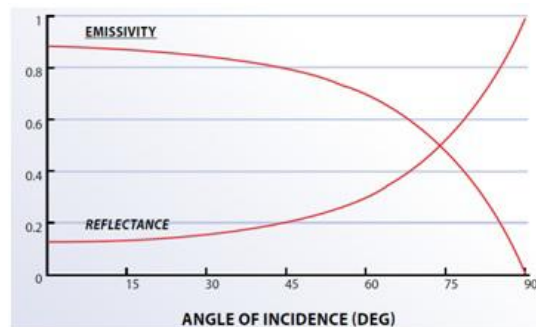


Figura 6.2.4.e - Dipendenza tra l'angolo di ripresa e l'emissività del vetro

Talvolta può essere utile osservare la parte posteriore di un pannello solare per evitare i riflessi. Poiché questo lato è solitamente quasi del tutto non riflettente, si può essere piuttosto certi che la temperatura rilevata dalla termocamera sia l'effettiva temperatura del pannello.



Figura 6.2.4.f - Foto del lato posteriore di un pannello fotovoltaico

7. TECNICHE IN CAMPO INDUSTRIALE

7.1. Termografia passiva

La prima legge della termodinamica è legata al principio di conservazione dell'energia e stabilisce che una certa quantità di calore è rilasciata da ogni processo (il nostro interesse maggiore sarà per i processi industriali ed è a questi che faremo in particolar modo riferimento) che consumi energia, a causa della legge dell'entropia. Ecco perché la temperatura può essere un parametro essenziale per controllare che un dato processo si stia sviluppando regolarmente.

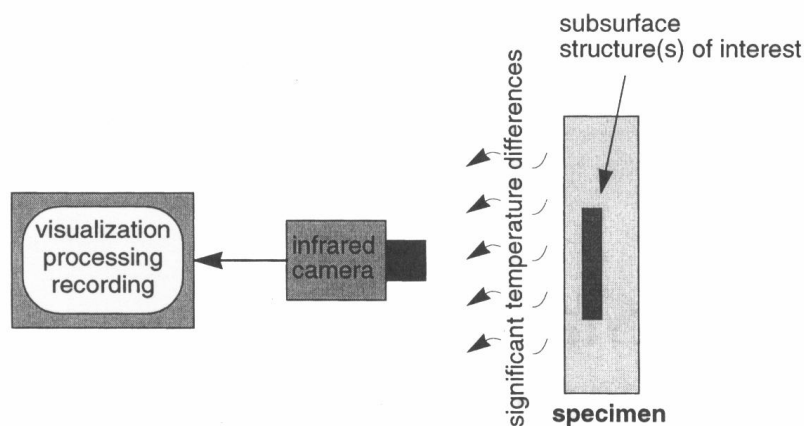


Figura 7.1.a - Schema Termografia PASSIVA

Nella termografia passiva, un profilo anomalo di temperatura indica un potenziale problema, e il termine chiave è una differenza di temperatura (rispetto ad un riferimento), spesso indicato come valore DT , o punto caldo. In generale la termografia passiva è qualitativa, poiché il suo fine è solo quello di evidenziare anomalie. Tuttavia alcune analisi possono fornire dati quantitativi se è disponibile un qualche modello matematico che metta in relazione le misure di temperatura superficiale (isoterme) con un evento o un comportamento specifico. Come si vede in figura 7.1.a, punto fondamentale di questa tecnica è l'assenza di una sorgente.

7.2. Termografia attiva

Nella termografia attiva è necessario fornire energia al campione sotto osservazione in modo da ottenere una significativa variazione di temperatura che metta in evidenza gli eventuali difetti; varie procedure possono essere seguite per far questo. In più l'analisi dei dati permette di estrarre informazioni quantitative sul campione ispezionato.

