

TECNOLOGIA.

Dall'ambiente all'edilizia, indagini non invasive con il supporto della termografia

L'ANALISI DELLA RADIAZIONE INFRAROSSA CONSENTE INTERVENTI TEMPESTIVI E MIRATI

La termografia è una tecnica diagnostica assolutamente non distruttiva che, misurando attraverso l'utilizzo di termocamere la radiazione infrarossa emessa da un corpo, è in grado di determinarne la temperatura superficiale.

Tutti gli oggetti ad una temperatura superiore allo zero assoluto emettono radiazioni nello spettro dell'infrarosso. Questa relazione è numericamente quantificabile grazie alla legge di Plank. La quantità di radiazioni emessa aumenta proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta di un oggetto. La correlazione tra irraggiamento e temperatura è fornita dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$q = \epsilon \sigma T^4$$

ove:

σ = costante di Stefan-Boltzmann ($= 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W} \times \text{m}^{-2} \times \text{K}^{-4}$)

ϵ = emissività della superficie emittente (variabile tra 0 e 1)

T = temperatura assoluta della superficie emittente (in gradi Kelvin).

Il termine termografia intende proprio la visualizzazione bidimensionale della misura di irraggiamento, ossia della radiazione elettromagnetica superficiale emessa dal corpo, e quindi trasformata in un'immagine visibile. La tecnologia consente di visualizzare valori assoluti e variazioni di temperatura degli oggetti, indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile. Analizzando la temperatura, divisa per punti, dell'intera area analizzata, viene generata una fotografia termica rappresentativa dell'intera superficie inquadrata, una mappa in falsi colori, associando ad una temperatura rilevata un colore corrispondente.

La mappatura della temperatura superficiale è fondamentale per poter valutare lo stato di conservazione dei materiali stessi e per individuare irregolarità nell'emissione dell'energia e quindi, a parità di emissività, di anomalie termiche. Difformità sulla distribuzione delle temperature denunciano singolarità, malfunzionamenti, degrado o rottura nel corpo in esame. È una tecnica d'indagine ottima in quelle situazioni dove la temperatura di una superficie dipende da una discontinuità delle caratteristiche del materiale: materiali diversi o scadenti vengono visualizzati per effetto della trasmissione e dell'irradiazione del calore. Misurando esternamente la temperatura di un corpo, ha il pregio di essere una tecnica non distruttiva e non intrusiva, ossia in grado di analizzare un materiale senza che questo sia alterato.

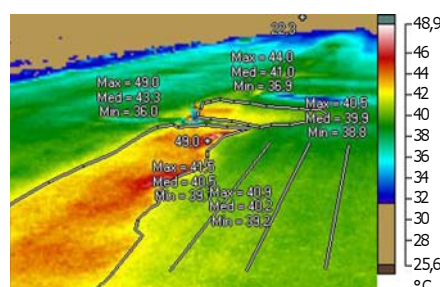
Strumentazione e procedure

Lo strumento per eseguire questo genere di controlli è la termocamera (detta anche *videocamera termografica* o *camera termica*), una particolare videocamera sensibile alla radiazione elettromagnetica dell'infrarosso. Questo dispositivo,

GLI AUTORI.

L'ingegnere **Massimo Rassu** svolge la libera professione nel campo dell'architettura e dell'urbanistica.
e-mail: maxrassu@gmail.com

Il comandante **Michelangelo Serra**, pilota in congedo, oggi è managing director della Air Systems srl e si occupa di controlli non distruttivi nel settore termografico plurisetoriale.
telefono: 070.270243
cellulare: 335.324758
e-mail: info@airsystems.it



rilevando tali emissioni e misurandone l'intensità, è in grado di individuare le temperature dei corpi analizzati e di restituire delle mappe termiche. Tali rappresentazioni grafiche sono costruite su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica dello strumento "legge" velocemente il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel e genera una mappa (detta, appunto, termogramma), in bianco e nero o in falsi colori, dell'oggetto osservato; ad ogni valore di grigio o ad ogni colore corrisponde una temperatura secondo una scala predefinita. La sensibilità della termocamera può arrivare anche ad alcuni centesimi di grado.

Le termocamere si dividono in radiometriche e non radiometriche: le prime consentono di misurare il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine. Vi sono anche apparecchiature con installata sul corpo macchina una normale camera alla luce visibile (su alcuni modelli persino in posizione coassiale), per acquisire simultaneamente i due tipi di immagine, ottima per memorizzare la fotografia digitale come punto di riferimento.

