



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA EDILE

**LA TERMOGRAFIA COME STRUMENTO SPERIMENTALE DI ANALISI
PER LA CONSERVAZIONE E IL RECUPERO DEGLI AFFRESCHI**

**THERMOGRAPHY AS AN EXPERIMENTAL ANALYSIS TOOL FOR
THE CONSERVATION AND RECOVERY OF FRESCOES**

Relatore:

Dott. Ing. Francesco Corvaro

Correlatore:

Dott.ssa Ing. Barbara Marchetti

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Gattafoni

Anno Accademico 2019 / 2020

Indice

1	Introduzione.....	pg. 4
	1.1 Obiettivo della tesi.....	5
2	Stato dell'arte.....	8
	2.1 L'affresco.....	10
	2.1.1 Caratteristiche fisico-chimiche.....	11
	2.1.2 Danneggiamenti negli affreschi.....	13
3	Termografia.....	16
	3.1 Cenni sulle principali applicazioni della termografia.....	19
	3.2 Principi fisici.....	20
	3.2.1 La trasmissione del calore per irraggiamento.....	21
	3.2.2 La teoria dell'infrarosso e la legge di Kirchhoff.....	23
	3.3 Misurazione: fonti di errore.....	28
	3.3.1 Valutazione dell'emissività dell'oggetto di misura.....	29
	3.3.2 Il mezzo interposto.....	30
	3.3.3 Limiti di applicabilità della tecnica.....	30
	3.4 Le termocamere.....	31
	3.5 Tecnica di analisi termografica.....	35
4	Attività sperimentale.....	37
	4.1 Costruzione del pannello di prova.....	37
	4.2 Acquisizione dei termogrammi.....	42
	4.2.1 Principio alla base.....	42
	4.2.2 Strumentazione utilizzata.....	43
	4.2.2.1 Termometro a infrarossi.....	43
	4.2.2.2 Termocamera.....	45
	4.2.2.3 Lampada riscaldante.....	48
	4.2.2.4 Software di 'image processing'.....	50
	4.2.3 Posizionamento degli strumenti.....	52
	4.2.4 Procedura di acquisizione dei termogrammi.....	54

4.2.4.1	Campione con superficie grigia.....	54
4.2.4.2	Campione con superficie colorata.....	56
5	Analisi, risultati e discussione.....	60
5.1	Elaborazione dei termogrammi del campione con superficie grigia.....	61
5.1.1	Analisi del campione grigio nel test a breve durata.....	61
5.1.2	Analisi del campione grigio nel test a lunga durata.....	64
5.2	Elaborazione dei termogrammi del campione con superficie colorata.....	67
5.2.1	Analisi del campione colorato nel test a breve durata.....	67
5.2.2	Analisi del campione colorato nel test a lunga durata.....	70
6	Conclusioni.....	74
	Bibliografia.....	77
	Appendice I: Cemento Grigio.....	78
	Appendice II: Biocalce Intonaco.....	79
	Ringraziamenti.....	83

1. Introduzione

Il problema del monitoraggio dello stato di salute dei beni artistici e storici è da alcuni decenni di grande interesse ed investe al contempo vari campi della ricerca scientifica. In particolare, nel corso degli anni '80 si è avuto, come previsto, un grande impegno nel recupero e nella conservazione del costruito. Ciò ha determinato un incremento della richiesta di indagini via via qualitativamente più approfondite. Recentemente si è assistito ad un notevole sviluppo di tecniche in grado di determinare lo stato di conservazione degli affreschi antichi mediante indagini non invasive e non distruttive.

Ogni tipo di intervento per la salvaguardia del Patrimonio storico-culturale deve essere preceduto da un'attenta fase di indagine, perché solo attraverso la conoscenza della sua storia, delle tecniche costruttive e dei materiali che lo compongono, è possibile ottenere un'azione di conservazione realmente efficace. Infatti, le modifiche avvenute in relazione alle varie fasi costruttive o ai successivi interventi di consolidamento, richiedono spesso valutazioni di dettaglio, in grado di tener conto anche del modo in cui è cambiata la risposta strutturale del manufatto nel tempo, ed individuare, così, eventuali situazioni critiche connesse alle sue trasformazioni.

Pur essendo auspicabile però un livello di conoscenza elevato nella valutazione di un'opera d'arte esistente, non sempre è possibile ricorrere a tutte le tipologie d'indagine disponibili, dovendo, in questo caso, necessariamente prescindere da quelle a carattere distruttivo, inapplicabili proprio a causa della loro invasività. In tale ottica, gli sviluppi riguardanti tecniche d'indagine indirette permettono di poter fare affidamento su metodologie non distruttive, ossia l'insieme di prove e controlli eseguibili in situ, in grado di cogliere quei parametri che consentono l'individuazione della consistenza materica, dei dettagli costruttivi e dei parametri meccanici degli elementi strutturali che compongono l'edificio.

Se prima le metodologie analitiche e le tecniche allora note in grado di individuare le caratteristiche chimico-fisiche delle opere d'arte facevano per lo più riferimento all'esperienza del restauratore, il quale, dopo un'ispezione manuale e visiva, era generalmente in grado di fornire un giudizio basato esclusivamente sulla sua espe-

rienza, ora è ormai consuetudine l'impiego di metodologie invasive e non, per la definizione e la mappatura di difetti sub-superficiali su pareti intonacate, che, anche se in contrapposizione, sono complementari e sono effettuati per uno screening preliminare dell'opera.

Tra le tecniche di monitoraggio non-distruttive si trovano sistemi di misura della radiazione termica tramite termografia infrarossa, sistemi basati su raggi X, ultrasuoni, interferometria o prospezione radar, ed infine sistemi basati sulla misura delle vibrazioni, come per esempio i sistemi LDV o SLDV (Scanning Laser Doppler Vibrometry). Molte di queste tecniche permettono di 'penetrare' gli strati più esterni e pervenire a quelli più interni evidenziandone stato e struttura; inoltre permettono lo studio di eventuali discontinuità e decoesioni tra superficie pittorica e supporto murale.

In particolare, i requisiti di queste nuove tecniche sono:

- assoluta non intrusività,
- misure remote,
- banda di risposta estesa,
- alta sensibilità,
- registrazione digitale dei dati,
- portabilità,

che sono l'oggetto di questa tesi.

1.1 Obiettivo della tesi

L'analisi effettuata in questa tesi si basa sulla verifica dell'approccio critico-tecnico-strutturale riguardante l'efficacia e la metodologia di impiego di queste moderne tecniche di indagine. Nello specifico, lo scopo di tale tesi è mettere a punto una tecnica non invasiva di diagnostica dello stato di salute di intonaci ed affreschi che rilevi la presenza di eventuali delaminazioni: la *termografia*.

Le indagini termografiche per la determinazione di problematiche sub-superficiali in materiali di interesse storico-artistico, attraverso il rilievo delle loro disomogeneità termiche, sono da anni ampiamente impiegate per la semplicità di utilizzo (trasportabilità, telemetria, immediatezza della risposta, etc.), seppur la successiva interpretazione del dato coinvolga spesso fenomeni fisici di difficile valutazione e quantificazione complessiva. La metodologia, consolidata da almeno un paio di decenni in ambito archeologico-architettonico per la localizzazione e il dimensionamento di difetti, la caratterizzazione di materiali e la determinazione di flussi evaporativi, è stata applicata anche a superfici policrome con risultati talvolta modesti, talaltra più rilevanti, in dipendenza della specifica tipologia degli oggetti esaminati. L'impiego di termocamere e di tecniche di elaborazione dell'immagine è in grado di evidenziare le anomalie termiche causate, ad esempio, dalla presenza di difetti vuoti o di danneggiamenti che si originano su una superficie muraria o su un pavimento. L'indagine termografica è anche in grado di rilevare la presenza di umidità, la presenza di elementi architettonici nascosti, distacchi di intonaci e di caratterizzare i vari materiali componenti una facciata o un edificio.

Questo studio pone l'attenzione sulla ricerca di una convalida sperimentale di questa tecnica, mediante la realizzazione di un pannello di prova in grado di 'imitare' la struttura a strati dell'affresco. Questo pannello è costituito da una mattonella di cemento, sopra la quale è stato disposto uno strato di intonaco ed in una seconda fase, la superficie del campione è stata colorata. Tra intonaco e cemento sono stati inseriti dischi di materiali diversi, aventi geometria e ubicazione note, al fine di simulare il vuoto che si viene a creare in seguito alla delaminazione. Il pannello è stato sottoposto a prove di tipo non invasivo (test termografico ad infrarossi). Le prove sono state effettuate sia puntando il laser al centro di ogni disco sia in punti sufficientemente lontani, dove si è supposto non sia presente il difetto.

In seguito, la presente analisi si concentra sui possibili problemi di lettura della temperatura su una superficie colorata. Tali superfici sono inoltre discontinue, sia per rugosità (dovuta ad esempio allo stato di conservazione e ai materiali con cui l'opera è stata realizzata) che nel colore.

Date le premesse, obiettivi della tesi sono principalmente individuare dei parametri che esprimano come l'emissività si relaziona con i colori presenti sulla superficie osservata, e individuare altri parametri che permettano di rilevare la relazione tra questi colori e la presenza di difetti dietro lo strato visibile. È pertanto necessario conoscere come evolve la temperatura in funzione del tempo di illuminazione e di raffreddamento, tenendo conto del fatto che i raggi emessi dalla lampada non arrivano tutti perpendicolari alla superficie.

In conclusione, questo sistema vuole indagare la propagazione termica sui componenti per determinare eventuali difetti tramite *image processing* e vuole essere un sistema autonomo che si possa ben inserire in catene di produzione completamente automatizzate. Con il lavoro svolto in questa tesi si sviluppano i primi algoritmi di analisi delle immagini (algoritmi di *image processing* realizzati con il software Mat-Lab) per il monitoraggio dello stato di salute di affreschi antichi mediante strumenti che non ne richiedono l'accesso diretto e il riconoscimento e la classificazione automatica dei difetti.

2.Stato dell'arte

Sotto il profilo diagnostico e conoscitivo, le pitture murali offrono un vasto orizzonte di problematiche da valutare e risolvere ai fini di una corretta conservazione dell'opera d'arte e di una approfondita conoscenza dei materiali e delle tecniche esecutive. Queste ricerche sono ancor di più di difficile interpretazione a causa delle peculiarità che ogni singola opera porta con sé sia per caratteristiche morfologiche e logistiche, che anche per diversità di genesi e di itinerario storico-evolutivo.

Per un'analisi sullo stato di conservazione di un'opera d'arte, la prima operazione da eseguire consiste in una lettura d'insieme dell'opera e dell'ambiente in cui è inserita. Questa visione serve a dare una valutazione sulla collocazione del dipinto nell'ambiente architettonico in cui è inserito, sulla qualità e lo stato di conservazione del muro, in modo da definire se sono stati presenti fattori, quali infiltrazioni di umidità, fratture della muratura o escursioni termiche rilevanti, che potrebbero essere stati causa ulteriore dei problemi di degrado sul dipinto.

La termovisione, quale mezzo di diagnosi non distruttiva, presenta un vasto campo di applicazioni nella diagnostica dell'architettura, dal rilevamento dell'umidità alla scoperta di elementi architettonici nascosti, dall'individuazione di distacchi negli intonaci come discontinuità della distribuzione delle temperature superficiali al rilevamento delle fratture delle finiture con distinzione tra lesioni passanti e non passanti, fino all'individuazione strutturale dell'edificio. Le discontinuità termiche causate dalla presenza di difetti o danneggiamenti che si originano su una superficie muraria in seguito al riscaldamento omogeneo della porzione muraria da analizzare, sono chiaramente evidenziabili graficamente mediante l'impiego di termocamere ad alta risoluzione e tecniche di elaborazione dell'immagine via software.

Le esperienze con termografia fino ad oggi realizzate rappresentano ancora il principio della sperimentazione di tale tecnica. La termografia ha moltissime applicazioni: dal fotovoltaico all'aeronautica e al settore automobilistico, fino all'edile e al campo medico.

Riguardo lo studio dei beni architettonici, particolare interesse è stato rivolto alle forme di degrado legate alla presenza d'acqua nei materiali edili, specificamente nei dipinti murari, dovuta principalmente all'umidità e al conseguente deposito di sali negli strati più esterni della muratura. La misura consiste nell'esprimere quantitativamente il flusso evaporativo in funzione del raffreddamento relativo misurato, e tale analisi consente di ottenere risultati confrontabili con quelli che derivano da metodi di misura distruttivi.

L'approccio solitamente utilizzato su elementi di dimensione limitata prevede l'utilizzo di apposite lampade o emettitori di aria calda per ottenere l'effetto di riscaldamento previsto.

Il metodo attivo della termografia pulsata, descritto nel seguito, è in grado di individuare informazioni riguardo le dimensioni, la profondità e la resistenza termica dei difetti. La visibilità dei difetti può però essere ridotta da variazioni locali di emissività termica e da un riscaldamento non uniforme.

C'è da ricordare che queste metodiche risultano applicabili principalmente in laboratori appositamente attrezzati, mentre per indagini su superfici estese disposte all'esterno degli edifici in cui la superficie da monitorare è notevole e possibilmente rivestita con opere di pregio come mosaici, la tecnica termografica attiva non può essere implementata facendo ricorso ad una lampada. In questo caso è stata valutata la possibilità di sfruttare l'energia solare, monitorando la risposta termica al termine di un periodo di insolazione prima del passaggio in ombra dell'elemento stesso.

Si è già accennato che un'errata valutazione dell'emissività di un corpo può influenzare negativamente la lettura di un risultato. La termocamera infatti non rileva una temperatura ma la calcola elaborando la radiazione termica ricevuta dal sensore, compensata con opportuni parametri inseriti dall'operatore. Uno tra i parametri più importanti è l'*emissività*. Nel calcolo dell'emissività spesso si fa riferimento a tabelle, che però non tengono conto del materiale osservato. Lo stato di ossidazione, di pulizia, la rugosità o altre caratteristiche legate al tipo di finitura possono incidere notevolmente sul valore di ϵ .

