Approfondimento C1.2 – La termografia

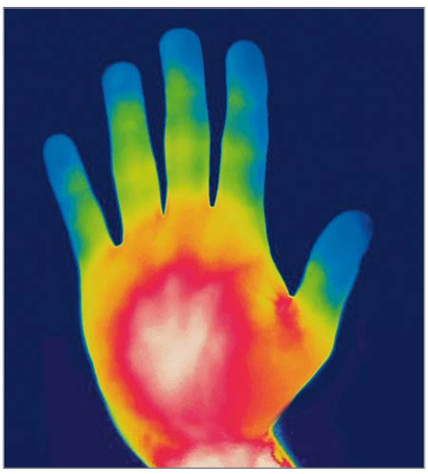
Tra le tecniche di indagine strumentale che accompagnano un lavoro di rilievo architettonico la termografia è oggi uno dei sistemi più utilizzati, e si classifica come **tecnica non distruttiva** in quanto non richiede alcun prelievo di campioni.

Termografia letteralmente significa "scrivere con il calore": infatti con essa siamo in grado di "leggere" immediatamente il comportamento termico superficiale di una zona, di un corpo o di un elemento edilizio rispetto all'insieme di cui esso è parte.

Per capire e approfondire su cosa si basa questa tecnica di indagine è necessario ricordare come si trasmette il calore nei corpi solidi, liquidi e gassosi.

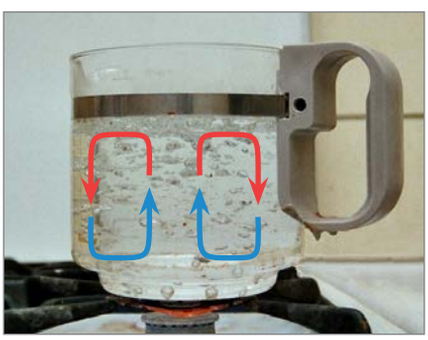
Ogni corpo caldo trasmette energia termica secondo 3 modalità fisiche:
- conduzione;
- convezione;
- irraggiamento.

La **conduzione** è il fenomeno di trasmissione di calore nei solidi, quando questi abbiano una diversa temperatura e siano a contatto diretto tra loro: si pensi ad esempio a un ferro da stiro oppure a una mano appoggiata a un vetro o a una superficie fredda: la distribuzione dei colori evidenzia le zone a contatto diretto che trasmettono una quantità di calore maggiore; tale quantità dipende dalla conducibilità termica del materiale. Se la superficie fosse costituita da un pannello di isolante il valore sarebbe il minimo (0,03 W/mk) mentre se la superficie fosse placcata di argento il valore sarebbe il massimo (420 W/mk).



Trasmissione di calore per conduzione.

La **convezione** è il fenomeno di trasferimento di calore nei fluidi, liquidi o gas, posti a differenti temperature, ed è un modo più veloce della conduzione. La convezione può essere forzata quando il movimento circolatorio è generato da un'agente esterno come, per esempio, un ventilatore, una pompa o il vento. Si parla invece di convenzione naturale (o libera) quando il moto è generato da forze interne ai fluidi, come le forze di galleggiamento o quelle centrifughe.



Trasmissione di calore per convenzione naturale.

L'**irraggiamento** è l'effetto di trasmissione del calore più veloce - poiché avviene alla velocità della luce - e più potente perché investe sia i corpi solidi, che liquidi, che aeriformi. Per immaginare gli effetti dell'irraggiamento pensiamo ad un auto parcheggiata al sole e ricordiamo che l'irraggiamento può avvenire anche se tra i due corpi è interposto un mezzo di separazione più freddo (cosa che non è possibile per la conduzione e la convezione, dove il contatto deve essere diretto e il passaggio di calore avviene sempre nel verso delle temperature decrescenti).

Termogramma di una macchina parcheggiata sotto il sole (Foto: U.S. Navy). I colori indicano temperature differenti: giallo e rosso quelle più calde e blu le più fredde.

