



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**LA TERMOGRAFIA COME STRUMENTO PER IL
MONITORAGGIO DEI BENI CULTURALI E
DELL'EDILIZIA**

**THE THERMOGRAPHY AS A TOOL FOR
MONITORING CULTURAL HERITAGE AND
BUILDINGS**

Relatore:
Prof. Francesco Corvaro

Tesi di Laurea di:
Matteo Mozzoni

Correlatore:
Prof. Matteo Moglie

Anno Accademico 2019-2020

Introduzione	4
Introduzione alla termografia	6
➤ Funzionamento della termocamera	9
➤ Tipi di termocamere	11
➤ Componenti e caratteristiche principali	12
➤ Principali tecniche	16
La termografia al servizio dei beni culturali	20
➤ Cocomeri e Poponi	20
➤ Affresco romanico interno all'Abbazia di San Giacomo della Bessa	22
➤ Rilevazioni delle condizioni termografiche all'interno di una cappella medievale	24
➤ Rilevazioni termografiche sugli affreschi della Sala dei Pavoni nella villa di Oplontis	25
➤ Volta affrescata in Villa Mirabello	26
➤ Riproduzione dell'Incontro di Anna e Gioacchino alla porta d'oro	28
➤ Affresco del Gymnasium a Pompei	31
➤ Domus dei Casti Amanti e di C. Iulius Polybius	33
➤ Campione di mosaico intonacato	36
La termografia in campo edile	40
➤ Esempi termografici nell'archeologia dell'architettura	41
➤ L'analisi termografica negli edifici storici americani	44
➤ La termografia come strumento investigativo	46
➤ Complementarità della termografia e del georadar	48
➤ Il sistema IRpano	51
➤ La valutazione dello stato di conservazione	53
➤ La termografia come salvaguardia delle strutture	55
Normativa	58
Conclusione	62
Bibliografia	63
Ringraziamenti	64

Introduzione

Nel settore industriale ogni prodotto che presenta una certa importanza critica, come elementi di sostegno, viti, componenti vari, corpi soggetti a varie sollecitazioni, deve essere controllato per la verifica della sua integrità e conformità alle norme vigenti. Infatti, è noto che una piccola cricca superficiale, se sottoposta a sollecitazioni di fatica, cresce di dimensione fino a portare alla rottura del componente. Proprio per evitare situazioni del genere, si utilizzano tecniche di controllo per l'analisi dei vari pezzi. Tra tutte le tecniche di controllo, si stanno sempre più sviluppando quelle non distruttive, che stanno man mano sostituendo il più incerto "controllo distruttivo a campione". Tra le varie tecniche non distruttive, abbreviate con NDT cioè *Non Destructive Testing*, troviamo la radiografia, gli ultrasuoni, la magnetoscopia, l'interferometria olografica, la termografia, ecc.... La termografia suscita particolare interesse per la semplicità e l'ampio range di applicazioni in cui può essere utilizzata. Dai primi anni 60, quando la termografia iniziò i suoi primi passi, agli anni più recenti, la tecnologia sfruttata dalla termografia ha subito profondi cambiamenti, facendo passi da gigante: lo sviluppo tecnologico ha permesso di sviluppare termocamere sempre più compatte e portatili, abbassando i costi di produzione e migliorando la qualità e l'accuratezza delle immagini.

La termografia è una metodologia di indagine volumetrica, cioè permette l'individuazione dei difetti in quasi tutto il volume dell'oggetto, che sfrutta la naturale emissione della radiazione infrarossa dai corpi: tutti gli oggetti ad una temperatura al di sopra dello zero assoluto emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso. Essa trova campi di applicazione sempre più ampi e vari, come l'industria siderurgica, l'industria chimica, l'edilizia, la medicina, l'automotive, l'aeronautica, i beni culturali. Proprio l'edilizia e soprattutto i beni culturali vengono messi sotto i riflettori in questa ricerca: a livello territoriale, il materiale su cui poter svolgere indagini di questo tipo è vario e abbondante. Nel campo edile, la termografia viene utilizzata come metodo di indagine preliminare nel caso di necessità di interventi di ristrutturazione, poiché permette la facile individuazione di umidità, l'identificazione di elementi architettonici nascosti, di distacchi negli intonaci, la caratterizzazione materiale dell'edificio, senza dover intervenire direttamente sul muro con test distruttivi. Nel campo dei beni culturali, la termografia sta piano piano allargando i suoi campi di applicazione: viene impiegata nell'analisi e nel restauro di opere pittoriche, come affreschi, dipinti e mosaici, grazie alla sua capacità di indagare al di sotto dello strato visibile dell'opera, permettendo l'individuazione dei difetti più comuni, come crepe, distacchi della pellicola pittorica dal supporto, infiltrazioni di acqua o umidità. Oltre alla pittura, l'analisi termografica può essere utilizzata anche per analizzare statue e vasellame, poiché permette di individuare facilmente crepe, difetti ed anomalie nelle varie opere. Fondamentale è il supporto che essa può fornire nella prevenzione delle opere e nella verifica degli interventi di restauro.

L'analisi termografica viene messa sotto ai riflettori, andando ad analizzare sia la base scientifica, sia lo stato dell'arte delle varie tecniche termografiche. Infatti, se lo strumento con il quale si ottengono le immagini si basa sempre sullo stesso principio fisico, andando semplicemente ad evolversi in tecnologia e portabilità, l'analisi postuma delle immagini ha subito vari cambiamenti nel corso dei decenni, ottenendo diverse tipologie di algoritmi di elaborazione che permettono, dalla stessa immagine di partenza, di ottenere informazioni diverse, in base al bisogno dell'operatore. Nel corso degli anni si è cercato anche di trovare una soluzione al principale problema della termografia, che essendo una tecnica di indagine che si svolge in loco e sfrutta il calore, subisce pesanti influenze dall'ambiente circostante e necessita, per essere il più precisa possibile, di dati affidabili in input. Per questo, si stanno sviluppando algoritmi tali da ridurre l'errore e il rumore generato dall'ambiente nelle immagini, abbassando in questo modo la difficoltà di interpretazione dei dati.

Dopo la descrizione dello stato dell'arte della termografia, si analizzeranno con più precisione alcuni esempi in cui questa tecnica viene utilizzata sugli affreschi, quadri ed edifici. Bisogna specificare che l'analisi termografica non viene quasi mai applicata da sola, ma sempre come tecnica integrativa o preliminare: in entrambe le situazioni, la termografia è di solito il primo metodo utilizzato, poiché permette subito di individuare le zone a rischio sulle quali intervenire con altre tecniche, evitando in questo modo il test a campione. I risultati ottimali di analisi si ottengono affiancando alla termografia altre tecniche non distruttive, come indagini ad ultrasuoni o l'utilizzo di georadar.

La termografia si è ampiamente affermata come tecnica di indagine affidabile, sono sempre più numerosi i settori che la utilizzano, grazie alla sua facilità di applicazione e sicurezza, anche se necessita di specifiche conoscenze base e soprattutto, per poter comprendere al meglio i suoi dati, una buona dose di esperienza.

Introduzione alla termografia

La termografia basa la sua attività sulla termocamera, che è lo strumento tramite il quale si ottengono i termogrammi che vengono successivamente elaborati ed analizzati.

La termocamera rileva la radiazione elettromagnetica emessa da ogni punto dell'oggetto e la rappresenta in un'immagine in livelli di grigio, visualizzabile a monitor.

Negli strumenti moderni è pratica comune convertire la scala dei livelli di grigio in una scala convenzionale di colori (*palette*) che va dal blu scuro al rosso chiaro, per ottenere un'indicazione qualitativa immediata della temperatura, dal più freddo al più caldo. La termografia permette di visualizzare valori assoluti e variazioni di temperatura degli oggetti, indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile. 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:

$$q = \sigma \varepsilon S T^4$$

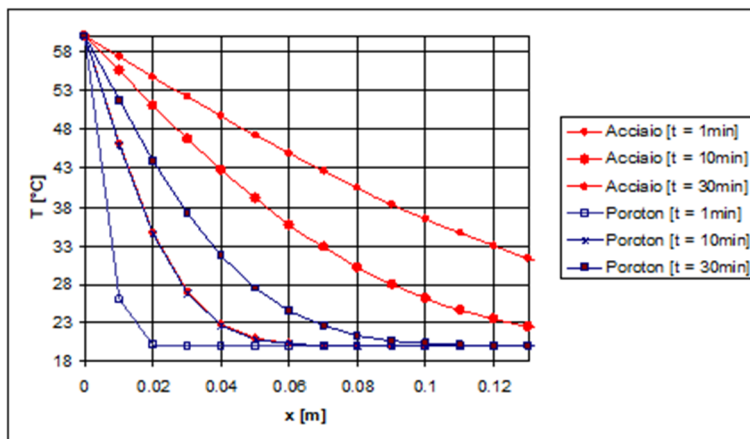
ove σ è la costante di Stefan-Boltzmann e vale $5,6703 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, ε è l'emissività della superficie emittente (variabile tra i limiti teorici 0 e 1) e T è la sua temperatura assoluta. La termografia permette l'individuazione di anomalie nell'emissione dell'energia e quindi, a parità di emissività, di anomalie termiche.

Il processo di propagazione del calore è complesso ma può essere brevemente descritto nel caso semplice di una parete molto profonda. Se una parete è in equilibrio termico con l'ambiente la sua temperatura sarà costante e pari ad un dato valore T_0 . Se ad un certo istante per effetto di uno scambio termico molto intenso la sua superficie viene posta interamente ad una temperatura T_S si avrà uno "scalino" di temperatura e lo strato superficiale inizierà a scambiare calore con gli strati vicini interni. Questo processo inizia quindi a scaldare parti della parete man mano sempre più profondi, cosicché mentre la superficie viene mantenuta alla temperatura costante T_S una sonda posta in differenti posizioni nella parete sentirà una variazione di temperatura un certo tempo dopo che è avvenuto il salto iniziale di temperatura sulla superficie. La velocità di propagazione di quella che potremmo definire un "onda termica" dipende principalmente dalla diffusività termica α con una legge per cui un punto della parete ad una profondità x dalla superficie viene raggiunto dall'onda termica dopo un tempo caratteristico pari a $t = \frac{x^2}{(16\alpha)}$. Dalla tabella 1 si può vedere che, fissata la profondità a 10cm, nell'alluminio tale tempo è di circa 6 secondi ma può valere circa 950 secondi nel cemento o addirittura più di due ore nel PVC.

Valori a 20°C	Conduttività termica	Densità	Calore specifico	Diffusività termica
	W/mK	Kg/m ³	10 ⁶ J/m ³ K	10 ⁻⁸ m ² /s
Aria	0.025	1.29	0.001	1938
Glicerolo	0.29	1260	3.073	9
Acqua	0.6	1000	4.18	14
Ghiaccio	2.1	917	2.017	104
Olio di oliva	0.17	920	1.65	10
Benzina	0.15	720	2.1	7
Olio siliconico	0.1	760	1.37	7
Alcohol	0.17	800	2.43	7
Alluminio	237	2700	2.376	9975
Rame	390	8960	3.494	11161
Acciaio INOX	16	7900	3.95	405
Quarzo	3	2600	2.13	141
Cemento	1.28	2200	1.94	66
Marmo	3	2700	2.376	126
Vetro	0.93	2600	2.184	43
Pyrex 7740	1.005	2230	1.681	60
PVC	0.16	1300	1.95	8
PTFE	0.25	2200	2.2	11
Nylon	0.25	1140	1.938	13
Corian (ceramic filled)	1.06	1800	2.307	46
Sabbia secca	0.35	1600	1.27	28
Sabbia bagnata	2.7	2100	2.64	102
Legno	0.4	780	0.187	214
Cuoio	0.14	-	0.001	59
Sughero	0.07	200	0.047	150
Fibra di vetro	0.045	120	0.092	49

Tabella 1 Valori di diffusività di alcuni materiali comuni

In figura 1 possiamo osservare un grafico in cui si può notare la variazione della temperatura in funzione della profondità della parete per diversi tempi. Le linee rosse si riferiscono al caso di una parete di acciaio mentre in blu si può vedere l'andamento della temperatura ridotta per una parete in Poroton. Pertanto, quando una sorgente termica riscalda una superficie, il calore si propaga per conduzione verso l'interno. Differenti materiali o un distacco in prossimità della superficie provocano una conduzione del calore differente, determinando differenti temperature superficiali. La termografia permette quindi di fare una



analisi delle caratteristiche interne alla parete osservando i tempi diversi di arrivo dell'onda termica ovvero, per un determinato istante, individuando le zone a temperatura differente.

Figura 1: Profilo delle temperature al variare del tempo in una parete di acciaio e in una di poroton.

Le discontinuità termiche causate dalla presenza di difetti o danneggiamenti, che si originano su una superficie muraria in seguito a riscaldamento, sono chiaramente evidenziabili nelle immagini termiche mediante l'impiego di termocamere ad alta risoluzione termica (0.05/0.01°C).

Per una corretta analisi dello stato di degrado di un manufatto, spesso la termografia viene affiancata ad interventi distruttivi quali il prelievo di campioni per prove fisico-chimiche da effettuare in laboratorio; in alcuni casi viene utilizzato come unico metodo di indagine.

L'analisi termografica può essere condotta in condizioni attive e passive. Nel primo caso l'elemento da indagare viene riscaldato onde incrementare la risposta termografica e, contestualmente, attivare i flussi di calore che consentono di ottenere diverse risposte dagli elementi a diversa capacità termica. Nelle condizioni passive, invece, si analizza la superficie così come essa si presenta al momento dell'indagine. Questo caso è molto frequente in indagini che riguardano elementi esterni di edifici quali ad esempio terrazze di copertura e pareti. Normalmente tali indagini si effettuano sfruttando il soleggiamento diretto ed analizzando il transitorio termico durante l'indagine. L'utilizzo della termografia permette la lettura delle radiazioni emesse nella banda dell'infrarosso da corpi sottoposti a sollecitazione termica. L'energia radiante è funzione della temperatura superficiale dei materiali, a sua volta condizionata dalla conducibilità termica e dal calore specifico, che esprimono in termini quantitativi l'attitudine del materiale stesso a trasmettere il calore o a trattenerlo: un materiale con valori alti di conducibilità si riscalderà velocemente ed altrettanto velocemente si raffredderà. Per effetto dei differenti valori di questi parametri, specifici per ciascun materiale, i diversi componenti di un manufatto, quale una muratura, assumeranno differenti temperature sotto l'azione di sollecitazioni termiche. Tale caratteristica è sfruttata dalla termografia per visualizzare, con appositi sistemi, i differenti comportamenti termici dei materiali. A causa di ciò, la termografia è influenzata dalle condizioni ambientali e climatiche del luogo in cui si opera.

Pertanto, occorre rispettare alcune regole generali per ottenere risultati corretti:

- occorre operare in assenza di irraggiamento solare, meglio se dopo il tramonto quando la struttura da analizzare è in fase di raffreddamento:
- occorre operare in assenza di pioggia e di vento.

La temperatura, l'umidità e la velocità del vento influenzano la qualità dei risultati, in quanto essi modificano le modalità con cui avviene lo scambio termico tra materiali e l'ambiente circostante.

È importante infine tenere in considerazione la presenza di sorgenti calde, quali tubazioni non coibentate o elementi scaldanti, che possono influenzare la distribuzione di temperatura sui componenti l'involucro, e i riflessi provenienti da altre superfici che potrebbero essere scambiati per difetti della struttura.

L'analisi termografica offre innumerevoli vantaggi:

- La termografia è un metodo di indagine veloce, che fornisce dati in tempo reale.

- Si effettua senza rompere nulla, viene utilizzata per eseguire prove non distruttive. L'utilizzo di una termocamera, ci consente di vedere l'invisibile senza intervenire sui materiali, basti pensare all'individuazione dei tubi sottotraccia o scovare i ponti termici di un edificio.
- Non necessita di chiudere al pubblico i siti dove si effettuano le indagini. Con una termocamera si può operare all'interno di un impianto industriale o dentro un edificio senza evacuare l'area oggetto del rilievo. (La termocamera non emette alcun tipo di radiazioni)
- La termografia è particolarmente indicata per la tutela e la salvaguardia di beni storici e architettonici, come chiese, edifici vincolati e monumenti. Essendo un metodo di indagine non invasiva, è prediletta rispetto ai tradizionali metodi di diagnosi, da parte degli enti e da tutte quelle realtà che gestiscono patrimoni immobiliare di immenso valore.
- Permette di rilevare i difetti in fase di costruzione, in modo tale da intervenire prima del termine del progetto.
- Una termocamera consente di risparmiare su spese di manutenzione presente e futura.

Sono relativamente pochi gli svantaggi dell'analisi termografica:

- Le misurazioni possono essere imprecise se le temperature sono molto vicine, gli oggetti possono diventare indistinguibili. Le immagini a infrarosso provenienti dalla fotocamera possono portare informazioni imprecise e quindi deduzioni ed interventi errati.
- Grande svantaggio della termografia è il prezzo della strumentazione: questo equipaggiamento è utilizzato raramente da privati o persone diverse dalle grandi aziende o dalle istituzioni pubbliche, proprio a causa dell'elevato costo delle termocamere.

Funzionamento della Termocamera

Una termocamera registra l'intensità della radiazione nella parte infrarossa dello spettro elettromagnetico e la converte in un'immagine visibile.

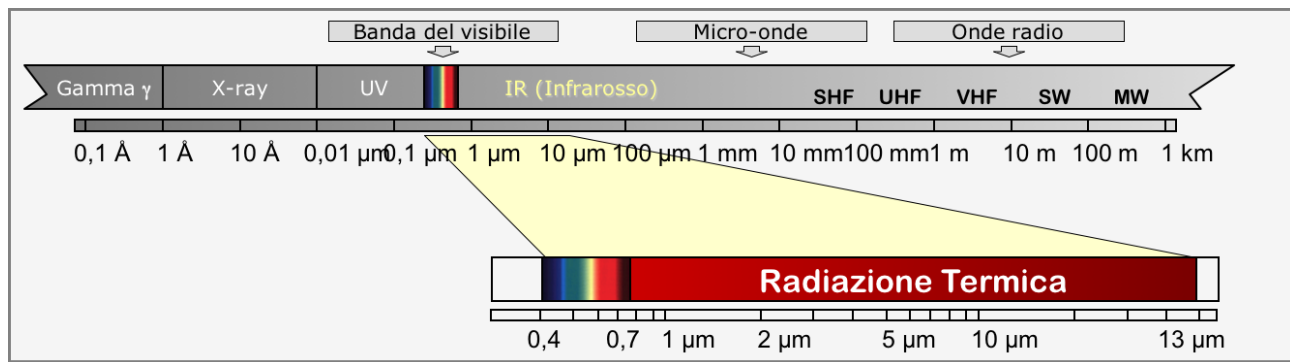
Ma cosa sono gli infrarossi? I nostri occhi sono sensori progettati per individuare la radiazione elettromagnetica che costituisce lo spettro della luce visibile. Tutte le altre forme di radiazioni elettromagnetiche, come gli infrarossi, sono invisibili all'occhio umano.

L'esistenza degli infrarossi è stata scoperta nel 1800 dall'astronomo Sir Frederick William Herschel. Incuriosito dalla differenza termica tra i vari colori della luce, diresse la luce del sole attraverso un prisma di vetro per creare uno spettro di luce e misurò poi la temperatura di ogni singolo colore. Scoprì che le temperature dei colori aumentavano nelle porzioni dello spettro dal violetto al rosso. Dopo aver notato questo, Herschel decise di misurare la temperatura appena oltre la zona del rosso, in una regione dello

spettro in cui non era visibile la luce del sole. Restò stupido quando scoprì che questa regione aveva la temperatura più elevata di tutti.

La radiazione infrarossa si trova tra la porzione dello spettro elettromagnetico del visibile e quella delle microonde. La fonte principale della radiazione infrarossa è il calore, o la radiazione termica. Qualsiasi oggetto ad una temperatura superiore allo zero assoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$ o 0 Kelvin), emette radiazioni nell'area dell'infrarosso.

L'occhio umano percepisce la lunghezza d'onda del visibile, tra $0,4$ e $0,7 \mu\text{m}$, mentre le termocamere sono sensibili alle lunghezze d'onda dell'infrarosso, tra $0,75$ e $14 \mu\text{m}$. L'essere umano però avverte le radiazioni dell'infrarosso in qualsiasi momento, semplicemente non le vede. Il calore che sentiamo provenire dal sole, da un fuoco, o da un radiatore, è tutto infrarosso; anche se i nostri occhi non riescono a vederlo, le terminazioni nervose della nostra pelle lo avvertono come calore. Più caldo è l'oggetto, maggiore è la quantità di radiazioni infrarosse emesse.



Una termocamera comprende un sistema ottico che concentra l'energia a raggi infrarossi emessa da un oggetto in un chip di rilevamento apposito (matrice del sensore), il quale include centinaia di pixel di rilevamento disposti su una griglia.

Ogni pixel della matrice del sensore reagisce all'energia a raggi infrarossi concentrata su di lui e produce un segnale elettronico. Il processore della termocamera acquisisce il segnale da ogni pixel e applica un calcolo matematico per creare una mappa di colori relativa alla temperatura apparente dell'oggetto. A ogni valore della temperatura viene assegnato un colore differente. La matrice di colore che si ottiene come risultato viene inviata alla memoria e al display della termocamera come immagine relativa alla temperatura (immagine termica) di quell'oggetto.

Molte termocamere includono anche una fotocamera a luce visibile che acquisisce automaticamente un'immagine digitale standard ad ogni attivazione del trigger. Unendo queste immagini, è più facile correlare le aree problematiche dell'immagine a infrarossi con l'apparecchiatura o con l'area sottoposta a ispezione.

Tramite la misura termografica, è possibile apprezzare differenze di temperatura dell'ordine di un decimo di grado ($0,1\text{K}$), mentre la reale misura della temperatura viene effettuata con un errore in genere compreso tra $\pm 2^{\circ}\text{C}$, nell'ipotesi che si conosca l'emissività termica superficiale e che le riflessioni da parte dell'ambiente siano trascurabili. Infatti, per i corpi non trasparenti l'emissività superficiale risulta

legata al coefficiente di riflessione secondo la relazione $\varepsilon + \rho = 1$, dove ε è l'emissività e ρ il coefficiente di riflessione. Un corpo nero presenta $\varepsilon = 1$ e non riflette. In genere le superfici riflettenti sono le superfici metalliche in particolar modo se ben lucidate. Materiali quali un intonaco o la superficie di un mattone hanno emissività prossime ad 1 ($\varepsilon = 0.98$) e possono quindi essere considerate quasi dei corpi neri, con riflessioni molto basse. Un basso valore dell'emissività richiede una correzione della misura della temperatura possibile mediante una regolazione presente in ogni strumento a patto che si conosca il valore dell'emissività. Un elevato valore del coefficiente di riflessione comporta poi la riflessione di radiazione infrarossa emessa da altre sorgenti, ad esempio il sole, che può rendere la misura della temperatura completamente sbagliata. Le riflessioni sono tuttavia facilmente individuali essendo spesso riflessioni di tipo speculare e quindi mobili con l'osservatore.

Tipi di termocamere

In commercio esistono vari tipi di termocamere ognuna con le sue specificità e campi di utilizzo. In via generale però, possono essere riunite in questi tre principali gruppi:

❖ Termocamere non radiometriche

Questo tipo di termocamera non consente di misurare il valore assoluto della temperatura, ma soltanto la differenza tra un punto e un altro. In pratica questa termocamera restituisce una immagine termica che mostra le sole differenze di temperatura, non potendo fornire la temperatura assoluta di un punto sull'immagine. Un uso comune di questa apparecchiatura è quello di prima ispezione. Ad esempio, viene utilizzata sui pannelli fotovoltaici, per individuare rapidamente le celle che presentano malfunzionamenti.

❖ Termocamere radiometriche

Le termocamere radiometriche, a differenza delle precedenti, permettono di ottenere la misurazione delle temperature assolute in qualsiasi punto presente all'interno di un'immagine. Quest'ultima è infatti costituita da un determinato numero di pixel distribuiti su righe e colonne.

Lo strumento, attraverso un procedimento elettronico, è capace di leggere rapidamente la quantità di energia contenuta e rappresentata da ciascun pixel ed in base ad essa elabora un'immagine in falsi colori o in bianco e nero dell'oggetto osservato. Il sensore microbolometro, oltre a rappresentare visivamente l'energia termica, rende possibile la misura della temperatura superficiale con una precisione $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$. Ogni singolo pixel del sensore è un punto di misura, pertanto, se una termocamera ha una matrice da 160x120 Pixel, avremo a disposizione ben 19.800 punti di misura.

❖ *Termocamere multispettrali*

Le termocamere multispettrali trovano impiego soprattutto in botanica avanzata e agricoltura. Grazie ai loro particolari sensori e in combinazione con droni, sono in grado di classificare la vegetazione o distinguere le varie colture presenti sui suoli coltivati.

Sul mercato esistono 3 tipologie di termocamere, adatte a tre tipologie diverse di consumatori e con diverse fasce di prezzo:

❖ *Termocamera Tascabile*

Rivoluzionarie per le loro dimensioni, sono consigliate per coloro che si affacciano alla termografia e per artigiani, elettricisti, idraulici. Il loro costo è contenuto.

❖ *Termocamera a Pistola*

Le termocamere a pistola (o point-shoot) sono le più diffuse nel settore edile ed industriale, sono termocamera di media fascia utilizzate sia da entry-level che da professionisti.

❖ *Termocamera Flexcam*

Le Termocamera con ottica inclinabile (o Flex-cam) hanno una forma che ricorda le comuni videocamere digitali e sono strumenti top level, con prestazioni migliori rispetto alle termocamere viste sopra. La principale peculiarità di una termocamera Flex-Cam è la possibilità di inclinare l'ottica fino a 180°riducendo l'affaticamento dell'operatore nelle ispezioni e semplificando l'analisi di componenti sopraelevati o difficilmente raggiungibili.