L'inserimento nella termocamera di valori errati, non solo determina errate misure di temperatura assolute, ma errori anche nella misura delle differenze di temperatura rilevate.

In generale, i materiali utilizzati in edilizia hanno emissività piuttosto alta, solitamente tra 0,80 e 0,96, ma il valore effettivo di ϵ varia soprattutto in base a:

- il colore della superficie, infatti colori scuri hanno, a parità di materiale, valori decisamente maggiori rispetto a colori chiari;
- la geometria del corpo, infatti gli oggetti concavi e le parti forate hanno un'emissività molto più alta del resto della superficie;
- l'angolo di ripresa della fotografia: il massimo valore di emissività si ha quando la superficie è perpendicolare alla termocamera.

2.1 L'affresco

L'affresco è un'antica tecnica di pittura murale che si realizza dipingendo con pigmenti stemperati in acqua su intonaco fresco: dopo che l'intonaco si è consolidato, il pigmento vi rimane completamente incorporato, acquistando così particolare resistenza all'acqua e al tempo. Il colore si cristallizza nello strato di intonaco grazie al processo chimico di carbonatazione, che avviene entro 3 ore dalla stesura dell'intonaco. La caratteristica principale dell'affresco è infatti la resistenza della superficie pittorica, che non richiede alcuna vernice protettiva. La sua applicazione ha conosciuto poche varianti nei secoli ed è rimasta nella sostanza inalterata fino ad oggi. La pittura ad affresco è una tecnica che nasce in tempi remoti e assai prima del buon fresco del Rinascimento italiano. Essa prevede l'impiego di pigmenti a base di terre colorate o di ossidi metallici di tinta, stabile all'effetto decolorante della calce. Le tinte sono semplicemente stemperate in acqua, oppure in acqua di calce o grassello diluito, e levigate contro lastre di marmo per eliminare tutte le parti aggregate o grossolane.

2.1.1 Caratteristiche fisico – chimiche

La struttura è circa la medesima sempre, anche se sono possibili piccole variazioni che dipendono dall'artista. Funge da base una parete ruvida priva di dislivelli e di umidità, cosicché lo strato di intonaco su cui si stendono i colori vi possa aderire agevolmente. In totale si hanno generalmente 3 strati di intonaco di spessori e caratteristiche differenti. Il primo strato, definito *rinzaffo*, è formato da 3 parti di sabbia grossa e da una di calce spenta e ha uno spessore di circa 15 mm. Il secondo strato, l'*arriccio* (una parte di calce e due di sabbia con uno spessore di circa 5/6 millimetri), viene steso sopra il rinzaffo prima che questo si sia indurito, con lo scopo di preparare una superficie uniforme; il terzo strato infine, il *tonachino* (co-stituito in parti uguali da calce e sabbia), viene applicato per uno spessore di circa

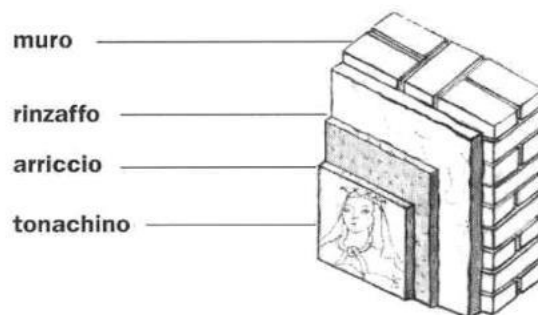
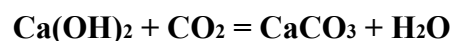


Figura 2.1: La stratificazione di un affresco

3 millimetri sopra l'arriccio, e deve essere dipinto quando è ancora bagnato, così che il colore possa integrarsi nella struttura cristallina su cui è applicato. Si forma, per carbonatazione della malta di calce, una pellicola protettiva trasparente che ingloba i pigmenti e li fissa.

La calce preparata secondo il metodo tradizionale consiste in frammenti di pietra (carbonato di calcio), cotti in forno a carbone (calce viva). Mescolata ad acqua e lasciata riposare per almeno sei mesi, la calce viva si trasforma in calce spenta, idrossido di calcio. Stesa sull'arriccio e ricoperta dallo strato di colore, la calce spenta, grazie all'azione dell'anidride carbonica presente nell'aria, torna a trasformarsi in carbonato di calcio e dunque in un composto minerale stabile e resistente, una vera e propria pietra. La calce spenta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) si combina con l'anidride carbonica dell'aria (CO_2) e riforma il carbonato di calcio (CaCO_3) secondo la reazione chimica, detta "processo di carbonatazione":



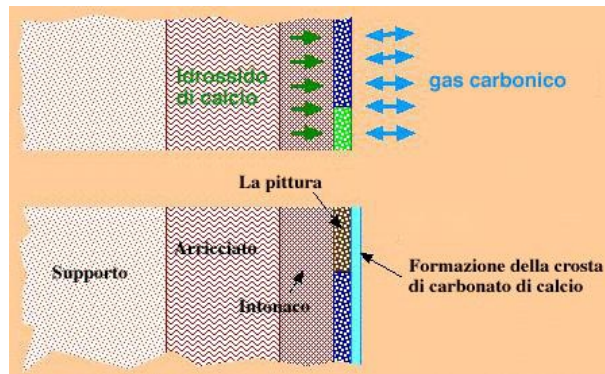


Figura 2.2: Formazione del carbonato di calcio

Occorre notare che sulla superficie, essendo facilitato il contatto con l'atmosfera esterna, si ha una maggiore interazione fra l'idrato di calcio e l'anidride carbonica ed una più facile e veloce evaporazione dell'acqua rispetto alla massa interna dell'intonaco; i cristalli di CaCO_3 formatisi in superficie vanno inoltre a costituire una barriera che impedisce ulteriormente la penetrazione in profondità dell'anidride carbonica e l'evaporazione dell'acqua contenuta all'interno.

In questo caso il legante è costituito da una sostanza minerale soggetta all'azione del tempo in maniera del tutto simile a quella dei pigmenti, anch'essi minerali. Inol-tre, la tecnica ad affresco non permette all'artista di vedere immediatamente il reale tono dei colori stesi. Asciugando l'intonaco infatti si altera progressivamente anche la cromia, alla quale vien meno la forza e la vivacità del colore bagnato. Il disegno viene generalmente riportato attraverso un cartone o per mezzo di una quadrettatura del bozzetto. Il cartone precedentemente disegnato viene appoggiato sul tonachino fresco e con una punta si ricalca il contorno delle forme, in modo che sullo strato di intonaco umido resti impresso un leggero solco. Per riportare il disegno sull'intonaco è altrimenti possibile utilizzare la tecnica dello spolvero, che prevede la foratura, attraverso strumenti metallici, del foglio su cui è stato disegnato il soggetto. Appoggiando questo foglio forato sul tonachino e passando una polvere di carbon-cino in corrispondenza dei fori, si ottiene la traccia della composizione. I pigmenti utilizzati sono di natura minerale, per poter resistere all'alcalinità della calce. La parte di intonaco che non può essere dipinta nella stessa giornata in cui è stata applicata alla parete va asportata e rifatta il giorno seguente. È possibile, a un esame attento di una parete affrescata, distinguere le linee di confine tra diverse giornate di lavoro. Occorre inoltre evidenziare che la tecnica dell'affresco impone tempi di esecuzione assai

stretti, poiché il colore va steso rapidamente finché lo strato di intonaco è umido. Se l'operazione è ben condotta, l'effetto finale è quello di una smaltatura della superficie intonacata che lascia inalterata e viva la brillantezza dei colori.

2.1.2 Danneggiamenti negli affreschi

È noto che i processi di alterazione dei beni artistici e monumentali interessano in maniera particolare le superfici a contatto con l'atmosfera. Nei dipinti murali, oltre a tutti i fenomeni di superficie tipici di un manufatto esposto all'ambiente, si aggiungono quelli legati all'eterogeneità degli strati costitutivi e alle interazioni esistenti tra strato pittorico, intonaco e strutture murarie.

Gli affreschi, in quanto dipinti murali, risentono di particolari fattori ambientali e inquinanti. Infatti la durabilità dell'opera è determinata, oltre che dalle caratteristiche dei materiali che la costituiscono, anche dalle caratteristiche dell'ambiente in cui è esposta. Ad esempio, le variazioni termoisometriche sulle superfici dipinte causano stress meccanici, trasporti dei materiali fra i vari strati, condensazione di umidità e di aggressivi atmosferici, deposizione di sporco. Inoltre, possono influenzare le reazioni di attacco chimico, la plasticità del polimero legante, lo sviluppo di colonie di microrganismi. Stress meccanici, come ritiri e delaminazioni, a loro volta, causano distacchi, crepe e in generale una perdita di adesione sugli strati pittorici, oppure irruvidimento superficiale con perdita di brillantezza, di chiarezza, di intensità dei colori.

Complessivamente le cause di deterioramento correlate all'esecuzione della pittura possono essere:

o difetti di tecnica:

- non sufficiente scabrosità della superficie muraria e/o dell'arriccio,
- non sufficiente spolveratura del supporto murario o dell'arriccio,
- non adeguata bagnatura dei due supporti,
- scarsa azione pressante sulla malta al momento della messa in opera,
- edificazione di 'giornate' troppo grandi e pertanto completate solo dopo il periodo ideale per la stesura del colore,

- errata dosatura di legante e carica negli intonaci,
- campitura dei colori secondo la pittura a calce, a tempera ed a olio;
- o difetti nei materiali:
 - grassello non bene 'spento': presenza di calce 'viva' nell'intonaco,
 - incompatibilità dei materiali costituenti il muro,
 - incompatibilità dei materiali costituenti l'intonaco,
 - impurità nella calce o nella sabbia;
- o difetti di edificazione:
 - costruzione della parete affrescata su terreni inquinati.

Dall'altra parte troviamo le alterazioni dovute a fenomeni naturali. Gli attacchi chimici sono dovuti all'ossigeno atmosferico, agli inquinanti atmosferici quali anidride solforosa, ossidi di azoto, ozono, ecc., all'anidride carbonica dovuta ad eccessive presenze di pubblico. Gli attacchi biologici derivano da microorganismi (muffe, batteri) trasportati dalle correnti d'aria o dai visitatori; attaccano le componenti organiche del dipinto, come le fibre vegetali o i leganti, e, in favorevoli condizioni termoisometriche e di luce, possono comportare danni estesi ed irrimediabili sia sotto l'aspetto estetico che addirittura sotto l'aspetto funzionale.

I principali fattori ambientali che incidono sullo stato di conservazione sono l'umidità, i sali solubili, le escursioni termiche, le vibrazioni e gli agenti biologici. I principali inquinanti sono H₂O, gas acidi, CO₂, materiale particolato ed idrocarburi pesanti. I danni che entrambi i fattori possono provocare sugli affreschi possono essere superficiali (erosione, colorimento o sporcamento) o interni. Anche le radiazioni elettromagnetiche, e quindi la luce sia naturale che artificiale che giunge sulla parete affrescata, contribuisce ai fenomeni alterativi.

Oggetto di questo studio sono solo i danni interni per l'affresco, tra i quali i più rilevanti sono la delaminazione e/o il distacco degli strati di cui è composto. Tipicamente, vi è un difetto localizzato iniziale che causa il non perfetto contatto tra gli strati. Progressivamente, a causa dell'aria e dell'umidità che sono intrappolati nelle cavità create dalla mancanza di aderenza, la regione delaminata si propaga, fino alla separazione macroscopica tra strati successivi ed alla conseguente

ingobbatura della superficie dipinta, con distacco dei pigmenti e degenerazione della forma dell'opera.

L'affresco può subire danni enormi, fino alla vera e propria separazione fisica di uno strato rispetto all'altro o di alcune parti di esso. Anche se non avviene il distacco, la delaminazione produce in ogni caso delle cavità che possono danneggiare l'estetica dell'affresco e la perdita totale di un'opera d'arte.

Per molte opere d'arte, la giusta conservazione è ottenuta dal controllo delle condizioni ambientali. Ciò è possibile per esempio per le opere d'arte contenute nei musei, ma non per gli affreschi. Questi non possono essere rimossi dal muro su cui sono stati dipinti e spesso non è possibile controllarne le condizioni ambientali. Una considerazione importante è che gli affreschi generalmente si trovano in posti di difficile accesso, come muri o cupole, generalmente di grandi dimensioni. Inoltre, poiché i luoghi in cui si trovano hanno rilevanza religiosa e culturale e presentano alti flussi di visitatori, la tecnica di monitoraggio deve non ostacolare il normale uso dell'edificio.

Diventa quindi di fondamentale importanza ridurre il più possibile l'intrusività del sistema di misura sull'affresco, evitando, se possibile, di installare dei sensori sulla superficie.

Ogni materiale, anzi ogni "sistema" di materiali diversi, risponde in maniera specifica alle sollecitazioni dell'ambiente, in funzione della natura chimica, della struttura, della storia subita. Il lavoro di conservazione dovrà tendere pertanto a porre e mantenere nel tempo l'affresco stesso in una situazione di equilibrio relativamente stabile rispetto all'ambiente in cui esso è inserito. E in questo contesto va valutato il significato di "restauro" come "attività comunque svolta per prolungare la vita dell'opera d'arte e parzialmente reintegrante la visione ed il godimento". Una diagnosi effettuata per tempo, quindi, permetterà di effettuare quegli interventi di restauro necessari ad evitare o perlomeno limitare i danni.

3. Termografia

La tecnica di diagnosi delle pitture murali presa in riferimento in questa tesi è quella della termografia.