Questi tre sistemi non si escludono a vicenda ma concorrono nella maggioranza dei casi.

Irraggiamento emisferico

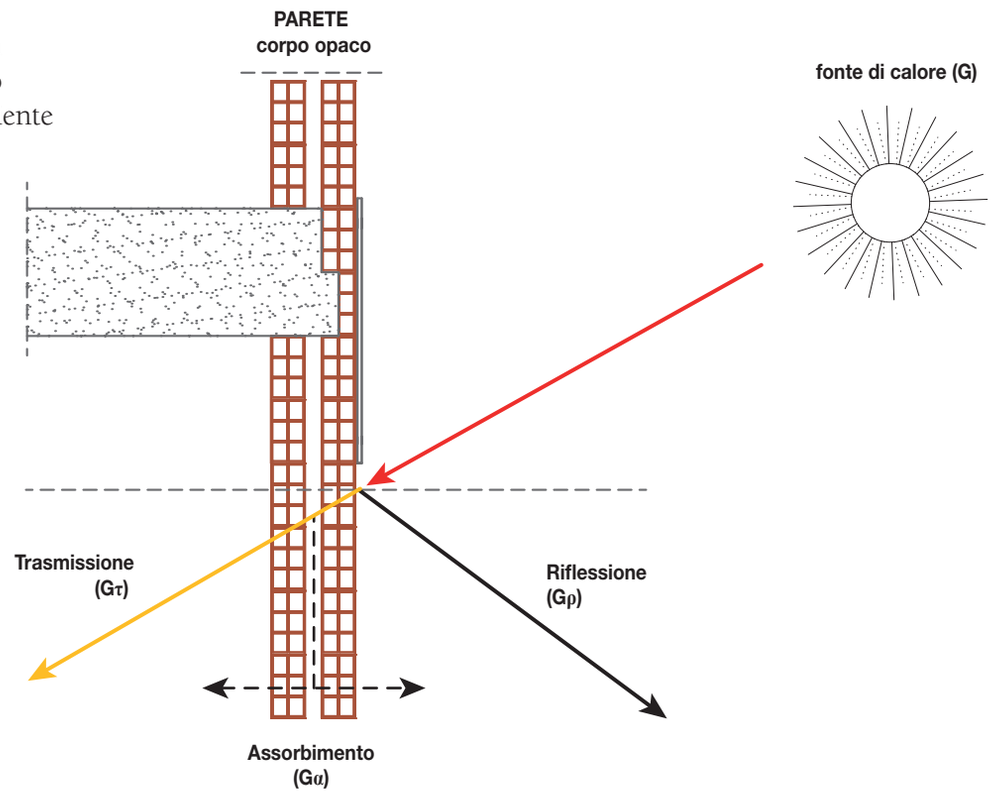
Nell'irraggiamento si distinguono tre componenti: l'**irradiazione** (**G**), l'**emissione di radiazione propria del sistema** (**E**) e la **radiosità** che possono essere ulteriormente approfondite dal docente di fisica (o nell'ambito della disciplina *fisica tecnica e impianti*, a seconda delle scuole).

Quando **G**, cioè la potenza termica che riscalda un corpo per unità di tempo e superficie, investe una superficie – ad esempio una parete edilizia per rimanere

Approfondimento C1.2 – La termografia

nel campo del rilievo architettonico – essa rappresenta **tutta** l'energia incidente, e cioè un **flusso elettromagnetico** proveniente da tutte le direzioni.

Ma (**G**) è la somma di tre componenti riconoscibili nello schema seguente:



• **Gα**, cioè la quota di energia **assorbita** dalla parete;
• **Gτ**, cioè la quota di energia che viene **trasmessa** attraverso la parete;
• **Gρ**, cioè la quota di energia che viene **riflessa**.