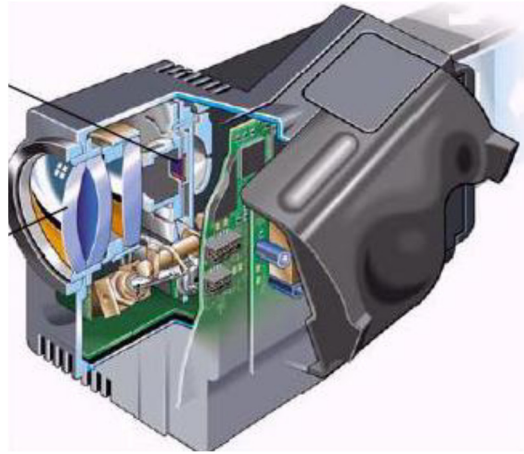
Componenti e caratteristiche principali della termocamera

In questi strumenti sono fondamentali *il sensore e la lente* (ottica) utilizzata:

1. Il sensore è una matrice bidimensionale FPA (Focal Plane Array) costituito in realtà da un reticolo di singoli rilevatori (detector) identici. Ogni singolo rilevatore rileva l'intensità di radiazione infrarossa che l'ottica focalizza su di esso e, tramite un trasduttore, la invia al sistema elettronico di elaborazione dell'immagine.
2. Poiché il vetro non è trasparente alla radiazione infrarossa l'ottica è composta da un cristallo in Germanio per le termocamere sensibili nel campo delle Long Wave (8-14 micron), da uno in Silicio per quelle sensibili nel campo delle Short Wave (0,8-2 micron) e Middle Wave (2-5 micron).

Sensore

Lente



Importante è il sensore, elemento fondamentale che condiziona le prestazioni e le potenzialità dello strumento e che costituisce la principale voce di costo.

È costituito dalla matrice bidimensionale di rilevatori e da tutti i componenti accessori (supporti, circuiteria elettrica, filtri, specchi e dispositivi ottici fissi o mobili, apparati di controllo della temperatura, ecc....)

I sensori fungono da trasduttori: trasformano l'energia elettromagnetica ricevuta in fenomeni misurabili (es. variazioni di potenziale elettrico, variazione di corrente elettrica, ecc....). Tutti i sensori hanno la caratteristica di essere sensibili ad una sola parte dello spettro elettromagnetico.

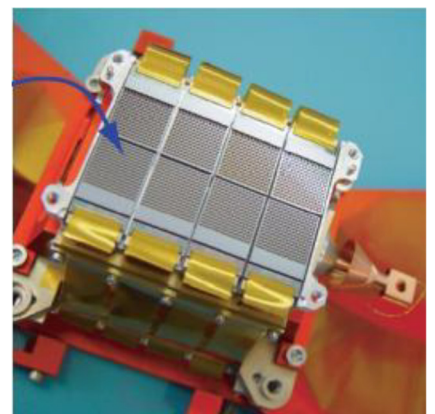
Nelle termocamere di ultima generazione si sono affermate due classi di sensori ad infrarossi FPA:

1. **Sensori microbolometrici**, o termici, appartenenti alla famiglia dei sensori di tipo termico, insieme ai sensori piroelettrici;
2. **Sensori fotovoltaici**, o fotonici, appartenenti alla famiglia dei sensori quantici.

1) **Sensori Microbolometrici**

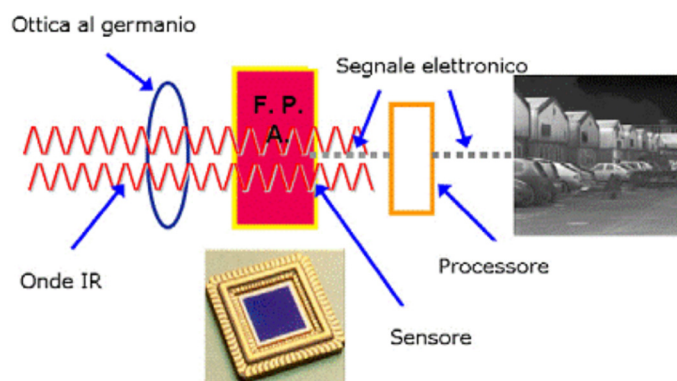
La radiazione che colpisce il sensore lo riscalda. Tale riscaldamento ha l'effetto di modificare la conduttività elettrica del materiale (silicio amorfo o ossido di vanadio). Per cui se si fa passare corrente attraverso il sensore bolometrico, la variazione di corrente prodotta dalla radiazione incidente può essere misurata e calibrata per ottenere una misura di T.

In realtà, l'algoritmo di misura è più complesso poiché tiene conto di ulteriori parametri, come: temperatura riflessa, temperatura ambiente, temperatura del gruppo ottico, coefficiente ϵ , distanza di ripresa.



I sensori microbolometrici:

- ❖ sono più lenti per il tempo di riscaldamento necessario ad attivare la variazione di conduttività elettrica;
- ❖ hanno una risoluzione termica minore, e costi minori;
- ❖ sono sensibili ad un ampio range di lunghezze d'onda prevalentemente nel Long Wave Infrared (di solito da 8-14 μm);
- ❖ non necessitano di raffreddamento e sono perciò impiegati nelle termocamere portatili



2) Sensori Fotovoltaici

In termini quantici la radiazione infrarossa trasporta quanti di energia. I sensori fotovoltaici restituiscono un segnale elettrico come diretta conseguenza della radiazione elettromagnetica rilevata, che è costituita da un flusso di fotoni, cioè quanti di energia elettromagnetica. Operano in base all'effetto fotoelettrico: i materiali che li compongono assorbono fotoni, che aumentano il livello energetico degli elettroni, determinando un aumento della conduttività, del potenziale o della corrente. Raffreddati a temperature criogeniche diventano molto sensibili all'energia infrarossa che l'ottica concentra su di essi ed hanno un tempo di risposta dell'ordine di 1 microsecondo. I sensori fotovoltaici hanno necessità di sistemi di raffreddamento che nel tempo si sono evoluti e migliorati:

- Vaporizzazione di azoto liquido (77 K) o elio liquido (4 K)
- Espansione di Argon o altri gas,
- Refrigeratori termoelettrici ad effetto Peltier (200 K)
- Apparat di refrigerazione multistadio a ciclo Stirling

I sensori fotovoltaici:

- sono molto più veloci in quanto non necessitano di alcun riscaldamento;
- hanno una risoluzione più elevata;
- devono essere raffreddati (operano alla T di circa 70 K, cioè - 203°C);
- molto utili nella registrazione di eventi durante transitori termici;
- hanno applicazione soprattutto in laboratorio, videosorveglianza, usi militari, controllo delle frontiere.

Oltre a sensore ed ottica, le termocamere possiedono altre importanti caratteristiche:

1. Il NETD, acronimo di “*noise equivalent temperature difference*”, corrisponde alla sensibilità termica dello strumento, cioè la più piccola differenza di temperatura che lo strumento riesce a rilevare: differenze di temperatura inferiori al NETD non sono percepibili poiché inferiori al “rumore di fondo”, mentre differenze di temperatura superiori al NETD generano il fenomeno della saturazione nell’immagine riprodotta dallo strumento.
2. Il Frame Rate o frequenza di acquisizione: rappresenta il massimo numero di immagini termiche acquisibili in sequenza nell’unità di tempo. In un sensore FPA il valore è limitato a causa dell’inerzia dei rilevatori (per i sensori non raffreddati). È un parametro fondamentale nell'utilizzo della termocamera se si cerca di misurare la temperatura di un oggetto in movimento o se l'operatore muove lo strumento durante la misurazione. Le termocamere con frequenza di acquisizione \geq ai 60 Hz ricoprono la maggior parte delle applicazioni.
3. La Pixel Resolution o risoluzione geometrica: rappresenta il numero di pixel in un’immagine termica, in linea di principio identico al numero di rilevatori di un sensore FPA. Influenza la qualità dell’informazione poiché ci dice ad ogni distanza quanto più piccoli sono gli oggetti che è possibile inquadrare. Hanno ampia diffusione termocamere con sensori da 320x240 (=76800) o 160x120 rilevatori sia raffreddati che non, ma sono commercialmente disponibili anche termocamere da 640x480 pixel. Sistemi militari o per applicazioni scientifiche arrivano ad altissime risoluzioni di 2048x2048 pixel.
4. Il FOV, acronimo di “*field of view*”, rappresenta il campo di vista dello strumento, cioè l’angolo solido complessivamente monitorato dal sensore dello strumento. È espresso in gradi angolari ed è il più utilizzato poiché rappresenta l’area che la termocamera è in grado di inquadrare in funzione della distanza. Può essere modulato sostituendo la lente dello strumento. Tre tipi di lente con tre diversi FOV:
 - Lenti STANDARD: FOV tra 10° e 25°;
 - Lenti GRADANGOLARI: FOV tra 25° e 60°;
 - Lenti TELEOBIETTIVI: FOV tra 1° e 10°.
5. IFOV, acronimo di “*instantaneous field of view*”, corrisponde al campo di vista istantaneo o alla risoluzione spaziale e rappresenta l’angolo solido monitorato dal singolo rilevatore di un sensore FPA. Indica la capacità di un’ottica di risolvere, cioè vedere e misurare, la temperatura di un’area puntiforme all’interno di un’immagine termica. Il campo visivo istantaneo definisce anche la capacità di un sistema di distinguere due aree puntiformi adiacenti. È una misura di spazio e quindi viene calcolata in mrad (milliradiani). L’IFOV rappresenta la porzione di campo visivo che corrisponde ad ogni singolo pixel.

Principali tecniche termografiche

In generale, possono essere distinte tre tecniche termografiche: la termografia ad impulsi (*Pulse Thermography*, PT), la termografia lock-in o termografia modulata (*Modulated Thermography*, MT) e la termografia a fase pulsata (*Pulse Phase Thermography*, PPT).

La termografia ad impulsi consiste semplicemente in una stimolazione dell'oggetto tramite un impulso energetico e il monitoraggio della variazione superficiale della temperatura durante la fase transitoria, nel riscaldamento o nel raffreddamento. Il riscaldamento avviene generalmente attraverso fari, lampade, flash o aria calda. L'aria calda può essere utilizzata solo in presenza di ampie superfici, a causa dei possibili danneggiamenti che potrebbe produrre. L'energia termica si propaga sotto la superficie tramite la conduzione mentre la termocamera registra la variazione di temperatura sulla superficie sotto analisi. Ovviamente la distribuzione di temperatura sarà uniforme se il materiale è omogeneo. Se invece nel materiale è presente un difetto o una discontinuità, ciò sarà un ostacolo alla propagazione del calore e come risultato si avrà una differenza di temperatura localizzata. L'evoluzione del fenomeno può essere osservata tramite l'acquisizione di una sequenza di immagini che dovranno essere elaborate successivamente per ottenere informazioni sulla dimensione, profondità e resistenza termica del difetto. Il punto cruciale dell'analisi è la capacità di distinguere, nelle applicazioni reali, il contrasto termico tra una zona omogenea e una zona con un difetto: in questo caso bisogna avere una buona conoscenza del materiale sotto esame. A differenza dei test in laboratorio, svolti in ambienti controllati e su provini di cui si conosce bene il materiale e proprietà, il controllo dei beni culturali come affreschi o quadri, è molto più difficoltoso poiché si ha a che fare con materiali antichi, antiche pitture che generalmente sono opache a causa dell'ossidazione (quindi con un alto valore di emissività). Le difficoltà di analisi aumentano se sono presenti interventi di restauro effettuati con prodotti chimici che comportano variazioni di emissività locale oppure se si analizzano mosaici, poiché sono composti da tessere di materiale diverso, il cui coefficiente di emissività varia da 0.95 per le tessere opache, a 0.6 per quelle più luminose. Per la termografia ad impulsi, sono possibili due modalità: trasmissione e riflessione. Nel caso della trasmissione, la termocamera ad infrarossi viene posizionata sulla parte posteriore della parete, cioè in opposizione alla fonte di riscaldamento. Questo approccio non è generalmente utilizzato, poiché spesso la porzione posteriore della superficie in analisi non è accessibile. Per questo viene preferita l'analisi tramite riflessione, dove sia la termocamera che la sorgente di calore sono posizionate di fronte alla superficie in analisi.

In questa tipologia di analisi, utilizzando la termografia ad impulsi in modalità di riflessione, incrementare la temperatura della superficie di 3-7 gradi rispetto a quella ambientale permette di visualizzare i difetti, durante la fase di riscaldamento, anche se con un debole contrasto. Un modo per aumentare il contrasto è far seguire la fase di riscaldamento da una rapida fase di raffreddamento, tramite

dell'aria fredda. Tuttavia, la tecnica di riscaldamento/raffreddamento non è consigliata per l'analisi di affreschi, a causa degli effetti negativi causati dal surriscaldamento locale dell'opera o dal flusso dell'aria. Per superare il problema del riscaldamento della superficie non uniforme, si può adottare una soluzione in cui la sorgente termica si muove: la termografia a riscaldamento laterale (*Lateral Heating Thermography*). In pratica, si monta la sorgente di calore, come una lampada, su due binari e tramite una coppia di motori con un inverter per variare la velocità, si fa muovere la sorgente sopra la superficie in analisi. In questo modo il riscaldamento è più lineare ed uniforme e la visibilità dei difetti dipende da vari parametri: la distanza D della sorgente dalla superficie analizzata, la velocità v , il tempo di esposizione t collegato al numero dei passaggi N_p . Per esempio, stabilita la velocità $v = 0.033$ m/s e il numero dei passaggi $N_p = 12$, la relazione tra l'incremento di temperatura della superficie ΔT_s e la distanza D della sorgente è:

$$\Delta T_s = 7,87e^{-0,0013D}$$

Tramite dei test e dei grafici si può mettere in relazione l'incremento di temperatura con i vari parametri sopracitati, permettendo di scegliere le caratteristiche ottimali per evitare il surriscaldamento locale della superficie. La termografia ad impulsi fornisce informazioni sulla dimensione, profondità e resistenza termica del difetto, anche se i dati possono essere soggetti ad errori a causa della variazione locale dell'emissività e a causa del riscaldamento non uniforme.

La termografia modulata si basa su un sistema affiancato da una sorgente di onde termiche che opera in modo tale da generare una modulazione della temperatura sinusoidale. La modulazione è generata da un impulso elettrico non lineare prodotto dal modulo Lock-in. La fonte di calore deve essere calibrata, per ogni frequenza, in modo tale da ottenere sempre una forma dell'onda termica sinusoidale. Nell'analisi lock-in, il sistema colleziona una serie di immagini e compara tra loro la temperatura estraendola dall'onda sinusoidale in ogni punto dell'immagine. L'equazione dell'onda termica è:

$T(t, z) = T_0 e^{-z/\mu} \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda})$, che esprime la temperatura T in funzione della profondità z e del tempo t e la lunghezza d'onda λ è definita come: $\lambda = 2\pi\mu$.

Lo spessore del materiale da analizzare dipende dal tempo del ciclo dell'onda (più lenta è l'onda, più è profonda la penetrazione) e dalle proprietà del materiale (conduttività termica, capacità termica e densità). Per esempio, il range delle frequenze per l'Agema 900, opzione Lock-in 2.0, varia da 3.75 Hz (267ms) a 0.0037 Hz (273s) in 15 intervalli. La massima profondità è raggiunta alla minima frequenza e dipende da:

$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$ dove α è la diffusività termica del materiale e f la frequenza dell'onda.

Generalmente, nei test si parte da una frequenza dell'onda media che, in base alla diffusività del materiale, permette di vedere difetti superficiali o poco profondi. Per analizzare difetti più profondi, la frequenza è diminuita fino al minimo. È noto che l'ampiezza dell'onda è insensibile ai riflessi dell'ambiente, mentre la fase è indipendente dal coefficiente di emissione termica. Questa tecnica è

ottima nell'analisi di preziosi manufatti, poiché non necessita di elevati gradienti termici ed inoltre la capacità di uno strumento di rilevare piccole differenze nei materiali viene considerato un importante vantaggio, soprattutto se si analizzano affreschi che possono essere stati rimaneggiati o riparati negli anni. In più, la termografia modulata permette di seguire la propagazione delle crepe: riducendo la frequenza sono visibili solo le crepe più grandi che si estendono in profondità. Tuttavia, le frequenze disponibili per la modulazione dei flussi termici non sono sufficientemente basse per rilevare i difetti più profondi.

La termografia a fase pulsata combina i vantaggi della PT e della MT. Nella termografia modulata, una singola frequenza è testata in regime stazionario, mentre nella termografia ad impulsi, varie frequenze vengono testate simultaneamente in regime transitorio. Nella termografia a fase pulsata, il campione viene riscaldato da un impulso rettangolare al posto di un impulso ideale di Dirac, in modo tale da avere un'ampiezza variabile nelle frequenze lanciate nel campione. Vengono poi acquisite delle sequenze di immagini e, per ogni pixel, viene estratto il decadimento temporale $D(x)$. Poi viene eseguita la

trasformata di Fourier $F_t(f)$ e si ottiene la fase ϕ di ogni frequenza f dalla formula: $\phi(f) = \tan^{-1}\left(\frac{I(f)}{R(f)}\right)$

dove $I(f)$ e $R(f)$ rappresenta la componente immaginaria e reale della trasformata di Fourier.

Questa tecnica può rivelare difetti localizzati ad una profondità maggiore, ma necessita di una certa differenza di temperatura tra le immagini successive della sequenza. Per esempio, per una frequenza di 0.0032 Hz, i difetti sono ben visibili con un $\Delta T_s = 7^\circ\text{C}$. Per un $\Delta T_s = 2^\circ\text{C}$, bisogna utilizzare una frequenza di 0.0021 Hz. Più la frequenza diminuisce più la stima del difetto può subire degli errori. Per questo, dato che per visualizzare difetti più profondi si necessita di gradienti di temperatura più elevati, la termografia a fase pulsata può essere considerata una tecnica eccellente quando le superfici da analizzare sono insensibili alle variazioni di temperatura, ma non è raccomandata in caso di analisi di reperti storici preziosi.

Nella ricerca dei difetti nascosti sotto le superfici dei reperti da analizzare, la fase più critica è proprio la valutazione dei dati acquisiti. Un basso contrasto e il rumore di fondo dell'immagine possono nascondere o confondere i difetti. La tecnica migliore per la riduzione del rumore è la ricostruzione del segnale termografico (TSR, *Thermographic Signal Reconstruction*). Essa permette la riduzione della quantità di dati, la pulizia del rumore dal segnale e l'ulteriore elaborazione dei dati sintetizzati usando immagini della prima e della seconda derivata insieme alla FFT, cosa che migliora considerevolmente il rapporto segnale-rumore.

La termografia al servizio dei beni culturali

La termografia come tecnica di studio ed analisi di dipinti, affreschi e mosaici, viene utilizzata principalmente per l'individuazione e la caratterizzazione di problematiche relative al supporto stesso o all'interfaccia tra il supporto e la pellicola pittorica. In generale si possono identificare tre fasi nell'analisi di beni artistici tramite termografia: 1) la preparazione dell'ambiente di ripresa; 2) l'acquisizione delle immagini; 3) l'analisi delle immagini. Ogni fase è fondamentale, ma la buona riuscita del lavoro dipende principalmente da un'ottimale preparazione dell'ambiente di ripresa, come la conoscenza della temperatura ambientale, dell'umidità, del materiale dell'opera da analizzare, la corretta impostazione della termocamera, l'individuazione della tecnica di riscaldamento ottimale per ogni specifica opera, poiché la maggior parte delle rilevazioni termografiche avviene in loco. Nel nostro caso, l'attenzione si è concentrata principalmente sulle tecniche utilizzate per la diagnosi di opere artistiche come affreschi, quadri, mosaici e i relativi risultati.

Cocomeri e Poponi

di Emilio Longoni (Barlassina di Seveso 1859 – Milano 1932)

Il dipinto è un'opera su tela del 1886 il cui spessore della materia pittorica (3 mm, tela compresa), la sovrimmissione di differenti strati di materiale e la presenza di distacchi del colore ha lasciato spazio alla possibilità di evidenziare specifiche disomogeneità termiche. L'opera,

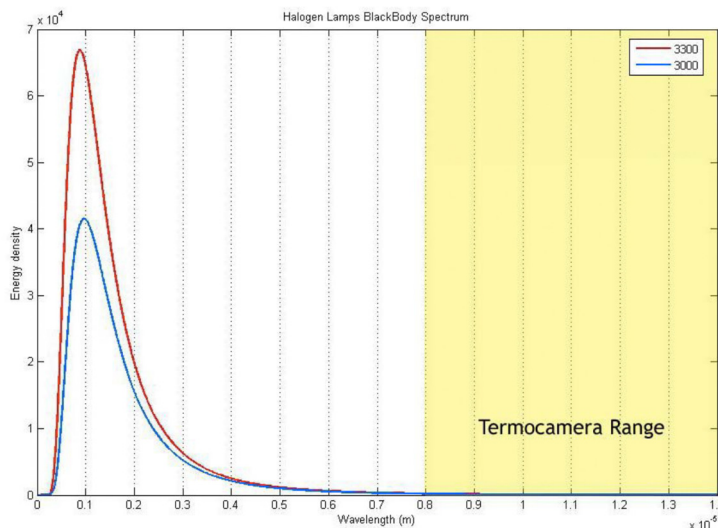


analizzata in primo luogo con altre tecniche di imaging multispettrale, tra cui la termografia, e sottoposta ad analisi spettroscopiche invasive e non, è risultata affetta da problemi di sollevamento della pellicola pittorica, in alcuni casi con evidente distacco. Su richiesta del restauratore e della conservatrice del museo si è pensato di verificare se a tali cadute corrispondesse una situazione più ampia di disadesioni della superficie della pittura rispetto agli strati sottostanti, situazione da tenere in tal caso sotto controllo nel tempo e da sanare con iniezioni di materiale consolidante. Nella scarsa adesione tra strati del colore possono avere un ruolo la foderatura occorsa al dipinto in un vecchio restauro e pure il fatto, scoperto

grazie alle radiografie, che l'opera è dipinta sopra una tela già utilizzata e dipinta, con i suoi spessori originari.

Per lo studio si è optato l'approccio attivo e dinamico, acquisendo una sequenza di immagini sia durante il riscaldamento stimolato, sia in fase di raffreddamento.

Riscaldamento: lampade alogene da 1000W, 3000-3300 K. (Si può notare che la coda della curva spettrale di emissione delle specifiche lampade cade al di fuori del range di sensibilità della termocamera (8-14 μm)).



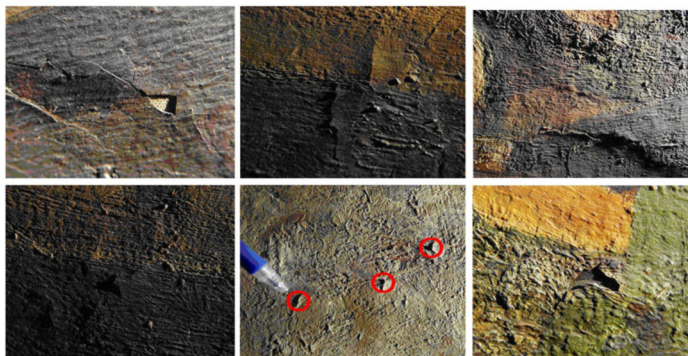
Posizionamento: In riflessione lampada anteriore posizionata a 45° rispetto alla normale del dipinto, mentre la camera è frontale. La distanza Opera-Sorgente è pari a 105 cm, mentre la distanza Opera-Camera

è 80 cm. In trasmissione lampada posteriore a 112 cm, mentre la camera è frontale al dipinto.

Acquisizione: In riflessione acquisizione delle immagini ogni 10 s sia in riscaldamento (2 min. fino a raggiungere un gradiente termico di 4°C), sia in raffreddamento (5 min. circa fino a raggiungere l'equilibrio termico). In trasmissione acquisizione delle immagini ogni 10 s sia in riscaldamento (2,5 min. circa, fino a raggiungere un gradiente termico di 6°C), sia in raffreddamento (5 min. circa).

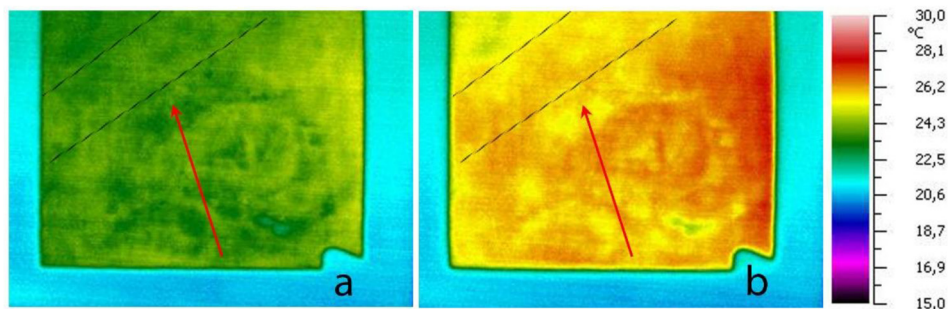
Strumentazione: Termocamera AVIO TVS700, con sensore FPA microbolometrico (320x240), sensibilità standard di 0.08°C ed emissività impostata a 0,90.

Risultati: il riscaldamento indotto ha portato nel sistema, dopo un'esposizione di 110-120 s, ad uno stato in cui non era più possibile distinguere



i differenti comportamenti termici, per cui sono stati analizzati solamente i primi 10 fotogrammi, sia in riflessione che in trasmissione. Nella sequenza in riflessione, sono state individuate aree a maggior riscaldamento, che denotano l'impiego di materiali a maggiore inerzia termica, strati pittorici più spessi o delaminazioni e distacchi superficiali, mentre le aree a minor riscaldamento denotano maggiore conducibilità termica e/o minore spessore. Bisogna tenere presente che influisce molto anche il colore della superficie. In trasmissione, le aree a temperatura maggiore indicano l'utilizzo di materiali a maggiore conducibilità termica e/o strati più sottili, mentre le zone più fredde indicano maggiore inerzia termica e/o maggiore spessore. Sono state inoltre individuate due "linee" parallele, slegate dall'impianto

iconografico visibile, le quali, tramite il confronto con radiografie digitali ad alta risoluzione, possono essere assimilate ad una precedente opera in cui la tela era ruotata e aveva come soggetto una figura femminile in piedi.



Affresco romanico interno all'Abbazia di San Giacomo della Bessa

La chiesa e il convento furono eretti tra il 1083 e il 1085 dal vescovo di Vercelli. La chiesa, di stile romanico, ha subito molte rimodulazioni nel tempo, andando a deturpare le linee architettoniche. Rimane al suo interno un affresco romanico, collocato nella navata centrale. In questo caso, le operazioni di analisi si sono concentrate sulla facciata della chiesa e sulla navata centrale, attraverso rilievi fotogrammetrici e laser scanner e sull'affresco, attraverso la termografia.