L'indagine diagnostica all'infrarosso per imaging è con-

dotta secondo normative UNI in materia di prove non distruttive: in particolare si applica la UNI 9252 per la metodologia e la UNI 9124 per la definizione delle anomalie e del degrado. L'ispezione viene pianificata in base alla tipologia delle utenze, alla loro criticità, alle condizioni di funzionamento: durante il sopralluogo si procede alla raccolta dei dati che verranno a creare un database per l'analisi comparativa dei componenti, utilizzabile per stilare statistiche e analizzare particolari dati riscontrati.

Alla raccolta dei dati segue l'elaborazione: si compila un report in cui fra le altre informazioni vengono valutate e classificate le anomalie secondo diverse classi di rischio. I rilievi vengono presentati in un dossier in cui sono contenute le immagini rilevate, i commenti relativi alla tecnica d'indagine utilizzata e i risultati ottenuti. Tutti i dati sono in formato digitale, un fondamentale supporto che permette il trattamento per operazioni di confronto, analisi e definizione.

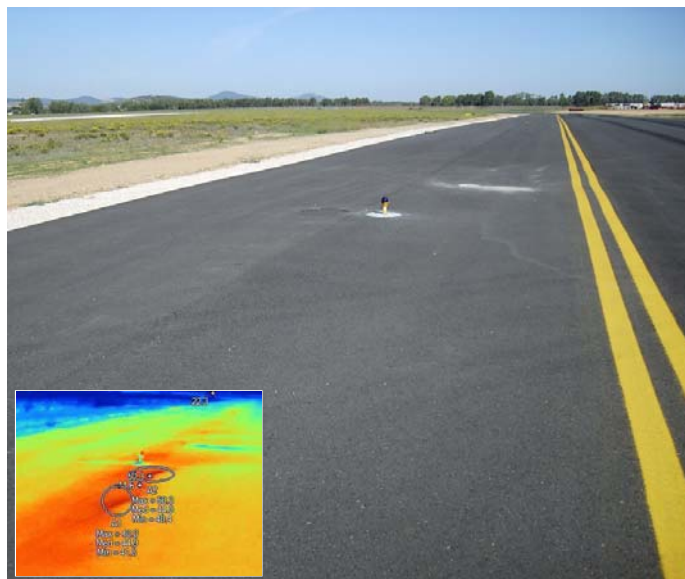
Applicazioni della termografia

La termografia riveste un ruolo essenziale nelle indagini non distruttive e si è evoluta a tal punto da diventare uno degli strumenti diagnostici più importanti per la *manutenzione preventiva*, e in particolare quella *predittiva*, per anticipare costosi guasti. Quest'ultima è utile per individuare tempestivamente le anomalie incipienti e quindi calcolare il tempo residuo prima dell'eventuale avaria: rivelando anomalie spesso invisibili ad occhio nudo, si determinano uno o più parametri, per esempio termici, misurati ed estrapolati utilizzando appropriati modelli matematici.

Le indagini preventive sugli impianti permettono di avere informazioni su difetti o malfunzionamenti delle parti di apparecchiature, prima che si aggravino e venga compromesso il funzionamento di tutto l'impianto o provochino danni irreversibili alle parti stesse, generando fastidiosi e costosissimi fermi macchina dei macchinari di produzione. Una variazione delle misure effettuate rispetto allo stato di normale funzionamento indica l'aumentare del degrado, consente di prevedere il momento del guasto e, in definitiva, di pianificare le contromisure correttive e di attuare un piano di miglioramento continuo delle prestazioni funzionali. Si possono eseguire accurate misurazioni della temperatura, per individuare delta termici anche minimi.

In un sistema in movimento (pompe, cuscinetti o assi motore; pulegge e cinghie di trasmissione), le parti soggette ad usura o in stato di degrado, aumentando l'attrito, producono calore; in un impianto elettrico il lento serraggio dei morsetti dei cavi elettrici provoca calore per effetto Joule; in un circuito elettrico stampato le perdite di corrente danno dei punti caldi. Si può tenere sotto controllo il buon funzionamento di impianti e apparecchiature ed intervenire tempestivamente su possibili difetti, con un conseguente risparmio sui costi di gestione e di intervento.