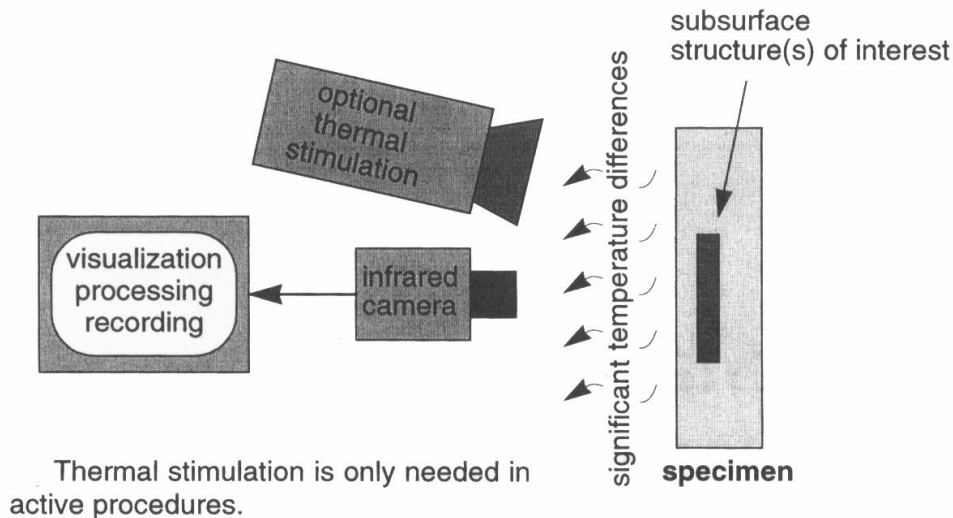


Figura 7.2.a - Schema Termografia ATTIVA

7.2.1. Termografia pulsata (PT – Pulsed Termography)

La termografia pulsata è una delle procedure più comuni di stimolazione termica utilizzate. Una delle ragioni risiede nella rapidità dell'ispezione, in cui si usa una breve stimolazione termica **Pulse** pulsata da pochi millisecondi per materiali altamente conduttivi (come i metalli) fino a pochi secondi per materiali poco conduttivi (come plastiche, laminati di grafite epossidica, ecc.).

In sintesi, consiste nel riscaldare brevemente il campione per poi registrare la curva di decadimento della temperatura, come mostra la figura 7.2.1.a.

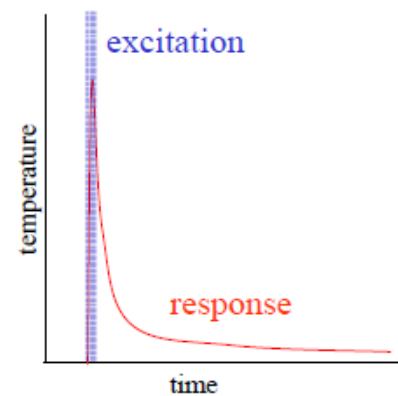


Figura 7.2.1.a - Schema Eccitazione/Rilevamento in Termografia Pulsata

Qualitativamente il fenomeno può essere descritto come segue: la temperatura del materiale cambia rapidamente dopo l'impulso iniziale poiché i fronti termici si propagano per diffusione sotto la superficie ed anche per perdite di radiazione e convezione. La presenza di un difetto sotto la superficie altera il tasso di diffusione, cosicché andando ad osservare la temperatura superficiale una volta che il fronte termico sia emerso, una diversa temperatura appare nella regione che sovrasta il difetto, rispetto alle zone circostanti.