Riscaldamento: effettuato sull'affresco attraverso stufe elettriche ad irraggiamento;

Posizionamento: sono state acquisite immagini termografiche dell'affresco in 3 punti (alto, medio, basso).

Acquisizione: è stata acquisita una sequenza di immagini, una ogni minuto per 30 minuti, sfruttando il transitorio di raffreddamento della superficie. Per ogni immagine termica è stata acquisita anche un'immagine nel visibile, tramite la stessa termocamera. È stata acquisita anche un'immagine termica in modalità stazionaria, prima del riscaldamento.

Strumentazione: termocamera NEC Thermo Tracer

TH9100MV/WV, con sensore microbolometrico (320x240), sensibilità standard di 0,06°C, range spettrale da 8 a 14 μm . Lo strumento presenta anche una camera nel visibile da 0.41 Megapixel (752x480).

Le varie immagini termiche sono poi state elaborate e sovrapposte tra loro, per ottenere un'unica immagine completa (Figura 1). Le termografie in situazione stazionaria non hanno fornito dati apprezzabili. Le informazioni acquisite nel transitorio di raffreddamento hanno permesso di rilevare un'anomalia termica nella parte bassa dell'affresco, causata da materiale avente capacità termica

maggiore, presenza forse di sali o umidità corrispondente ad un distacco dell'intonaco della muratura retrostante. Nella zona centrale dell'affresco si notano invece due zone che corrispondono a porzioni di affresco ricostruite o restaurate. Invece, nella parte alta e bassa dell'opera, si può leggere la tessitura muraria retrostante l'affresco formata da pietre di diverso materiale e la terminazione di due archi laterali.

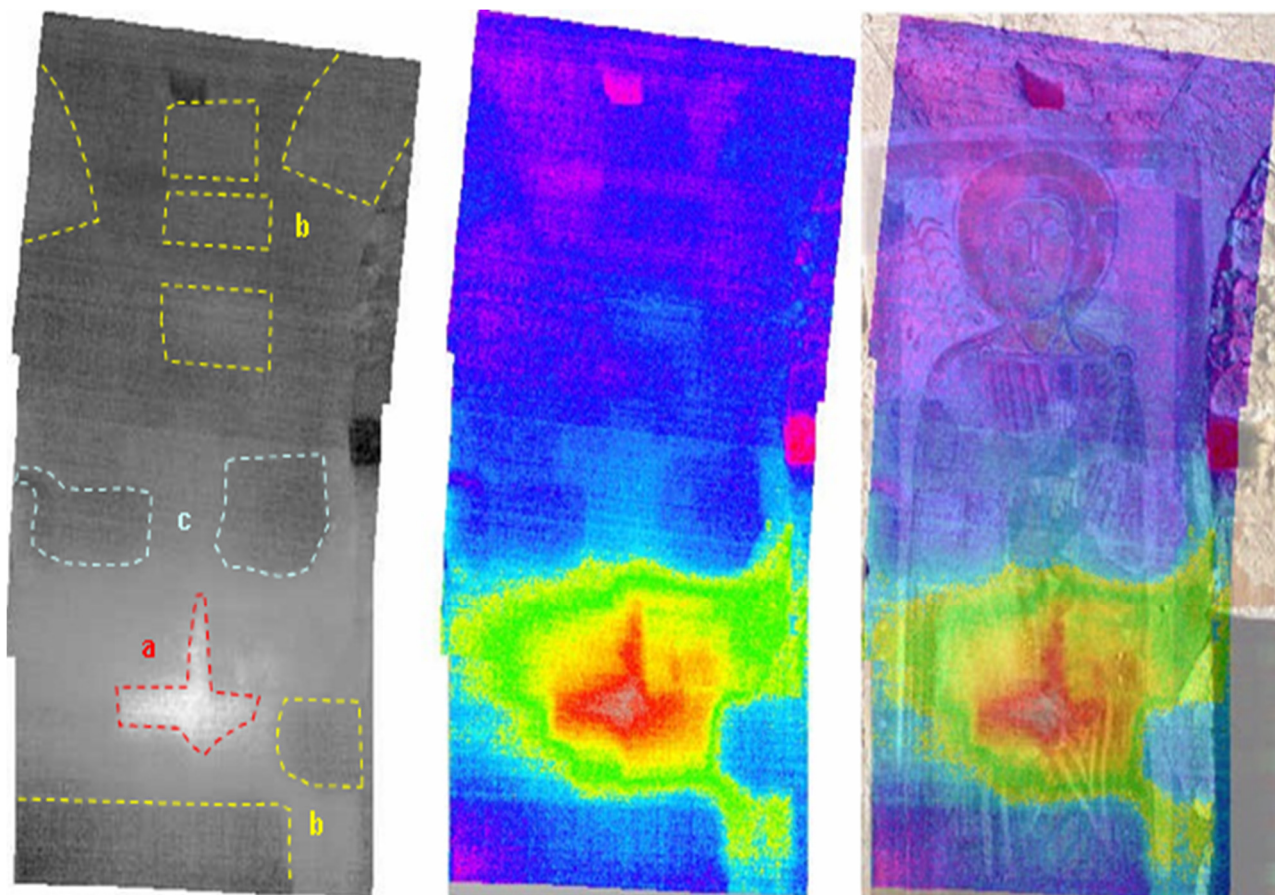
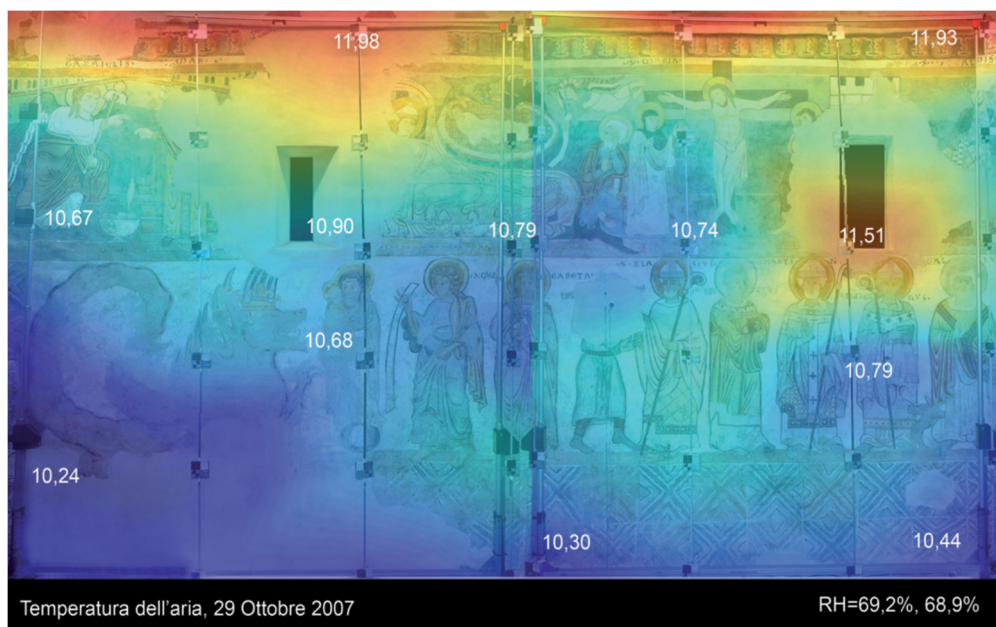


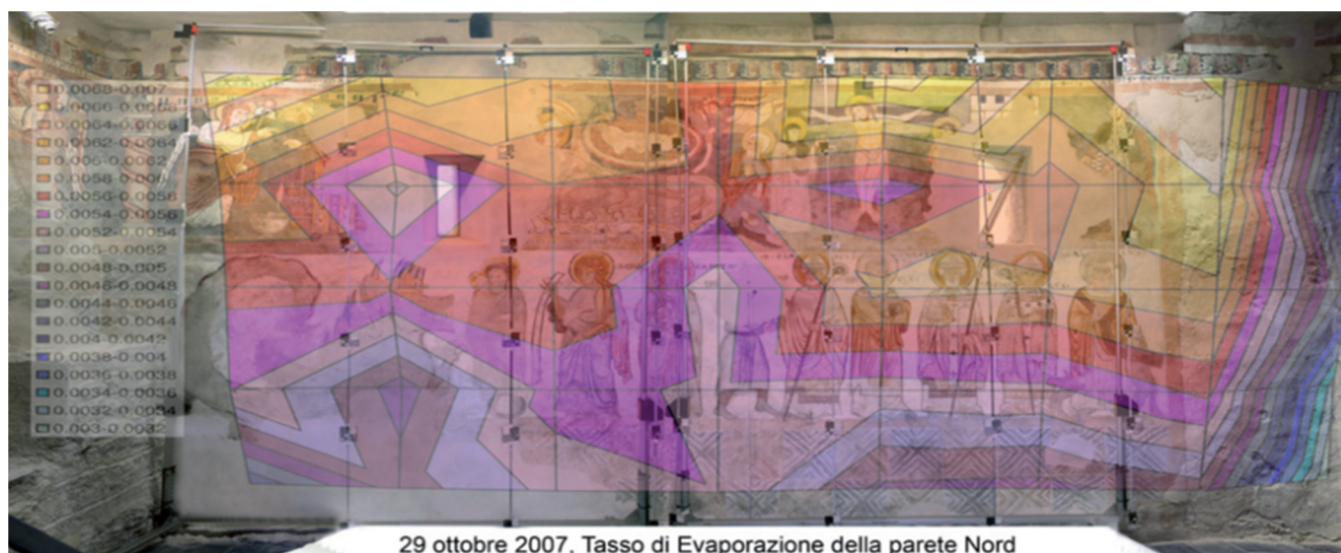
Figura 1: Elaborazione e sovrapposizione delle immagini termografiche dell'affresco romanico.

Rilevazione delle condizioni termodinamiche all'interno di una cappella medievale

L'intervento, ad opera della Soprintendenza dei Beni Culturali della provincia di Trento, è stato effettuato attraverso l'uso di un dispositivo accessorio e sono state compiute rilevazioni termodinamiche all'interno della cappella, nell'arco di 12 mesi. Nei vari monitoraggi, la temperatura dell'affresco si è sempre dimostrata uniforme, anche se variabile nel corso dell'anno. In queste condizioni, non si ottiene alcuna informazione da una termografia tradizionale, poiché indipendentemente dal contenuto di acqua nel muro, non ci sarà evaporazione a causa dell'umidità relativa



molto alta e un'insufficiente circolazione dell'aria, condizioni molto comuni all'interno degli edifici storici. Per quello, sono stati compiuti rilevamenti differenti, come la temperatura dell'aria a 10 centimetri di distanza dall'affresco: si osserva la distribuzione di temperatura dell'aria che è molto accurata, si nota la stratificazione verticale e gli effetti dei faretto che illuminano l'affresco dall'alto. Inoltre, si nota la scia termica dell'aria esterna (più calda di qualche grado) che filtra dalla finestrella di destra, mentre quella di sinistra è sigillata. Attraverso un nuovo metodo di indagine termografico sviluppato dal CNR, si è misurata l'umidità relativa in due zone della cappella, che è risultata costante attorno al 70%, valore corrispondente a quello fornito da altri strumenti. È stata poi misurata, sempre all'interno della cappella,



la distribuzione di velocità dell'aria, che ha raggiunto valori massimi di 0,5 m/s in prossimità della finestrella, mentre nel resto dell'affresco era molto inferiore, difficile da misurare anche con anemometri a filo caldo. In queste condizioni, l'evaporazione è inibita dalla stagnazione dell'aria. Combinando questi risultati con la temperatura superficiale, si è ottenuto una stima del tasso di evaporazione della parete: quest'analisi relativa, combinata con altri test specifici, ha portato ad una diagnosi chiara per quanto riguarda l'umidità delle opere pittoriche analizzate. Questo perché il microclima è estremamente importante per la salute degli occupanti e dell'opera stessa e la termografia può essere utilizzata, sempre combinata con altri strumenti, per valutare la condizione di benessere.

Rilevazioni termografiche sugli affreschi della *Sala dei Pavoni* nella villa di Oplontis

L'analisi è stata effettuata per valutare lo stato di conservazione del ciclo pittorico. La superficie degli affreschi è stata suddivisa in settori, per ottimizzare, identificare e interpretare meglio i dati ricavati.

Riscaldamento: effettuato a livello locale attraverso un phon, per avere un gradiente termico sufficiente.

Posizionamento: le riprese sono state effettuate dalla distanza di 2 metri circa, tenendo la termocamera fissa su un cavalletto.

Acquisizione: le immagini acquisite sono state rielaborate attraverso softwares dedicati come MikroSpec e Microview, in modo tale da mettere in evidenza le aree interessate.

Strumentazione: è stata utilizzata una termocamera Nikon-Nek Thermo Tracer TH9100MV/WV, con sensore microbolometrico (320x240), sensibilità standard di 0,06°C, range spettrale da 8 a 14 µm.

L'emissività è stata impostata a 0,54.

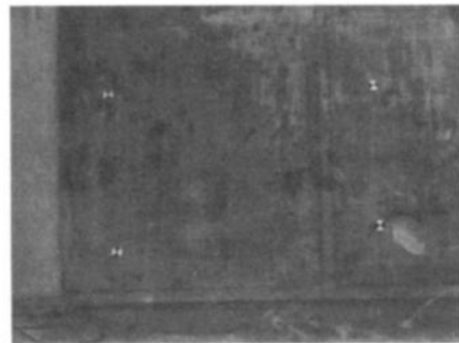
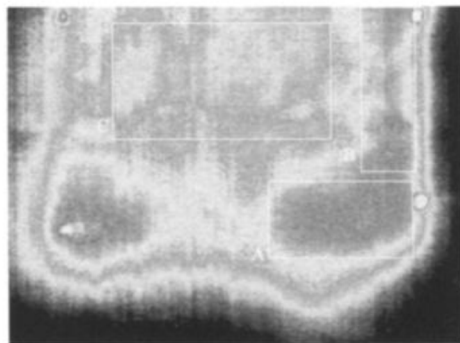
In generale, tramite l'analisi termografica, sono state rilevate diverse fessurazioni negli affreschi, alcune più evidenti, anche nel visibile, altre più nascoste. Frequenti sono anche i distacchi del materiale



dall'intonaco sottostante, evidenziato da aree più fredde, mentre sono presenti anche zone fredde causate dalla diversa capacità termica del materiale, probabilmente infestato da muffe, o anche a causa dei diversi pigmenti utilizzati.

Gli affreschi siti nelle aree archeologiche sono opere ad alto rischio di degrado per la presenza di umidità, infiltrazioni di acqua nelle murature ed esposizione agli agenti atmosferici ed intemperie. In conclusione, il quadro degradativo è diffuso e differenziato: vi sono zone a diretto contatto con il piano di calpestio che

risultano più fredde per la presenza di umidità di risalita, forse causata dal passaggio di una conduttura di acqua.

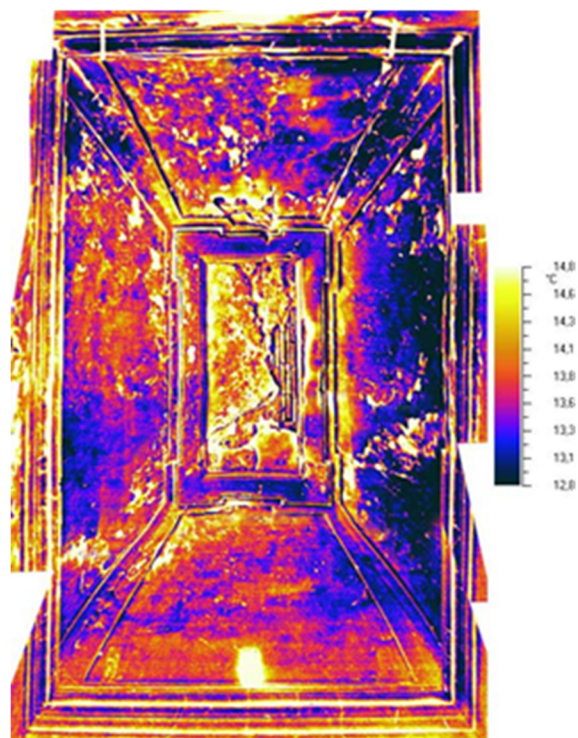


Volta affrescata in villa Mirabello a Monza

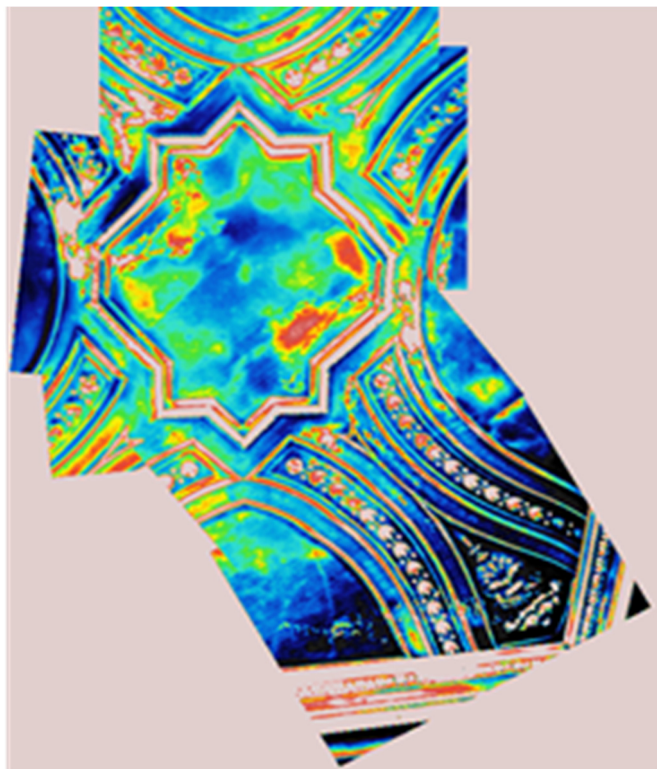
Per accertare la natura di irregolarità come la mancanza di aderenza tra gli strati degli affreschi, o per

valutare le dimensioni e profondità dei difetti, il test più comunemente effettuato è il test a percussione, in cui si percuote la superficie e a seconda del suono riprodotto, si può dedurre la condizione di adesione. Per compiere ciò, la superficie deve essere raggiungibile e quindi, per aree al di sopra di 2,5m, bisogna predisporre ponteggi o elevatori. Poiché la stima dei distacchi avviene prima dell'intervento, spesso si approssima la valutazione delle aree di intervento. Per questo, un valido aiuto per la mappatura dei distacchi proviene dalla valutazione termografica: nel caso della volta affrescata in villa Mirabello, l'indagine termografica ha permesso di effettuare una

prima stima dei distacchi degli strati più esterni, senza allestire ponteggi. Il riscaldamento è stato effettuato per convezione, poiché il riscaldamento per irraggiamento di affreschi o superfici molto disomogenee può causare assorbimenti differenziati del calore per via soprattutto dei differenti colori. Inoltre, l'andamento del segnale termico nel tempo dipende dalla profondità e dallo spessore del



difetto, e perciò la durata e la modalità del riscaldamento e dell'acquisizione delle immagini deve essere valutata e calcolata in funzione della presunta profondità del difetto e delle caratteristiche del materiale. Dai termogrammi acquisiti in fase di riscaldamento, si è potuto facilmente individuare i vari punti più caldi, che corrispondono al distacco dello strato più esterno dell'affresco. Una semplice localizzazione dei difetti di adesione avviene sui materiali che presentano un coefficiente di riflessione basso ed emissività

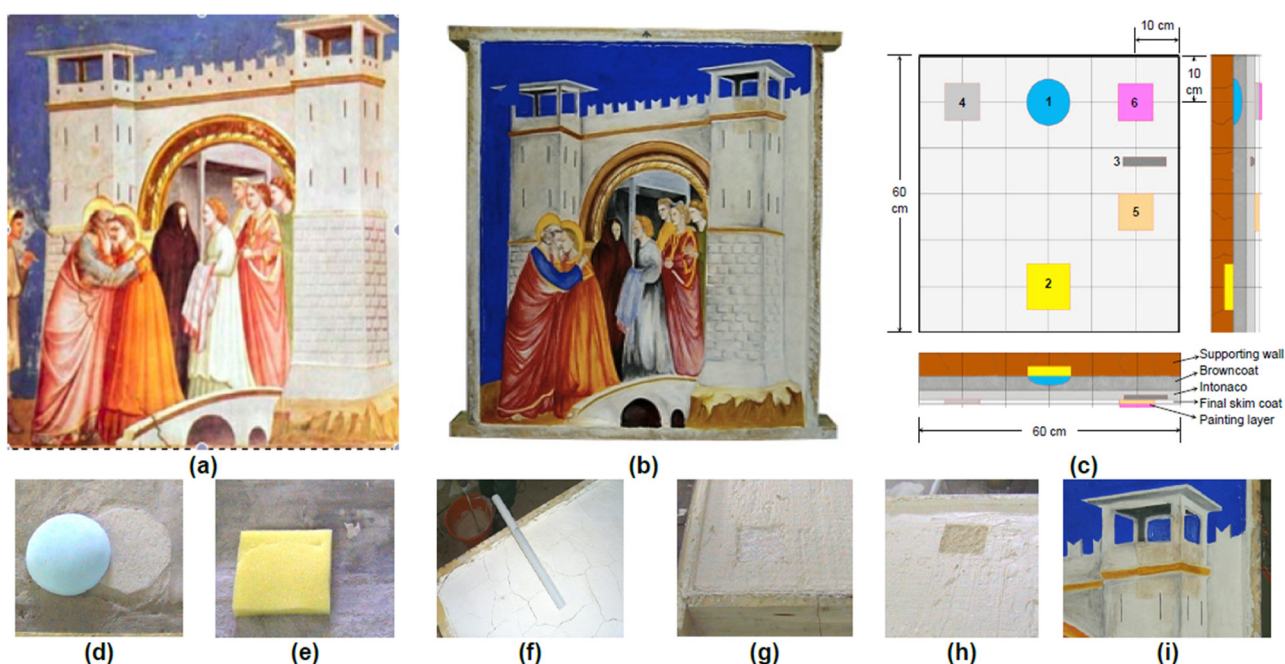


molto alto, come gli intonaci.

Le immagini termiche ricavate dall'analisi di una volta intonacata di un edificio storico a Milano, permettono di individuare velocemente i punti critici. La volta è stata riscaldata per convezione, attraverso un flusso di aria calda che ha generato un gradiente termico di 8°C e sono state acquisite delle immagini, che rilevano, attraverso la scala cromatica, precisamente tramite le macchie rosse, i distacchi della finitura, poiché lo strato di aria interposto tra la finitura e la muratura sottostante si oppone al flusso termico, generando un aumento locale della temperatura superficiale della zona in cui è presente il distacco.

Riproduzione dell'*Incontro di Anna e Gioacchino alla porta d'oro*

Gli affreschi sono, più di altri, soggetti a variazioni ambientali o altre cause esterne che possono danneggiare la loro integrità. L'aria condizionata, la luce, l'inquinamento, il contatto umano, accelerano il deterioramento delle opere. Anche il vapore acqueo prodotto dal respiro dei visitatori, depositandosi sulla superficie delle opere, può incrementare il deterioramento. Per questo il monitoraggio e l'applicazione di tecniche non distruttive è fondamentale, non solo per restaurare l'opera, ma anche per conservarla. Per comprendere meglio quale delle diverse tecniche termografiche è meglio applicare, si effettuano test di laboratorio. In questo caso, è stato scelto di creare una copia dell'opera di Giotto *Incontro di Anna e*



Gioacchino alla Porta d'Oro, affresco presente alla Cappella degli Scrovegni a Padova. La riproduzione (1.b) è stata effettuata su un supporto di legno 60x60 cm, utilizzando le tecniche e i materiali tradizionali. Nella riproduzione dell'opera, sono stati inseriti a differenti livelli, dei difetti che rappresentano i tipici danneggiamenti subiti dagli affreschi (1.c).

Il difetto 1 (d) è un vuoto, riprodotto attraverso una sfera di polistirene, che è stata rimossa dopo che l'opera era asciutta, e va a rappresentare il distacco dell'affresco dal supporto. Il difetto 2 (e) è una spugna, che può essere bagnata tramite un mattone rimovibile dietro di essa. Il difetto 3 (f) è un mezzo tubo di gomma inserito tramite un buco nel supporto di legno, per simulare un vuoto tra la pellicola pittorica e la rasatura del fondo. Il difetto 4 (g) è stato realizzato inserendo del cloruro di sodio per simulare l'alterazione causata dai sali (efflorescenza). Il difetto 5 (h) è stato realizzato tramite sabbia di fiume per produrre crepe sulla superficie. Il difetto 6 (i) è stato realizzato miscelando il poliacetatovinile con del colore, per simulare lo sfaldamento della pellicola pittorica, dopo l'essiccazione dell'affresco.

Riscaldamento: l'affresco è stato riscaldato tramite 4 lampade ad infrarossi da 250W, piazzate su una struttura in legno.

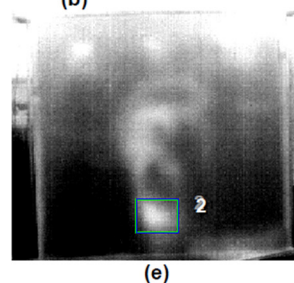
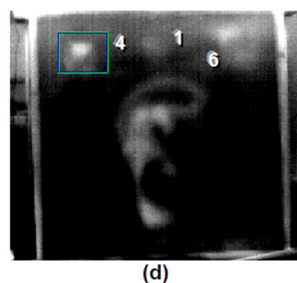
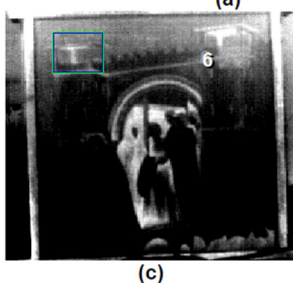
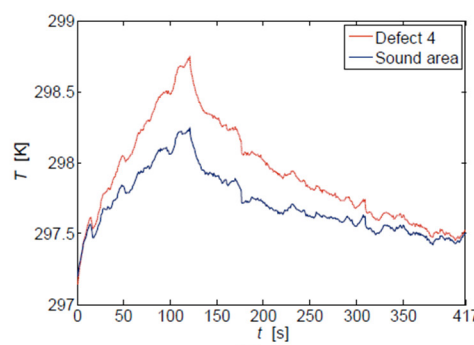
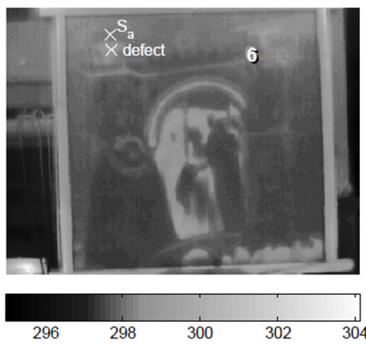
Posizionamento: la termocamera è posizionata al centro della struttura di legno che sorregge le 4 lampade.