La tecnica oggi applicata è certamente superiore a quelle che comunemente sono le aspettative di un'indagine tradizionale e trova applicazione in numerosi settori: siderurgico, industriale chimico, artistico, aeronautico, automobilistico, ambientale. Il principio si basa sulla misura della distribuzione delle temperature superficiali dell'oggetto in esame.



L'immagine visibile di una pista di rullaggio aeroportuale e - nel riquadro - la corrispondente immagine termografica in cui si evidenzia la disomogeneità della compattazione della pista.

Una diversa risposta termica indica una maggiore presenza di aria tra le parti bituminose o nel sottofondo e quindi una diversa compattazione effettuata dai mezzi meccanici, in quanto il difetto è localizzato lungo delle direttrici di lavoro standard.

In ambito industriale la manutenzione predittiva con la termografia si rivela incredibilmente comoda per stabilire la correttezza degli standard costruttivi o la conformità a specifiche costruttive. Nella ricerca di base o applicata, costituisce un metodo non distruttivo, affidabile e rapido che supporta il lavoro di ogni giorno, in particolare per lo sviluppo e studio di prototipi, per l'analisi comportamentale di apparati, materiali o componenti soggetti a qualsiasi tipo di sollecitazione.

Degrado e diagnostica in architettura

Negli ultimi anni, le indagini termografiche hanno trovato sempre maggiore impiego nella fase della diagnostica e degli interventi sull'edilizia storica e moderna, dal rilevamento dell'umidità alla scoperta di elementi architettonici nascosti, dall'individuazione di distacchi negli intonaci fino all'analisi strutturale dell'edificio. È possibile conoscere la composizione delle murature su cui si deve intervenire: un supporto per chi deve operare nel restauro conservativo e per le esigenze di chi deve conoscere la struttura e i materiali di cui è costituito un edificio o una parte di esso. Si possono ridurre notevolmente le spese, dovute a svariate problematiche di degrado dell'interno e dell'esterno degli edifici, la causa dei difetti imputabili ad una costruzione scadente o ad un'anomalia, formatasi nel tempo per colpa di un'errata messa in opera o pessima conduzione dei lavori.

Analogamente alle applicazioni in campo industriale, in edilizia l'impiego della termografia raggiunge la sua massima efficienza nell'identificare tempestivamente guasti su edifici, con la possibilità di ripararli prima che il danno assuma proporzioni ingenti e di proteggerli dagli investimenti affrontati in termini di attrezzatura e materiali. Le problematiche che si formano per un degradamento non risanato in tempo

si traducono infatti in elevati costi di riparazione.

Le immagini in falsi colori possono essere trattate attraverso software di raddrizzamento geometrico e sovrapposte a ortofotopiani delle superfici, a fotoraddrizzamenti geometrici oppure a rilievi al tratto. Il computo metrico delle superfici su cui intervenire avviene in modo diretto, e si ha una maggiore definizione delle zone da demolire o consolidare e sul loro stato di degrado, per avere una maggior precisione in fase di preventivo o capitolato.

Nelle superfici affrescate, intonacate o rivestite all'interno o all'esterno di edifici, è possibile individuare gli elementi del degrado e la caratterizzazione delle strutture di supporto, nonché gli elementi non visibili ad occhio nudo:

- cavità interne alla muratura che possono creare fenomeni di condensa o trasmissività termica anomala;
- elementi strutturali dei quali è possibile ottenere il posizionamento e le dimensioni: archi di scarico, pilastri, architravature, strutture lignee di sostegno;
- difetti o danneggiamenti provocanti discontinuità termiche su una superficie muraria, in seguito a riscaldamento omogeneo della porzione muraria;
- materiali componenti la muratura di supporto;
- localizzazione di canalizzazioni, impianti, condutture o vuoti all'interno di pareti e murature;
- impianti e condotte, termiche e sanitarie, di qualsiasi portata, inglobate nella muratura, per la ricerca di perdite;
- aperture tamponate e particolari architettonici presenti all'interno di una muratura ricoperta di intonaco.