Quindi:

G= Gα + Gτ + Gρ = 100%
(radiazione elettromagnetica che si misura in **W**, watt)

L'entità o il "peso" di queste quote in relazione all'energia totale incidente (per unità di tempo e superficie ricordiamolo), dipende dalle proprietà fisiche del corpo, identificate da:

• **coefficiente di assorbimento α**, cioè la capacità del corpo di assorbire calore;

• **coefficiente di trasmissione τ**, cioè la capacità del corpo di trasmettere calore;

• **coefficiente di riflessione ρ**, cioè la capacità del corpo di riflettere calore.

La relazione precedente si può anche scrivere così:

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

Il coefficiente **τ** indica la **trasmissività** di un corpo cioè la parte di energia che lo attraversa caratterizzata dall'essere **energia infrarossa**, ovvero energia che sconfina la banda[1] del visibile ad occhio nudo e si estende al campo infrarosso[2].

Nella maggior parte dei materiali edilizi la quota di energia trasmessa è considerata nulla (**τ** = 0): perfino il vetro è considerato un corpo opaco nel campo delle onde lunghe (*long wave*) mentre è trasmissivo nel campo delle onde corte (*short wave*).

Si può quindi assumere l'equazione caratteristica: $\alpha + \rho = 1$

[1] Lo spettro elettromagnetico è diviso in bande (fasce) in funzione della lunghezza d'onda (**mμ**) del flusso di energia.
[2] L'infrarosso è quel settore dello spettro solare che confina con la parte più esterna del rosso visibile e i cui raggi comprendono la gamma di onde che vanno da circa 730 m**μ** fino a circa 400.000 mμ.

© 2015 Franco Lucisano Editore • N. Fava - Geometria e disegno - Volume 2

Approfondimento C1.2 – La termografia

Emissione termica

Riassunto di quanto abbiamo affrontato e ulteriore passo avanti per capire la termografia: ogni corpo riscaldato a una certa temperatura, o che si trovi comunque a una temperatura superiore allo zero assoluto, **emette una radiazione elettromagnetica** che può avere valori di lunghezza d'onda molto vari.

Dalla superficie di una parete (o da un qualsiasi corpo) viene emessa dunque una radiazione (**E**) che si manifesta in tre modi:
- **Eε**, cioè la quota di energia emessa dalla parete;
- **Eτ**, cioè la quota di energia che viene trasmessa;
- **Eρ**, cioè la quota di energia che viene riflessa.

Quindi, l'energia totale uscente, è:

$$E = E\varepsilon + E\tau + E\rho = 100\%$$

Per quanto riguarda la **quantificazione** della quantità di calore emessa da una superficie si assume come riferimento convenzionale il **corpo nero**, cioè un assorbitore ideale di energia, dotato di un coefficiente di assorbimento $\alpha = 1$ e di coefficienti di trasmissione e riflessione **nulli** ($\rho = 0, \tau = 0$).

La **legge di Boltzmann**[3] cioè:

$$q = \sigma T^4$$

dove:
- **q** è l'emittenza, cioè la potenza emessa per unità (W/m^2),
- **σ** è la costante di Boltzmann,
- **T** è la temperatura,

stabilisce quale relazione intercorre tra la temperatura e l'energia irradiata da un corpo nero: in questo ambito ci limitiamo solo a sottolineare che, per esprimere le caratteristiche di emissione e di assorbimento delle superfici reali che vogliamo studiare – perché saranno oggetto di una termografia – viene utilizzato come riferimento il corpo nero.

Le pareti reali sono costituite da superfici *grigie*, cioè da materiali che emettono una quantità di energia inferiore rispetto a quella emessa da un corpo nero posto alla stessa temperatura: questa quantità dipende dall'**emissività** (**ε**) che è il rapporto tra l'emissione termica di una superficie e la massima teorica possibile alla stessa temperatura.

L'emissività (**ε**) è quindi un coefficiente legato alle proprietà fisiche e ottiche della superficie del corpo il cui valore è compreso tra lo **0** (per i corpi idealmente **bianchi**) e **1** (per i corpi idealmente **neri**). Una superficie dotata di elevata emissività termica possiede la capacità di dissipare efficacemente il calore verso l'ambiente su cui si affaccia.