Acquisizione: il campione è stato riscaldato per 2 minuti e poi raffreddato per 5. L'intero processo è stato registrato dalla termocamera tramite un frame rate di 1 Hz.

Strumentazione: termocamera ad infrarossi FLIR S65 HS (320x256), con una sensibilità standard tra i 7,5 e i 13 μm .

Il presente studio dell'affresco realizzato in laboratorio serve per confrontare tra loro varie tecniche di analisi termografiche, cosa possibile poiché si conoscono a priori la posizione e l'entità dei difetti. Tra le varie tecniche di analisi utilizzate, abbiamo la DAC (Different Absolute Contrast), che calcola il contrasto termico dell'attuale profilo termico in relazione ad un'area priva di difetti che segue l'equazione del raffreddamento ideale, espressa dalla soluzione dell'equazione di Fourier monodimensionale. Si utilizza la PPT (Pulse Phase Thermography), che trasforma i dati dal dominio del tempo al dominio della frequenza, in modo da avere diagrammi di fase che hanno un contrasto dei difetti migliorato. La PCT (Principal Component Thermography) che riorganizza la principale varianza spaziotemporale della sequenza. Si usa anche la TSR (Thermographic Signal Reconstruction), che produce immagini sintetiche (derivata prima e seconda, diagrammi di fase) dalla regressione polinomiale dei dati termografici grezzi e l'HOS (Higher Order Statistics) che calcola il più alto ordine dei momenti centralizzati (terzo

“asimmetrico”, quarto “curtosi” o ennesimo) del profilo temporale della temperatura, producendo immagini singole come sommatoria di tutte le informazioni della sequenza originaria. Sono state acquisite 417 immagini utili per il processo. La figura (a) rappresenta il massimo contrasto termico per il

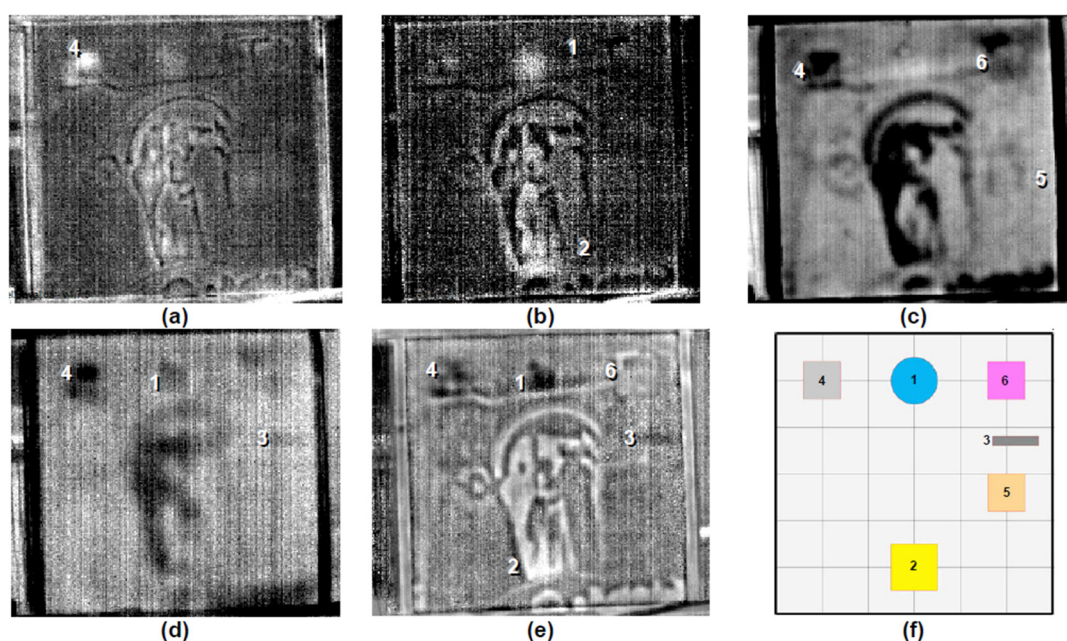


difetto 4, in alto a sinistra. La figura (b) il profilo termico del difetto 4 e di un'area a lui vicina (le due aree sono indicate dalle due croci nell'immagine). Come si può vedere, il contrasto termico del difetto inizia a comparire durante il riscaldamento (circa 20s) e diminuisce lentamente fino a scomparire alla fine del

raffreddamento. È presente anche una leggera indicazione del difetto 6 nei primi momenti (figura c) e un debole segnale è ancora presente dopo (figura d). si può anche notare leggermente il difetto 1, ma presenta un segnale molto debole. Gli effetti della differenza dell'emissività nella pittura si può notare nel riquadro della figura (c): durante il riscaldamento, l'angolo della torre emette un forte segnale che potrebbe coprire un difetto sottostante. Tuttavia, durante il raffreddamento, il segnale termico del difetto 2 inizia ad essere più forte. La variazione di emissività influenza anche il difetto 2: l'area del difetto 2 corrisponde ai colori bianco e nero. Come nel caso dell'angolo della torre, il colore nero produce un forte segnale, specialmente durante il riscaldamento. Infatti, tutte le aree dipinte con colori scuri mostrano un'emissione più forte rispetto alle altre aree. L'impatto dei colori scuri è ridotto nella fase di raffreddamento.

Tecniche di analisi più avanzate sono state utilizzate per migliorare l'analisi dei difetti. La DAC, TSR e PPT sono state applicate solo nella fase di raffreddamento, da $t=121$ alla fine, per un totale di 297 immagini, anche se alcuni difetti hanno un contrasto migliore durante il riscaldamento. La ragione per cui è stato scelto questo approccio è che questi tre algoritmi si basano sull'assunto che il profilo termico segue approssimativamente un decadimento lineare su una scala doppio-logaritmica, come previsto dall'equazione monodimensionale della diffusione del calore. Bisogna tenere in mente che sono presenti perdite di informazioni da questi risultati. Idealmente, la fase di riscaldamento dovrebbe essere stoppata appena ogni difetto è visibile.

I difetti in queste immagini sono più o meno visibili in base alla tecnica utilizzata: la figura (a) e (b) mostrano i risultati della DAC: è visibile il difetto 1, 2 e 4. La derivata prima calcolata in due differenti momenti permette di vedere i difetti 1, 3, 4, 5, 6 (figura c/d), mentre i difetti 1, 2, 3, 4 e 6 sono visibili tramite la PPT nella figura (e).



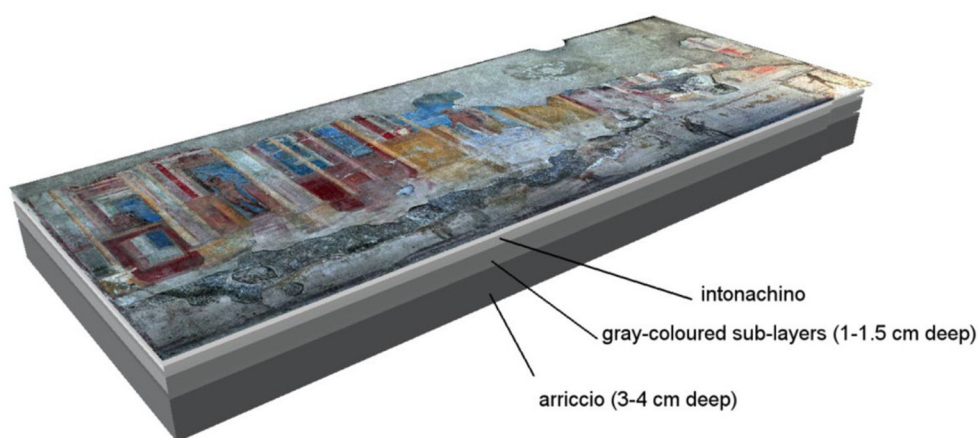
HOS e PCT sono stati applicati nell'intera sequenza (riscaldamento e raffreddamento), ottenendo 417 immagini. L'immagine ricavata dal quarto ordine del momento, di figura (a), mostra quattro dei sei difetti fabbricati. Le figure (b/c/d) rappresentano i risultati della PCT. Tutti i difetti possono più o meno essere riconosciuti. In particolare, il difetto 2 ha un contrasto migliore rispetto alle altre tecniche. In tutti i casi, il difetto 5 appare sempre con un contrasto molto debole.

Sicuramente l'elaborazione del segnale grezzo acquisito in loco tramite diverse tecniche avanzate aiuta molto per migliorare i contrasti dei difetti, ridurre l'impatto della variazione di emissività e del riscaldamento non uniforme.

Affresco del *Gymnasium* a Pompei

Negli affreschi presenti in aree archeologiche esposte ad intemperie e degrado, fondamentale è la prevenzione e il controllo sistematico delle opere, per minimizzare l'avanzamento del degrado e diminuire i futuri costi di restauro. Per questo, l'utilizzo di tecniche non invasive è fondamentale, poiché permettono di avere importanti informazioni direttamente sul campo e senza toccare l'artefatto. In questo caso, tra le tecniche non invasive, vengono utilizzate l'IRT (Infrared Thermography) e la GPR (Ground-Penetrating Radar: essa permette di ottenere la riflessione elettromagnetica del sottosuolo e delle strutture dei muri, per conoscere la struttura interna e la stratificazione dei materiali. Inoltre, permette di localizzare i difetti più comuni, come fratture e distacchi.). L'opera presenta tre strati: il primo è l'*intonachino*, un sottile strato di intonaco bianco; il secondo strato, di colore grigio, è costituito da intonaco mischiato alla sabbia nera vulcanica e materiale calcareo; il terzo strato, quello più spesso e profondo, è chiamato

arriccio ed ha la funzione di aderire al muro e fornire una difesa dall'umidità. La struttura degli strati è stata analizzata e riprodotta tramite modelli 3D dell'affresco, ottenuti dalla lavorazione delle immagini acquisite da una Nikon D90.



L'affresco è stato poi sottoposto ad analisi termografica:

Riscaldamento: effettuato in modalità passiva, cioè attraverso la radiazione solare indotta sul muro.

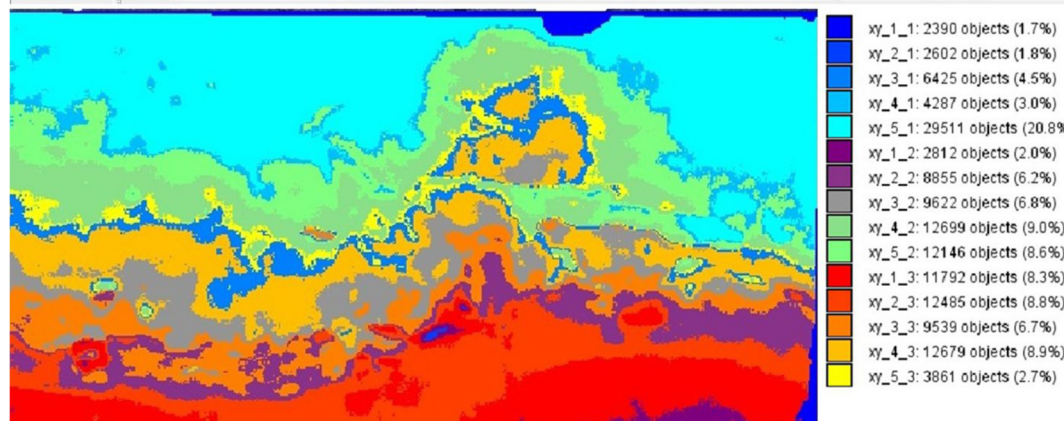
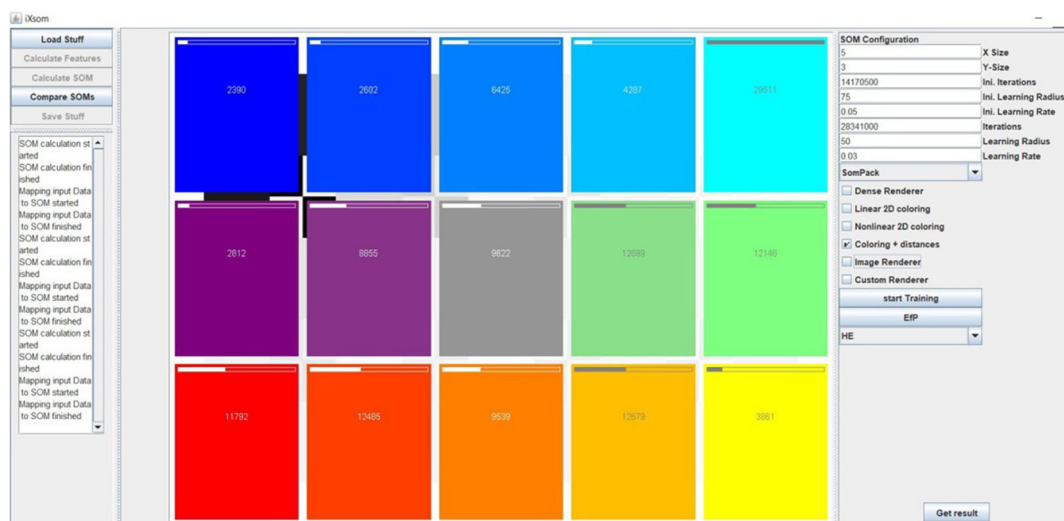
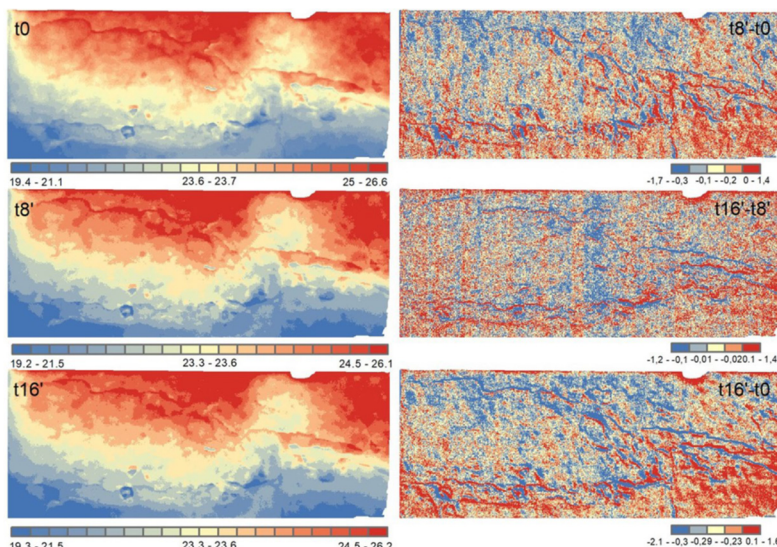
Posizionamento: la camera è stata posizionata a 3m dall'affresco.

Acquisizione: sono stati acquisiti tre termogrammi, con una risoluzione spaziale di 1,51 cm e temporale di 8 min, cioè acquisiti al tempo t0, t8 e t16. Le immagini sono state registrate alle 02:30 pm, con una temperatura esterna di 26,6°C e un'umidità dell'88%.

Strumentazione: è stata utilizzata una termocamera FLIR SC660, equipaggiata con un sensore microbolometrico (640x480), sensibilità standard tra i 7,5 e i 13-14 µm.

Il tre termogrammi sono stati rielaborati tramite "Map Algebra" e si è potuto notare che la parte inferiore dell'affresco è la più fredda, mentre il resto presenza zone più

calde e più fredde. Tuttavia, i tre termogrammi non presentano informazioni così differenti tra loro e inoltre si vogliono considerare, allo stesso tempo, similitudini spaziali e temporali di ogni pixel: essendo i pixel all'incirca 425,115, essi sono stati analizzati tramite un algoritmo chiamato SOM (Self-Organizing



Maps), ottenendo un'unica immagine che combina i pixel dei tre termogrammi. Dal risultato ottenuto, tramite una scala cromatica, è possibile evidenziare ed estrarre le maggiori efflorescenze, analizzandole in modo migliore rispetto alla sola interpretazione visiva. Nella parte superiore, si nota che i confini

dell'affresco non si distinguono dall'area staccata, ma il colore ciano circonda entrambe le zone,

suggerendo un comportamento termico simile. Questo potrebbe significare che queste aree dell'affresco sono apparentemente salve, ma hanno anche un significativo rischio di distacco. In basso al muro si nota invece il fenomeno della capillarità di risalita, di colore arancione, rosso e viola, con differenti gradi di gravità.

La combinazione dei dati termografici e dei dati ottenuti tramite GPR ha permesso di ottenere una mappa dello stato finale di conservazione dell'affresco, con lo schema di tutti i difetti e le aree soggette a futuri rischi di distacco. L'utilizzo e la combinazione di tecniche non invasive diverse, permette di ottenere mappe dello stato di conservazione delle opere con più precisione e più informazioni, anche quelle relative a fenomeni non immediatamente visibili.

Domus dei Casti Amanti e Domus di C. Iulius Polybius

I dati degli affreschi, ottenuti tramite le analisi termografiche, possono essere sensibilmente influenzati dalle precedenti opere di restauro. Nel caso, per esempio, degli affreschi presenti nella "Domus dei Casti Amanti", l'analisi termografica è stata effettuata poco tempo dopo l'intervento di restauro sugli affreschi, intervento che ha lasciato sulla superficie delle opere uno strato protettivo, innalzando il livello di riflessione e quindi diminuendo l'efficacia dell'energia termica destinata al riscaldamento della superficie da analizzare. Per risolvere questo problema, è stato necessario estendere il tempo di riscaldamento, ricorrendo ad un "Step Heating" (SP) piuttosto che ad un "Pulse Heating" (PH). In questo modo, si penetra nel muro con un'onda termica di intensità e lunghezza maggiore: l'onda termica può raggiungere profondità maggiori, ma è caratterizzata da una peggiore risoluzione spaziale. Il test è stato effettuato nella Domus dei Casti Amanti e nella Domus di C. Iulius Polybius.

Riscaldamento: effettuato tramite tre lampade alogene.

Acquisizione: i termogrammi sono stati acquisiti 1 al secondo, per un totale di 199 s. successivamente sono stati rielaborati.

Strumentazione: è stata utilizzata una termocamera Infratec-Variocam HD, da 1024x768 pixel, con sensibilità standard da 7,5 a 14 μm , range di temperatura da -40°C a 1200°C , accuratezza di $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ e frame rate di 30Hz.

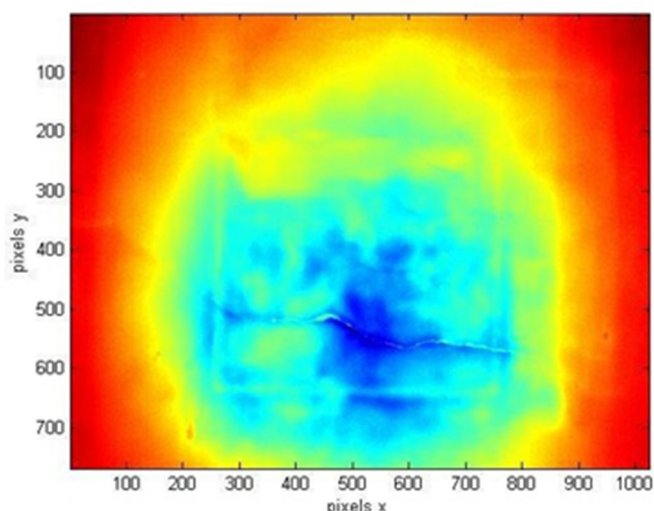
Le immagini acquisite dalla termocamera sono state successivamente rielaborate tramite un algoritmo, il PCA (Principal Component Analysis). Questa tecnica riduce l'insieme delle variabili dipendenti ad una o più variabili indipendenti, riducendo così le variabili che descrivono il fenomeno. L'uso della PCA permette di ottenere una descrizione compatta e ottimale dei dati, con la minima perdita di informazioni. Infatti, poiché i dati catturati dalla termocamera sono sia spaziali (1024x768), sia temporali (199 acquisizioni), l'utilizzo di questo algoritmo concentra tutte le informazioni temporali sulla stessa

immagine spaziale, identificando tre o quattro componenti principali che contengono informazioni indipendenti come l'omogeneità del riscaldamento, la variazione di forma della superficie, la variazione di emissività. Nel caso degli affreschi di Pompei, la PCA ha generato, dalle 199 immagini iniziali, 4 immagini sintetizzate.

Nei tre affreschi analizzati nella Domus dei Casti Amanti, l'affresco PIX 12 9 m N, PIX 12 9 m E, PIX 12 9 m O, si possono notare alcuni difetti evidenziati dalle differenze di temperatura, soprattutto al centro dell'affresco PIX 12 9 n M. Per un'analisi migliore, la prima immagine PC è stata sovrapposta all'immagine dell'affresco nel visibile, in modo da individuare più facilmente le aree interessate da difetti.



a

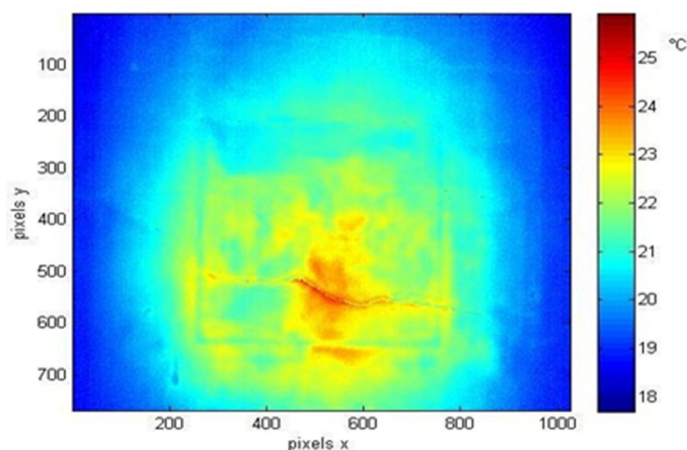


b

Affresco PIX 12 9 m N.

Immagine nel visibile (a), termogramma (b), prima immagine PCA (c), sovrapposizione tramite il quale si possono notare i vari difetti dell'affresco (d).

c

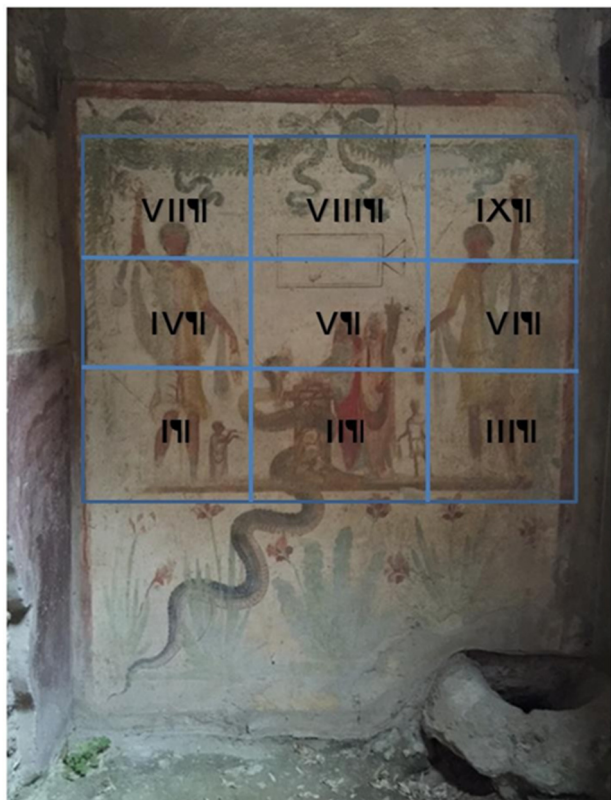


d

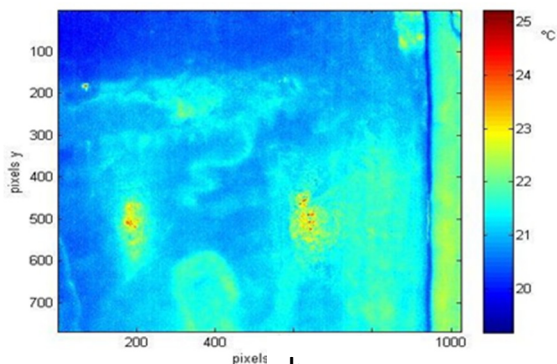


L'affresco presente nella Domus di Iulius Polybius, PIX 13 3 3c O, essendo grande, è stato scomposto in

9 settori, analizzati individualmente. In questo caso, si può chiaramente notare nel termogramma la riflessione delle lampade, che hanno creato due punti gialli al centro. Visibile è anche la disomogeneità del riscaldamento e l'influenza dei colori della superficie. Proprio tramite la PCA è stato possibile eliminare l'influenza della riflessione e dei colori, ottenendo immagini più accurate e attendibili. Anche qui, i settori sono stati ricomposti e sovrapposti all'immagine nel visibile, ottenendo uno schema in cui è possibile notare vari difetti, come i distacchi. Unico difetto della PCA è che ci sono discontinuità, nel riassetto dei vari settori, nei colori tra i vari punti di vista e i difetti appaiono con colori diversi tra loro. Per questo è importante evidenziare le aree soggette a danni e difetti.