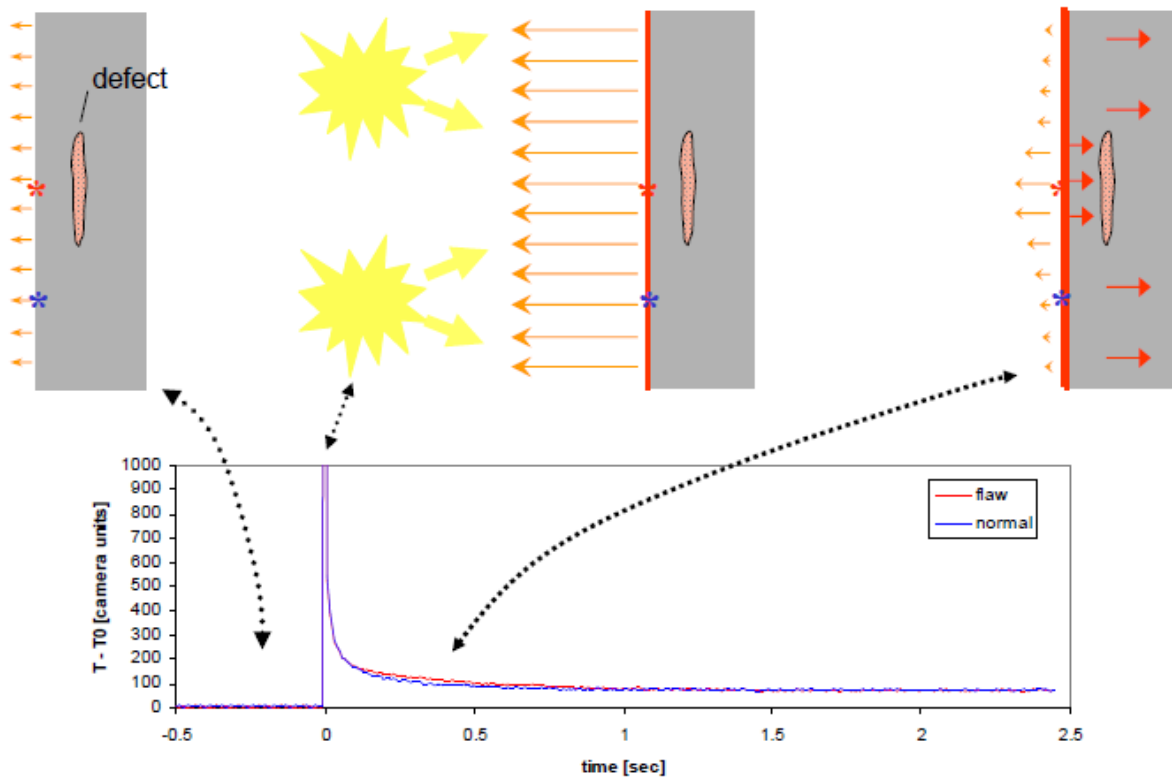


Figura 7.2.1.b - Schema Termografia Pulsata

Per quanto riguarda la profondità osservabile, questa è limitata, ma molti difetti, come le fratture ad esempio, spesso iniziano a svilupparsi proprio vicino alla superficie.

In base alla posizione della sorgente termica, si distinguono due modalità di indagine:

- ✓ *in riflessione*: sorgente e termocamera vengono posizionate dallo stesso lato rispetto alla superficie del campione (per la ricerca di difetti presenti sulla faccia anteriore);

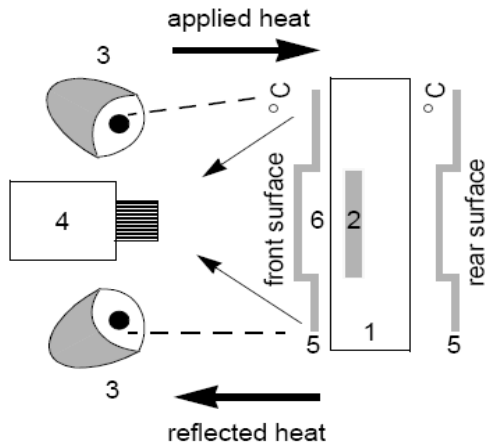


Figura 7.2.1.c - Modalità in RIFLESSIONE

- ✓ *in trasmissione*: sorgente e termocamera vengono posizionate su lati opposti rispetto alla superficie da indagare (per difetti presenti sulla faccia posteriore).

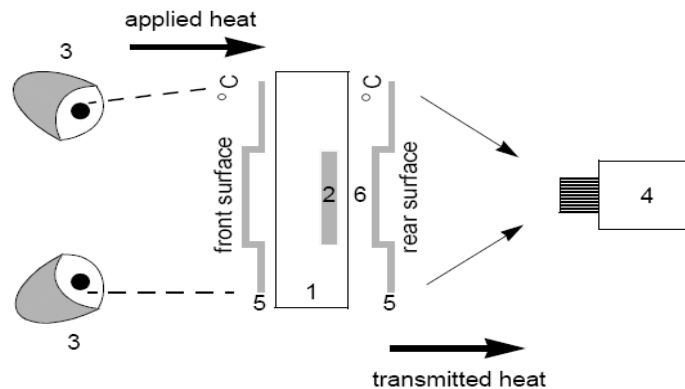


Figura 7.2.1.d - Modalità in TRASMISSIONE

7.2.2. Termografia Lock-in (LT – Lock-in Termography)

È basata sull'utilizzo di onde termiche generate all'interno del materiale sotto esame e la loro rilevazione remota. La generazione delle onde termiche è ottenuta tramite riscaldamento periodico (ad es. attraverso una lampada modulata sinusoidalmente), mentre il campo di temperatura oscillante, risultante in regime stazionario, è rilevato in modo remoto attraverso la ricezione degli infrarossi.

Lock-in è riferito alla necessità di registrare la dipendenza del segnale di uscita da quello di ingresso (il riscaldamento modulato). Questo si può fare con un amplificatore lock-in nel caso di riscaldamento punto-punto tramite laser o attraverso un elaboratore nel caso di riscaldamento a campo intero tramite lampada. Così si giunge alle immagini del campo di temperatura, che

sarà di tipo oscillatorio anch'esso; caratterizzato da una fase, che può essere messa in relazione con il tempo di propagazione, e da un'ampiezza, che viene messa in relazione con la diffusività termica.