I controlli termici comprendono tutte le metodologie in cui vengono utilizzati dispositivi per il rilevamento di calore al fine di misurare la variazione di temperatura in componenti, strutture, sistemi o processi fisici. La termografia è una di queste: una tecnica di *telerilevamento*, effettuata tramite l'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso. Più precisamente questa tecnica permette di misurare l'energia nell'infrarosso emessa da corpi a temperatura diversa dallo zero assoluto mediante opportuni sensori, e di correlarla alla temperatura superficiale del corpo stesso.

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

Le indagini termografiche offrono, già da tempo, molteplici applicazioni nel campo della ricerca sui dipinti murali, anche se non esiste una loro consolidata prassi metodologica d'impiego. L'esame del comportamento termico delle superfici dipinte, mediante l'utilizzo della termovisione in emissione, consente di ottenere una considerevole quantità di elementi conoscitivi, non altrimenti rilevabili a occhio nudo, e importanti dati correlabili allo studio dei supporti, alle verifiche tensionali delle strutture, nonché all'ambiente ed ai relativi parametri termoigrometrici.

Ogni materiale emette con continuità energia, sotto forma di *radiazioni elettromagnetiche*, in maniera proporzionale alla sua temperatura superficiale, che è funzione della conducibilità termica e del calore specifico. I valori di questi parametri, diversi per ciascun materiale, portano i componenti di una muratura ad assumere temperature differenti, distinguibili dalla termoripresa.

Attraverso l'utilizzo di una *termocamera*, strumento per eseguire controlli di tipo termografico, è perciò possibile risalire alla mappa termica della 'scena' inquadrata mediante l'interpretazione della radiazione percepita dall'elemento sensibile della termocamera stessa, il detector.

La termografia si è rivelata una tecnica sempre più efficiente e quindi utilizzata perché:

- permette di analizzare la temperatura di qualsiasi corpo senza entrarvi in contatto, cioè in modo non invasivo, permettendo la ripetizione delle misure nel tempo;
- può valutare differenze di temperatura dell'ordine dei centesimi di grado;
- permette il rilevamento dei dati in un campo di misura molto esteso;
- aumenta le probabilità di individuare in modo preciso il guasto o gli elementi difettosi, anche qualora non fossero ancora critici;
- non richiede il fermo degli impianti, anzi va fatta con impianti a regime e possibilmente in condizioni di massima sollecitazione;
- consente interventi mirati e preventivi, quindi riduzione dei costi di manutenzione;
- può ridurre il pericolo di eventi catastrofici come incendi o blocchi produttivi improvvisi.

La visualizzazione della distribuzione termica superficiale fornisce un essenziale contributo conoscitivo di quei fenomeni di degrado delle pitture murali, che si possono associare o imputare a fattori microclimatici. Inoltre, l'indagine termografica può fornire precise informazioni sul grado di adesione dell'intonaco dipinto alla struttura muraria. Le sacche d'aria presenti nelle cavità che si formano in corrispondenza di intonaci allentati o distaccati, rilevano infatti un'inerzia termica notevolmente diversa dalle circostanti zone in adesione. Sulla superficie dell'intonaco ciò si traduce in una discontinuità termica chiaramente evidenziabile per mezzo della ripresa termografica.

Per ottimizzare la lettura delle immagini termografiche è altresì importante porre in relazione queste ultime ad immagini reali, in modo da associare la visualizzazione del fenomeno termico alla corrispondente area indagata. La

mappa della temperatura superficiale può essere visualizzata già sullo schermo dello strumento come un'immagine a falsi colori o a livelli di grigi in cui si riconoscono le proporzioni, la forma e le dimensioni dell'oggetto indagato.

La temperatura superficiale di un oggetto è legata ai processi di propagazione del calore che si attivano al suo interno. Il variare di tali condizioni – sia per motivi artificiali che naturali – determina pertanto nella struttura muraria fenomeni di “transitorio termico” (cioè in presenza di sorgenti artificiali o naturali, come flussi convettivi o di aria calda o l'irraggiamento solare), facilmente individuabili attraverso l'analisi termografica all'infrarosso della superficie: i materiali caratterizzati da una elevata conducibilità termica, nonché da un calore specifico molto basso, tendono rapidamente a raggiungere temperature maggiori di altri materiali, e allo stesso modo, una volta terminato il ciclo di riscaldamento, tendono a raffreddarsi altrettanto rapidamente. Infatti le discontinuità si manifestano generalmente con un'area più calda: se la ripresa avviene nella fase di riscaldamento e primo raffreddamento, il colore rimane all'interno della porzione di superficie che rimane separata dal substrato da uno strato d'aria, anziché trasmettersi al resto della struttura.

La possibilità di percepire differenze cromatiche connesse alle caratteristiche fisiche dei vari materiali, non distinguibili nello spettro del visibile a causa, ad esempio, della presenza di uno strato di intonaco, rende la termografia molto efficace per la definizione della tessitura, della morfologia interna e delle caratteristiche geometriche delle strutture verticali e degli orizzontamenti, per la ricerca della disomogeneità, difettosità, vuoti o cavità interne, per la valutazione delle condizioni e dello stato di conservazione del manufatto in generale.

Un altro aspetto fondamentale da considerare nell'analisi conoscitiva dell'opera riguarda le lesioni dell'apparecchio murario: il quadro fessurativo ed il controllo della sua evoluzione, sono infatti il primo passo per valutare l'effettivo stato di conservazione del manufatto e per diagnosticare cause ed effetti futuri. Anche se le lesioni si mostrano in superficie, non sempre è possibile accertarne la profondità. In regime transitorio, la termografia permette di poter rilevare le fratture delle finiture, e di poter distinguere tra lesioni passanti e non. Nel caso di riscaldamento diretto della superficie indagata, l'aumento della temperatura è più

veloce sui bordi delle fessure più superficiali, e ciò permette di distinguerle meglio all'infrarosso termico che nel visibile. Spesso i bordi delle fessure presentano anche distacco della finitura e, poi-ché le aree distaccate appaiono più calde in fase di riscaldamento, tale condizione migliora la leggibilità del degrado nei termogrammi in prossimità della lesione in-dagata.

Considerando che la radiazione misurata è condizionata dall'ambiente esterno, prima di iniziare le riprese, occorre impostare adeguatamente lo strumento per non incorrere in errori di valutazione della temperatura (è necessario settare in maniera accurata la temperatura ambientale, la temperatura riflessa, l'emissività del materiale dell'oggetto di indagine e la distanza dell'oggetto). Un altro parametro che incide sulla misura è l'angolo di ripresa, detto anche "angolo di incidenza": all'aumentare dell'angolo di incidenza, aumenta la riflettanza della superficie e diminuisce l'emissività. Ciò comporta valori di temperatura errati se ottenuti con angoli di ripresa superiori al 60°.

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

3.1 Cenni sulle principali applicazioni della termografia

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

In generale, l'utilizzo della termografia è sempre più diffuso in numerosi settori, dall'agricoltura alla geologia, alla meteorologia e alla medicina. Infatti la tecnica

termografica si è dimostrata assai utile e flessibile soprattutto nella diagnostica; essa può essere applicata con successo nei seguenti rilievi:

- rilievi sulla morfologia: forme preesistenti, forme dimensionali e geometrie delle strutture, modifiche strutturali ed anomalie;
- rilievi sul degrado: stato fessurativo, rilievo di umidità, dispersioni termiche, individuazione di attività termoigrometriche e loro controllo in fase dinamica;
- rilievi di impianti: elettrici, di riscaldamento, idrici, fognari, canne fumarie;
- controlli in fase di intervento: visualizzazione continua dei percorsi preferenziali del materiale iniettato ed immediata segnalazione del formarsi di sacche e distacchi.

In particolare, nel settore dell'edilizia si è avuto un notevole interesse per questa forma di *indagine diagnostica* in quanto permette di ottenere informazioni riguardo lo stato della struttura rilevando l'orientamento dei solai, la tessitura muraria al di sotto degli intonaci, l'umidità nelle murature, le infiltrazioni nei manti di copertura e tutte le anomalie termiche. Risulta inoltre di fondamentale importanza sia per lo studio storico del manufatto architettonico in quanto tale, attraverso l'identificazione e la documentazione grafica di elementi strutturali non riscontrabili per mezzo dell'esame a vista, sia come strumento di indagine diagnostica e di monitoraggio non distruttivo delle cause e degli effetti del degrado delle parti più superficiali delle murature con particolare riferimento allo stato di conservazione di intonaci, affreschi e mosaici (argomento analizzato in questa tesi).

Gli aspetti di diagnostica connessi riguardano essenzialmente la rivelazione di distacchi nei paramenti murari (intonaci, affreschi, mosaici e lastre) e la presenza di umidità superficiale.

3.2 Principi fisici

La *tecnica termografica*, non distruttiva né invasiva, fornisce, di un oggetto fermo o in movimento, un'immagine termica, senza richiedere alcun contatto fisico e senza influenzare in alcun modo la temperatura di superficie della sorgente irradiante.

Per quanto riguarda le modalità di eccitazione si può avere eccitazione per temperatura, nel qual caso le caratteristiche di irraggiamento dipendono esclusivamente dalla natura del corpo e dalla sua temperatura, ed eccitazione per luminescenza, in cui assumono particolare importanza la forma di energia eccitatrice e le modalità con cui viene comunicata all'emettitore. Riguardo a quest'ultima modalità è utile fare riferimento allo spettro di onde elettromagnetiche.

3.2.1 La trasmissione del calore per irraggiamento

La termografia individua la temperatura superficiale dei corpi in esame sfruttando il principio fisico secondo cui qualunque corpo con una temperatura maggiore dello zero assoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emette energia sotto forma di *radiazione infrarossa* - cioè onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda comprese tra 750 e 1400 nanometri. La teoria termografica e quindi il funzionamento della termocamera si basa sui principi fisici della trasmissione del calore per irraggiamento, che si articola nelle leggi di Planck, Wien e Stefan-Boltzmann.

Il fenomeno dell'*irraggiamento* avviene indipendentemente dalla presenza di un mezzo ed indica la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie di un corpo che si trova ad una certa temperatura. L'irraggiamento ha luogo generalmente contemporaneamente alle altre due forme di trasmissione - conduzione e convezione - ma a differenza di esse non subisce attenuazione, avviene anche nel vuoto, ed è il fenomeno più veloce, poiché si verifica alla velocità della luce. La trasmissione di calore per irraggiamento tra due corpi inoltre può avvenire anche in presenza di un mezzo di separazione più freddo di entrambi i corpi (a differenza di conduzione e convezione).

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

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

$$\lambda = c / \nu$$

dove λ è la lunghezza d'onda, c la velocità della luce nel mezzo di trasmissione (ovvero il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e l'indice di rifrazione del mezzo), e ν la frequenza.

La frequenza e la lunghezza d'onda sono perciò inversamente proporzionali, e la prima, al contrario della seconda e della velocità di propagazione, dipende solo dalla sorgente, indipendentemente dal mezzo in cui si propaga l'onda.

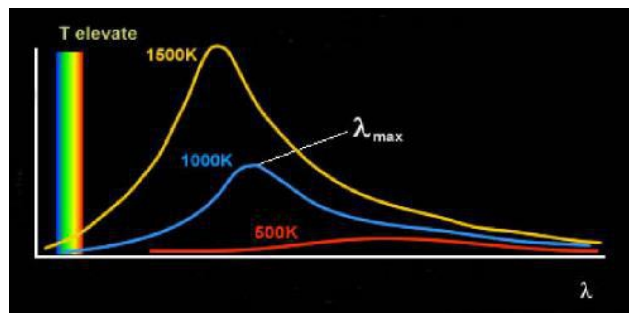


Figura 4.1: Legge di Planck

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

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

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

Le onde elettromagnetiche, pur avendo tutte la stessa natura, differiscono nel loro comportamento proprio al variare della lunghezza d'onda. Le radiazioni elettromagnetiche coprono un campo esteso di lunghezze d'onda, variabile da meno di 10-10 μm per i raggi cosmici fino a più di 1010 μm per le onde elettriche di potenza.

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

Poiché la temperatura è una misura dell'intensità di questi processi a livello micro-scopico, all'aumentare della temperatura aumenta l'emissione di radiazione termica, che è continuamente emessa da tutta la materia che si trovi a temperatura superiore allo zero assoluto (0° Kelvin, corrispondenti a -273.15° Celsius): tutti gli oggetti e le persone emettono (e assorbono) continuamente radiazione.

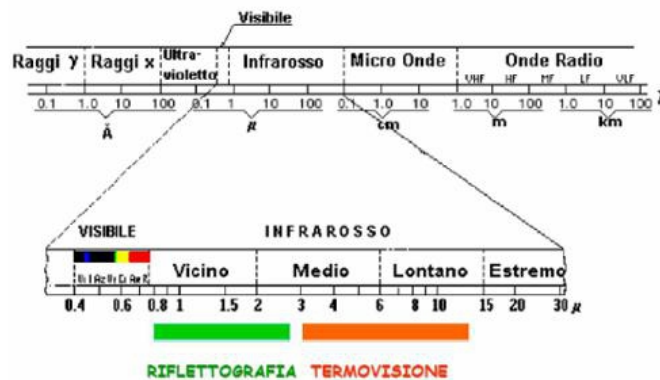


Figura 4.2: Spettro della radiazione elettromagnetica

Nello spettro elettromagnetico la radiazione termica è la parte che va da circa 0.1 a 100 μm , poiché la radiazione emessa dai corpi a causa della loro temperatura cade quasi interamente in questo campo di lunghezze d'onda.

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

3.2.2 La teoria dell'infrarosso e la legge di Kirchhoff

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

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

- vicino IR (lunghezze d'onda comprese tra 0.78 e 1.5 μm),
- medio IR (lunghezze d'onda comprese tra 1.5 e 20 μm),
- lontano IR (lunghezze d'onda comprese tra 20 e 1000 μm).