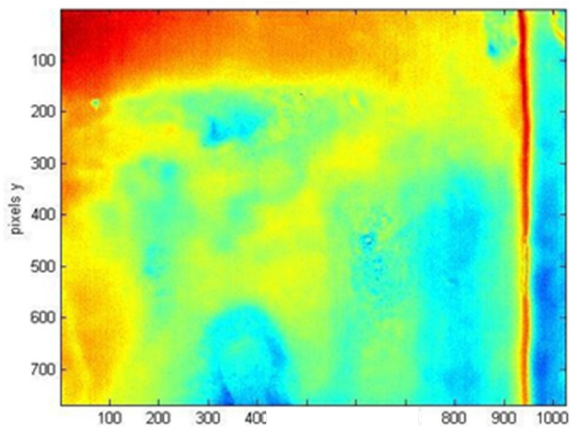


a

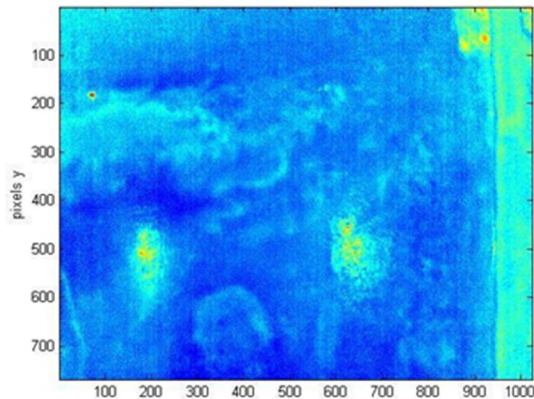


b

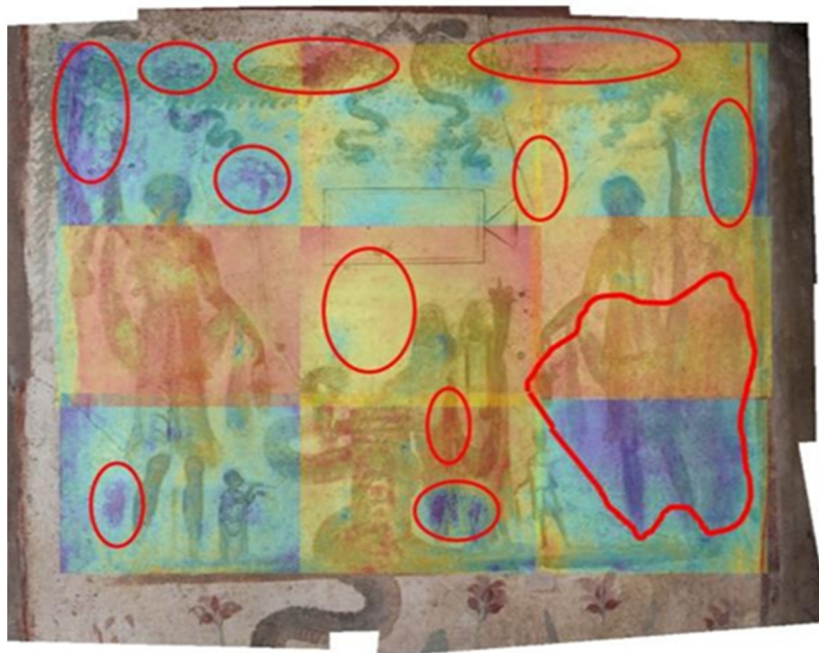
Partizione dell'affresco PIX 13 3 3c O (a); termogramma del settore 9 con il dettaglio delle lampade (b); prima PC (c); seconda Pc, contenente il riflesso delle lampade (d); sovrapposizione delle immagini in cui si notano i vari difetti (e).



c



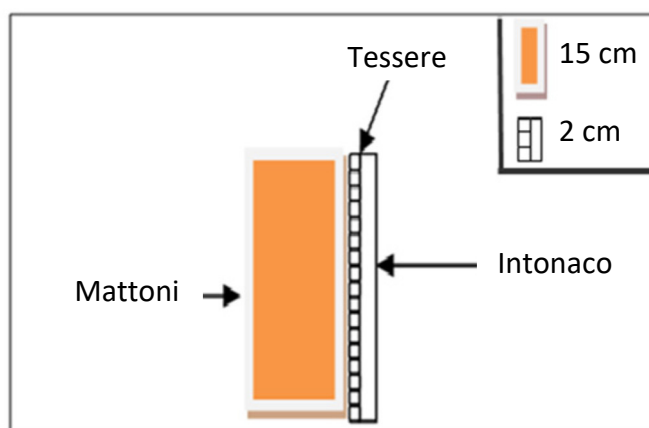
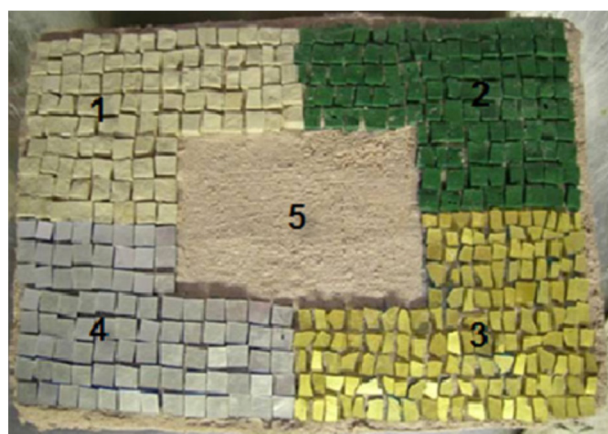
d



e

Campione di mosaico intonacato

Il mosaico è una delle opere artistiche più difficili da analizzare tramite la termografia, a causa delle tessere di cui è composto, tessere che possiedono un'emissività diversa in base al materiale con cui sono fatte. Fondamentale, in questo caso, è testare la potenzialità dello strumento applicandolo in laboratorio su un mosaico intonacato. Il campione consiste in un pannello 30x20 cm, che presenta una superficie intonacata con malta di calce e coperta da tessere, in modo tale da avere 5 regioni con differenti materiali:



(1) marmo, (2) smalto, (3) vetro con foglie d'oro, (4) vetro con foglie d'argento e un'area vuota al centro (5). Sotto al mosaico, la struttura richiama un vero muro, infatti presenta una base di mattoni di circa 15 cm e una copertura di intonaco di circa 1 cm. Durante l'analisi dei dati della termografia pulsata, la sequenza dei termogrammi è stata processata tramite la Termografia a Fase Pulsata (PPT), in modo tale da poter ricostruire il ritardo di fase delle immagini. È stata utilizzata la TSR (Thermographic Signal Reconstruction), per ottenere le immagini della derivata prima e seconda; infine è stata utilizzata la PCT

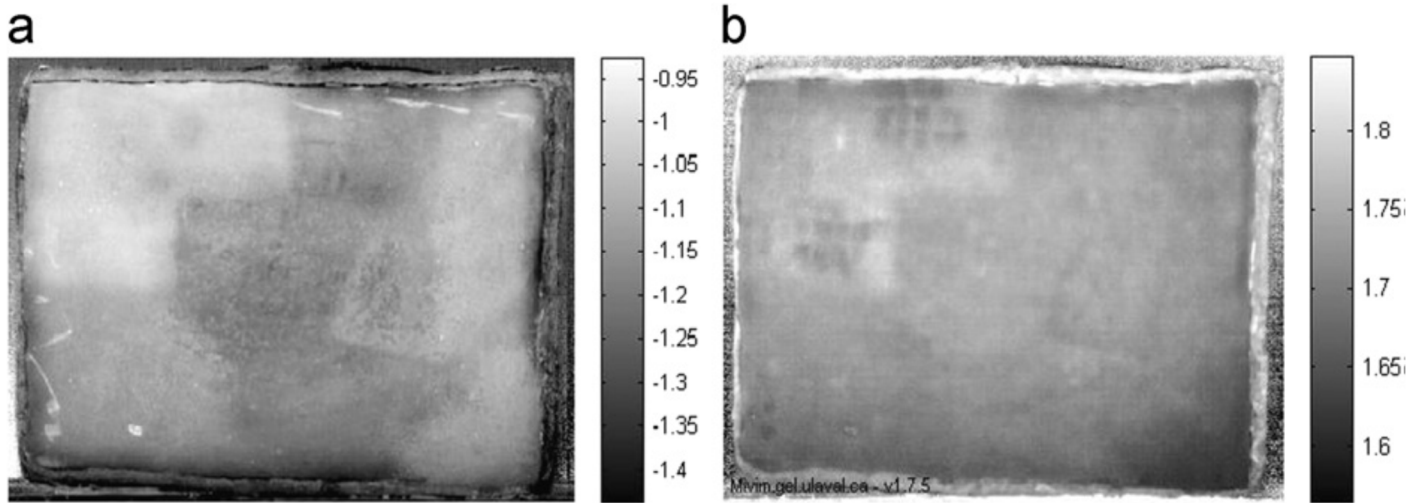
(Principal Component Thermography) per ottenere una funzione (EOFs, Empirical Orthogonal Functions) che descrive la variazione spaziale dei dati.

Riscaldamento: effettuato tramite due lampade alogene da 1000W ognuna, posizionate a 50 cm dalla superficie del mosaico. Sono stati testati differenti periodi di riscaldamento, da 35 s, 60 s, 120 s e 240 s, generando un incremento di temperatura di 8-9°C.

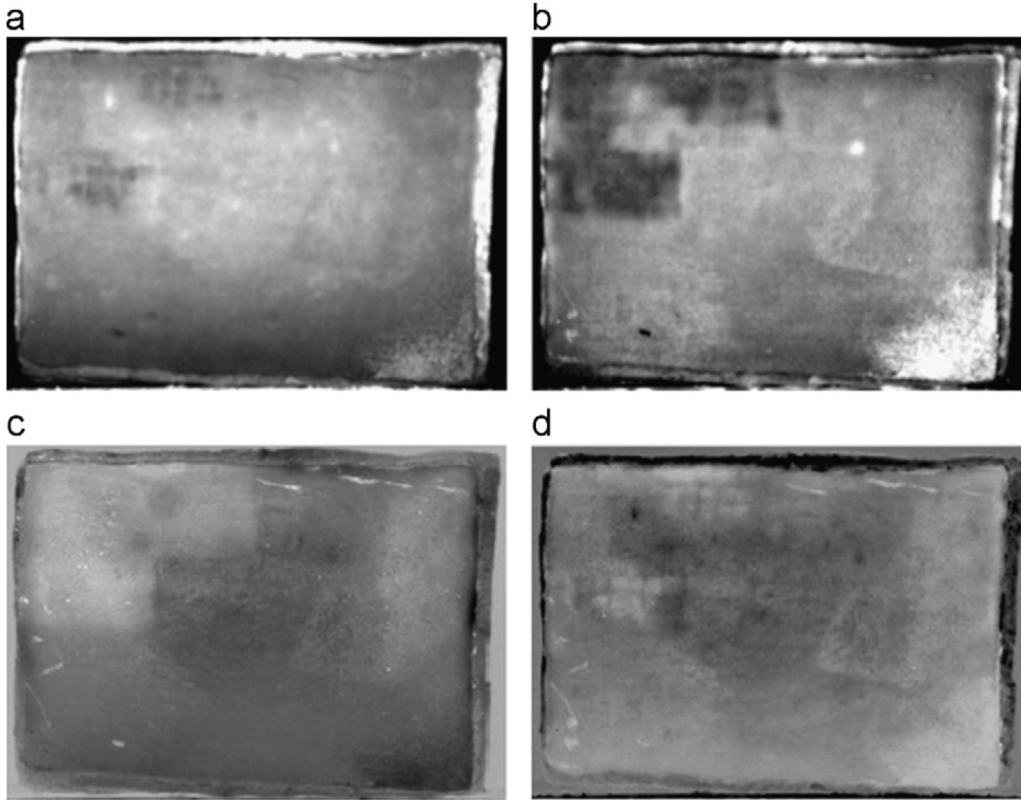
Posizionamento: la camera è stata posizionata frontalmente alla superficie, mentre le lampade con un angolo appropriato, in modo tale da evitare la registrazione della radiazione termica.

Acquisizione: i dati sono stati acquisiti in riflessione e, in base al tempo di riscaldamento, sono state utilizzate varie frequenze, rispettivamente da 11 Hz, 5 Hz, 3,6 Hz e 2 Hz. In ogni periodo sono state acquisite 1600 immagini.

Strumentazione: è stata utilizzata una camera infrarossi FPA Phoenix, da 640x512 pixel, con sensibilità standard tra 3 e 5 μm .

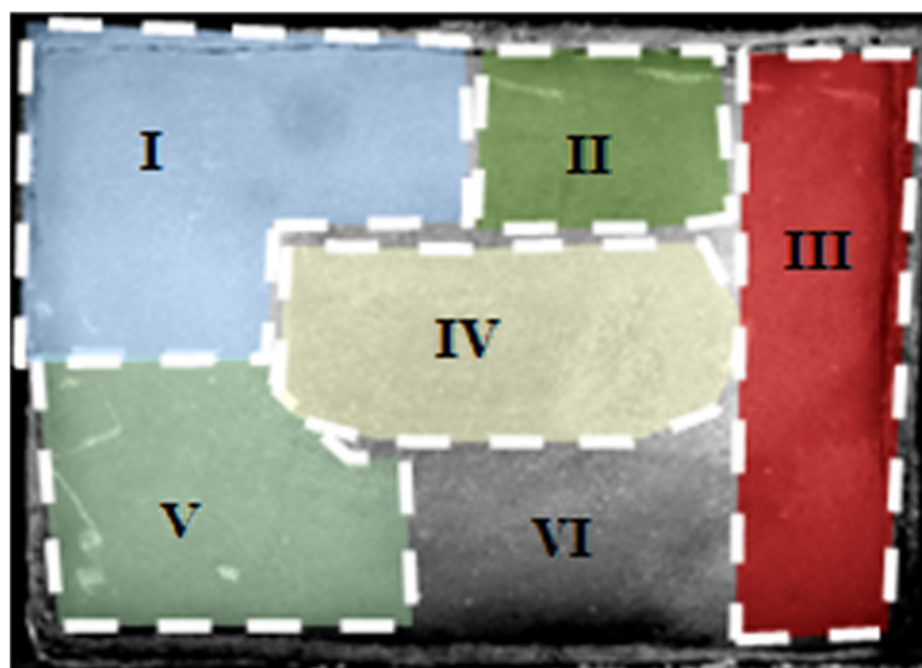


L'individuazione delle differenti regioni è possibile dai risultati ottenuti dalla termografia. In generale, le regioni possono essere individuate e in qualche caso specifico, anche le singole tessere. Per esempio, la figura a rappresenta l'immagine di fase ottenuta a $f=0,007$ Hz, durante il riscaldamento del campione per 35s e processando la sequenza di dati (sia quelli ottenuti in riscaldamento, sia in raffreddamento) tramite PPT. Si identifica chiaramente la regione 1 e l'area vuota 5 e si notano anche variazioni che possono suggerire la presenza delle aree 2, 3 e 4, ma i dati non sono così chiari da fornire i limiti delle aree. La figura b indica l'immagine di fase ottenuta a $f=0,03$ Hz, processando esclusivamente i dati del riscaldamento per 35s: in questo caso, alcune tessere di marmo dell'area 1 possono essere individuate. Dai risultati della PPT, l'area con tessere di marmo e l'area vuota al centro possono essere chiaramente identificate, mentre ci sono segnali delle altre aree, anche se non con una chiara distinzione.



Simili risultati possono essere ottenuti processando i dati tramite TSR ed estraendo la derivata temporale prima e seconda. Infatti, alcune tessere di marmo si notano tramite la derivata prima a $t=2,4s$, dopo aver elaborato la sequenza del riscaldamento di 60s (figura a). Nella figura b, si può notare

chiaramente l'area 1, estraendo la derivata seconda a $t=2,8s$ dalla stessa sequenza. Le figure c/d rappresentano rispettivamente la seconda EOF e terza EOF dopo l'applicazione della PCT nella stessa sequenza utilizzata nella TSR. La PCT riorganizza i dati in modo tale che ogni EOF evidenzia una specifica caratteristica. Proprio tramite la PCT si è scoperto che nel campione è presente una disomogeneità dell'intonaco con un accumulo di malta sulla zona destra. Infatti, mappando i differenti segnali termici sulla superficie del pannello, si ottengono 6 aree, che rappresentano 6 variazioni della superficie. L'area 3 evidenzia l'anomalia termica osservata in questa zona, a causa dell'eccessivo



rivestimento di calce depositato. Invece le aree 1,2,4,5,6, corrispondono esattamente alla rispettiva regione del pannello intonacato. L'analisi tramite termografia fornisce risultati sull'identificazione delle differenti aree del mosaico. Il campione è stato analizzato anche tramite Interferometria Olografica, fornendo

informazioni aggiuntive sulla precisa delimitazione delle aree oltre ad alcune informazioni sull'adesione delle tessere all'intonaco.

Elaborando i dati termografici, si può chiaramente distinguere le tessere di marmo e la zona vuota centrale. Tecniche avanzate, come la PPT, TSR e PCT forniscono informazioni aggiuntive e migliorano la qualità e la visibilità del segnale termografico. In particolare, la PPT permette di individuare le differenti regioni dell'intonaco, mentre strumenti come la TSR e PCT completano i dati e permettono il chiaro riconoscimento di alcune tessere.

La termografia in campo edile

In campo edile, la termografia si sta affermando sempre più come valido strumento di analisi e controllo, capace di fornire informazioni molto utili per lo svolgimento dei lavori. Data la sua maneggevolezza e portabilità, facilità di utilizzo e accessibilità dei dati, la termocamera è uno strumento che nei cantieri edili può essere usato a 360 gradi. Nella maggior parte dei casi, l'analisi riguarda opere architettoniche principalmente storiche che necessitano di interventi di ristrutturazione e la termografia interviene per individuare l'entità e la tipologia di danno. In questo modo, si può intervenire direttamente sul punto critico, senza perdere tempo e risorse. Un'altra tipologia di applicazione riguarda la capacità della termografia di individuare elementi architettonici nascosti, non visibili dall'esterno: tramite la sollecitazione termica, si genera una risposta dai diversi materiali presenti nella parete, come legno, mattoni, pietre, malta, proiettando la loro impronta sullo strato di intonaco che ne copre la vista, permettendo in questo modo la ricostruzione delle diverse fasi di trasformazione di alcuni edifici e contribuendo ad una anamnesi ricostruttiva delle strutture architettoniche. Ma la termografia può anche essere utilizzata, grazie al suo ampio campo di applicazioni, per il controllo, in fase d'opera, delle opere edili: tramite questo strumento si può verificare direttamente sul campo l'integrità delle strutture che si stanno costruendo, per poter, in questo modo, intervenire in anticipo su eventuali difetti non visibili durante la costruzione, ma che potrebbero diventare tali a progetto ultimato. Nella fase preliminare dell'investigazione termografica, quando tempo e budget sono limitati, l'IRT può velocemente localizzare le aree che necessitano di ulteriori verifiche. Nelle situazioni in cui i materiali hanno profonde differenze nelle proprietà termiche, come pietra e malta, l'approccio passivo e la radiazione solare sono sufficienti. Dove invece i materiali hanno caratteristiche simili, buoni risultati si possono ottenere tramite modelli numerici dello scambio termico tra il muro e l'ambiente. Bisogna tenere sempre in considerazione che le proprietà termiche della superficie dei muri e quindi il relativo flusso termico dipende dagli strati di cui è composto. Spesso queste superfici sono caratterizzate da diversi colori, diversa porosità, diverse coperture. Durante il riscaldamento queste differenze influenzano il flusso termico, generando un flusso non uniforme e diversi livelli di assorbimento, che vengono captati dalla termocamera e che possono facilmente essere scambiati per difetti.

Esempi termografici nell'archeologia dell'architettura

Ricostruire la storia di un manufatto, leggerne le caratteristiche costruttive, correlarne lo stato di conservazione ai materiali che lo costituiscono sono tutti elementi ai quali l'uso della termografia infrarossa è in grado di offrire un significativo supporto. In questo caso, viene analizzato il Convento di San Francesco a Folloni, la chiesa Collegiata di Santa Maria Maggiore nella Rabatana di Tursi e il palazzo dei Cavalieri di Malta a Grassano. L'obiettivo è conoscere meglio la planimetria degli edifici e la loro salvaguardia.

Strumentazione: le riprese sono state effettuate tramite una termocamera AVIO TVS-600, con sensore microbolometrico da 320x240, che opera tra gli 8 e i 14 μm . La risoluzione termica minima è di $0,15^\circ\text{C}$, con una precisione di $\pm 4^\circ\text{C}$. Questo sistema presenta un campo visivo, tramite una lente di 35 mm, di $25,8^\circ$ (H) x $19,5^\circ$ (V). tutto ciò consente di indagare una zona di $14 \times 13,7$ mm ad una distanza di 10 m.

Acquisizione: le riprese sono state effettuate sfruttando la sorgente solare come mezzo di riscaldamento. Le immagini sono state successivamente elaborate con software dedicati, ottimizzando i valori di emissività ed uniformando gli intervalli di temperatura, in modo da ottenere fotomosaici più complessi per poter restituire in modo unitario le informazioni, dopo aver enfatizzato tramite programmi la disomogeneità termiche presenti nelle immagini.

Per ogni rilevamento, è stata misurata la temperatura ambiente, l'umidità relativa e la velocità dell'aria, fattori che influenzano la rilevazione termografica indiretta. L'obiettivo è quello di fornire elementi per l'analisi archeologica dei manufatti architettonici attraverso l'individuazione e lettura di significative discontinuità nella distribuzione spaziale di temperature riconducibili ai diversi materiali presenti sotto lo strato di intonaco. Nel caso del complesso monumentale di San Francesco a Folloni, l'interesse per l'edificio deriva dalle vicissitudini che ne hanno segnato la storia. Dalla sua fondazione ad oggi, si sono susseguite tre chiese nel convento, ognuna costruita per sostituire la precedente. Attualmente il complesso presenta segni di dissesto riguardanti le strutture fondali legati alle varie fasi costruttive e alle problematiche di carattere geologiche e sismiche. L'analisi tramite termografia infrarossa ha consentito

l'individuazione sugli sbalzi architettonici di elementi la cui collocazione spaziale era solo ipotizzabile dalle planimetrie cinquecentesche, mostrando l'esistenza di una complessa stratificazione di trasformazioni.

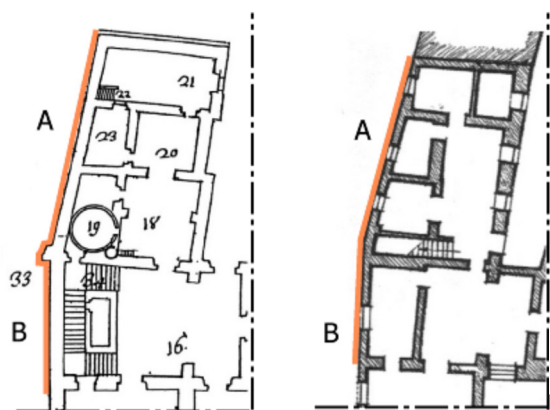


Figura 1



Figura 2

Nella figura 1 si può ben visualizzare la differenza di planimetria tra la configurazione settecentesca e quella attuale. Sono ben evidenti le trasformazioni distributive interne.

Nella figura 2 abbiamo il particolare della parete nord, zona B: si confronta l'immagine nel visibile con quella nell'infrarosso. Si possono distinguere chiaramente gli elementi morfo-strutturali individuati e le differenti tessiture murarie.