La **legge di Kirchhoff**[4] stabilisce una corrispondenza tra l'emissività (**ε**) e il coefficiente di assorbimento (**α**): la relazione $\varepsilon = \alpha$ indica che un corpo caratterizzato da elevate capacità di assorbire calore sarà anche un buon emettitore di calore e, viceversa, un corpo che assorbe poco calore ne emetterà poco.

Ma perché è importante l'emissività nella termografia?

Perché il valore (**ε**) è l'indicatore di come si distribuisce la temperatura superficiale di un corpo misurando l'intensità di emittenza infrarossa proveniente dalla superficie stessa, e una termocamera è in grado di tradurre le misure in rappresentazioni efficaci.

Il valore (**ε**) è fortemente influenzato dai materiali di cui è composto il corpo (immaginiamo una qualsiasi parete edilizia all'interno della quale possono coesistere diversi strati di materiali diversi!).

In linea generale i metalli hanno un valore (**ε**) abbastanza contenuto mentre tutti gli altri materiali utilizzati in edilizia hanno valori piuttosto alti (che sono cioè più vicini a **1** che a **0**). Se pensiamo all'uso estensivo delle murature in laterizio comune o al calcestruzzo per le componenti strutturali constatiamo che i valori si attestano su un intervallo compreso tra 0,80 e 0,96.

E ancora: la superficie di un pavimento in legno assorbe ed emette più del 90% dell'energia termica mentre meno del 10% è riflessa o trasmessa, e questo spiega da sé il grande comfort abitativo che un parquet offre rispetto ad altre soluzioni di pavimentazioni.

Quando si fa un'analisi termografica, tuttavia, non bisogna prendere alla lettera i dati di emissività riportati nella cosiddetta *letteratura*: infatti i valori ef-

[3] Argomento correlato da approfondire con il docente di fisica in una didattica interdisciplinare.
[4] Argomento correlato da approfondire con il docente di fisica in una didattica interdisciplinare.

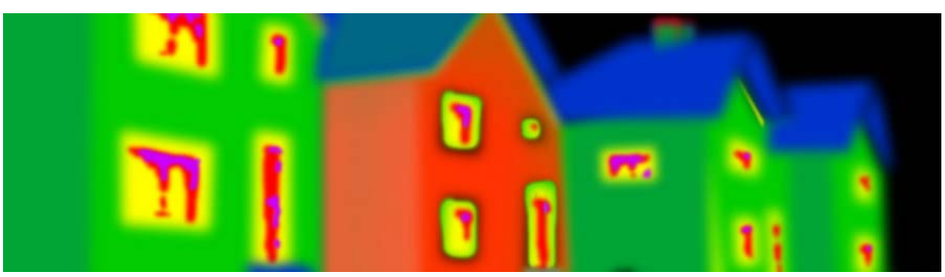
© 2015 Franco Lucisano Editore • N. Fava - Geometria e disegno - Volume 2

Approfondimento C1.2 – La termografia

fettivi dipendono da variabili correlate strettamente allo stato di conservazione della superficie del materiale. In altri termini lo stato di ossidazione, lo stato di pulizia, la rugosità o altre caratteristiche legate al tipo di finitura possono incidere notevolmente sulla temperatura superficiale e quindi sul valore di (**ε**). Passiamo brevemente in rassegna i principali condizionamenti del valore effettivo di **ε**:

- il **colore** della superficie, infatti se misuriamo un provino dello stesso materiale dipinto con colori chiari e scuri constatiamo valori decisamente maggiori per questi ultimi (viceversa, i materiali con colorazioni naturali chiare hanno una minore emissività, come si nota nelle immagini termografiche sottostanti);
- la **geometria del corpo**, infatti gli oggetti concavi e le parti forate hanno un'emissività molto più alta del resto della superficie del provino.
- l'**angolazione di ripresa** della fotografia (cioè l'angolo di incidenza tra superficie e posizione di ripresa dell'operatore): il massimo valore di emissività si ha quando l'oggetto-superficie è perpendicolare alla termocamera.