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

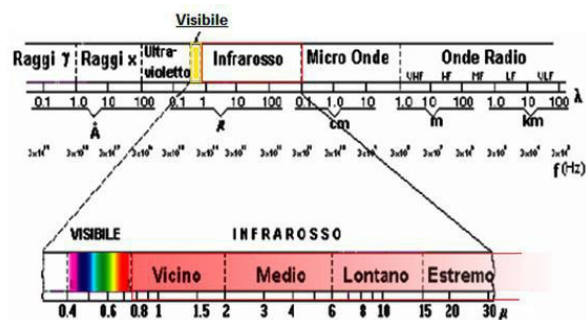


Figura 4.3: Spettro infrarosso

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

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

- $\rho = E_r / E$: coefficiente di riflessione o riflettanza;
- $\tau = E_t / E$: coefficiente di trasmissione o trasmittanza;
- $\alpha = E_a / E$: coefficiente di assorbimento o emittanza.

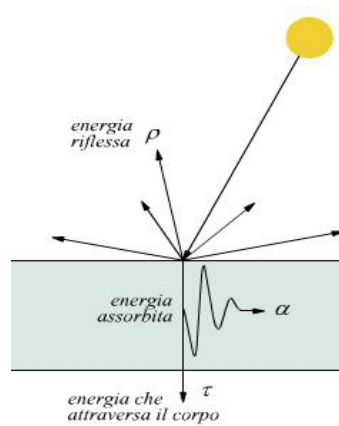


Figura 4.4: Schema trasmissione del calore

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

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

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

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

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

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

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

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

Come detto però, il corpo nero è solamente un'astrazione teorica, occorre perciò definire il concetto di emissività per corpi non neri (oggetti reali): l'*emissività* di una superficie è definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura; viene indicata con $0 < \varepsilon < 1$ ed è una misura di quanto una superficie reale approssima un corpo nero. In generale l'emissività di un corpo dipende da fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, la lunghezza d'onda e la finitura superficiale del corpo osservato.

Con 'finitura superficiale' s'intende la rugosità superficiale del corpo e l'eventuale presenza di inclusioni estranee o zone chimicamente o fisicamente alterate. Una rugosità elevata aumenta l'emittanza e la rende meno sensibile a variazioni di an-golo di emissione. Da ciò consegue che non è sempre possibile stabilire univocamente l'emittanza di un corpo: nel caso ci siano forti variazioni risulta più corretto parlare di emissività in un dato punto, in una certa direzione, temperatura e lunghezza d'onda. Infatti l'emissività risulta proporzionale alla quantità di energia emessa da un corpo per unità di tempo (W/s).

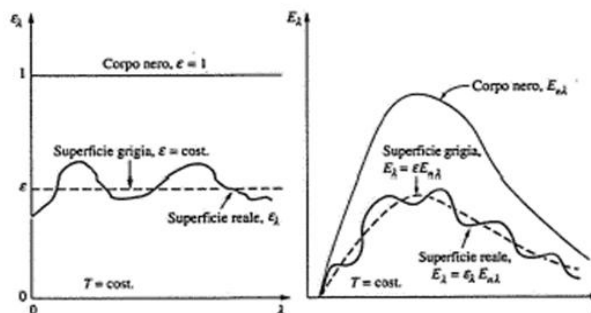


Figura 4.5: Confronto emissività e potere emissivo di una superficie reale, superficie grigia e corpo nero alla stessa temperatura

È inoltre importante ricordare che esiste una correlazione tra la temperatura del corpo e la radiazione infrarossa consistente nel fatto che essendo il calore energia cinetica che è trasferita alle particelle del corpo colpito dalla radiazione, la temperatura può essere definita come il livello di agitazione di queste particelle: più alto è il loro contenuto energetico, maggiore sarà l'agitazione e più alto sarà il livello di temperatura a cui il corpo si trova. Questo significa che più alta è la temperatura, più elevata sarà l'intensità della radiazione infrarossa emessa.

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

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

dove:

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

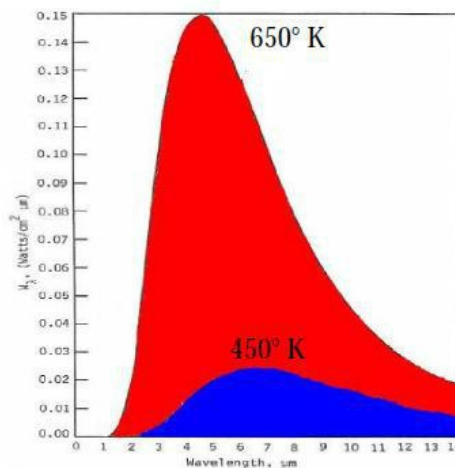


Figura 4.6: Legge di Stefan - Boltzmann

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

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

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

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

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

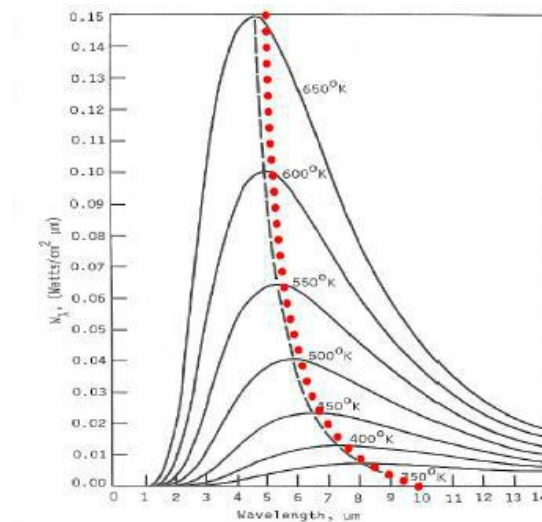


Figura 4.7: Legge dello spostamento di Wien

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

3.3 Misurazione: fonti di errore

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

I raggi infrarossi registrati dalla termocamera sono quindi composti:

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

Poiché la trasmissione ai fini pratici risulta spesso irrilevante, si assume $\rho + \varepsilon = 1$. Per la termografia questo significa che quanto minore è l'emissività, tanto maggiore è la quota di raggi infrarossi riflessi, tanto è più difficile effettuare una misura precisa della temperatura e tanto più importante è che la compensazione della temperatura riflessa (RTC), parametro regolabile sullo strumento, sia impostata correttamente.

- Gli oggetti di misura con emissività elevata ($\varepsilon \geq 0.8$): hanno un fattore di riflessione basso → la loro temperatura può essere misurata molto facilmente con la termocamera.
- Gli oggetti di misura con emissività media ($0.8 > \varepsilon > 0.6$): hanno un fattore di riflessione medio → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera.
- Gli oggetti di misura con emissività bassa ($\varepsilon \leq 0.6$): hanno un fattore di riflessione elevato → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera ma i risultati devono essere esaminati molto attentamente, bisogna tenere conto nel calcolo della T della compensazione della temperatura riflessa (RTC).

3.3.1 Valutazione dell'emissività dell'oggetto di misura

Come accennato, la valutazione dell'emissività dell'oggetto è una procedura fondamentale per poter effettuare un'indagine termografica. Assicurarsi che l'impostazione dell'emissività sia corretta è particolarmente importante se vi sono grandi differenze di temperatura tra l'oggetto di misura e l'ambiente di misura. Se infatti la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente basse e viceversa; se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente alte e viceversa.

La termocamera deve quindi, in ogni momento, conoscere la tipologia di oggetto che sta rilevando per poter fornire la temperatura dell'oggetto stesso, avvicinandosi più possibile a quella reale.

3.3.2 Il mezzo interposto

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

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

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

3.3.3 Limiti di applicabilità della tecnica

Il problema maggiore legato all'interpretazione dei termogrammi è la ricostruzione delle effettive mappe termiche a partire dalla misura locale di radianza fornita dal sensore IR della termocamera. Il segnale da questo prodotto è proporzionale alla quantità di radiazione proveniente dalla superficie dei corpi in esame e può essere convertito nella temperatura dell'oggetto solo conoscendone il fattore di forma e il valore di emittanza punto per punto (infatti, il valore dell'emittanza dipende anche dall'angolo di vista).

Il comportamento termico può mostrare importanti variazioni anche tra zone adiacenti di materiale omogeneo solo in dipendenza dal colore dell'area in esame, per esempio le irregolarità della superficie (differenze di cromia, di materiali, dello stato di conservazione...) causano un assorbimento non omogeneo e alterano la temperatura della superficie mascherando le anomalie termiche dovute alla struttura interna e rendendo più difficile la lettura della termografia.

La capacità di distinguere irregolarità termiche casuali da quelle collegate direttamente a notizie di interesse storico o a particolari danni superficiali come distacchi, umidità ed alterazioni cromatiche dipende dalla corretta interpretazione dei fenomeni di scambio termico fra l'oggetto osservato e l'ambiente circostante al momento della ripresa termografica. Questa operazione presenta delle difficoltà perché la stessa causa può dar luogo a effetti termici opposti soprattutto in dipendenza dai tempi di ripresa e dal contesto in cui si osserva il fenomeno termico. Le indagini infatti documentano lo stato di fatto al momento in cui sono svolte, ed hanno perciò una validità temporale.

3.4 Le termocamere

Un *sistema termografico* è generalmente costituito da una termocamera con rilevatore all'infrarosso, un monitor e da un computer per la post-elaborazione delle immagini.

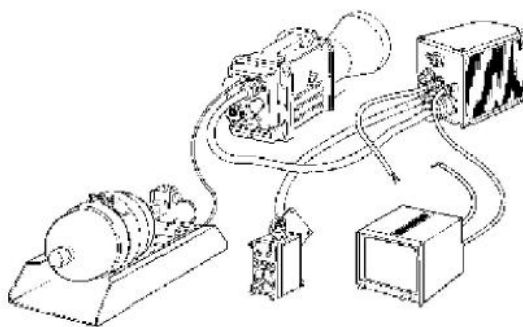


Figura 4.8: Esempio di un sistema termografico

Il funzionamento della *termocamera* si basa sulla rilevazione senza contatto dell'energia termica emessa dagli elementi ispezionati. Questa energia viene con-

vertita in un segnale elettronico che viene in seguito elaborato in tempo reale da software specifici al fine di produrre immagini digitali in scala di grigi o in falsi colori, che rappresenta la distribuzione delle temperature relative, e realizzare calcoli analitici della temperatura attraverso il computer. L'intervallo tra il bianco e il nero può essere fatto corrispondere a differenze di grigi di temperature da 1°C a 200°C.

I vari gradienti termici possono essere restituiti da speciali monitor a colori secondo una scala cromatica arbitraria che attribuisce biunivocamente un determinato colore ad un determinato gradiente termico. È possibile far comparire sullo schermo anche l'immagine isotermica per ogni determinato gradiente, ossia l'immagine di tutti i punti della zona inquadrata che si trovano alla stessa temperatura. Il gradiente minimo di temperatura rilevabile dipende dalla temperatura media dell'oggetto in esame e varia in funzione inversa da questa. Per temperature normali, normalmente il potere risolutivo è di circa 0,2°C.

Questa metodologia, quindi, permette di mettere in evidenza i punti caldi, quelli freddi e le differenze di calore esistenti tra le varie parti della superficie esaminata. Si ottiene, in questo modo, una rappresentazione del gradiente termico tra zone di-verse del corpo e un modello della distribuzione termica.



Figura 4.9: Processo termografico tramite termocamera

La termocamera non rileva solamente la radiazione causata dalla temperatura dell'oggetto, ma anche quella che si origina nelle zone circostanti e viene riflessa dall'oggetto stesso. Entrambe queste radiazioni variano in base all'assorbimento atmosferico, e il valore della misurazione può essere fortemente influenzato dalla temperatura ambientale. Il fatto che la temperatura possa variare da punto a punto in funzione della energia localmente assorbita, si può rivelare una vera e propria complicazione per la diagnostica attiva di superfici affrescate. Pertanto è necessario includere la misura delle proprietà di assorbimento o almeno una stima

ragionevole della sua influenza sulla temperatura. Lo spettro di assorbimento è il complementare dello spettro di riflessione.

Per una rilevazione precisa della temperatura superficiale dell'oggetto e quindi opportuno considerare tali fenomeni inserendo dei parametri opportuni che permettano di tenere conto delle caratteristiche dei vari elementi ispezionati e delle situazioni ambientali in cui si opera, in modo da correggere i fattori di disturbo della misurazione sopra menzionati. Tali parametri sono: l'emissività dell'oggetto, la temperatura riflessa, la temperatura atmosferica, la distanza tra oggetto e termocamera e l'umidità relativa.

Il comportamento termico può presentare differenze da punto a punto anche per materiali omogenei in caso di colore differente. Il *colore della superficie* da esaminare ha una grande rilevanza sulla temperatura dell'oggetto preso in considerazione. Questo perché in un corpo opaco giungono le radiazioni riflesse, in uno trasparente le trasmesse. I corpi che riflettono tutte le radiazioni visibili per superfici non lucide, diffondenti, appaiono bianchi, grigi o neri a seconda della percentuale di radiazione riflessa (*riflettanza*). I corpi che riflettono in percentuale diversa le radiazioni dello spettro avranno una tinta dovuta alla combinazione delle radiazioni riflesse.