Anche la chiesa collegiata di Santa Maria Maggiore ha subito nel corso degli anni radicali opere di riammodernamento che hanno trasformato l'interno della chiesa. La pianta dell'edificio mostra caratteri di forte irregolarità a causa della particolare orografia del suolo e a causa delle numerose manomissioni. Le indagini hanno evidenziato una serie di discontinuità nelle murature che hanno permesso l'individuazione di diverse aperture murate. Le caratteristiche fisiche dei materiali utilizzati per chiudere queste aperture hanno fornito molti indizi sulle fasi di realizzazione dell'intervento. (In linea tratteggiata sono evidenziati gli elementi morfo-strutturali individuati, figura 3)

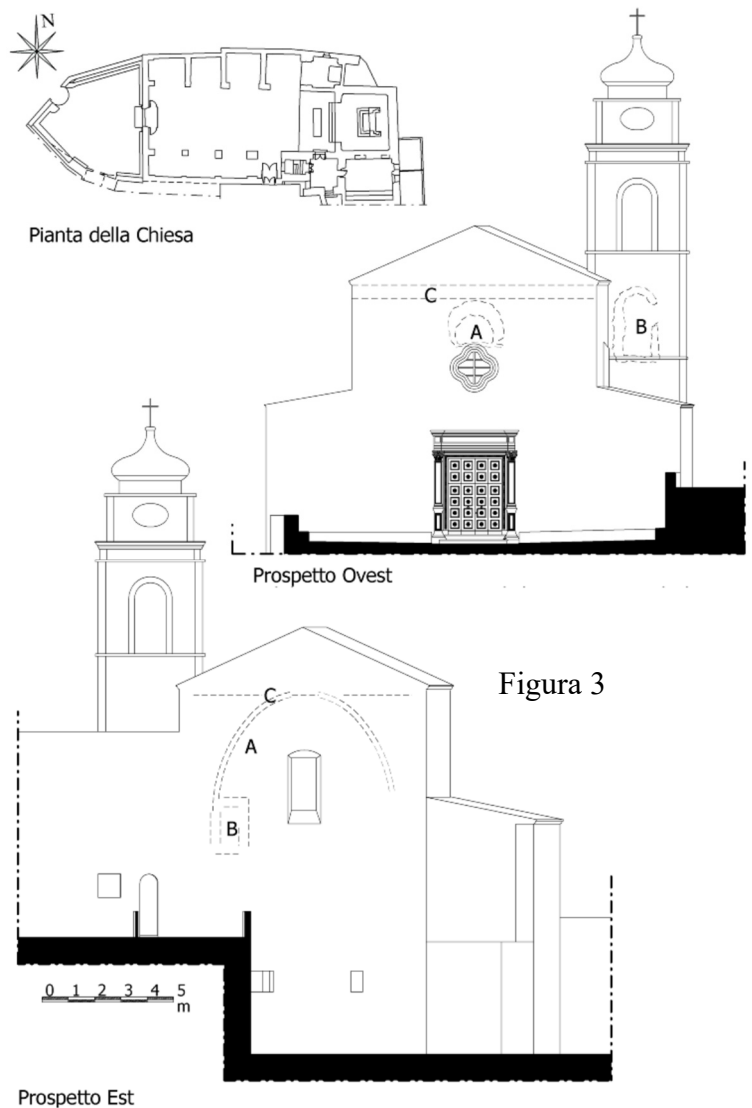
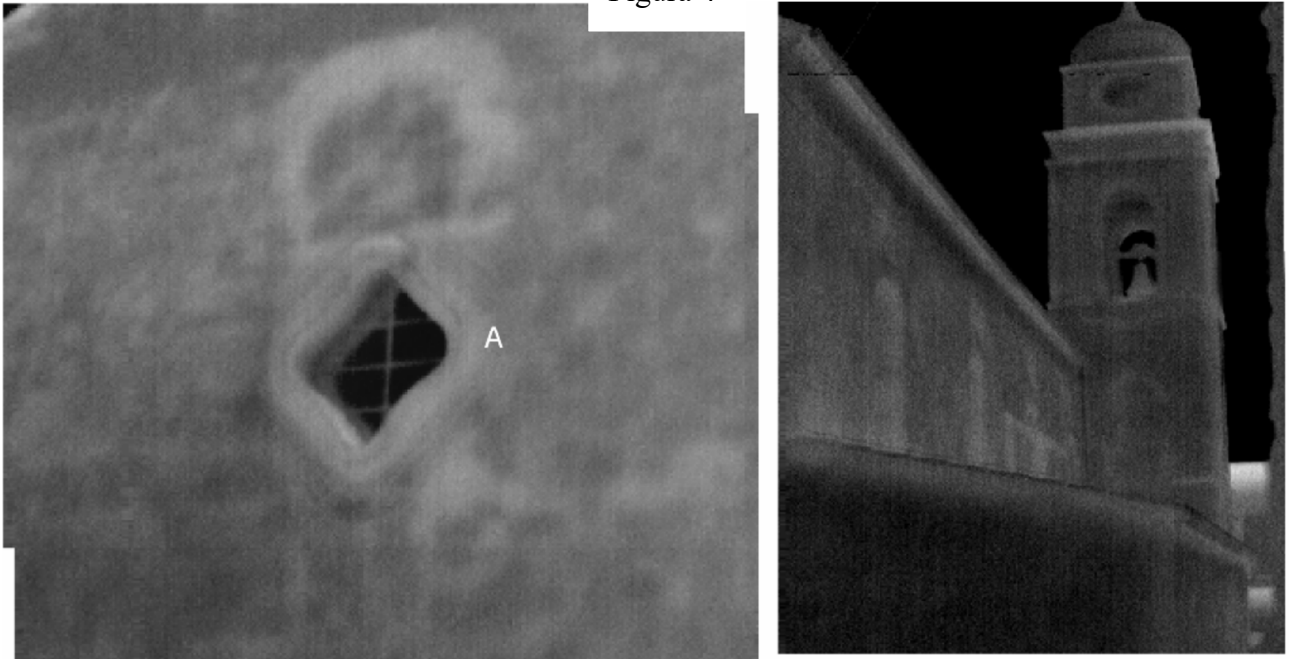


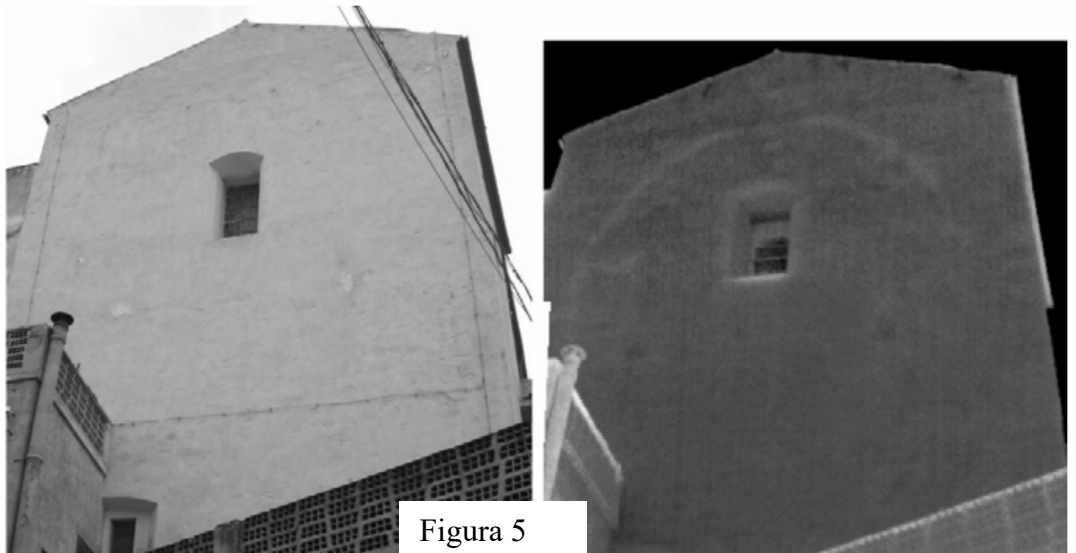
Figura 3

Figura 4



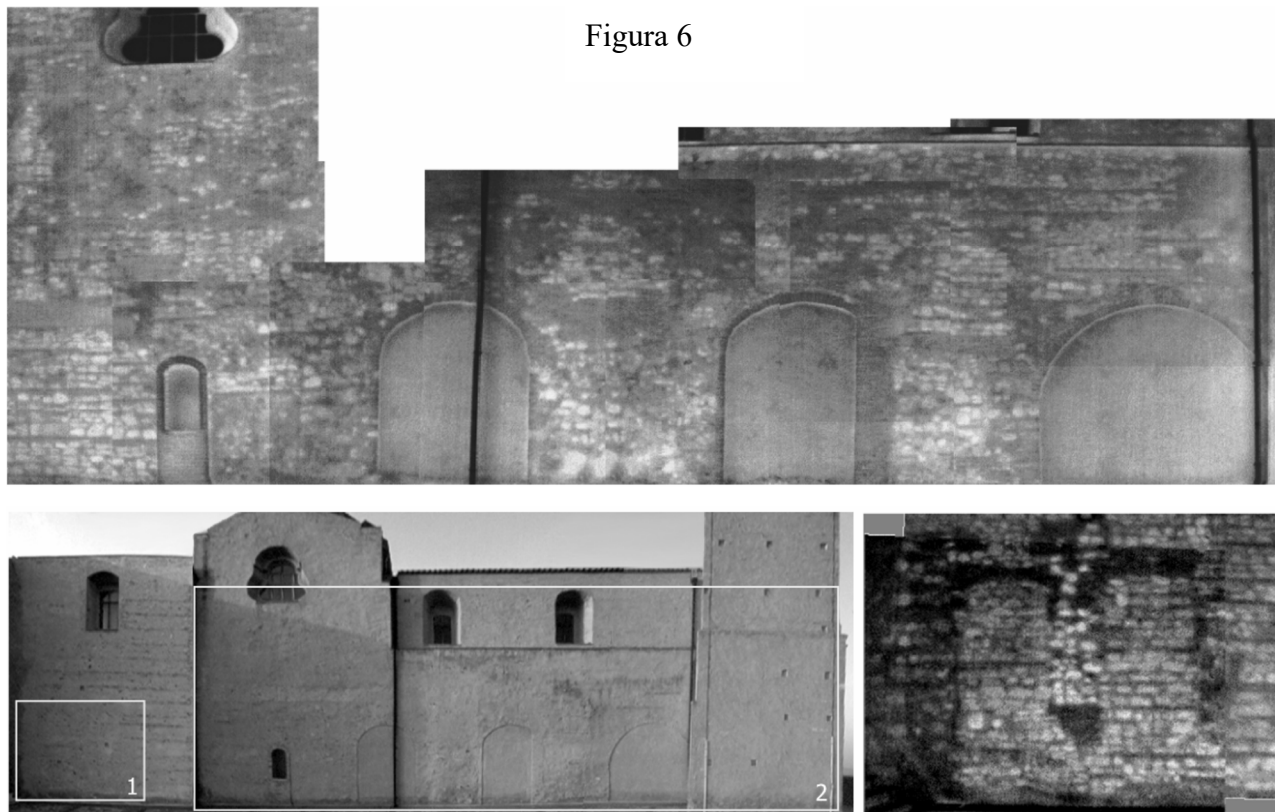
Sulla facciata ovest (figura 4) è stato rilevato un oculo circolare al di sopra dell'attuale oculo quadrilobato. Inoltre, si può notare il particolare dell'arco passante murato nella torre campanaria.

Nella figura 5 si può chiaramente vedere la disomogeneità termica prodotta dai materiali costituenti l'arco di scarico della volta originaria non più presente. Anche il castello di Grassano è un complesso



architettonico profondamente trasformato a causa dei lavori eseguiti nei secoli, in cui gran parte degli ambienti sono andati perduti, mentre la chiesa ha subito numerosi rimaneggiamenti. Grazie alla documentazione, si è riusciti a ricostruire la funzione della maggior parte degli ambienti, ma la termografia si è resa necessaria per individuare alcuni vani murati che collegavano la chiesa al cortile. Tali rilevamenti hanno permesso di completare il quadro conoscitivo dell'impianto. Anche in questo caso, fondamentale è stata l'integrazione dei dati ricavati dalla termografia con i documenti storici. Le riprese hanno consentito di individuare due vani, attualmente murati, come si vede nella figura 6, fotomosaico delle immagini acquisite e rielaborate.

Figura 6



L'analisi termografica negli edifici storici americani

L'applicazione della termografia ha trovato utilizzo anche nelle strutture storiche americane, caratterizzate dall'utilizzo di diversi materiali, tra cui il legno. In questi casi, l'IRT viene principalmente usata per individuare gli elementi strutturali, come ad esempio nella Peck house, del 1888, in Youngstown, Ohio. In questo caso, tramite la termografia, si possono identificare le asticelle di legno tra i travetti del solaio e i perni in legno (Figura 1). La differenza di conducibilità termica permette di individuare la struttura lignea delle pareti al di sotto del gesso che le ricopre.

Nella figura 2 si può anche vedere dalle immagini termiche la presenza del radiatore e della tubazione di alimentazione, a sinistra, e un poste termico nell'angolo a destra. Le riprese sono state effettuate con il tempo freddo mentre la casa era riscaldata.



Figura 1

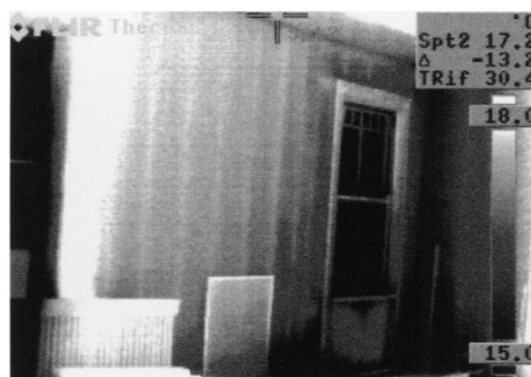


Figura 2

Un'altra funzione utile della termografia è la sua capacità di vedere l'umidità: la presenza di acqua nelle strutture di legno è la prima causa di problemi, tra cui muffa e funghi, che causano il deterioramento del legno e ambienti malsani. La distribuzione dell'umidità si può rilevare grazie all'effetto del raffreddamento dell'evaporazione dell'acqua. Durante l'evaporazione, l'alto valore del calore latente raffredda la superficie; questo fenomeno dipende dalla dissipazione dell'energia termica dovuta al cambiamento di stato da liquido a vapore. Il tasso di evaporazione dipende principalmente dall'umidità relativa, temperatura, acqua e solubilità dei sali presenti nel materiale. La termografia localizza la distribuzione dell'umidità senza alcun test distruttivo e può essere utilizzata per monitorare nel tempo la diffusione dell'umidità, indipendentemente dai Sali solubili presenti. Lo svantaggio è che si riferisce solo alla superficie e non fornisce un dato relativo alla quantità di acqua contenuta nel muro. Le figure 3 e 4 rappresentano una immagine nel visibile e nell'infrarosso della Westcott House, precisamente della Frank Lloyd Wright's Westcott house, del 1908, in Springfield, in Ohio. Nelle immagini si può vedere che la distribuzione dell'umidità non segue la forma del danno sulla superficie dell'intonaco. Tuttavia, la distribuzione di temperatura indica che l'infiltrazione parte dall'angolo.



Figura 3

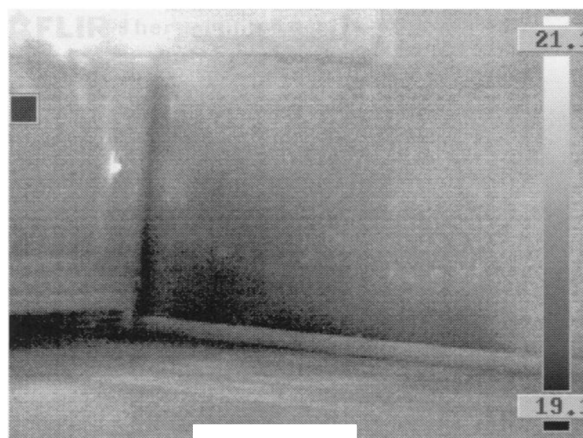


Figura 4

In questi casi, la soluzione più semplice per risolvere questo problema è integrare la rilevazione termografica dell'umidità con misure dirette dell'acqua tramite altri test. Il vantaggio è che si può trovare, tramite IRT, i punti esatti in cui compiere gli altri test, che possono essere più invasivi.

La termografia infrarosso può essere usata senza problemi e con successo sulle strutture di legno. La procedura sviluppata sulle strutture in muratura in Italia funziona bene anche sulle strutture in legno in America, poiché le immagini vengono scattate sulla superficie intonacata e non direttamente sulla struttura lignea.

La termografia come strumento investigativo per la conoscenza delle tecniche costruttive

Un'interessante applicazione della termografia riguarda la sua natura investigativa: data la sua capacità di vedere dietro ad intonaci e solai, questa tecnica non distruttiva può trovare altre applicazioni oltre alla semplice diagnosi. Un esempio lo possiamo trovare a Reggio Calabria, dove la termografia è stata applicata per approfondire le conoscenze su due particolari tecniche costruttive della zona, ideate per l'elevato rischio sismico: la tecnica baraccata e la muratura confinata. La tecnica baraccata, più antica, consiste in "una rete interna di legname di poca fabbrica rivestita", che conferiva alla struttura la capacità di resistere alle sollecitazioni sismiche. L'intelaiatura di legno era costituita da montanti e traversi solidamente collegati tra loro e controventati da ulteriori elementi diagonali singoli a forma di croce di S. Andrea. Se il telaio ligneo veniva lasciato a vista ed i vuoti tra le maglie riempiti con muratura, si parla di casa intelaiata. Se l'ossatura lignea era completamente avvolta dall'apparecchio murario, si parla di casa baraccata. Differente invece è la muratura confinata, caratterizzata da ossatura principale, ossatura secondaria e muratura. Tre elementi strettamente collegati tra loro. L'ossatura principale ha il compito di resistere alle sollecitazioni sismiche, mentre l'ossatura secondaria, che irrigidisce la struttura, è collegata al telaio principale. La particolarità sta nel rapporto tra la muratura e l'ossatura: entrambe vengono erette contemporaneamente e si pone particolare attenzione a falsare i mattoni per migliorare l'aderenza con l'ossatura. Tutto ciò è ancora visibile in alcuni edifici storici della città.



Figura 1: Casa intelaiata.



Figura 2: Partizione verticale di una casa baraccata.

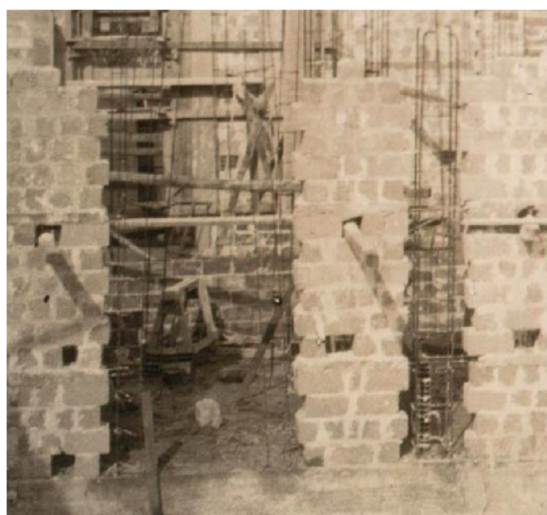
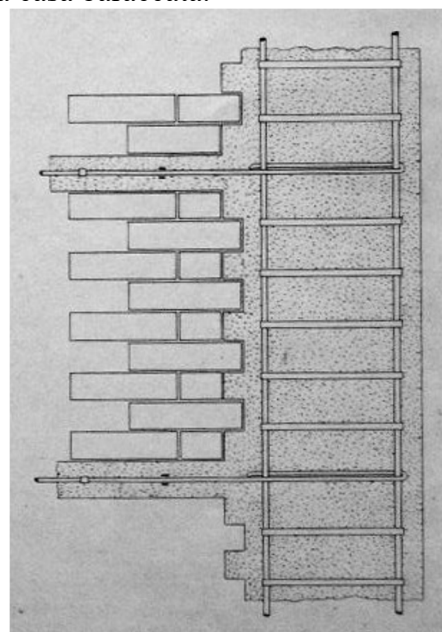


Figura 3:
Foto storica di un cantiere, a sx.
Ammorsatura muro-pilastro, a dx



Il progetto di ricerca a Reggio Emilia ha visto l'applicazione di alcune strumentazioni diagnostiche finalizzate alla conoscenza delle caratteristiche tecniche, dello stato di conservazione materiale e delle risorse comportamentali residue delle due tecnologie. La specificità tecnologica di tali edifici difatti ha orientato la ricerca verso applicazioni non convenzionali di strumentazioni e tecnologie molto note, ma da applicare in contesti nuovi, così da individuarne ulteriori campi di applicazione.

Nello specifico l'indagine ha preso le mosse dalla sperimentazione sugli edifici in muratura confinata, selezionando quindi strumentazioni che sono ordinariamente impiegate nell'analisi del calcestruzzo armato, quali la termocamera, il pacometro, il rilevatore ad ultrasuoni e lo sclerometro. La ricerca ha inoltre avuto lo scopo di proporre una filiera con cui applicare le diverse strumentazioni, secondo un ordine razionale. Le prime indagini compiute sono state le visioni termografiche; queste non solo consentono un'indagine non invasiva, rapida e speditiva, che non necessita di particolari

provvedimenti (quali ponteggi, accesso diretto alle superfici, etc.), ma permettono anche un confronto immediato tra i termogrammi (Figura 4) e le fotografie a luce bianca (Figura 5), il che ha permesso immediatamente di riconoscere la tecnologia impiegata (muratura confinata, struttura con telaio in calcestruzzo e baraccato). Ciò ha consentito in primo luogo di selezionare gli edifici che rispondessero ai requisiti tecnologici specifici e individuare la posizione della muratura e dell'ossatura principale e secondaria, senza rimuovere l'intonaco.

Successivamente si sono svolte le indagini pacometriche per rilevare e dimensionare le armature e il copriferro, le battiture sclerometriche, per fornire indicazioni sulle capacità resistenti del calcestruzzo e delle indagini ad ultrasuoni per approfondire i dati. A conclusione di queste indagini su muraure confinate,

si è passato agli edifici baraccati. In questo caso le stesse strumentazioni sono state impiegate nella conoscenza di edifici molto diversi, che necessitavano quindi di metodologie applicative profondamente differenti e sostanzialmente sperimentali. Anche qui sono state effettuate per prima le rilevazioni termografiche, per accertarsi che gli edifici selezionati fossero veramente baraccati. I rilevamenti termografici hanno posto in evidenza che l'individuazione del telaio in legno risulta generalmente più difficile di quello in calcestruzzo armato, in quanto era necessario che si verificassero delle specifiche condizioni, tra cui l'irraggiamento diretto del sole, esposizione del pannello ad est e l'assenza di vento,

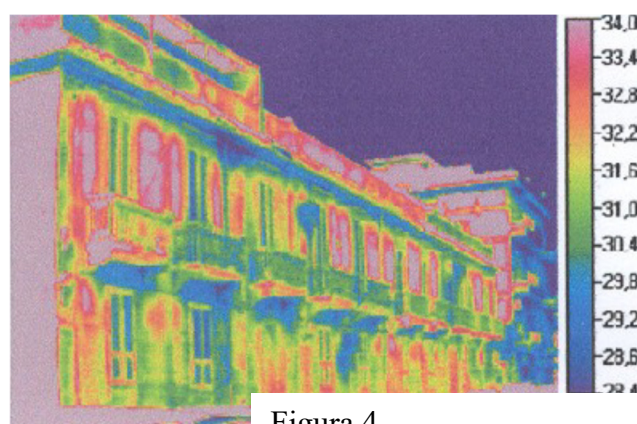


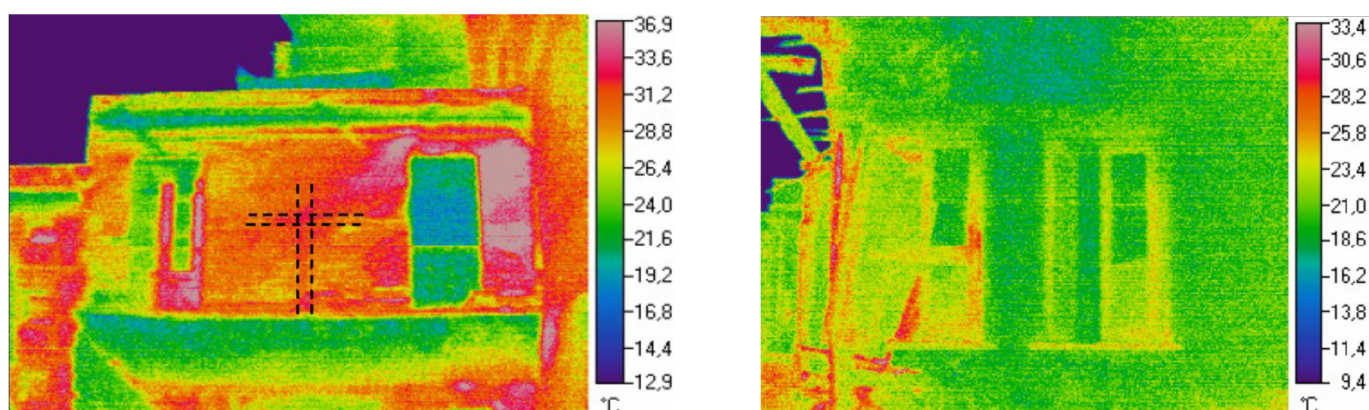
Figura 4



Figura 5

ciò perché il differenziale termico nella struttura legno-muratura si è mostrato assai più basso di quello calcestruzzo-muratura. Ciò ha reso spesso dubbia l'individuazione dei telai lignei, specialmente all'interno degli edifici, sebbene i documenti d'archivio attestassero la presenza della struttura in legno. In questo caso, la struttura lignea è stata individuata tramite indagine pacometrica ed ultrasuoni, grazie al rilevamento dei chiodi da cui si è dedotta la posizione degli elementi lignei. In questo caso, la rilevazione è stata più difficile, a causa delle numerose anomalie rilevate che non hanno permesso una buona conoscenza dello stato di conservazione dell'edificio. L'obiettivo della ricerca era determinare e sperimentare l'applicabilità di alcune strumentazioni diagnostiche, come la termografia, per l'individuazione di alcune tipologie edilizie. L'utilizzo combinato di più tecnologie non distruttive ha fornito dati interessanti, che rispecchiavano quanto descritto nei documenti d'archivio, anche se in alcuni casi è stato necessario effettuare alcuni test distruttivi per identificare le anomalie rilevate dagli strumenti.

Figura 6: I due edifici sono entrambi baraccati, ma solo in quello a sinistra la termografia rileva il telaio ligneo.



Complementarità della termografia con il georadar

Nell'ingegneria civile, i restauratori e gli ingegneri richiedono spesso informazioni sulla geometria degli elementi non visibili, sul loro stato di conservazione e sulla matrice che compone i materiali dell'edificio. Una tale quantità di informazioni eterogenee richiede l'applicazione di diversi strumenti contemporaneamente, basati su principi fisici di funzionamento diversi. In questo caso, si analizza tramite analisi termografica e georadar, la Villa Litta Modignani, progetto di restaurazione del comune di Milano. Tramite questa strumentazione, sono stati analizzati vari ambienti della villa, nello specifico il porticato, la volta della biblioteca, la volta del refettorio e la travatura della pavimentazione. Nel porticato, l'obiettivo era quello di individuare le catene nascoste nelle volte. Un'analisi visiva ha permesso di individuare i capochiave (figura 1), però non si poteva stabilire se le tirantature fossero ancora presenti o no. Con la termografia è stata individuata la presenza dei tiranti metallici verticali in

tutte le volte (figura 2) e tramite un bruciatore a gas, è stato studiato il transitorio termico delle volte del porticato, evidenziando la presenza di catene subsuperficiali nascoste nelle volte (figura 3).

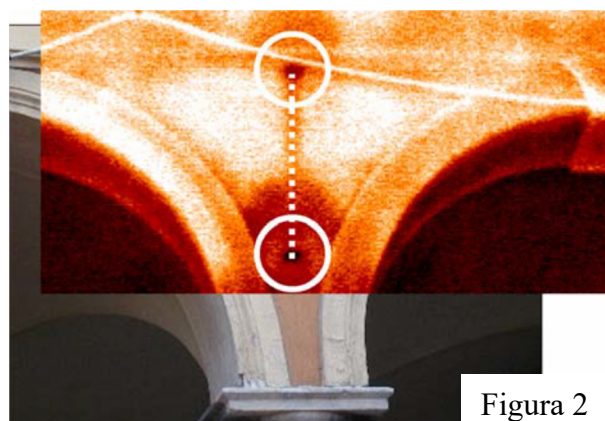
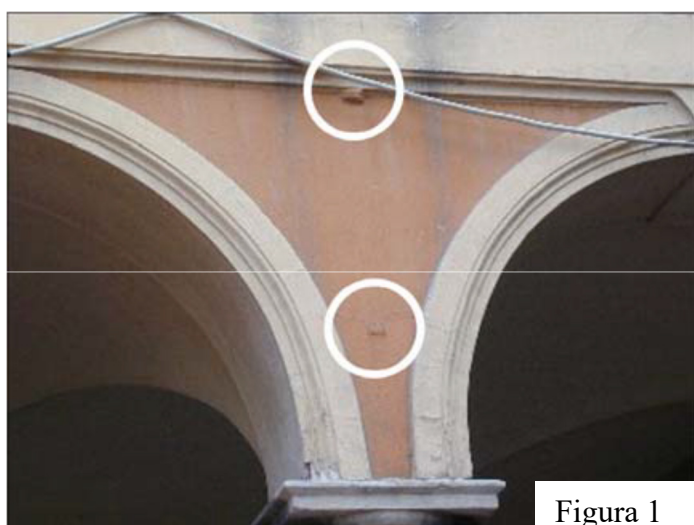


Figura 1

Figura 2

Lo stesso porticato è stato indagato con georadar. L'acquisizione è stata eseguita dal corridoio soprastante il porticato, ottenendo un profilo (figura 4) in cui sono chiaramente distinguibili le iperboli di diffrazione delle cinque volte (vault) ed è confermata la presenza delle tirature orizzontali (tie rod). È inoltre evidenziata

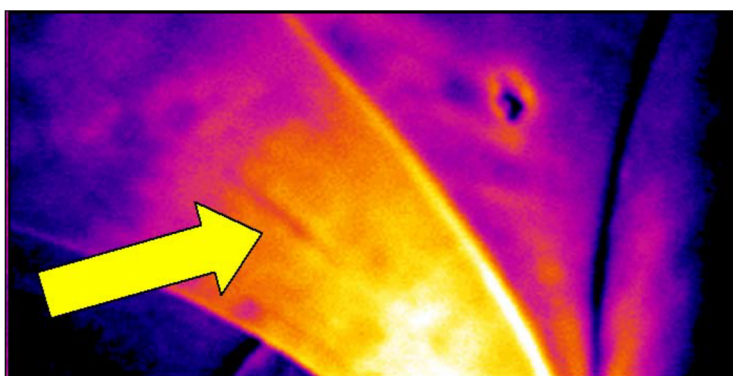


Figura 3

la presenza di tubature e cablaggi in tre punti. (pipe or cable). L'interpretazione congiunta di IRT e GPR ha consentito di affermare con sicurezza che la tipologia costruttiva della villa rispecchia quanto scritto nei documenti storici in possesso del comune di Milano.