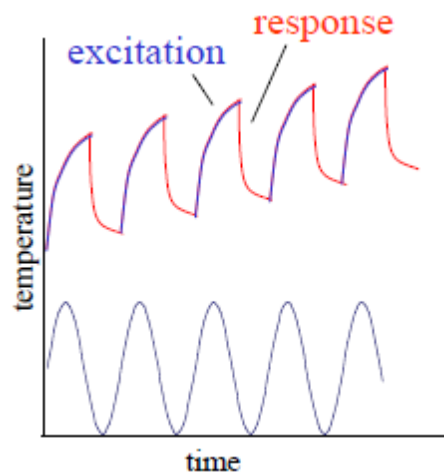


Figura 7.2.2.a - Schema
Eccitazione/Rilevamento in Termografia
Lock-in

Termografia Lock-in a induzione:

la sollecitazione termica viene generata sfruttando il principio delle correnti parassite (o indotte) generate in masse metalliche conduttrici immerse in un campo magnetico variabile (o che si muovono all'interno di un campo magnetico costante). La profondità di penetrazione dipende dall'effetto pelle, ovvero dalla tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi all'interno di un conduttore in modo non uniforme. Le eventuali cricche presenti sul campione aumentano localmente la densità della corrente, portando all'individuazione del difetto nell'immagine termica.

Termografia Lock-in ad ultrasuoni:

si utilizza il calore generato da una sorgente di ultrasuoni come sistema di eccitazione. Il principio di funzionamento è basato sul riscaldamento localizzato nella zona interessata dal difetto mediante l'assorbimento di onde ad ultrasuoni di elevata energia.

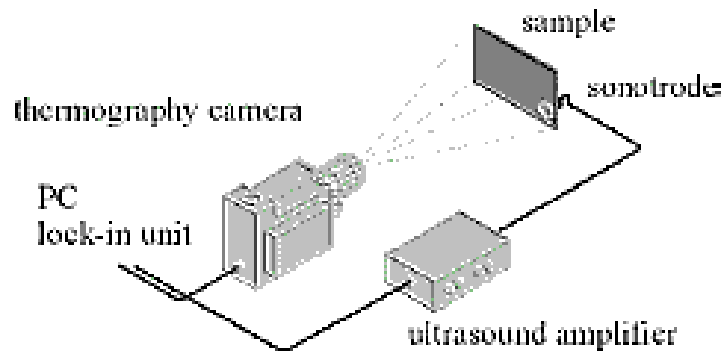


Figura 7.2.2.b - Schema Termografia Lock-in ad ultrasuoni

7.2.3. Riscaldamento a gradini (SH - Step Heating)

In questo caso, l'incremento della temperatura superficiale è osservato durante l'applicazione di un gradino termico di lunga durata (impulso lungo). Trova impiego soprattutto in applicazioni quali la stima dello spessore dei rivestimenti (compresi quelli multistrato, cioè quelli composti da più materiali), ispezione del legame tra rivestimento e substrato o studio di strutture composite.

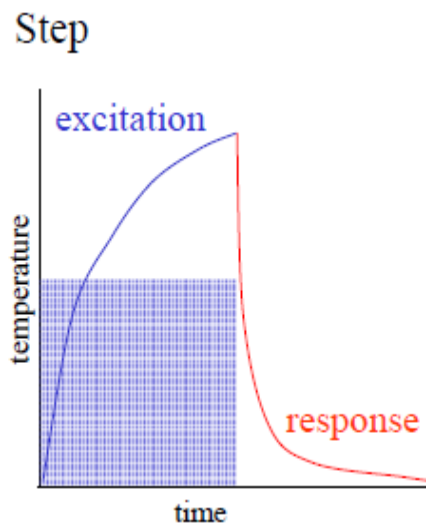


Figura 7.2.3.a - Schema Eccitazione/Rilevamento in Termografia a Gradini

7.2.4. Transient Thermography

Può essere vista come una combinazione della termografia lock-in e della step heating. Il campione è riscaldato con un impulso di lunga durata e sia il riscaldamento che il successivo raffreddamento vengono registrati per ricavare informazioni di fase ed ampiezza tramite analisi di Fourier delle sequenze locali di dati temporali. Si ottiene, quindi, qualcosa di simile alla termografia lock-in, solo che si hanno immagini per più frequenze e non per una sola.