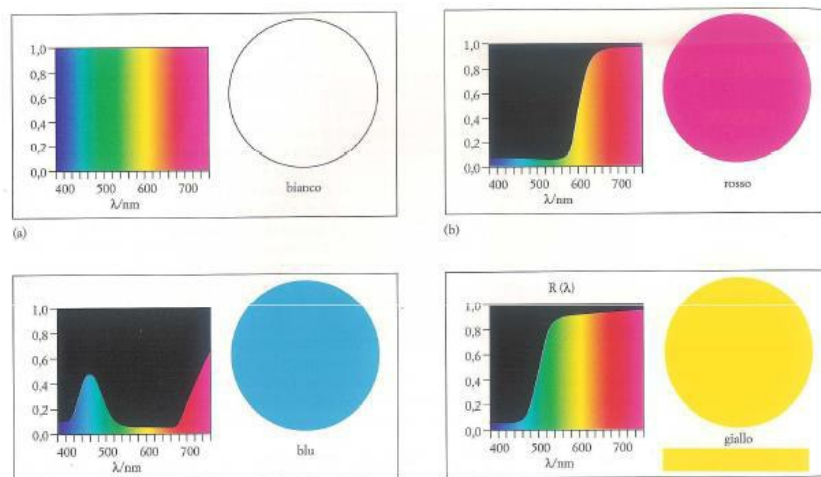


Figura 4.10: Spettro di riflettanza

Il sistema IR viene prescelto in relazione al tipo di applicazione cui è destinato in banda corta o in banda lunga. Le termocamere “short wave” possiedono una banda spettrale dai 3 ai 5 μm : si tratta di una quantità di radiazione minima e comparabile all'irraggiamento solare nella medesima banda. Le termocamere

“long wave”, in-vece, possiedono banda spettrale da 8 a 12 μm . Sebbene meno sensibili, lavorano in una banda spettrale dove la quantità di energia è maggiore e non c'è disturbo alla radiazione solare.

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

3.5 Tecnica di analisi termografica

La termografia è divenuta un tipo di ispezione fondamentale in tutti i campi dove non sia possibile effettuare misure di temperatura per contatto. Viene classificata in due tipologie di indagine a seconda degli obiettivi che si intende perseguire:

- termografia passiva,
- termografia attiva.

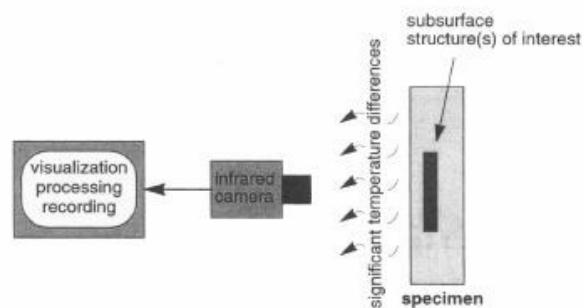


Figura 4.11: Schema termografia passiva

La *termografia passiva* consiste nell'analizzare l'elemento nella sua condizione stazionaria di esercizio, senza influenzarne il regime termico. È necessario che per l'esecuzione dell'indagine non vi siano porzioni dell'elemento irraggiate dal sole o da sistemi di illuminazione artificiale, perché tali zone fornirebbero risultati poco significativi. Le principali applicazioni nel campo edile sono collegabili all'individuazione della presenza di ponti termici ed infiltrazioni d'acqua all'interno delle murature.

La *termografia attiva* consiste nel sollecitare termicamente l'elemento modifican-

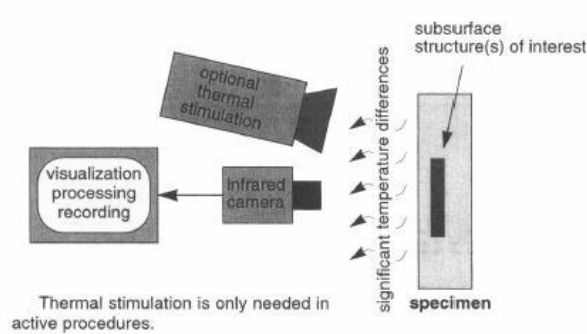


Figura 4.12: Schema termografia attiva

done le condizioni stazionarie. La differenza tra i valori della conducibilità termica e del calore specifico delle diverse parti dell'elemento portano le stesse ad assumere differenti temperature sotto sollecitazione termica. Questa tecnica consente di individuare elementi situati sotto il rivestimento esterno, nonché la verifica dello stato di aderenza e la conservazione del rivestimento stesso.

La termografia di tipo attivo è applicabile secondo diverse tecniche in funzione delle differenti modalità di riscaldamento della superficie:

- termografia Pulsata (PT)
- termografia Lock-in (LT)
- termografia Ultrasound Lock-in (ULT).

La *termografia pulsata* consiste nel riscaldare il provino per un intervallo di tempo molto breve e registrare la curva di decadimento della temperatura. Il riscaldamento avviene tramite un impulso che può essere implementato per mezzo di una o più lampade, flash, raggi laser, getti d'aria o d'acqua. La temperatura superficiale, in seguito all'impulso, cambia rapidamente, poiché il calore si propaga per irraggiamento, per convezione e, sotto la superficie, per diffusione. La presenza di un'anomalia altera la diffusione con conseguente variazione di temperatura nella zona del difetto rispetto a quelle circostanti. Questa tecnica è utilizzata per i materiali che hanno un'alta conducibilità termica, la cui superficie può essere riscaldata con un impulso molto breve. Il suo maggior vantaggio è dato dalla rapidità di esecuzione.

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

- in *riflessione*: sorgente e termocamera vengono posizionate dallo stesso lato rispetto alla superficie del campione (per la ricerca di difetti presenti sulla faccia anteriore);
- in *trasmissione*: sorgente e termocamera vengono posizionate su lati opposti rispetto alla superficie da indagare (per difetti presenti sulla faccia posteriore).

Nella *termografia Lock-in* il riscaldamento della superficie avviene modulando sinusoidalmente una fonte di calore, ad esempio una lampada, che produce un'onda termica che si propaga nel corpo oggetto di studio. L'onda viene riflessa quando incontra delle discontinuità, creando un'interferenza con l'onda termica esercitata sul corpo. In questo caso, agendo sulla modulazione della fonte di calore, è possibile determinare la profondità di eventuali difetti.

Nella *termografia Ultrasound Lock-in* viene sfruttato uno stimolo termico generato da una sorgente ad ultrasuoni che emette onde ad alta energia.

Esistono anche altri metodi termografici che si basano sulla combinazione di due tecniche. La scelta della tecnica impiegata nelle indagini di tipo termografico è essenzialmente funzione del problema che si deve affrontare. Per effettuare una corretta indagine è necessario conoscere:

- le caratteristiche dell'attrezzatura termografica;
- le caratteristiche dell'elemento oggetto di studio o degli strati che lo compongono;
- le proprietà radiative dei materiali coinvolti nell'indagine;
- i fattori climatici;
- l'accessibilità per le ispezioni;
- l'influenza dell'ambiente sull'elemento sotto indagine;
- la presenza di altri fattori che possono condizionare le prove.

4. Attività sperimentale

4.1 Costruzione del pannello di prova

La tecnica termografica è stata sperimentata, al fine di investigare sulla possibilità di usare la termografia per la diagnosi dello stato di conservazione di affreschi an-tichi (in particolare, per il rilevamento delle delaminazioni) su un *campione di prova*, costruito in modo da riprodurre la struttura a strati di un affresco.

Il campione in esame, di misura 50 x 36 cm (1800 cm²), è mostrato in figura 4.1. Il pannello, in questo caso, presenta una *struttura stratificata*: su una tavola di legno truciolato utilizzata come base di appoggio, si è steso uno strato di cemento grigio e sabbia di fiume, spesso 3 cm (fig. 4.2), su cui sono stati appoggiati 6 mattoni pieni rettangolari, dal colore rosa chiaro e dimensioni di 24,5 x 11,5 x 5,5 cm.



Figura 4.1 e 4.2: La disposizione dei mattoni e Lo strato di cemento e sabbia

Per legare i mattoni, è stato realizzato un altro strato superiore di cemento grigio e sabbia di fiume, sempre di spessore pari a 3 cm (fig 4.3). Durante la stesura si è cercato di mantenere lo strato superficiale il più omogeneo possibile: per fare questo si è fatto ricorso a strumenti come cazzuola e frattazzo.

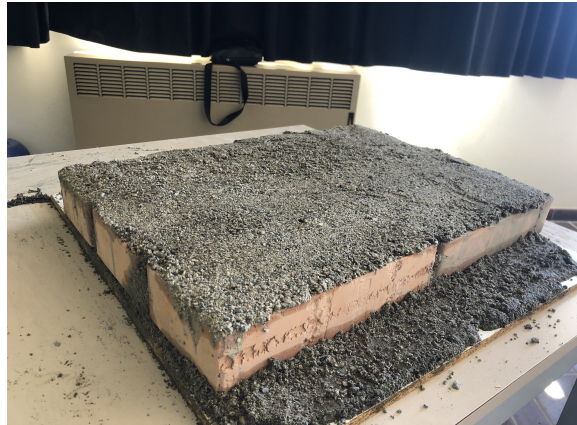


Figura 4.3: La stratificazione del pannello di prova

Su quest'ultimo, sono stati disposti i primi 2 *dischi* con geometria, materiale e ubicazione noti (fig. 4.4). La funzione dei dischi è quella di emulare un distacco tra l'arriccio e il rinzaffo, una volta avvenuta la delaminazione. I dischi sono tutti di cartone e hanno tutti geometria identica: sono cilindrici, con un diametro di 8 mm e uno spessore di 2 mm. L'adesione tra dischi e cemento/sabbia è garantita interponendo un sottile strato di colla. Sopra i 2 dischi, a contatto con il cemento, verrà steso un ulteriore strato di intonaco (Biocalce), spesso 1 cm.



Figura 4.4: L'ubicazione dei primi 2 dischi

Una volta che la colla si è asciugata, si è provveduto ad inumidire fino a saturazione il cemento. Questo assorbe molta acqua, che diffonde all'interno del materiale abbastanza velocemente. Applicare l'intonaco sul cemento asciutto significa alterare la concentrazione d'acqua negli strati interni dell'intonaco stesso, causandone una maggiore fragilità e sgretolabilità.

Il passo successivo è la scelta della calce. Generalmente, l'intonaco pittorico utilizzato nell'affresco, è costituito da una malta molto più raffinata di quella del sottostante arriccio e formata da una parte di calce e due di sabbia. Nell'esperimento effettuato in laboratorio, si è preferito utilizzare un premiscelato industriale piuttosto che realizzare la malta con sabbia e calce, questo per motivi di tempo, di precisione di esecuzione e di economicità, essendo il costo del premiscelato circa uguale alla somma dei costi di calce e sabbia. Si è scelta una malta che non contenesse cemento, in quanto questa ha tempi di asciugatura notevolmente minori.

L'intonaco è stato realizzato con 5 kg di calce e circa 1 litro d'acqua, mescolati lentamente fino ad avere una miscela sufficientemente omogenea; in quanto, una quantità limitata di acqua nell'impasto garantisce una bassa porosità del composto. Il premiscelato scelto è stato la *Biocalce*, le cui caratteristiche sono espresse nella scheda tecnica in appendice.



Figura 4.5: Il pannello dopo la stesura del primo strato di Biocalce

Sopra questo primo strato di Biocalce, sono stati disposti i restanti 4 dischi con geometria, materiale e ubicazione noti (fig. 4.6). Si è fatta la scelta di disporre i dischi su livelli diversi per simulare l'effetto dei difetti a diversa profondità. I dischi sono sempre tutti di cartone e hanno tutti geometria identica: sono cilindrici, con un diametro di 8 mm e uno spessore di 2 mm. L'adesione tra dischi e Biocalce è garantita interponendo un sottile strato di colla. Sopra i 4 dischi verrà steso il secondo e ultimo strato di Biocalce, spesso 1 cm (fig. 4.7)

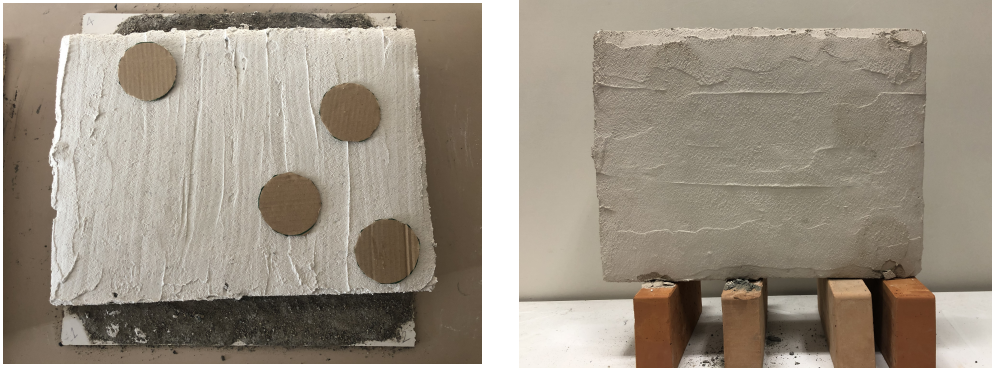


Figura 4.6 e 4.7: L'ubicazione degli ultimi 4 dischi e Il secondo e ultimo strato di Biocalce

Per poter conoscere la posizione del disco al momento della rilevazione dei dati, il pannello è stato suddiviso in una griglia su 2 livelli (livello 1 – inferiore, livello 2 - superiore). A ogni riga è stata assegnata una lettera (A-B-C) e a ogni colonna un numero (1-2).

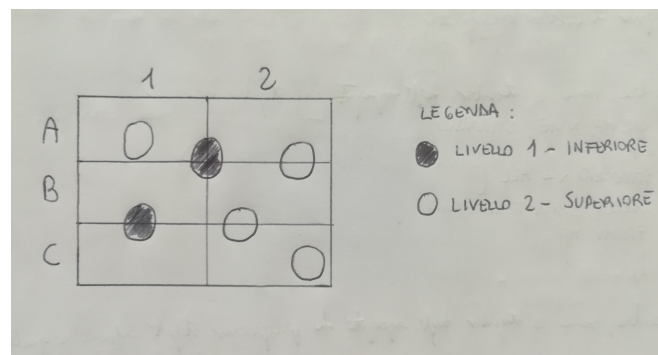


Figura 4.8: La griglia dei dischi

Inizialmente non è stato aggiunto nessun colore alla superficie, quindi il muro appare di colore grigio. In questo primo esperimento, le misurazioni sono state fatte ignorando il colore superficiale, al fine di analizzare solamente come la termografia riesca a rilevare i 'vuoti' creati dai difetti.