Nel campo dei beni culturali, questa tecnica consente il rilevamento dell'umidità nelle murature, distacchi di affreschi, mosaici e intonaci, lo studio compositivo di murature antiche e moderne, nonché il rilievo delle superfici maggiormente a rischio per fattori microclimatici, prima di intervenire in maniera invasiva, con notevole risparmio di tempo e denaro in fase di ristrutturazione. L'analisi termografica aiuta a capire la "storia" dell'edificio, ossia come questo, o una sua parte, abbia acquisito l'aspetto attuale, indagine della struttura e della tessitura muraria, verifica dello stato della trama muraria, del potere coibente, la mappatura del degrado e dei materiali che compongono la superficie di un manufatto. La termografia è preziosa per definire una strategia di manutenzione che tenga conto degli effetti del tempo e degli eventi storici trascorsi, come:

- distacchi dell'intonaco o del rivestimento, o di affreschi, mosaici ed intonaci storici;
- fenomeni di alterazione e degrado, superficiali e sottosuperficiali (decoesione);
- infiltrazioni di umidità o condensa, con individuazione della fonte;
- lesioni strutturali;
- saturazione di umidità all'interno dell'isolamento di un tetto o di qualunque altra copertura.

Le tecniche termografiche si sono dimostrate estremamente efficaci nella diagnostica dello stato di conservazione della facciata della Basilica di San Pietro, a Roma, prima dell'inizio del restauro e nella verifica della qualità degli interventi effettuati. Il gruppo d'intervento è stato in grado di individuare fessurazioni, distacchi dell'intonaco dalla superficie

in pietra e sacche di umidità che sarebbero altrimenti rimaste nascoste. L'uso più significativo della termografia si è avuto nella valutazione degli intonaci, per i quali differenze di temperatura di 0,5 °C si sono dimostrate importanti. Grazie all'elevata sensibilità della termocamera utilizzata, la squadra è riuscita a ricavare immagini a infrarossi per controllare le condizioni di quasi cinquantamila stucchi della facciata della Basilica, ma anche per mettere a punto un trattamento battericida per la rimozione dei microrganismi che infestavano gran parte della superficie in pietra e di verificare l'efficacia della procedura.

Analisi delle infiltrazioni e dell'umidità

Le infiltrazioni dai solai piani o dalle coperture sono un problema di non facile soluzione: in molti casi l'origine si trova distante dal punto di uscita dell'acqua. Spesso bisogna ricorrere a prove di allagamento, rottura del rivestimento o comunque a metodi che comportano interferenze con le attività che si svolgono nei locali, ancor di più se si tratta di abitazioni o luoghi di lavoro.

Con la termografia l'indagine viene semplificata notevolmente: le variazioni termiche nelle superfici interne ed esterne evidenziano, per esempio, la presenza o le infiltrazioni di acqua ed umidità anche invisibili all'occhio, l'eventuale degrado di guaine bituminose (soprattutto in punti sensibili come risolve o giunti), oppure la posizione delle canalizzazioni degli impianti all'interno della muratura e il punto preciso di presumibili perdite di acqua o di altro liquido, fornendo dati sulla provenienza e sulla propagazione dell'infiltrazione. In questa maniera si evita di demolire ampie aree di rivestimento: si interviene in maniera puntuale e si rimuove solo la parte interessata al problema.

L'impianto termico e le dispersioni di calore

La certificazione energetica degli edifici – ossia lo studio delle dispersioni di calore a supporto della relazione tecnica sul rispetto delle prescrizioni in materia di contenimento del consumo di energia – è diventata obbligatoria secondo la direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002. In Italia, la direttiva è stata trasformata in legge nazionale dal 4 gennaio 2006 D.L. N.192/05 e successiva circolare del 24/05/06, e pertanto qualsiasi immobile da vendere o da ristrutturare deve essere provvisto obbligatoriamente di un certificato che indica i consumi energetici per il riscaldamento/raffreddamento, la produzione di acqua calda e le emissioni di CO₂.

La termografia all'infrarosso è la metodologia più efficace e precisa per attestare e certificare l'isolamento termico degli edifici in conformità alla Norma UNI EN 473 150 9712 "Controlli non distruttivi" e può assumere un ruolo importante nell'incremento dell'efficienza in termini di risparmio energetico e quindi economico.

Questa tecnologia assicura la localizzazione e il dimensionamento delle dispersioni di calore attraverso elementi dell'involucro edilizio, infissi, murature, tetti o coperture, valutando e calcolando la quantità di energia dispersa. Inoltre è possibile identificare ed eliminare puntualmente i difetti di isolamento, per arrivare all'abbattimento delle dispersioni,



Un pannello fotovoltaico con celle in corto, evidenziate (P1 e P2) dall'immagine termografica nel riquadro.

ottimizzando il rendimento delle apparecchiature. L'analisi è talmente minuziosa che è possibile capire quali perdite di calore non sono visibili ad occhio e non vengono considerate nelle ipotesi standard dal calcolo della certificazione.