Materiale	Superficie	Emissività (ε)	Temperatura (K)
Acciaio Inossidabile	Lucidata	0,17-0,30	300-1000
	Leggermente ossidata	0,30-0,40	600-1000
	Molto ossidata	0,70-0,80	600-100
Alluminio	Lucidato	0,04-0,06	300-900
	Anodizzato	0,8	300
Asfalto	---	0,85-0,96	300
Calcestruzzo	---	0,88-0,94	300
Ferro	Ferro battuto	0,28	300-500
	Ghisa	0,44	300
	Arrugginito	0,61	300
	Ossidato	0,64-0,78	500-900
Laterizio	Argilla refrattaria	0,75	1200
	comune	0,93-0,96	300
Legno	Faggio	0,94	300
	Quercia	0,90	300
Terreno	---	0,93-0,96	300
Vetro	Float	0,90-0,95	300



Le macchine termografiche a raggi infrarossi

Una termocamera è composta da un dispositivo ottico, un sensore sensibile alla radiazione infrarossa, un'unità di scansione e un software di gestione e controllo dei dati.

Nelle termocamere portatili, in uso nell'ambito del restauro, del rilievo architettonico e della diagnosi energetica, il sensore è composto da materiali metallici sensibili ad uno spettro elettromagnetico ampio. Il sensore rileva i segnali termici e li trasmette all'unità di scansione che a sua volta li invia al sistema che li trasforma in un'immagine termica, cioè un **termogramma** (un'immagine a due dimensioni dove falsi colori rappresentano l'andamento delle temperature superficiali).

È fondamentale la scelta della banda di sensibilità, cioè l'intervallo di lunghezze d'onde elettromagnetiche che il sensore è in grado di rilevare: **nel settore edilizio si usano macchine sensibili alle onde lunghe** (*Long Wave* - **LW**) perché le **LW** hanno il minimo assorbimento atmosferico con temperature inferiori a 100°C.

Approfondimento C1.2 – La termografia

Altri parametri da tenere in considerazione nell'acquisto di una termocamera utile in campo edilizio sono:

1) la risoluzione del sensore: da un minimo di 160×120 pixel per termogrammi in ambienti interni a 320×240 pixel per rilevazioni in ambienti esterni;

2) l'intervallo di misura (*thermal range*), cioè il valore massimo e minimo di temperatura entro il quale lo strumento è calibrato per eseguire il rilievo. Qui entra in campo, ovviamente, l'uso specifico che prevediamo di dover fare con la nostra termocamera cosicché, se un intervallo dai –20 °C ai 60 °C è opportuno per le diagnosi energetiche, nelle indagini impiantistiche i valori sono ovviamente anche più alti di 100 °C e quindi l'intervallo di misura deve essere adeguato;

3) il campo visivo dell'apparecchio, cioè il valore che indica la porzione di spazio inquadrabile con la termocamera: esso dipende dall'ampiezza degli angoli di osservazione orizzontale e verticale (*Angular Field Of View*, **AFOV**).

Gli strumenti adatti all'impiego nel settore edilizio, che operano con lo spettro elettromagnetico a onde lunghe, possono avere un dispositivo ottico statico o girevole.

Nel primo caso l'apparecchio è dotato di un'impugnatura "a pistola" adatta a rilievi di piccole dimensioni, a studi archeologici, o analisi parziali di involucri edilizi o di impianti idrici, elettrici o termici. Nel secondo caso l'aspetto dello strumento è più compatto e, con un grandangolo o un teleobiettivo montato, si dispone dello strumento più idoneo per analisi ambientali e di beni architettonici.

Per i software di elaborazione dei dati rilevati va ricordato che è possibile inserire e modificare molti fattori, quali i dati climatici, il valore di emissività tabellare, la palette cromatica ed altri parametri relativi all'isolamento termico e alla formazione di condensa.

Termocamera a raggi infrarossi di tipo GIREVOLE.

Termocamera a raggi infrarossi di tipo STATICO.