7.2.5. Vibrotermografia (VT - VibroThermography)

Questa tecnica sfrutta il calore che si sviluppa in corrispondenza di fratture o cricche per effetto della frizione indotta in esse da vibrazioni meccaniche applicate dall'esterno al campione da analizzare. L'energia meccanica si converte in energia termica; i difetti vengono sollecitati in corrispondenza di specifiche risonanze meccaniche, potendo poi risuonare indipendentemente dal resto della struttura. Anche se nella maggior parte dei casi viene utilizzata una frequenza di eccitazione fissa, si potrebbe, cambiando le frequenze, andare a cercare differenti gradienti termici locali.

Un esempio applicativo si ha nel caso della ricerca di danni sotto la superficie nelle strutture portanti di edifici e di macchinari: si sottopone il materiale ad una serie di vibrazioni oscillanti tra le 15000 e le 30000 volte al secondo, dopodiché si analizza termograficamente la struttura. I punti dove si registra una temperatura superiore, a determinate frequenze, sono quelli danneggiati o quelli che potrebbero in seguito produrre fratture.

8. CONCLUSIONI

Alla luce di quanto detto finora, la termografia all'infrarosso è considerata uno strumento molto efficace ed efficiente, oltre che in continua evoluzione, per l'individuazione di problemi di varia natura, applicabile in un'enorme varietà di ambiti e situazioni. Questa tecnica ha come vantaggio più significativo, soprattutto in campo industriale, il fatto di permettere un salto di qualità nel campo della manutenzione preventiva. Grazie ad un uso programmato e competente della termografia ad infrarossi infatti, è possibile analizzare componenti e strutture sia in fase di produzione che di utilizzo, prevedere eventuali difetti e rotture, e di conseguenza evitare da una parte la produzione di pezzi difettosi, e dall'altra bruschi stop della produzione (con conseguente danno economico). Un unico guasto può causare il blocco di un intero impianto, con conseguenti costi di mancata produzione o disservizio, risulta evidente perciò il vantaggio derivante dalla possibilità di evitare fermi macchina, necessari per la sostituzione delle parti danneggiate, inevitabili sino al ripristino delle condizioni di esercizio dopo il danneggiamento.

Una caratteristica fondamentale che rende questa tecnica di controllo uno strumento sempre più utilizzato è la sua "adattabilità" ad una serie di campi applicativi differenti: oltre che in ambito industriale infatti, è sempre più sfruttata e sperimentata per diagnosi di veterinaria e medicina, oltre che affinata nel campo dell'edilizia, nel quale risulta utile in una varietà di situazioni sempre più elevata. La termografia a infrarossi si è rivelata uno strumento impareggiabile per affrontare e risolvere inoltre una vasta gamma di questioni e problemi scientifici: grazie alla capacità di analisi non distruttiva, i sistemi termografici sono un importante strumento per molte applicazioni anche nel settore della ricerca e sviluppo.

Quindi, nonostante la scelta di una termocamera ad alto rendimento possa implicare un rilevante investimento, al quale vanno sommati i costi derivanti dalla formazione di operatori specializzati, l'uso della termografia genera fin da subito significativi vantaggi e risultati per ogni

programma di manutenzione predittiva, ed in breve tempo produce un risparmio tale da coprire l'investimento iniziale.

9. BIBLIOGRAFIA

- “La termografia per l’edilizia e l’industria”, Guido Roche, Maggioli Editore, maggio 2012
- “Nondestructive Evaluation and Quality Control”, ASM Metals Handbook Volume 17, 1992
- Università degli studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DIMECA), slide dell’ing. Massimiliano Pau
- www.ndt-ed.org
- www.brera.unimi.it
- www.diagnositermografiche.it
- www.associazionetermografia.it
- “Active Thermography for Nondestructive Testing”, Vetorix Engineering S.r.l.
- “La termografia e suoi ambiti di applicazione”, Teorema S.r.l.
- Politecnico di Milano, “Termografia all’infrarosso”, Ing. Emanuele Zappa
- Università Federico II di Napoli, “Infrared Thermography for Flow Visualization and Heat Transfer Measurements”, Giovanni M. Carlomagno e Luigi de Luca
- “Guida tascabile sulla termografia”, www.testo.it, maggio 2011
- www.rotfil.com
- “Manuale per la termografia ad infrarossi per applicazioni industriali”, FLIR Systems AB, 2011
- www.fluke.com/library
- Università degli studi di Palermo – “Metodi NDT basati sulla Termografia ad Infrarossi”, Ing. Giuseppe Pitarresi, 2009
- “Termodinamica e trasmissione del calore”, Yunus A. Çengel, McGraw-Hill Libri Italia S.r.l.