Nella seconda parte dell'analisi sperimentale, sul pannello sono state applicate delle *tempere di diversi colori* (6 colori: blu, oro, rosso, giallo, bianco, nero), con l'obiettivo di studiare l'influenza del colore sulla termovisione e sulla rilevazione dei distacchi. Siccome la tecnica dell'affresco impone tempi di esecuzione assai stretti ed infatti il colore va steso rapidamente finché lo strato di intonaco è umido, avendo eseguito in questo esperimento le misurazioni del pannello grigio e del pannello colorato in due momenti differenti, si è provveduto, prima della ste-

sura delle tempere, ad inumidire lo strato di intonaco con l'acqua affinché si ottenesse una superficie pronta a ricevere ed assorbire il colore.

La superficie da dipingere deve essere completamente liscia e compatta in quanto una tale struttura offre caratteristiche di notevole resistenza, rispetto a una rugosa, non presentando lacune di disaggregazione. La minor granulometria della sabbia e l'azione meccanica della cazzuola facilitano questa operazione in modo da consentire che sulla superficie non si depositi la polvere. Al contrario, una superficie troppo corrugata e ricca di imperfezioni potrebbe alterare la lettura effettuata con la termocamera.

In un vero e proprio affresco, i 'pigmenti' utilizzati sono tutti di natura minerale, fatto che giustifica la limitatezza della gamma cromatica. Nel nostro caso, si è scelto di usare delle comuni tempere da pittura per ottimizzare i tempi e i costi.

Non avendo a disposizione dei materiali e una strumentazione adeguati all'allestimento di un Set-up idoneo a vincolare la struttura in modo stabile, ci si è muniti di 4 mattoni che fungessero da supporto al pannello e lo mantenessero il più rigido possibile.

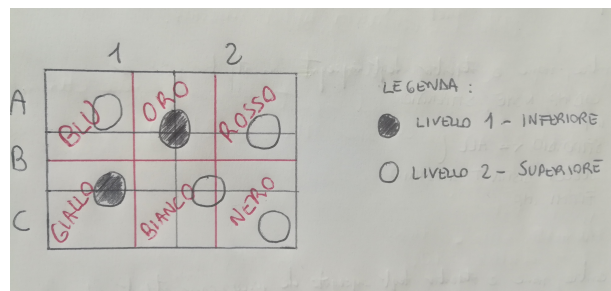


Figura 4.9 e 4.10: Il pannello dopo la stesura delle tempere e La posizione dei colori

4.2 Acquisizione dei termogrammi

4.2.1 Principio alla base

Le analisi termiche non distruttive sono in grado di rilevare difetti interni mediante l'eccitazione del materiale e l'osservazione delle differenze termiche risultanti su una superficie sottoposta ad analisi. Come già detto, queste si sono rivelate uno strumento prezioso per rilevare vuoti, delaminazioni, e inclusioni di acqua in materiali compositi.

Per lo studio si è adottato, come spesso accade per materiali di interesse archeometrico, l'approccio *attivo e dinamico*, prevedendo l'acquisizione di una sequenza di immagini, opportunamente distanziate nel tempo, sia durante il riscaldamento stimolato sia in fase di raffreddamento del campione. La registrazione termografica dell'evoluzione della temperatura superficiale del provino, che è avvenuta infatti dopo una sollecitazione termica, è stata fatta ad intervalli di tempo prestabiliti. Si è cercato di finalizzare l'indagine all'ottenimento, a livello qualitativo, di una *map-patura termica superficiale* del pannello considerato, tenendo conto, in fase di acquisizione, di alcuni parametri fondamentali, quali la temperatura ambientale e la distanza tra oggetto e termocamera, nonché ad individuare alcuni punti e fornire una misura qualitativa dell'emittanza di tali punti (dove sono localizzati i difetti) in funzione del riscaldamento dello strato superficiale del corpo esaminato.

Per il riscaldamento si sono impiegate lampade alogene (potenza massima di 2000W) per l'esigenza di riscaldare la sola superficie in esame e mantenere così l'approssimazione di propagazione monodimensionale del calore. Questo perché è necessario che a cavallo della struttura vi sia uno sbalzo termico di almeno 5-10 °C al fine di apprezzare sui termogrammi le anomalie termiche eventualmente presenti.

Durante le prove termografiche è stato analizzato un provino con difetti di adesione tra due strati intermedi in due fasi differenti, a seconda del diverso livello di gradiente termico.

In seguito alla rilevazione delle immagini termiche, si è proceduto con l'analisi di queste tramite un software MatLab per il riconoscimento e la classificazione dei

difetti del campione: in particolare, questa tecnica di *'image processing'* è stata applicata alla termografia per riconoscere le anomalie dovute alle delaminazioni. Per lo sviluppo di questi algoritmi di *'image processing'*, vanno tenuti in considerazione anche algoritmi di supporto pensati appositamente per lavorare con la propagazione del calore indotta dal riscaldamento della lampada.

4.2.2 Strumentazione utilizzata

4.2.2.1 Termometro a infrarossi

Per catturare la temperatura del pannello nei diversi punti difettati, è stata utilizzata una pistola termica senza contatto Helect per termometro a infrarossi a laser digitale.



Figura 4.11: Pistola termica senza contatto Helect

Il termometro a infrarossi Helect può essere utilizzato per la valutazione di temperatura sia in misura giornaliera che industriale.

Questo termometro a infrarossi rileva l'emissione dell'infrarosso sulla prima superficie che incontra attraverso un laser rosso, di aiuto per prendere la mira con precisione, e traduce la radiazione in gradi Celsius o Fahrenheit (variazione °C/°F commutabile). La temperatura appare sul led retroilluminato, che fornisce anche altri parametri, compreso il livello di carica della batteria. Il tempo di risposta è immediato e presenta un margine di errore nel rilevare la temperatura di circa 2%.

L'alimentazione è fornita da una pila 9 V. Per metterlo in azione, basta tirare il grilletto dopo aver puntato il dispositivo. Se si muove lo strumento senza rilasciare il grilletto, il termometro infrarossi Helect rileverà in modalità continua le nuove temperature. Lo spegnimento è automatico dopo pochi secondi di inutilizzo. Questo permette di prolungare la vita delle pile.

Da tenere in considerazione che il diametro dell'oggetto in prova deve essere più grande della dimensione dello spot laser.

Inoltre stabilire la distanza di utilizzo è un po' complicato. Il rapporto distanza-punto è 12 a 1. Significa che da 30 centimetri la superficie rilevata avrà un diametro di 2,5. Più ci si allontana, più il termometro infrarossi Helect perde di precisione. Lo strumento scende ulteriormente di attendibilità sulle superfici riflettenti, come uno specchio o un metallo lucido.

Le specifiche tecniche di questo strumento sono qui riportate:

- intervallo di temperatura: da -50° a 550° Celsius (da -58° a 1022°F);
- precisione: $\pm 1,5\%$ o $\pm 1,5^\circ$ Celsius;
- risoluzione: 0,1° Celsius o 0,1° F;
- ripetibilità: 1% della lettura o 1° Celsius;
- tempo di risposta: 500mSec, risposta del 95%;
- risposta spettrale: 8-14 μm ;
- emissività: 0,95 preset;
- distanza dal punto: 12: 1;
- temperatura di funzionamento: 0° ~ 40° Celsius (32° ~ 104° F);
- umidità operativa: 10 ~ 95% R.H.;
- temperatura di stoccaggio: -20° ~ 60° Celsius (-4° ~ 140° F);
- alimentazione: batterie AAA * 2PCS da 1,5 V (incluse).

Di sotto sono elencati i dati relativi a dimensione e peso:

- peso di prodotto: 0,1300 kg;
- peso di pacchetto: 0,1500 kg;
- wise del prodotto (L x P x A): 14,00 x 7,00 x 3,80 cm / 5,51 x 2,76 x 1,5 pollici;

- formato del pacchetto (L x P x A): 17,00 x 10,00 x 4,90 cm / 6,69 x 3,94 x 1,93 pollici.



Figura 4.12: Termometro ad infrarossi utilizzato

4.2.2.2 Termocamera

I test sono stati realizzati con una termocamera compatta Flir C3, con WiFi integrato per l'eventuale collegamento a dispositivi elettronici.



Figura 4.13: Termocamera compatta Flir C3

La termocamera Flir C3 è estremamente compatta e sottile, facile e maneggevole nell'uso professionale quotidiano. Il suo display touchscreen la rende estremamente intuitiva nell'utilizzo e di facile apprendimento, permettendo l'individuazione e la risoluzione dei problemi e finalmente la documentazione e condivisione delle immagini termiche con una rapidità senza eguali.

Flir C3 annovera l'esclusiva tecnologia MSX® che aggiunge in tempo reale all'immagine termica dettagli chiave prelevati dalla fotocamera standard integrata. Il risultato è un'unica immagine nitida dell'oggetto inquadrato che, integrando informazioni importanti visibili ad occhio nudo, permette una migliore individuazione del problema rilevato. La tecnologia MSX® lavora in tempo reale ed è utilizzabile sia durante la ripresa direttamente sul display a bordo che durante lo stream USB.

Utilizza la funzione "Punto Caldo" o "Punto Freddo" per misurare rapidamente all'interno di una determinata area i punti di maggiore e minore temperatura. In questo modo saranno immediatamente visibili i punti maggiormente critici, limitando il tempo necessario all'individuazione del problema.

Per poter trasmettere i termogrammi catturati con la termocamera allo smartphone, è possibile collegare Flir C3 a questo utilizzando l'app gratuita FLIR Tools Mobile e rapidamente si potrà trasferire immagini e realizzare report. Dispone inoltre di connessione USB standard (connettore USB Micro-B) per un collegamento al PC via cavo.

Gli aspetti di maggiore rilevanza sono:

- radiometrica: immagini totalmente radiometriche permettono di misurare anche in un secondo tempo la temperatura di ciascun pixel dell'immagine in un range compreso tra -10°C e 150°C;
- touch screen: luminoso display touch screen da 3" con orientamento automatico per la massima versatilità e facilità di utilizzo;
- WiFi: Flir C3 si collega rapidamente con i dispositivi mobili permettendo così di realizzare ed inviare rapidamente report di situazioni critiche o di avvenute riparazioni;
- FLIR Tools: include Flir Tools con relativo software per la creazione di report professionale su PC o Mac;
- misurazione del Max/Min: permettono l'individuazione immediata dei punti più caldi e più freddi all'interno di una determinata area.

Le caratteristiche tecniche di notevole rilevanza sono riportate in questa tabella:

Sensore IR	80 × 60 (4,800 punti di misurazione)
Sensibilità termica	< 0.10°C
Campo visivo	41° x 31°

Minima distanza di messa a fuoco

Termica: 0.15 m (0.49 ft.)
MSX®: 1.0 m (3.3 ft.)

Frequenza di aggiornamento	9 Hz
Lunghezze d'onda	7.5 - 14 µm
Risoluzione Display	3 pollici (320 x 240 pixel)
Orientamento Automatico	Si
Touch Screen	Si
Immagine termica	Si
Immagine visuale	Si
MSX®	Si
Galleria	Si
Picture in Picture	Area IR sopra l'immagine grafica
Range temperatura	da -10°C a 150°C
Precisione	±2°C o 2%, a seconda del maggiore, a 25°C nominali
Area	Riquadro con max. o min.
Correzione dell'emissività	Si; matte/semi-matte/semi-glossy + valore personalizzabile
Supporto di memoria	Memoria interna in grado di archiviare circa 500 immagini
Formato immagine	Standard JPEG, 14-bit measurement data included
Risoluzione camera	640 x 480 pixels

Fuoco	Fisso
Wi-Fi Standard	802.11 b/g/n
Potenza massima Wi-Fi	18 dBm
Tipologie supportate	Peer-to-peer (ad hoc) o infrastruttura (network)
USB 2.0	USB Micro-B: Trasferimento dati da e verso PC, iOS and Android
Batteria	3.7 V ricaricabile Li-ion
Durata batteria	2 ore
Tempo di ricarica	1,5 ore
Temperatura operativa	da -10°C a 50°C
Temperatura di magazzino	da -40°C a 70°C
Peso	0.13 kg
Dimensioni (L x P x H)	125 x 80 x 24 mm

Tabella 4.1: I dati tecnici della termocamera utilizzata

4.2.2.3 Lampada riscaldante

Per riscaldare il campione, in modo tale da avere uno sbalzo termico notevole, è stata utilizzata una lampada riscaldante a piantana con 3 barre Navaris.

La lampada riscaldante Navaris è un apparecchio di riscaldamento di stile innovativo, in quanto sfrutta i raggi infrarossi con protezione anti-surriscaldamento.

Rispetto agli altri sistemi di riscaldamento, gli infrarossi non modificano il tasso d'umidità e lasciano l'aria tersa e fresca. Offre tutta la convenienza dell'elettricità con costi di consumo molto bassi rispetto ad apparecchi a gas.



Figura 4.14: Lampada riscaldante Navaris

Le caratteristiche principali di questa lampada sono:

- 3 livelli di riscaldamento: con 3 diversi livelli di calore 650W/1350W/2000W, è possibile regolare il flusso di calore a seconda dell'esigenza;
- regolabile: grazie al cavalletto telescopico con altezza regolabile tra 177-211 cm e orientabile di 45°, la stufa diventa estremamente versatile, in modo da adattarsi a tutte le altezze e tutte le inclinazioni. La piantana è composta da 4 elementi da circa mezzo metro, quindi è possibile ridurre le dimensioni massime durante il montaggio della piantana arrivando ad una misura di 1,77 m.
- dettagli tecnici: 1 lampada riscaldante / peso circa di 8,2kg / 3 livelli di calore / cavo lungo 3 metri - presa F Schuko / inclinazione 0° - 45° / silenziosa;
- massima protezione: le barre riscaldanti sono protette da una griglia. La lampada è inoltre protetta da spruzzi d'acqua (IPX4). In caso di surriscaldamento si spegne automaticamente;
- posizionamento flessibile: il cavo elettrico extra lungo consente di utilizzare la lampada a terra o di fissarla alla parete. Gli elevati standard di sicurezza la rendono adatta all'uso interno.