La termografia e l'architettura

È dagli anni cinquanta che sono disponibili studi e applicazioni della termodinamica per uso civile e impiantistico: le tecniche di indagine basate su immagini termiche divennero fondamentali da subito per la geologia e l'ingegneria ambientale: termocamere speciali collocate su aerei o satelliti consentivano di leggere la conformazione del terreno, l'umidità del suolo, l'andamento delle correnti.

Poi fu la volta dei beni culturali e dell'archeologia: grazie a un procedimento comparativo, si potevano individuare le stratificazioni delle fasi costruttive di uno scavo, oppure cogliere soluzio-

Approfondimento C1.2 – La termografia

ni di continuità (disomogeneità o fratture non percettibili) in una parete affrescata.

Il successo e la diffusione di questa tecnica sono proprio legate all'assenza totale di controindicazioni o pericoli di danneggiamenti per beni dotati di valore artistico ma privi di resistenza statica (pensiamo alla friabilità e fragilità di oggetti o reperti antichi).

Nelle **architetture**, invece, si possono raccogliere informazioni non visibili – perché nascoste dallo strato superficiale dell'involucro edilizio – importantissime invece per:

1) la conoscenza storica e documentata di una costruzione;

2) formulare diagnosi finalizzate a interventi di restauro;

3) individuare le cause di danni e difetti agli impianti e programmare riparazioni mirate;

4) certificare le prestazioni energetiche dell'edificio (*Green Energy Audit*).

Per ciò che riguarda il primo punto, la termografia svela ciò che sta sotto i materiali di finitura, e quindi in un termogramma vengono messi a nudo eventuali:

- archi di scarico e arcate;
- piattabande di aperture tamponate;
- catene in ferro, giunti, elementi strutturali non visibili;
- sopraelevazioni di murature e ampliamenti avvenuti in tempi successivi;
- tessiture murarie, cornici e marcapiani;
- canne fumarie e intercapedini.

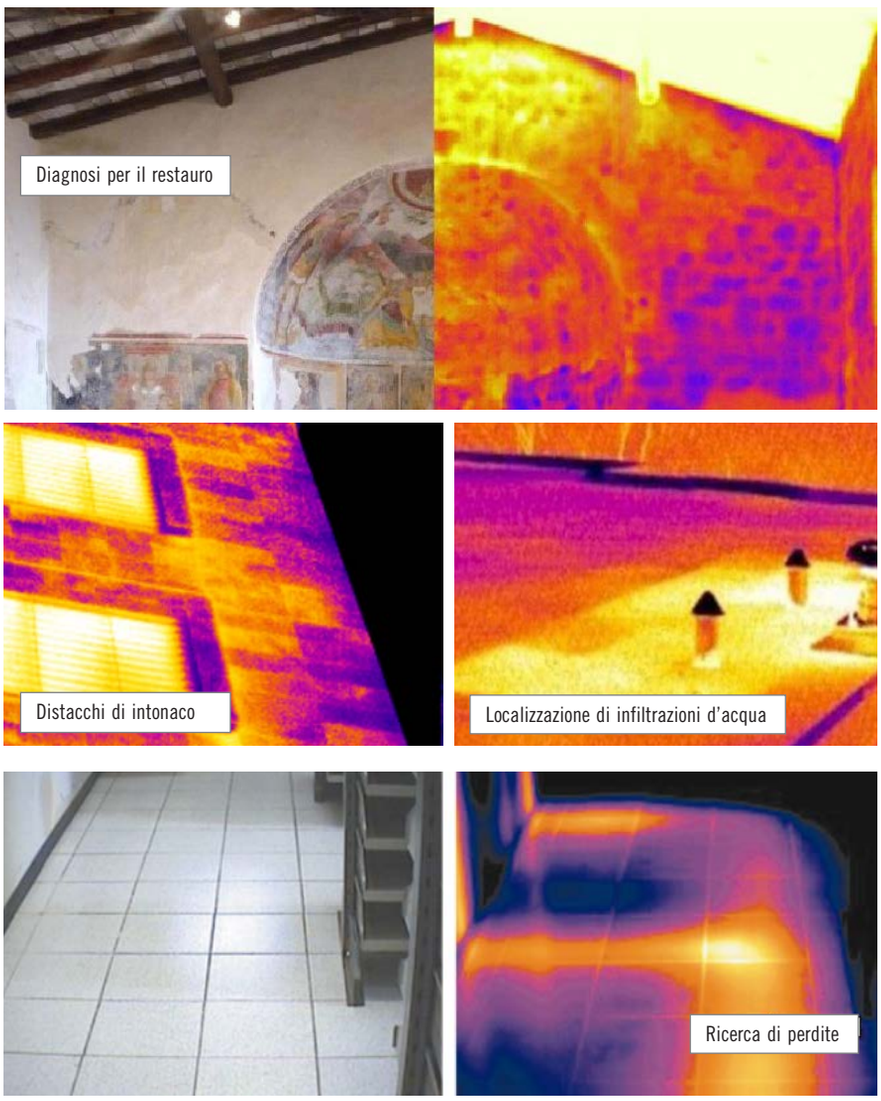
Per la diagnostica mirata a progetti di restauro, la termografia è diventata insostituibile per osservare:

- distacchi di superfici di intonaco;
- infiltrazioni d'acqua piovana;
- fessurazioni strutturali;
- rifacimenti o interventi precedenti con aggiunta di materiale;
- tracce di buche, forature occluse;
- umidità interstiziale.

Il terzo punto, legato all'individuazione di malfunzionamenti o difetti di opere impiantistiche, come

- perdite d'acqua per rottura di tubazioni,
- surriscaldamenti di canalizzazioni sottotraccia e scatole di derivazione,

ha avuto un interessante sviluppo anche nella manutenzione predittiva di grandi sistemi produttivi e di distribuzione di energia elettrica: gli impianti sono verificati con la termografia per individuare tempestivamente anomalie e adottare soluzioni correttive prima che si verifichino danni costosi da riparare.



Approfondimento C1.2 – La termografia

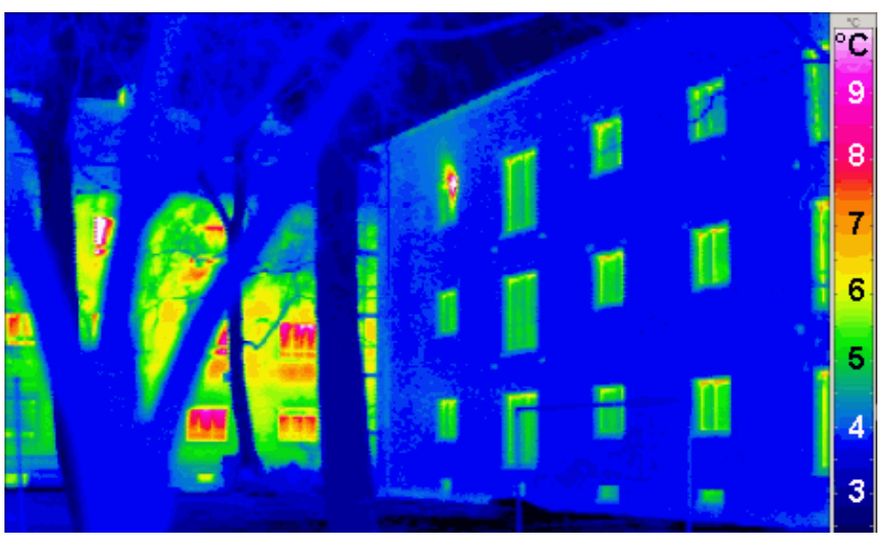
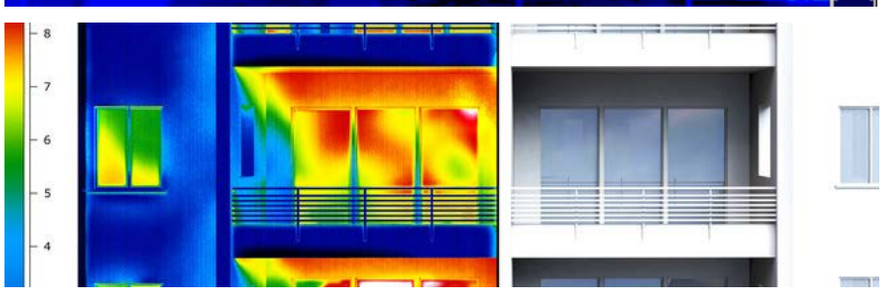
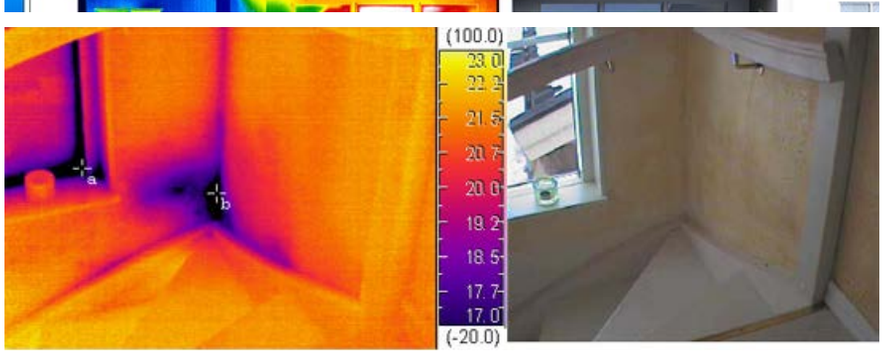
Ma è con l'ultimo punto, cioè con le indagini finalizzate alla conoscenza del comportamento energetico di un edificio, che la termografia occupa un posto di primo piano tanto che le procedure vengono definite a livello internazionale dalla norma ISO 18436-7.