Manutenzione impianti elettronici ed elettrici

L'ispezione termografica dei componenti elettrici serve, in generale, a rilevare sovratemperature anomale, causate dall'azione tra corrente e resistenza, conseguenti sia ad aumenti nelle resistenze di contatto per allentamento del sistema di serraggio o corrosione dei collegamenti (che potrebbero essere difettosi, non protetti o surriscaldati), sia al malfunzionamento di componenti, in modo da orientare e programmare oculatamente la fase di manutenzione vera e propria. I tipici componenti da sottoporre a questi controlli sono linee elettriche aeree, sottostazioni, trasformatori, unità tristori, dispositivi di apertura dei circuiti, trasformatori, interruttori, fusibili, disgiuntori, motori e unità di controllo motori.

In tal modo si possono valutare le condizioni del componente sotto osservazione ed il suo stato di degrado, per rilevare la presenza di guasti incipienti o prevenire guasti molto gravi che potrebbero provocare un fuori servizio della rete, compromettendo la produzione o lo svolgimento delle attività di processo.

In definitiva, si ottengono benefici come aumentare l'affidabilità del sistema elettrico, accrescendo la sicurezza del personale e accordando un generale miglioramento della

qualità del lavoro svolto. Si riducono i tempi di indisponibilità dei componenti evitando rilevanti conseguenze economiche, conseguenti dall'interruzione della produzione o di erogazione di servizi. L'indagine termica consente, infine, di migliorare la conoscenza del comportamento nel tempo di componenti, con possibilità di un migliore sfruttamento degli stessi sotto l'aspetto delle prestazioni e della durata di vita utile.

Medicina e veterinaria

La termografia medica consente di evidenziare e misurare le temperature della superficie del corpo umano, sfruttando il calore emesso dall'organismo attraverso la cute. In tal modo possono essere analizzati alcuni tipi di tumori, soprattutto quelli alla mammella e alla tiroide. Oppure possono essere valutate le alterazioni del flusso del sangue negli arti, gli stati infiammatori a livello del sistema muscolare o lesioni ischemiche, anche se solo in aree superficiali.

Agricoltura

Questa tecnica trova spazio e applicabilità anche nel settore dell'agricoltura, fornendo un notevole numero di dati qualitativi e quantitativi sulle coltivazioni, portando all'avanguardia il sistema di controllo delle piantagioni, e di conseguenza rendendo possibile una vera e propria opera di prevenzione sulle colture. Le diagnosi possibili in agricoltura sono la verifica dello stress idrico delle coltivazioni dovuto alla cattiva irrigazione del terreno (consentendone una corretta e valutando l'efficacia degli impianti), dello stato dei fusti di alberi da frutta o legna, dell'umidità del terreno, e del corretto grado della temperatura interna delle piante.

Ambiente

Nel monitoraggio degli abusi ambientali è possibile rilevare aree con presenza di inquinamento, per valori di calore differenziati o con forti delta termici; oppure, evidenziare zone di calore formatosi in materiali a causa, ad esempio, di mozziconi di sigarette o ceneri; oppure individuare le aree in cui è in corso fermentazione locale e/o una reazione di vari elementi chimici presenti nei rifiuti; o ancora rilevare le scintille provocate dal contatto tra metalli e materiali infiammabili.

Analisi di opere d'arte mobili

Un'indagine diagnostica come la termografia, di tipo non invasivo, viene condotta senza contatto con l'opera e anche in ambienti diversi dal laboratorio, poiché l'oggetto non necessita di essere spostato dal luogo di collocazione. Possono essere individuate discontinuità interne alla materia che compone l'opera in analisi, oppure - anche se nascosti alla vista - chiodi ed elementi metallici in tavole dipinte, sculture in legno ed altri materiali, o gli elementi di assemblaggio delle parti, o, infine, stuccature e integrazioni di parti.

In conclusione, le potenzialità di questa tecnica sono molteplici e molte con ogni probabilità devono essere ancora scoperte, vista la recente introduzione di apparecchiature all'infrarosso per uso civile.

**Massimo Rasso
Michelangelo Serra**