Qui di seguito sono elencati i dati tecnici:

- materiali: metallo con verniciatura a polvere, componenti elettronici (3 barre al quarzo);
- misure: 52x177-211cm;
- spegnimento automatico/ Parascintille;
- classe di protezione: IPX4 (impermeabilità agli schizzi d'acqua);
- consumo energetico: 650 - 2000W / Alimentazione: AC 220-240V, 50-60Hz / Presa EU F Schuko;
- peso: 8,2kg;
- livelli di riscaldamento: 650W / 1300W / 2000W.



Figura 4.15: Lampada riscaldante utilizzata

4.2.2.4 Software di ‘image processing’

Il software utilizzato per la successiva elaborazione dei dati è *MatLab*, integrato con il programma realizzato dal Prof. Corvaro.

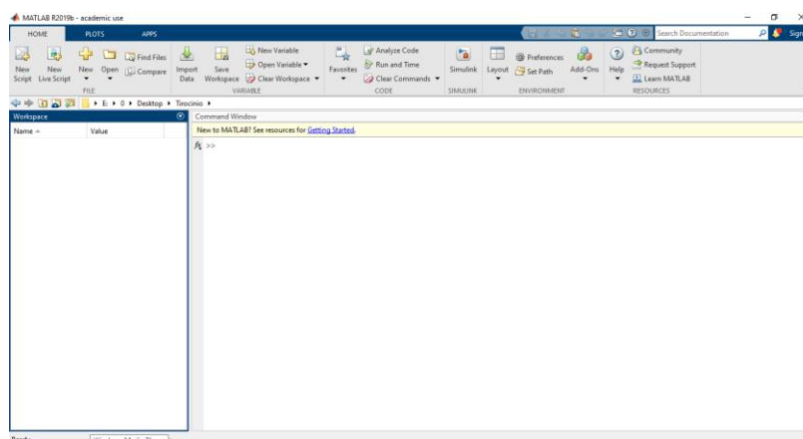


Figura 4.16: Interfaccia grafica del software MatLab

MatLab (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un ambiente per il [calcolo numerico](#) e l'analisi [statistica](#) scritto in [C](#), che comprende anche l'omonimo [linguaggio di pro-grammazione](#) creato dalla [MathWorks](#), che esprime le operazioni matematiche con matrici e array in modo diretto. MatLab consente di manipolare [matrici](#), visualiz-zare [funzioni](#) e dati, implementare [algoritmi](#), creare [interfacce](#) utente, e interfac-ciarsi con altri programmi.

Nel nostro studio, le sequenze temporali dei dati termici acquisiti per ciascuna prova sono state elaborate mediante il programma realizzato dal professore all'interno del software MatLab. Questo programma permette di processare le immagini termiche acquisite con la termocamera C3 in nuove immagini, in cui è possibile evidenziare i difetti del campione preso in esame (dopo averlo sollecitato termicamente), poiché tali immagini vengono restituite in 'falsi colori', dove ogni colore è associato a una determinata analisi. Ognuna di esse individua le temperature massime e minime raggiunte da ciascun pixel durante la prova, anche in funzione del tempo.

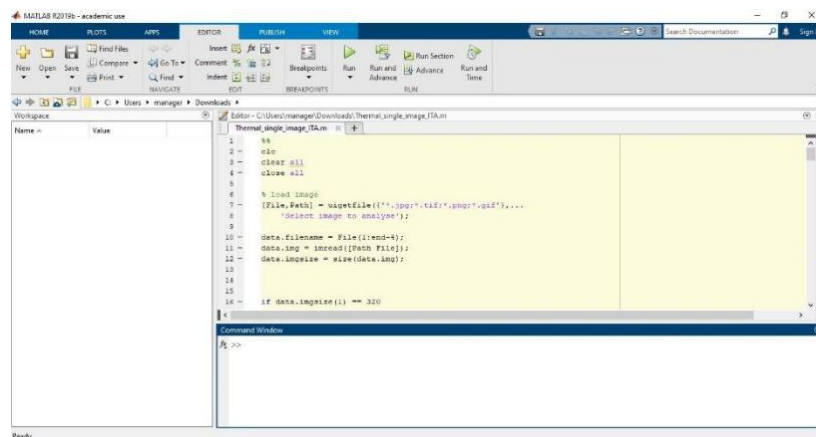


Figura 4.17: Interfaccia grafica del programma utilizzato

Le termocamere R&D/scientifiche di FLIR si integrano perfettamente in MatLab. Le termocamere sono perfettamente compatibili con GigE Vision e GeniCam: il controllo remoto della termocamera e la trasmissione di immagini termiche con completa calibrazione di temperatura in MatLab risultano molto semplici. Non è necessario la conversione di SDK specifici del fornitore. Al contrario, l'interfaccia standard consente di impostare rapidamente la trasmissione in streaming di dati termici ad alta sensibilità dalla termocamera FLIR direttamente in MatLab e permette all'utente di concentrarsi sullo sviluppo dell'applicazione.

Il software ResearchIR di FLIR supporta l'utilizzo di script MatLab per l'analisi delle immagini direttamente nel software. Lo script MatLab può essere importato come filtro digitale in ResearchIR e applicato alle immagini termiche dal vivo o registrate. Dietro le quinte, l'immagine termica viene passata come file di immagine allo script MatLab, che la elabora e infine la restituisce a ResearchIR per la visualizzazione e l'ulteriore analisi. Il metodo offre un ottimo strumento per sfruttare i kit di analisi di immagini MatLab direttamente nel software nativo ResearchIR di FLIR.

4.2.3 Posizionamento degli strumenti

Le acquisizioni dei termogrammi sono state effettuate in *riflessione*, secondo la configurazione comunemente impiegata per indagini su dipinti murali e intonaci, che prevede il posizionamento della sorgente di radiazione e della termocamera dallo stesso lato della superficie da esaminare.

Come mostra la foto (fig. 4.18), la termocamera è stata posizionata sopra un treppiede di altezza regolabile in modo tale da avere il pannello alla stessa elevazione. Sopra la termocamera è stata posta una lampada alogena da 2000 Watt. Anche la lampada, avendo l'asta di supporto regolabile, è alla stessa altezza del campione esaminato affinché il flusso arrivi perpendicolarmente all'oggetto da misurare e riscaldi la superficie in modo uniforme. Risulta fondamentale non variare mai l'inclinazione della lampada, altrimenti porzioni del pannello potrebbero risultare di temperatura differente e si potrebbe incorrere in un surriscaldamento in alcuni punti dell'oggetto.

Ad una distanza di 1,00m è stato posto un pannello stratificato con difetti sub-superficiali e in seguito pitturato con le tempere. Questo pannello è stato posto su un tavolo (per comodità degli spostamenti), sorretto da dei mattoni di supporto.

Quindi il profilo d'onda legato alla direzione in cui illumina la lampada è stato valutato ad una distanza tra lampada e pannello bianco di 1000 mm e la termocamera è solidale con la lampada.

Ci si è dotati anche di un computer, in cui è stato installato il software MatLab, dove è stata realizzata la conversione delle immagini catturate con la termocamera alle immagini processate in ‘falsi colori’.



Figura 4.18: Set-up per le acquisizioni dei termogrammi

I test sono stati svolti a luce spenta e con le finestre chiuse, altrimenti la lettura delle temperature sarebbe potuta essere alterata.

Dato che la termocamera è di facile utilizzo, è stato sufficiente posizionarsi con lo strumento frontalmente all'area interessata, mettere a fuoco il punto interessato con lo “spot” visualizzato nello schermo dello strumento, premere il pulsante SEL, e successivamente SAVE/FRZ per congelare e salvare l'immagine nella memoria della scheda della termocamera.

Setup	Acquisizione in riflessione
Distanza termocamera- pannello [mm]	1000
Area inquadrata [mm]	180000
Numero di lampade	1
Frequenza di campionamento [Hz]	Per il test breve → 1 foto / min Per il test lungo → 1 foto / min
Tempo di riscaldamento t_{ri} [s]	Per il test breve → 3 min Per il test lungo → 6 min
Tempo di raffreddamento t_{ra} [s]	Per il test breve → 10 min Per il test lungo → 15 min

Tabella 4.2: Principali condizioni di misura del set-up della termocamera

4.2.4 Procedura di acquisizione dei termogrammi

Date queste condizioni, sono stati realizzati test sia di brevissima durata che di durata più lunga, poiché si è voluto ottenere prima uno *sbalzo termico* di 5°C e poi di 10°C, al fine di studiare come il diverso grado di temperatura va a incidere sui ‘falsi colori’ delle immagini processate. Questo procedimento è stato ripetuto due volte: sia per il campione color grigio (prima della stesura delle tempere), che per il campione pitturato con 6 colori differenti.

4.2.4.1 Campione con superficie grigia



Figura 4.19: La foto del campione grigio effettuata con la termocamera

L'immagine ha una qualità scadente poiché la termocamera, in una stanza a luci spente, non offre una risoluzione molto elevata.

Prima di iniziare il riscaldamento omogeneo del pannello mediante la lampada, sono state registrate le temperature ambiente della superficie del campione per ogni punto difettato. Queste temperature ambiente sono rimaste inalterate sia per le acquisizioni dei termogrammi in seguito a un riscaldamento più lungo, che per quelle relative a un riscaldamento minore del campione. Tali dati sono stati ottenuti attra-verso l'ausilio del termometro a infrarossi Helect che, per mezzo di un laser rosso, permette la valutazione della temperatura in maniera precisa. L'operatore che ha svolto le misurazioni si è posizionato in corrispondenza della lampada e della termocamera, quindi a 1,00 m dall'oggetto esaminato.

POSIZIONE	TEMPERATURA
A - 1	26,8 °C
A - 2	26,7 °C
B - 1	26,1 °C
B - 2	26,2 °C
C - 1	26,0 °C
C - 2	26,2 °C

Tabella 4.3: Temperatura ambiente del pannello valutata nei punti difettati (prima del riscaldamento)

Effettuando una media di tutte le temperature ottenute, si ha circa un T_m pari a 26,3°C.

Nel test di breve durata, prima del riscaldamento, la termocamera ha rilevato una T_{min} del pannello uguale a 28,5°C (rilevato nelle zone con colori freddi) e una T_{max} pari a 34,6°C (nelle zone con colori caldi), mostrando una lieve differenza rispetto al valore ottenuto con la pistola termica. Tale incongruenza è dovuta probabilmente alla non completa precisione da parte della termocamera nel rilevare le temperature. Poi è stata accesa la lampada per circa 3 minuti, fin quando non si è giunti a un gradiente termico massimo di 5°C rispetto alla

temperatura iniziale, portando l'interfaccia a $31,3^{\circ}\text{C}$ al tempo t_0 . Durante la fase di riscaldamento non sono state effettuate misurazioni. Appena la lampada è stata spenta, si è registrata la prima immagine termica al tempo t_0 . Invece, durante la fase di raffreddamento totale, durata circa 10 min, sono state effettuate altre 10 misurazioni, con una dinamica d'acquisizione che ha visto la registrazione delle immagini termiche a intervalli di 1 minuto.

Nel test di durata maggiore, invece, partendo sempre da una T_m iniziale = $26,3^{\circ}\text{C}$, si è portato il pannello, dopo 6 min, ad avere una temperatura superficiale media di $36,3^{\circ}\text{C}$ a t_0 , ottenendo uno sbalzo termico di ben 10°C . Anche qui, la T_{\min} e la T_{\max} al tempo iniziale, valutati con la termocamera, sono stati rispettivamente di $30,1^{\circ}\text{C}$ e $36,5^{\circ}\text{C}$, con una evidente differenza rispetto al valore ottenuto con il termometro. Mentre il tempo totale di raffreddamento (ossia il tempo necessario affinché il pannello tornasse alla temperatura iniziale e si raggiungesse il completo equilibrio termico) è stato pari a circa tre volte il tempo di riscaldamento, quindi di 15 minuti, superando i 10 minuti in cui sono state svolte le misurazioni a lampada spenta. Allo stesso modo del procedimento descritto sopra, anche in questo caso le acquisizioni sono state fatte ogni minuto dallo spegnimento della fonte di calore.

4.2.4.2 Campione con superficie colorata



Figura 4.20: La foto del campione colorato effettuata con la termocamera

Il procedimento della registrazione dei termogrammi è lo stesso di quello già spiegato in precedenza. A differenza dell'esperimento descritto sopra, questa volta, però, le misurazioni sono state effettuate sul pannello in seguito alla stesura delle tempere, al fine di analizzare l'incidenza dei colori sulla termografia e anche l'influenza su di questa della diversa profondità dei difetti.

A tal proposito, si è scelto di applicare ai due difetti posti sul livello inferiore un colore che ha un grado di assorbimento del flusso di calore elevato (oro) e un colore che ha un grado di assorbimento del flusso di calore basso (giallo), in modo tale da avere risultati dell'analisi più evidenti. Questo perché la temperatura può variare da zona a zona, appunto, in funzione dell'energia localmente assorbita. Pertanto è necessario includere la misura delle proprietà di assorbimento o almeno una stima ragionevole della sua influenza sulla temperatura. Anche nel caso in cui non ci fossero stati difetti e quindi in caso di materiali omogenei, il comportamento termico sarebbe stato differente, da punto a punto, se la superficie avesse presentato cromie diverse.

Anche questa volta, prima di iniziare a riscaldare con la lampada il pannello, sono state registrate le temperature ambiente della superficie del campione per ogni colore. Questi valori ottenuti a temperatura ambiente sono stati presi in riferimento sia per le acquisizioni dei termogrammi in seguito a un riscaldamento più lungo, che per quelle relative a un riscaldamento minore del campione, a seconda che si voglia raggiungere un delta positivo di T di 5 o 10°C. Ci si è dotati del termometro a infrarossi Helect per ottenere questi dati: tale strumento garantisce la massima precisione nel catturare le temperature per mezzo di un laser rosso.