La certificazione energetica obbligatoria ha reso più familiari alcuni concetti come la dispersione termica, o i ponti termici, evidenziati direttamente in un termogramma. I corsi di formazione per diventare esperti qualificati di termografia o i convegni per le diagnosi energetiche di un edificio (*Green Energy Audit*) si sono moltiplicati.

L'auditor termografico, che è un nuovo professionista, può verificare:

- lo stato delle strutture portanti dell'edificio;
- se esiste o se è assente l'isolamento termico (per esempio in una muratura a cassetta);
- la stratigrafia di un pacchetto murario, di un basamento e di una copertura, cioè dell'involucro edilizio opaco;
- le prestazioni e tipologie delle parti trasparenti (vetri e telai);
- infiltrazioni o perdite d'acqua derivanti da impianti idrici, fognari o di riscaldamento;
- formazione di muffe, condense, batteri e animali nocivi;
- infiltrazioni d'aria nei giunti strutturali;
- localizzazione di anomalie o parti non funzionanti negli impianti elettrici;
- localizzazione di anomalie o elementi non funzionanti negli impianti di climatizzazione;
- localizzazione di anomalie o elementi non funzionanti negli impianti fotovoltaici e solari termici.

Come riferimento nazionale per gli operatori di termografia ad infrarosso è attiva l'Associazione Italiana Termografia Infrarosso (**A.I.T.I.**), che testimonia la diffusione di questa tecnica negli ambiti più disparati oltre a quello dei rilievi energetici: *manutenzione preventiva, automazione industriale, test non distruttivi, Ricerca & Sviluppo, ispezioni edili, termoidraulica, settore medicale, settore militare, sorveglianza, sicurezza e controllo dei processi produttivi*, e molto altro ancora.

Oggi, per esempio, anche l'ingegneria ambientale utilizza immagini termiche nel monitoraggio aereo per rilevare inquinamenti e discariche abusive: infatti la fermentazione e le reazioni chimiche presenti nei rifiuti sviluppano calore e la differenza di temperatura rispetto alle aree agricole limitrofe è leggibile facilmente. Con termogrammi è anche possibile individuare materiali infiammabili!

Nell'immagine sotto è evidente la differenza tra un edificio di una nuova costruzione (a dx) e uno tradizionale molto dispersivo.