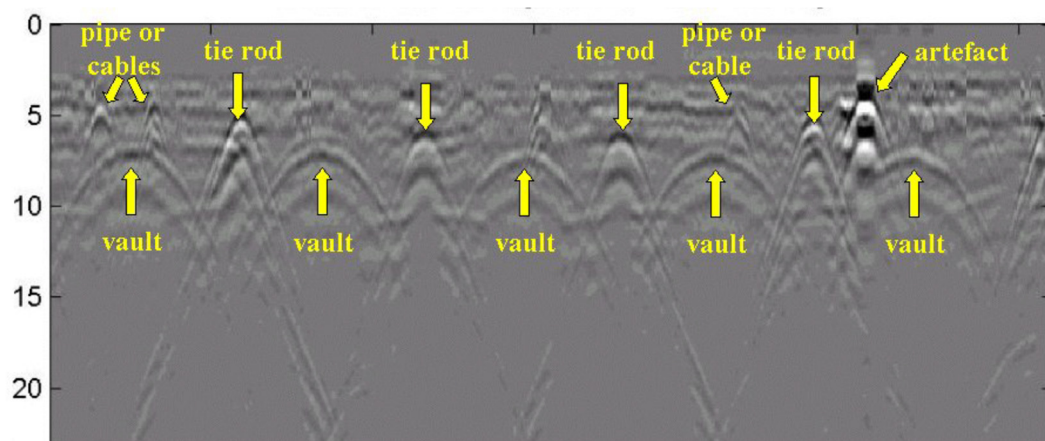


Figura 4

Nel caso della volta della biblioteca, l'analisi è stata effettuata per comprendere il vero funzionamento della volta: negli edifici storici, spesso si trovavano volte realizzate con strutture lignee a solo scopo decorativo. Tramite il riscaldamento e l'analisi del transitorio termico della volta della biblioteca, si è individuata, sotto l'intonaco, una vera volta in laterizio (figura 5), a significare il comportamento strutturale della volta. Inoltre, sono stati individuati materiali disomogenei ed estese zone di distacchi degli intonaci (figura 6).

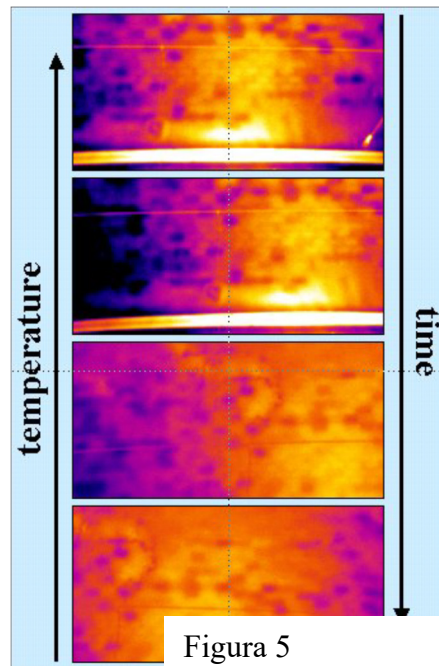


Figura 5

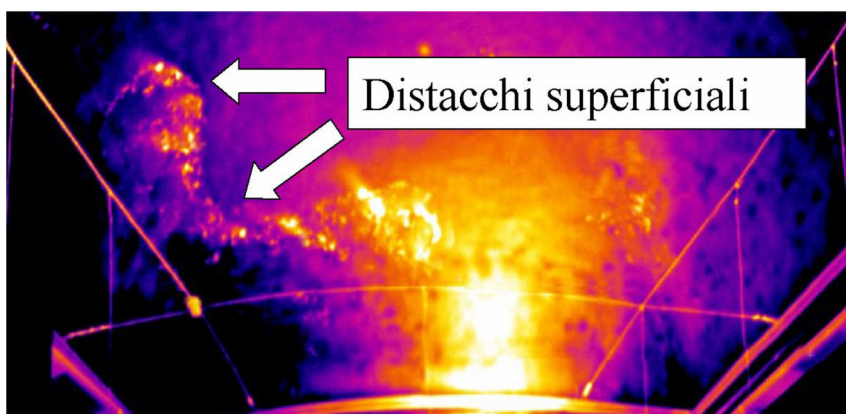


Figura 6

Anche la volta dell'ex refettorio è stata indagata tramite rilievo termografico. Anche in questo caso la volta è stata realizzata in laterizio con il piano d'imposta dei mattoni parallelo al lato maggiore della sala (figura 7). Oltre alla struttura, la termografia ha permesso di individuare una traccia termica dalla forma geometrica regolare, a testimoniare l'esistenza di un tamponamento o fregio non più esistente (figura 8). Inoltre, è stata osservata una netta discontinuità delle caratteristiche termiche della cornice superiore, causato dall'utilizzo di due materiali diversi (figura 9).

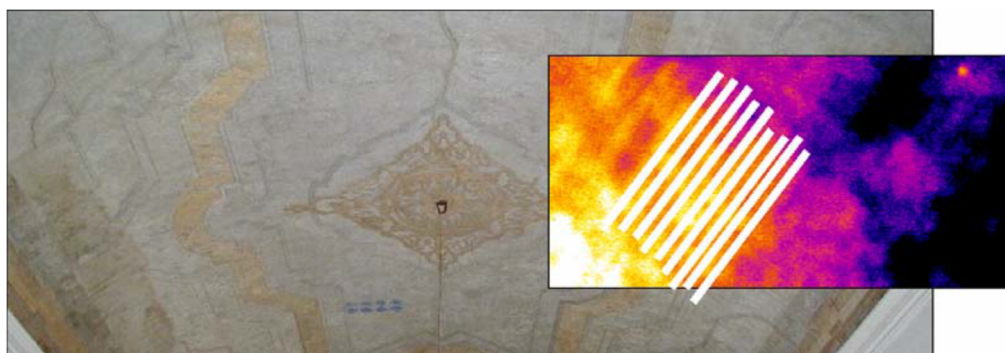


Figura 7

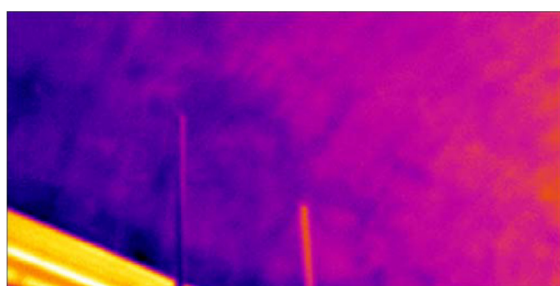
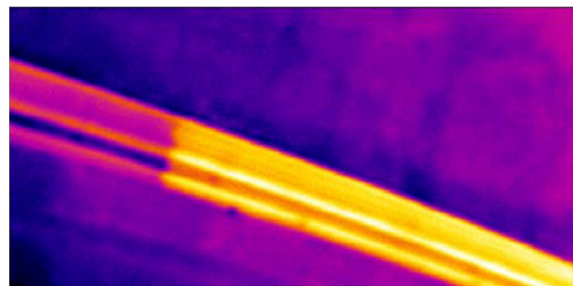


Figura 8,
a sx.

Figura 9,
a dx.



La travatura che sostiene le pavimentazioni in legno è stata individuata facilmente tramite il georadar. Questo lavoro congiunto di tecniche non distruttive ha dimostrato la complementarità delle varie strumentazioni. Infatti, problemi legati all'individuazione di elementi subsuperficiali nascosti dalla muratura possono essere affrontati efficacemente tramite termografia, mentre problematiche connesse all'individuazione e misura di elementi più profondi possono essere affrontate mediante l'uso del georadar. Un utilizzo congiunto riduce notevolmente il tempo necessario per le indagini, semplificando l'interpretazione dei dati, contenendo i costi delle operazioni.

Il sistema IRpano

Questo sistema termografico, sviluppato all'interno di ITC-CNR, è un metodo di indagine che consiste in un sistema robotizzato che può acquisire ed elaborare automaticamente immagini fotografiche e termiche, attraverso la scansione delle superfici circostanti, al ritmo di circa 30 metri quadri al minuto. Il sistema è un apparato complesso il cui nucleo è costituito da una termocamera ad infrarossi microbolometrica, con un sensore sensibile nell'intervallo 7,5-13 μm , ed è in grado di individuare differenze di temperature di 50mK a 30°C. La dimensione del sensore è pari a 320x240 pixel. La termocamera IR è montata su un brandeggio motorizzato che consente di eseguire la scansione di una parete acquisendo immagini di campi di vista vicini. L'acquisizione è gestita automaticamente da un software appositamente sviluppato in ambiente LabVIEW, mentre l'elaborazione delle immagini termiche viene effettuata con Matlab. Le immagini relative ad una scansione vengono elaborate automaticamente per correggere le aberrazioni radiometriche e geometriche e successivamente mosaicate per ottenere una visione completa della superficie di interesse. La risoluzione spaziale del mosaico termico è pari a 1 pixel per centimetro e le sue dimensioni dipendono dall'ampiezza della superficie indagata. La corretta temperatura di ogni pixel viene calcolata automaticamente prendendo in considerazione la radiazione riflessa dall'ambiente e considerando le superfici come emettitori lambertiani con emissività pari a 0.90.

Questo nuovo sistema di rilevazione è stato testato su alcune chiese della provincia dell'Aquila. Nella chiesa di Santo Stefano di Sessanio, è stata applicata la termografia passiva all'esterno dell'edificio, acquisendo la distribuzione della temperatura superficiale della facciata durante il momento di massimo irraggiamento della giornata. Si è cercato di agevolare il confronto dei dati tramite immagini scattate prima e dopo il terremoto del 6 aprile 2009. Nella figura 1 si evidenzia il quadro fessurativo della facciata principale: le lesioni evidenziate nell'immagine termica indicano chiaramente la sollecitazione dovuta al tirante applicato alla parete. Le lesioni non sono visibili nella fotografia, poiché troppo sottili o non affioranti in superficie. Queste lesioni si notano nell'immagine termica probabilmente a causa del distacco locale dell'intonaco.



Figura 1: La chiesa di Santo Stefano di Sessanio, prima (a sinistra e al centro) e dopo (a destra) del terremoto del 6 aprile 2009. L'immagine termica era stata acquisita prima dell'evento sismico.

L'ispezione della chiesa di Santa Lucia, a Rocca di Cambio, è avvenuta nei giorni successivi al terremoto. La scansione termografica è stata effettuata all'interno dell'edificio con tecnica attiva, mediante la sollecitazione termica, per circa un'ora, delle pareti con un riscaldatore portatile ad aria calda alimentato a GPL. Le immagini presenti in figura 2 mostrano la fotografia della controfacciata della parete di fondo e la relativa distribuzione di temperatura, che mette in evidenza, oltre alla tessitura muraria, le lesioni della parete, visualizzate come zone a temperatura maggiore. L'utilizzo di IRpano ha permesso l'esecuzione delle attività di diagnostica in tempi rapidi, minimizzando l'esposizione del personale alle condizioni di lavoro pericolose.

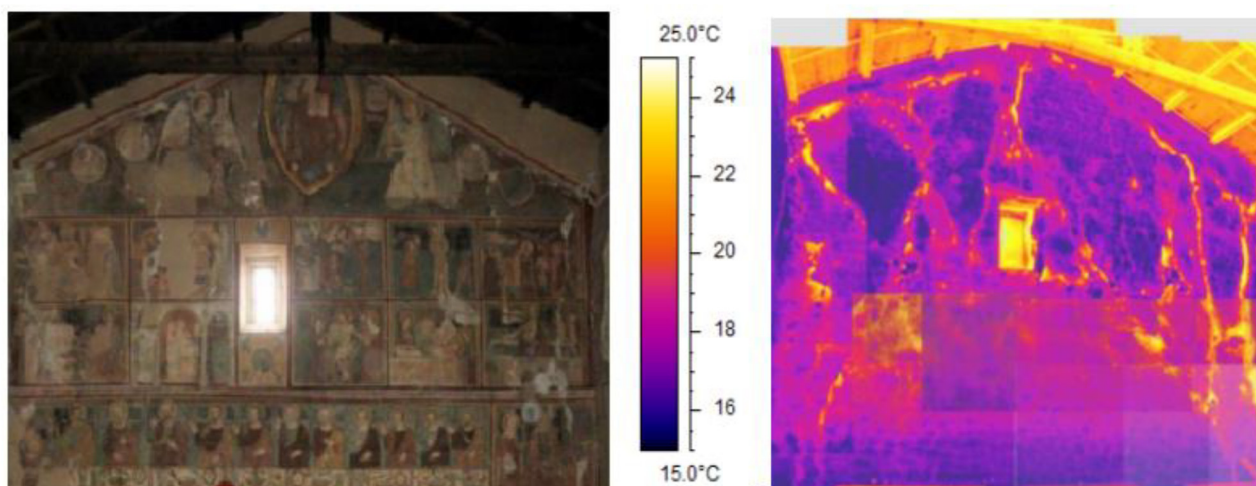


Figura 2: Le immagini rappresentano la chiesa di Santa Lucia di Rocca di Cambio, dopo il terremoto. L'immagine termica è stata poi fornita al personale addetto alla gestione dell'emergenza.

Una delle possibilità offerte dal sistema IRpano è la capacità di integrare le scansioni termografiche delle superfici con un modello tridimensionale dell'edificio.

La valutazione dello stato di conservazione

Durante la valutazione igrometrica dell'umidità contenuta negli edifici, bisogna ben specificare in che modalità sta avvenendo l'analisi, poiché i risultati ottenuti dalle immagini possono cambiare: in condizioni ambientali che facilitano l'evaporazione superficiale, le regioni con maggiore umidità appaiono come aree più fredde nelle riprese all'infrarosso termico in modalità passiva. Nella modalità attiva, quindi dopo il riscaldamento della superficie, l'acqua contenuta nei materiali da costruzione trattiene il calore accumulato, mentre il resto dell'ambiente presenta una temperatura inferiore. Le parti imbibite risultano così a temperatura maggiore, in condizioni di ripresa stazionarie. La termografia infrarossa presenta indiscutibili vantaggi: permette infatti, senza alcun prelievo, di determinare la distribuzione superficiale dell'umidità e di ripetere le misure nel tempo, consentendo il monitoraggio del fenomeno, e di verificare quindi, grazie alla non distruttività della prova, i mutamenti al cambiare delle condizioni ambientali. La misura avviene in tempo reale. La rapidità di esecuzione della prova consente infine l'indagine di vaste aree in un tempo contenuto. Gli svantaggi che d'altro canto ancora permangono sono essenzialmente legati al carattere qualitativo e superficiale delle indagini. Il limite principale è rappresentato dalla mancanza di una diretta corrispondenza quantitativa tra la temperatura registrata ed il contenuto d'acqua nel materiale.

Un esempio di applicazione di questo tipo si ha nella figura sottostante, che mostra il mosaico composto da immagini termiche del prospetto nord della Cascina Caldera a Milano. Si nota chiaramente la linea di massima imbibizione della muratura contraddistinta da una fascia più scura alla base della muratura ad andamento variabile, con un picco sulla sinistra. L'altezza della zona a minor temperatura mediamente non supera gli 80 cm da terra. La differenza di temperatura non è dovuta a diversità del materiale, bensì alla presenza di flussi evaporativi nella zona maggiormente imbibita. La ripresa è avvenuta in condizioni stazionarie, in modalità passiva, quindi senza sollecitazione termica.

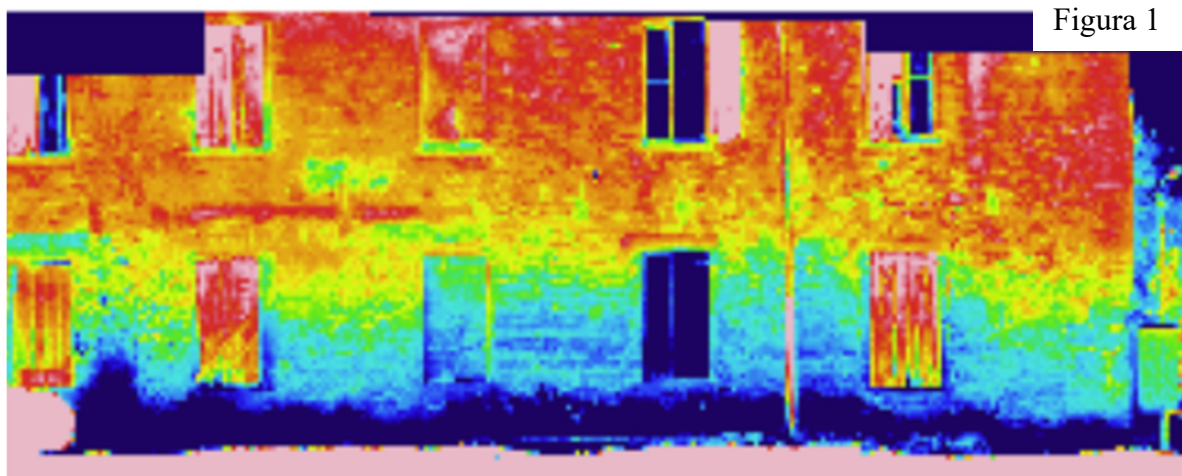


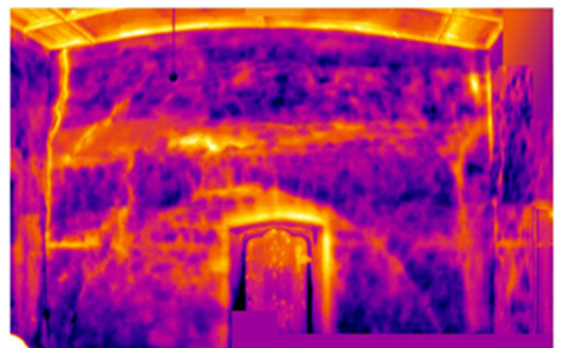
Figura 1

Nell'ambito della conservazione del costruito storico, non sono rari i casi in cui le modifiche avvenute nel tempo hanno sostanzialmente stravolto l'impianto originale, senza che la documentazione rinvenuta, o

reperibile, possa esaurientemente fornire le informazioni relative a tali modifiche. A complicare ulteriormente la lettura, capita sovente di imbattersi in interventi “cosmetici” di uniformazione delle linee e degli ambienti. Tali interventi mascherano i cambiamenti sopraggiunti, rendendo incerta la localizzazione degli elementi strutturali non a vista. In questi casi la termografia infrarossa può essere un valido aiuto per consentire l’individuazione degli elementi senza dover ricorrere a carotaggi e saggi distruttivi. La localizzazione di strutture non a vista è possibile solo se la differenza delle proprietà dei materiali induce una distribuzione delle temperature superficiali variabile. Il flusso di calore può essere provocato dalle condizioni climatiche naturali o mediante una sollecitazione termica artificiale, opportunamente calcolata ed applicata. Nel caso di materiali con proprietà termiche ben differenziate i risultati sono ottenibili più facilmente, poiché dalla risposta termica si possono ottenere immagini molto contrastate anche nel caso di un’elevata approssimazione dei tempi di riscaldamento e di ripresa. La riuscita della prova dipende dalla potenza del riscaldamento disponibile, oltre che dalle capacità termiche dei materiali, dalla loro adesione alla struttura, e dall’omogeneità degli strati che costituiscono il rivestimento e la struttura. In pratica, la profondità a cui attualmente ci si limita è di pochi centimetri, ma è sufficiente per poter ottenere una “impronta termica” della struttura sottostante la finitura. Un esempio lo fornisce l’indagine termografica effettuata nel castello di Pergine Valsugana, Castelpergine, dove le analisi sono state effettuate per ampliare la conoscenza dell’edificio ed indentificare catene e canne fumarie. Nella figura 2 si rileva che la muratura intonacata è costituita da conci di pietra irregolari; nella muratura è presente un arco di scarico, ben identificabile all’infrarosso termico. Il quadro fessurativo risulta più chiaramente leggibile nei termogrammi, ed è possibile distinguere le fessure passanti l’intero spessore della muratura da quelle che attraversano soltanto l’intonaco. Le lesioni che interessano solo l’intonaco, in fase di riscaldamento, si comportano come cavità e pertanto si genera un riscaldamento localizzato. Attraverso le fessure che tagliano lo spessore della muratura di genera un flusso di aria calda, che fluisce dall’interno della stanza che è stata esaminata e riscaldata verso il locale adiacente, in cui si registra una temperatura inferiore di circa 10°C.



Figura 2:
Immagine nel
visibile a sx,
nell'infrarosso
a dx.



La termografia come salvaguardia delle strutture

La penisola italiana offre moltissimi esempi in cui la termografia infrarossa potrebbe intervenire per valutare la conservazione degli edifici e programmare adeguati interventi di consolidamento e restauro. Un esempio evidente delle reali potenzialità della termografia sugli edifici storici proviene dalle misurazioni sulla chiesa di Santa Maria ad Cryptas, in Abruzzo, precisamente vicino L'Aquila. Questa chiesa è stata oggetto di indagine negli anni prima del terremoto del 2009, e per confrontare i dati, anche dopo l'evento sismico. La chiesa è un patrimonio artistico della zona, ed anche una delle più antiche, con degli affreschi che ricoprono tutti i muri interni e la volta (figura 1). Durante gli anni, la chiesa è stata restaurata varie volte a causa degli eventi sismici.

L'analisi termografica è stata effettuata su tutti i muri esterni, ponendo particolare attenzione alla facciata:

confrontando le immagini termiche con quelle visibili ad occhio nudo, sono stati individuati alcuni problemi

(figura 2), come l'umidità di risalita nella zona in basso a

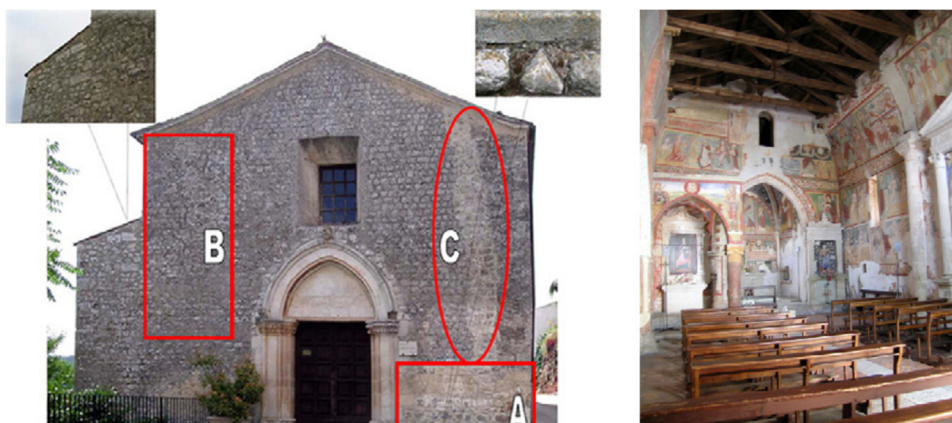
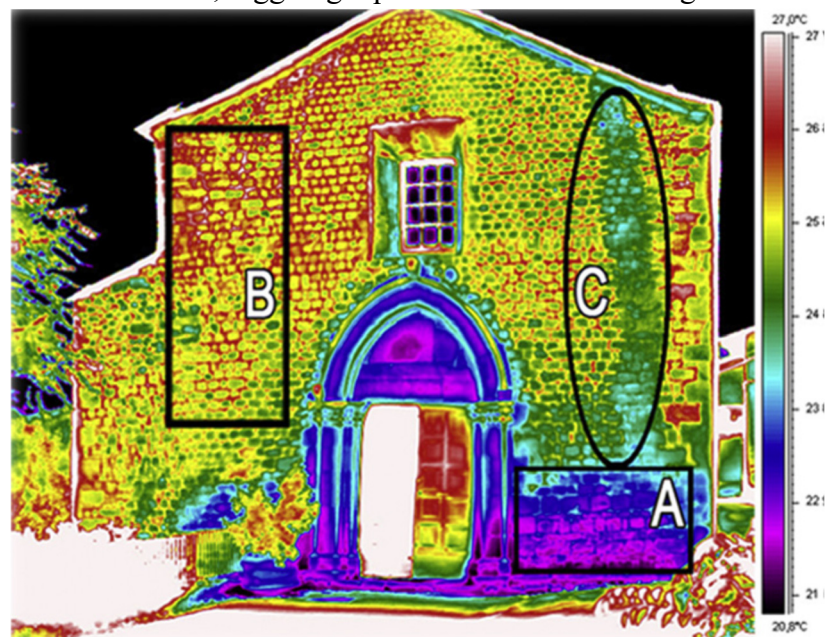


Figura 1: La chiesa di Santa Maria ad Cryptas, dettaglio interno e della facciata.

destra della facciata (zona A), l'inizio della formazione di crepe e fratture nella tessitura muraria (zona B), dovuta ad una instabilità della malta, causata probabilmente dallo stress termico. In questa zona, grazie ai termogrammi si è individuata una frattura sopra la finestra ed una che dalla zona superiore della facciata sinistra, raggiunge quasi la base. La disomogeneità della zona C testimonia l'uso di differenti



materiali, probabilmente a causa di un restauro.

Figura 2: Termogramma della facciata, dove si evidenziano le zone critiche individuate.

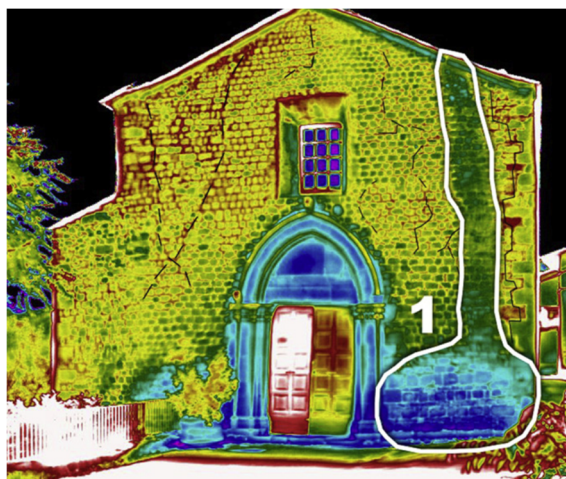


Figura 3: Particolare della facciata, dove si notano chiaramente le varie fratture in alto, non visibili ad occhio nudo, e l'umidità combinata ad un attacco biologico che sta interessando la tessitura muraria, risalendo dal terreno fino al tetto.

Dopo l'evento sismico del 6 aprile 2009, la situazione dell'edificio è diventata talmente critica che sono stati necessari degli interventi di messa in sicurezza, per prevenire ulteriori danni (figura 4).



La scoperta più importante nella rilevazione termografica successiva al terremoto è stata che le lesioni, accennate nelle immagini termografiche prima del 2009, sono venute chiaramente fuori ed ora sono visibili anche ad occhio nudo. La stessa cosa è successo anche ai lati della chiesa (figura 5 e 6), dove erano presenti crepe localizzate dalla termografia prima del terremoto, che dopo l'evento sismico sono diventate più evidenti, necessitando quindi di particolari interventi di puntellamento e stabilizzazione del tessuto murario.

Figura 4: Termogramma della facciata dopo il terremoto, in cui si evidenziano le crepe visibili e il puntellamento dell'edificio.

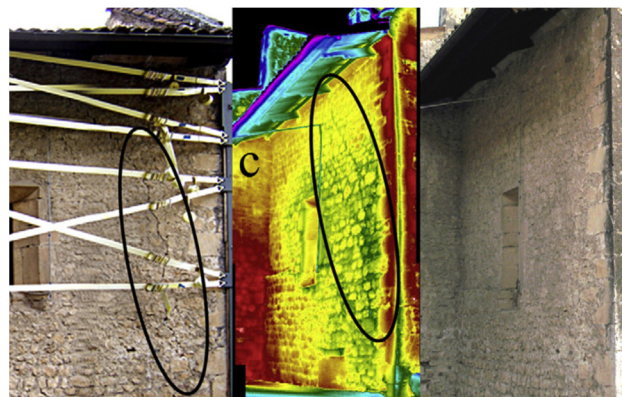
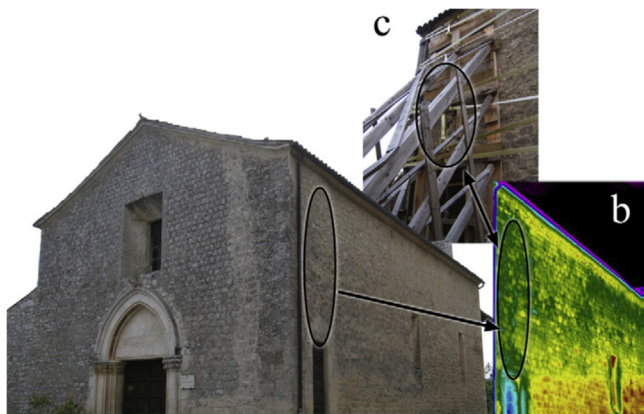


Figura 5: Interventi di messa in sicurezza delle lesioni, individuate dalla termografia prima dell'evento sismico, visibili ai lati della chiesa.

Questo esempio mostra che alcuni dei danni occorsi dopo il terremoto corrispondono alle anomalie termiche rilevate prima, evidenziando le potenzialità della metodologia termografica come strumento di diagnosi preventiva e l'utilità di questa tecnica in questi casi e nelle applicazioni a salvaguardia degli edifici storici.

Un altro esempio, sempre in provincia dell'Aquila, è la Chiesa di San Flaviano (figura 1). L'edificio presenta una tessitura muraria rimaneggiata nel corso del tempo, chiaramente visibile nella parte superiore della facciata. L'analisi dei termogrammi (figura 2), concentrati sulla facciata dell'edificio, consente di identificare agevolmente i differenti materiali e il confronto fra le regioni a comportamento



Figura 1: Facciata della chiesa di San Flaviano. anomalo, tenuto conto delle condizioni ambientali, ha portato all'individuazione di varie zone critiche.

Figura 2: Immagine termografica in cui si evidenziano le anomalie termiche.

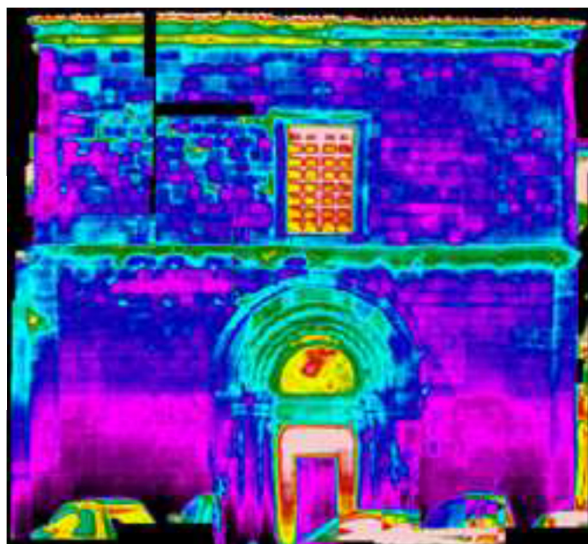


Figura 3: Identificazione delle varie zone critiche.

La zona A e B risultano più fredde, probabilmente a causa dell'umidità di risalita. Nelle zone C, D ed E, la differenza di temperatura di pochi gradi evidenzia la presenza di materiali diversi, la mancanza di conci e della malta tra i conci stessi, segnalata dalla temperatura più alta con possibilità di distacco dell'intonaco.

Strumentazione: termocamera AVIO TVS-2000MkIILW, che può operare in un intervallo tra -40°C e 300°C , con una sensibilità di $0,1^{\circ}\text{C}$.

Acquisizione: le immagini sono state acquisite nella mattinata, in modalità passiva, a circa 11 metri dalla facciata. L'emissività è stata impostata a 0,90. Umidità del 41,35 e temperatura di $15,8^{\circ}\text{C}$.

Una conoscenza più specifica dell'edificio assume un'importanza strategica per garantire il necessario rigore tecnico scientifico per operare su un edificio in un'area a rischio sismico.

Normativa

La norma UNI-EN-16714: 2016 è la versione ufficiale di quella Europea elaborata dal Comitato Tecnico CEN/TC 138 “Non-Destructive testing” (segreteria AFNOR Francia), finalmente adottata anche dall’Ente Italiano di Normazione. Descrive diversi principi, requisiti della strumentazione, scopi, termini e definizioni per l’applicazione della termografia nelle prove non distruttive. Si divide in tre parti: principi generali, equipaggiamento, termini e definizioni.

UNI-EN-16714 – 1:2016

La presente norma Europea UNI-EN-16714 specifica i principi generali per la termografia delle prove non distruttive. Le prove termografiche sono utilizzate per la rivelazione e la localizzazione delle discontinuità come cricche, delaminazioni e inclusioni. Questo in materiali differenti come compositi, metalli e rivestimenti. Solitamente per questo tipo di indagine è richiesta una stimolazione termica la cui scelta dipende dall’applicazione in funzione del tipo di materiale, della geometria, dell’oggetto e del tipo di difetti da determinare. Si definiscono i criteri per la preparazione alla prova, come le istruzioni per l’esecuzione, la descrizione del metodo di analisi che devono essere messe a disposizione del personale responsabile. Le istruzioni devono indicare la posizione di ripresa e l’accessibilità della stessa, lo scopo, ambito, area da sottoporre all’analisi. Occorre indicare il tipo di disomogeneità attesa e se esistono rotture in superficie o meno. Occorre altresì definire i requisiti richiesti dalla strumentazione, come risoluzioni spaziali, temporali, termiche e il grado di precisione della misura. Nelle istruzioni è necessario indicare l’eventuale tipo di sorgente per la stimolazione termica appropriata e le relative caratteristiche, la distanza e il tempo di esposizione, posizioni e distanza della termocamera rispetto ad essa ed i parametri di misurazione da adottare. Importante anche annotare tutte le condizioni ambientali presenti durante l’esecuzione con l’ausilio della strumentazione adeguata e specificare lo stato operativo dell’oggetto in esame al momento della prova, lo scopo e il campo di applicazione dell’analisi. Per verificare l’allestimento dell’intero sistema di misurazione, la norma UNI-EN-16714 definisce che, oltre ai parametri di misurazione selezionati, si debba utilizzare almeno uno dei provini di riferimento.

Vengono indicati tre tipi di provino:

TIPO 1: provino per il controllo della taratura per la prova del sistema di misurazione. In sintesi, prima o durante la prova, si deve verificare il corretto funzionamento e l’eventuale taratura della termocamera. Infatti, viene specificato che occorrerebbe utilizzare un corpo nero tarato a due diverse temperature pertinenti la prova per la verifica dell’accuratezza della taratura effettiva. Qualora vi fosse energia introdotta da radiazioni omogenee, tale omogeneità andrebbe verificata sottoponendovi, per esempio, una grande lastra metallica annerita;

TIPO 2: provino realizzato con lo stesso materiale dell’oggetto sottoposto a prova che comprende difetti artificiali come fori a fondo piatto, tacche o cunei a gradini con differenti geometrie. Devono quindi

essere considerate tutte le proprietà termiche anisotrope. A tale scopo possono essere necessari diversi provini di riferimento di tipo 2;

TIPO 3: provino reale con difetti naturali che sono generati durante il processo di produzione, quindi tipo di materiale, geometria e condizioni superficiali sono simili a quello dell'oggetto sottoposto a prova. I difetti dovrebbero essere caratterizzati mediante altri metodi non distruttivi come ultrasuoni e tomografia computerizzata.

Vengono definiti i passi che devono essere eseguiti con l'ausilio dei provini di riferimento per assicurare che l'apparecchiatura utilizzata stia funzionando correttamente. In termografia, i risultati delle misurazioni sono condizionati dall'emissività dell'oggetto e dall'irradiazione proveniente dall'ambiente circostante. Tali grandezze devono essere prese in considerazione. Nel caso di oggetto a bassa emissività può essere applicato un rivestimento (nastro isolante o vernice spray nero opaca) con emissività alta e nota. Il tipo di rivestimento deve essere determinato utilizzando un provino di riferimento di tipo 2 o 3.

Le procedure di termografia possono essere eseguite in modo attivo o passivo e valutate in modo qualitativo, comparativo o quantitativo. Nella termografia qualitativa si esaminano i modelli termici e la distribuzione delle radiazioni sulla superficie interessata. In quella comparativa, sia in forma attiva che passiva, vengono esaminate e messe a confronto grandezze differenziali (ΔT), mentre in quella quantitativa, grandezze assolute. Per avere successo le prove termografiche richiedono una scelta appropriata della termocamera in funzione della sensibilità, un intervallo di temperatura idoneo, sezione dell'immagine idonea con prevenzione dei riflessi mediante la scelta di angolazione opportuna, monitoraggio di sorgenti di disturbo esterne (vento e umidità), una lente idonea alla risoluzione spaziale richiesta, capacità di focalizzazione e corretta scelta della tavolozza di rappresentazione. La termografia passiva utilizza soltanto il flusso di calore dovuto al calore dell'oggetto sotto verifica, ed è utilizzata negli edifici per la localizzazione dell'umidità, ponti termici e perdite d'acqua, per l'ispezione in sistemi elettrici e meccanici. La termografia attiva invece utilizza fonti addizionali di energia che possono essere naturali o artificiali che generano un flusso di calore non stazionario verso l'oggetto sotto esame. Le fonti naturali possono essere la radiazione solare, la luce pulsata e non, aria fredda o calda, ultrasuoni, induzione, e le prestazioni dell'eccitazione devono essere convalidate dai provini di riferimento di tipo 2 e 3. Le fonti artificiali vengono descritti nella sezione 2 della presente norma. La termografia attiva si suddivide a seconda del tipo di eccitazione, in transitoria (pulsata, a gradini), di modulazione (look-in, raffica di impulsi). Anche a seconda del tipo di valutazione, (angolo di fase o look-in, derivata dal tempo, a temperatura differenziale).

Nella termografia qualitativa si visualizza la densità e la distribuzione della radiazione di temperatura apparente sulla superficie dell'oggetto sottoposto ad esame. Ricerca tubazioni e perdite, verifica della variazione di temperatura su pavimenti radianti, ricerca di strutture nascoste, localizzazione della delaminazione, sono gli esempi applicativi. Comparativa (comparativa o quantitativa): valuta le

differenze di temperatura apparenti o i parametri secondari, come le differenze di fase, confrontando gli stessi oggetti sottoponendoli a prova in diversi momenti in condizioni simili, oppure a prove differenti alle medesime condizioni. Per ottenere successo in questo tipo di analisi occorre aggiungere delle “precondizioni” come la scelta della stessa sezione d’immagine, la stima dei parametri di misurazione (emissività e temperatura riflessa) e la stabilità della temperatura nella fotocamera nel tempo. Nella procedura quantitativa le temperature o i parametri secondari sono determinati e valutati dai valori di radiazione misurati. Occorre quindi una conoscenza approfondita delle caratteristiche dei materiali (emissività) e delle sue dipendenze (temperatura, lunghezza d’onda e condizioni ambientali). Questa metodologia è applicata nella classificazione dei difetti di macchine e sistemi elettrici e meccanici. Per garantire un successo con la termografia attiva si richiede la scelta di un filtro spettrale idoneo che corrisponda alle caratteristiche spettrali del soggetto in esame, un metodo di eccitazione con intensità idonea variabile nel tempo. In quella passiva invece si richiede la taratura della temperatura e l’impostazione corretta dei parametri di misurazione quali emissività e T_{Rif} . Il personale qualificato secondo la EN ISO 9712 deve dimostrare la propria competenza sulle norme, regole, specifiche, istruzioni di prova, conoscenza dell’attrezzatura e il suo funzionamento, montaggio, progettazione. Conoscenze sui regolamenti di sicurezza legate alle eccitazioni ottiche, sonore, elettriche, magnetiche e di altro tipo. Deve essere in grado, inoltre, di capire le indicazioni sui criteri per riconoscere i veri difetti da quelli forvianti dipendenti da errata emissività, temperatura riflessa e inquinamento superficiale. La norma UNI-EN-16714 definisce anche i dettagli minimi che deve contenere il rapporto di prova o report. Oltre il riferimento della presente normativa, occorre specificare scopo e campo di applicazione della prova, riferimento dell’ordinante dell’analisi, data, luogo, tecnica utilizzata, caratteristiche dei materiali, provini di riferimento utilizzati, tipo di apparecchiatura, parametri ambientali, stato operativo e condizioni limiti dell’oggetto analizzato, descrizione dello stesso (dimensione, posizione e temperatura), risultati dell’analisi, incertezza di misurazione. Nome, certificazione e firma dell’operatore e del supervisore.

UNI-EN-16714 – 2:2016

La seconda parte della norma UNI-EN-16714, elaborata sotto la competenza della Commissione Tecnica UNI, descrive le proprietà e i requisiti delle termocamere utilizzate per le prove non distruttive (effettuata in precedenza). Fornisce anche esempi di fonti di eccitazione e le caratteristiche richieste. La termocamera deve essere scelta in base all’applicazione e alla temperatura d’esercizio dell’oggetto sottoposto ad ispezione. I parametri fondamentali sono la sensibilità spettrale, l’intervallo di temperatura, risoluzione termica, spaziale e temporale, frequenza dell’immagine. Tali dati devono essere certificati dal costruttore. Vengono definiti anche gli accessori equipaggiabili: lenti grandangolari o teleobiettivi (da comprendere nella taratura della termocamera). Specchi a infrarossi, finestre di protezione (protezione meccanica, chimica e da elevate temperature), alloggiamenti di protezione (dal calore, polvere, acqua, sostanze chimiche, campi magnetici, atmosfere esplosive). Le fonti di eccitazione utilizzabili per la

termografia attiva possono essere le lampade flash (pulsata), lampade led e laser (modulata o pulsata), aria (calda o fredda), bobine a induzione (riscaldamento di elettroconduttori senza contatto), eccitazione meccanica (vibrazioni e ultrasuoni). I controlli del funzionamento e tracciabilità riguardano i dispositivi e il software che devono essere controllati con regolarità, sia da parte dell'utilizzatore prima della prova, sia da parte del costruttore, che con frequenza di interventi programmati esegue la taratura e la verifica dell'accuratezza di misura. La norma definisce anche i parametri e metodi di misurazione per la caratterizzazione delle termocamere, quali IFOV, FOV, SRF, NETD e MRTD.

La UNI-EN-16714 definisce anche l'utilizzo di strumenti accessori, quali termometri, dispositivi per la misurazione dell'umidità, anemometri, pinze amperometriche, fotocamere nell'intervallo del visibile e endoscopi.

UNI-EN-16714 – 3:2016

La terza parte ed ultima parte della norma UNI-EN-16714 stabilisce termini e definizioni da utilizzare per le prove termografiche.

La presente normativa risale al 2016. Ad inizio del 2020, la Commissione UNI/CT 036, dedicata alle prove non distruttive, ha proposto il progetto di norma UNI 1607547 dal titolo: "Indicazioni generali per il corretto utilizzo della termografia all'infrarosso". Il progetto di norma, destinato soprattutto ai nuovi utilizzatori, si propone di fornire indicazioni di base per un corretto uso della termografia all'infrarosso. L'obiettivo del progetto di norma è quello di produrre un documento di base, di facile consultazione, che richiami e integri le norme esistenti. Attualmente la norma si trova nella fase dell'inchiesta pubblica preliminare.

Conclusion

La termografia si sta sempre più affermando come una valida tecnica di controllo non distruttivo, probabilmente una delle più semplici da applicare ed interpretare, infatti, in molti casi, fornisce risultati chiari e facilmente integrabili con altre tecniche. Proprio per questo, il mercato delle termocamere è in espansione e si sta sviluppando per migliorare gli strumenti ed abbassarne il costo, che attualmente è ancora troppo alto ed è diventato il principale limite di questa tecnologia, che rimane in questo modo confinata negli ambienti scientifici e di ricerca e non riesce a diffondersi nei cantieri e negli uffici tecnici. A livello territoriale, la termografia può fornire un ampio supporto nella verifica e nel restauro dei beni culturali, soprattutto quadri ed affreschi, dato che nella nostra zona sono tantissime le opere artistiche presenti nella miriade di antiche chiese e conventi sparsi nelle nostre colline. Il controllo termografico in questi casi potrebbe essere il primo step di indagine per identificare le opere più a rischio e pianificare un sistema di interventi per recuperare e, soprattutto, conservare l'enorme patrimonio artistico della nostra zona.

Ancora più importante è l'utilizzo del controllo termografico, sempre come prima indagine, negli edifici storici della zona, che è, come tutti ben sappiamo, ad elevato rischio sismico. La capacità della termografia di individuare i difetti ed i danni generati da crepe non ancora visibili nella struttura, permette di effettuare interventi mirati di consolidamento e prevenzione prima della loro manifestazione che possono essere tali da evitare eventuali crolli e catastrofi in caso di eventi sismici, come è già accaduto nel 2009 e nel 2016. Essendo una tecnica di controllo preliminare, si potrebbe effettuare, a costi contenuti, un censimento degli edifici, soprattutto pubblici, per poter in questo modo intervenire nei casi più a rischio e salvaguardare un patrimonio edile che consiste in buona parte di edifici storici e di edifici costruiti negli anni 50.

Oltre all'edilizia e ai beni culturali, la termografia si sta affermando in moltissimi altri campi di applicazione, come la medicina, l'automotive, l'ingegneria. Sono sempre più diffuse le aziende che sfruttano il controllo termografico nella verifica dei processi produttivi, come ad esempio nelle linee di produzione: in questi casi, dal classico controllo a campione, si potrebbe passare al controllo dell'intera produzione, montando una termocamera che scansioni il prodotto finito per individuare eventuali problemi.

Questi sono solo alcuni dei motivi per cui la termografia dovrebbe espandersi, uscire dai laboratori di ricerca e diffondersi anche nei cantieri e nelle aziende, in modo tale da migliorare l'affidabilità dei prodotti e, soprattutto, la sicurezza negli edifici.

Bibliografia

- BENDADA A., SFARRA S., AMBROSINI D.**, *Active thermography data processing for the NDT&E of frescoes*, in “X International Conference on QIRT”, 2010.
- BIANCO A., ESPOSITO A., TUZZA S.**, *Le indagini non distruttive come strumento investigativo per la conoscenza delle tecniche costruttive dell’edilizia storica del ‘900: il caso studio di Reggio Calabria*, in “AIPnD – PnD”, 2007.
- BORGOGNO MONDINO E., GRUA M., LINGUA A., GIULIO TONOLO F.**, *Tecniche innovative per il rilievo multispettrale di affreschi murali*, in “IX conferenza nazionale ASITA”, 2005.
- CADELANO G., BORTOLIN A., CIFANI G.**, *Ispezioni strutturali supportate dalla termografia IR*, in “XVI Convegno Anidis”, 2015.
- CAGIO S., POLDI G., REDAELLI V.**, *Termografia: uno strumento utile per l’esame di dipinti su supporto mobile?*, in “AIPnD – PnD”, 2009.
- CARLOMAGNO G.M.**, *Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT*, in “NDT&E International”, 2002, 35: 559-565.
- CASTELLINI P., MARTARELLI M., LENCI S.**, *Diagnostic survey on frescoes paintings in pompeii by active IR-Thermography*, in “Metrology for archaeology and cultural heritage”, 2017, 51-56.
- DANESE M., SILEO M., MASINI N.**, *geophysical Methods and Spatial Information for the Analysis of decaying Frescoes*, in “Surveys in Geophysics”, 2018, 39: 1149-1166.
- FERGOLA L., DAMO M.**, *Indagini termografiche ad alta risoluzione sugli affreschi della “Sala dei Pavoni” nella villa di Oplontis*, in “Rivista di Studi Pompeiani”, 2008, 19: 144-147.
- GERALDI E., GIZZI F.T., MASINI N.**, *termografia all’infrarosso ed archeologia dell’architettura: alcuni esempi*, in “GNGTS – Atti del XXII Convegno Nazionale”, 2003.
- GRINZATO E.**, *Controllare è necessario, il controllo termico è utile: introduzione alla termografia IR, potenzialità e limiti*, in “AIPnD journal”, 2008.
- LUALDI M., GIANINETTO M., ZANZI L., SAISI A.**, *Complementarità delle indagini termografiche e georadar nella diagnosi degli edifici*, in “GNGTS - Atti del XXII Convegno Nazionale”, 2003.
- PAOLETTI D., AMBROSINI D., SFARRA S.**
- *La termografia applicata alla salvaguardia di strutture architettoniche a carattere religioso della provincia dell’Aquila*, in “V Congresso Nazionale IGIC”, 2007.
 - *Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation*, in “Journal of Cultural Heritage”, 2013, 14: 116-121.
- ROSINA E., SALERNO A., MARENGO M.**, *Valutazione dello stato di conservazione di edifici mediante termografia infrarossa. Parte II*, 2007.
- ROSINA E., ROBISON E.C.**, *Applying infrared thermography to historic wood-framed buildings in North America*, in “APT Bulletin”, 2002, 33: 37-44.
- THEODORAKEAS P., IBARRA-CASTANEDO C.**, *NDT inspection of plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry*, in “NDT&E international, 2012, 14: 116-121.
- UNI-EN-16714**: 2016 Norma italiana sulla Termografia

Ringraziamenti

Riconosco che il mio percorso di studi è stato un po' troppo lungo, sicuramente mi sarei potuto impegnare di più ma non mi pento di quello che ho fatto, poiché anche se caratterizzato dallo studio, dal sudore, dalle gioie e dalle sconfitte che si trovano in tutti i corsi universitari, il Mio percorso universitario è stato caratterizzato anche da tante altre cose, che mi hanno fatto vivere questi anni in cui l'università era al centro, ma non da sola.

Le prime persone che devo ringraziare sono i miei genitori, coloro che mi hanno sempre supportato e sopportato in tutta questa avventura: ci sono sempre stati, a modo loro, mai invasivi ma sempre presenti quando servivano, anche quando ero vicino a lasciare tutto e cambiare strada. Non finirò mai di ringraziarli e spero di averli resi un po' orgogliosi di me.

Ringrazio poi la mia ragazza, A, che mi ha sempre sostenuto: abbiamo camminato insieme su questa strada impervia, è stata vicino a me anche quando non se ne rendeva conto, tenendomi compagnia nell'attesa della lezione, chiedendomi degli esami, ripassando alcune materie con me... ha gioito con me nei momenti più belli ed è stata con me nei momenti più tristi. Grazie per esserci stata, spero di ricambiare il favore con te, sostenendoti in ogni scelta che farai nel tuo percorso.

Ringrazio tutte le persone che ho incontrato in questi anni tramite l'università, i coinquilini ad Ancona, il gestore della casa che è sempre stato molto disponibile, i pochi compagni di corso con cui ho legato e i tre amici con cui ho affrontato questa avventura, aiutandoci a vicenda quando serviva.

Ringrazio i vari professori dell'università, per averci seguito in questo percorso, alcune lezioni sono state veramente interessanti e coinvolgenti e ringrazio soprattutto il relatore e correlatore, per la loro disponibilità durante il tirocinio e nella stesura della presente tesi.

Ringrazio l'Università Politecnica delle Marche, che al contrario di quello che si diceva, è un'ottima università, di alto livello, piena di persone preparate e disponibili.

Infine, ringrazio me stesso... sono contento del percorso e del risultato, sono riuscito ad arrivare qui con le mie forze e la mia testardaggine, grazie anche ai compromessi che facevo con me stesso, riuscendo a superare i momenti negativi ed ottenendo anche qualche bel risultato. Ora la strada continua chissà verso quali destinazioni, ma sempre pronto a mettermi in gioco senza rimpianti... *Carpe Diem!*