COLORE	TEMPERATURA
Rosso	22,2 °C
Bianco	22,2 °C
Giallo	22,2 °C
Blu	22,0 °C
Oro	22,3 °C
Nero	22,1 °C

Tabella 4.4: Temperatura ambiente del pannello valutata in punti di colore diverso (prima del riscaldamento)

Effettuando una media di tutte le temperature ottenute, si ha circa un T_m pari a 22,2°C.

Nel test di breve durata, ossia quello in cui ci si prefigge di raggiungere uno sbalzo termico a t_0 di 5°C , prima del riscaldamento, la termocamera ha rilevato una T_{\min} del pannello uguale a $17,6^{\circ}\text{C}$ (rilevato nelle zone con colori freddi) e una T_{\max} pari a $24,2^{\circ}\text{C}$ (nelle zone con colori caldi), mostrando una lieve differenza rispetto al valore ottenuto con la pistola termica.

Nella seconda fase del test, si è riscaldato il pannello con una radiazione che giungesse perpendicolarmente dalla lampada alla superficie dell'oggetto. Tale riscaldamento ha avuto una durata di circa 3 minuti, ottenendo una temperatura all'interfaccia del pannello di $27,2^{\circ}\text{C}$ al tempo t_0 . Durante la fase di riscaldamento non sono state effettuate le misurazioni. Al raggiungimento della temperatura prevista, il flusso di calore è stato cessato spegnendo la lampada: si è registrata la prima immagine termica al tempo t_0 . Invece, durante la fase di raffreddamento totale, periodo di 10 minuti in cui il pannello è tornato ad avere la medesima temperatura misurata prima del riscaldamento, sono state effettuate altre 10 misurazioni, da tempo t_1 a t_{10} , con una dinamica d'acquisizione che ha visto la registrazione delle immagini termiche sempre a intervalli di 1 minuto.

In merito a questo test in cui si è riscaldato il pannello portandolo a 5°C in più rispetto alla T iniziale, qui di sotto è stata riportata una tabella in cui si mostrano le temperature relative a ogni colore dopo 10 minuti dallo spegnimento della lampada, quindi al tempo t_{10} . Si nota come la superficie analizzata del campione, dopo questo intervallo di tempo, torni ad avere una temperatura molto vicina a quella misurata all'inizio: ciò mostra che è avvenuto un processo di totale raffreddamento.

COLORE	TEMPERATURA
Rosso	$22,9^{\circ}\text{C}$
Bianco	$22,0^{\circ}\text{C}$
Giallo	$22,0^{\circ}\text{C}$
Blu	$22,0^{\circ}\text{C}$
Oro	$23,3^{\circ}\text{C}$
Nero	$23,0^{\circ}\text{C}$

Tabella 4.5: Temperatura del pannello riscaldato valutata in punti di colore diverso (in seguito a un gradiente termico di 5°C)

Nel secondo test di durata maggiore (fase di riscaldamento di durata di 6 min circa), invece, è stata presa in considerazione ugualmente una T_m iniziale = 22,2°C; si è poi portato il pannello ad avere una temperatura superficiale media di 32,2 a t_0 , dato da 22°C più il gradiente termico di 10°C. Il tempo necessario affinché il pannello tornasse alla temperatura media posseduta prima di accendere la lampada, detto “tempo di raffreddamento, t_{ra} ” è stato di circa 3 volte il “tempo di riscaldamento, t_{ri} ”. Anche qui la dinamica della registrazione delle immagini termiche ha avuto intervalli da una misurazione all'altra di 1 minuto per 10 minuti consecutivi.

I termogrammi catturati a temperatura ambiente e successivamente allo spegnimento della lampada riscaldante, con la termocamera Flir, sia per il pannello con superficie grigia che per il pannello pitturato con le tempere, e allo stesso modo per entrambi i test di breve e lunga durata, sono stati processati e studiati con un pro-gramma specifico del software MatLab, per valutare la ‘qualità’ del riscaldamento e determinare le zone difettate, in funzione del colore e del materiale. Questo pro-gramma ci ha restituito una mappatura termica per ogni immagine esaminata, dove si possono evidenziare le porzioni di pannello con un indice di assorbimento elevato e non e quindi le zone in cui si è avuto un accumulo di calore. Questo aspetto dell’esperienza sarà trattato con maggiore attenzione e dettaglio nel prossimo capitolo, in cui verranno analizzate le immagini termiche ottenute in questa prima fase sperimentale.

5. Analisi, risultati e discussione

Come già scritto, le immagini termiche sono state registrate attraverso una termocamera solidale con la lampada, il cui flusso di calore ha riscaldato uniformemente il pannello di prova. La sorgente di calore è stata posizionata ad una distanza dal campione esaminato di 1,00 m. Le prove sono state effettuate tenendo accesa la lampada per un tempo necessario al raggiungimento di uno sbalzo termico, rispetto alla temperatura ambiente del pannello, di 5 e 10°C, sia per il pannello con superficie grigia (prima della stesura delle tempere) che per il pannello colorato (dopo la stesura delle tempere).

Per tutti i casi studiati, sono stati analizzati i termogrammi ottenuti attraverso un programma del software MatLab, che ci ha restituito delle immagini in ‘falsi colori’: in questa scala dei colori, ad ognuno di essi viene associata una temperatura. In tale programma, sfruttando l'immagine visibile associata alla termografia, è possibile fondere l'immagine fotografica con quella ad infrarosso. Si è quindi in grado di visualizzare sulla fotografia tutte le aree termografiche appartenenti ad un determinato range di temperatura. Questo permette l'immediata correlazione di una *anomalia termica* nella sua posizione reale. Infatti, l'utilità di questa fase di ‘image processing’ è data dal fatto che, attraverso l'elaborazione dei fenomeni termici che si verificano a causa di una sollecitazione termica, si possa comprendere gli aspetti legati al comportamento termico delle strutture, migliorando così la comprensione dell'applicazione termografica nella identificazione e interpretazione delle anomalie interne riscontrate. Questa procedura è stata condotta con lo scopo di indentificare la posizione dei difetti negli affreschi.

Le misurazioni svolte durante entrambi i test di breve e lunga durata, hanno visto la registrazione dei termogrammi a temperatura ambiente, ossia prima della messa in funzione della lampada, e durante la fase di raffreddamento del pannello (della durata di 10 min per ogni prova), dal momento in cui è stata spenta la fonte di calore, ad intervalli di un minuto da un'immagine all'altra. Per praticità e per evitare un'analisi prolissa, si è scelto di riportare nei paragrafi successivi le immagini termiche più caratteristiche catturate con la termocamera, ossia quelle ottenute:

- nell'esatto momento in cui la lampada riscaldante ha smesso di funzionare,
- a 1 minuto dallo spegnimento della lampada,

- a 3 minuti dallo spegnimento della lampada,
- a 6 minuti dallo spegnimento della lampada,
- a 10 minuti dallo spegnimento della lampada,

al fine di analizzare come l'evoluzione dei colori restituiti dal programma venga influenzata dalla diminuzione progressiva della temperatura.

5.1 Elaborazione dei termogrammi del campione con superficie grigia

La prima operazione di elaborazione delle immagini termiche è relativa ai test effettuati sul campione prima di procedere con l'applicazione delle tempere. Questo campione contiene delle anomalie con ubicazione nota dovute a eventuali distacchi e delaminazioni, come accade usualmente negli affreschi di origine antica.

La pratica di processamento permette la rilevazione di elementi nascosti e con opportune analisi e calibrazioni, è possibile individuare anche i differenti tipi di materiale utilizzati per ricreare i difetti tra due strati del pannello. Le tecniche di ispezione termovisiva risultano uno strumento sensibilissimo infatti a rivelare fenomeni di degrado o corrosione in quanto correlati alla *diffusione del calore*. A tal proposito, la temperatura superficiale rilevata col termometro a distanza è dipendente anche dalla propagazione del calore all'interno della muratura.

5.1.1 Analisi del campione grigio nel test a breve durata ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Per le motivazioni già spiegate precedentemente, di seguito verranno riportati i termogrammi ottenuti e le relative elaborazioni a determinati intervalli di tempo dallo spegnimento della lampada.

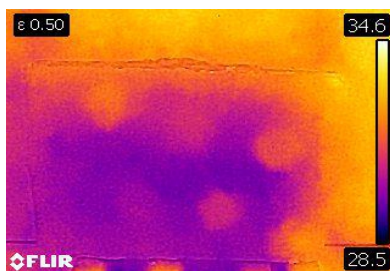


Figura 5.1: Termogramma del pannello grigio a temperatura ambiente

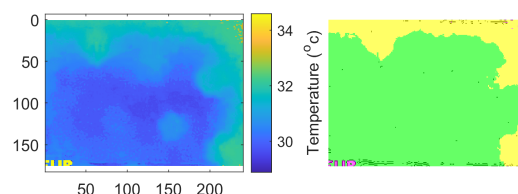


Figura 5.2: Immagine processata del pannello grigio a temperatura ambiente

Già da ora, prima del riscaldamento, è possibile individuare che i difetti più evidenti sono quei 4 che sono stati posti sul livello 2 – superiore.

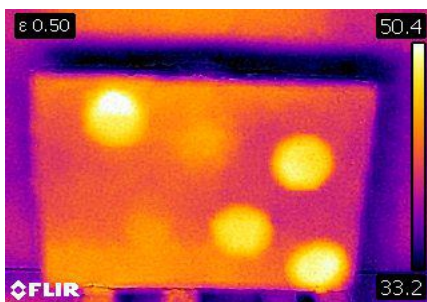


Figura 5.3: Termogramma del pannello grigio subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

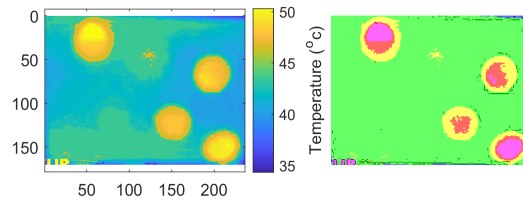


Figura 5.4: Immagine processata del pannello grigio subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

Si prosegue con l'analisi delle immagini dopo aver messo in funzione la sorgente di calore, che ha provveduto a riscaldare la superficie del pannello portandolo a un $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ rispetto alla temperatura iniziale. Questo termogramma fornisce informazioni sul contributo di emissione, quindi la *mappa termica*. La mappatura delle aree dei termogrammi con comportamenti termici simili ha portato al riconoscimento di forme e strutture dissimili tra le immagini acquisite in riflessione. È ben evidente la non omogeneità del riscaldamento, data la differenza delle temperature riscontrate (manifestate attraverso i colori diversi): infatti, le aree di distacco (dove sono posizionati i difetti) risultano più calde. Questi difetti diventano sempre più evidenti man mano che la superficie viene sottoposta ad un riscaldamento maggiore.

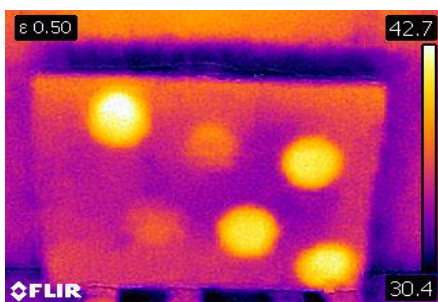


Figura 5.5: Termogramma del pannello grigio a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

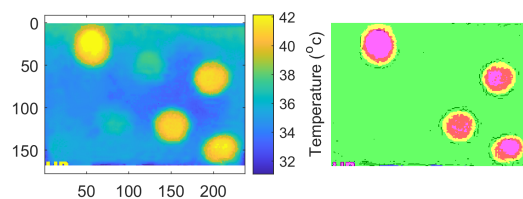


Figura 5.6: Immagine processata del pannello grigio a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

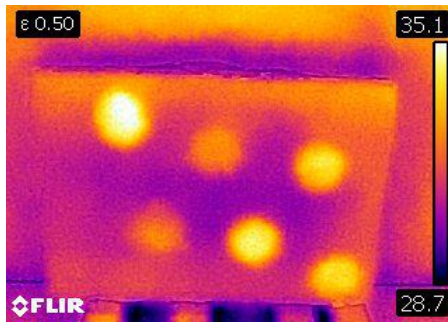


Figura 5.7: Termogramma del pannello grigio a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

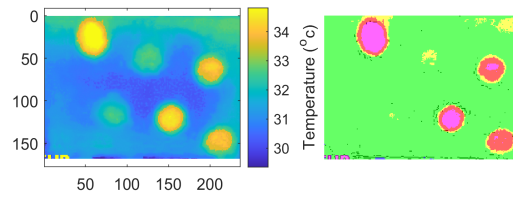


Figura 5.8: Immagine processata del pannello grigio a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

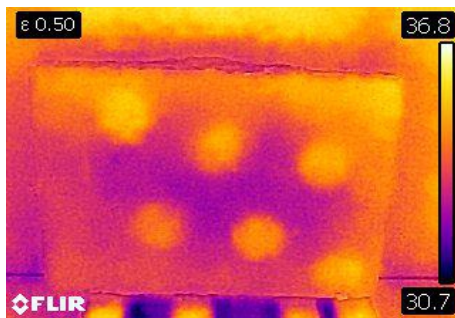


Figura 5.9: Termogramma del pannello grigio a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

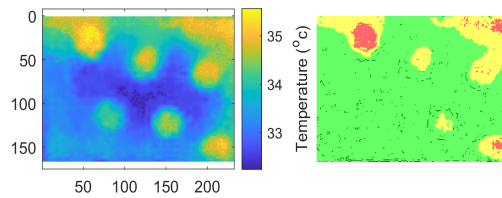


Figura 5.10: Immagine processata del pannello grigio a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

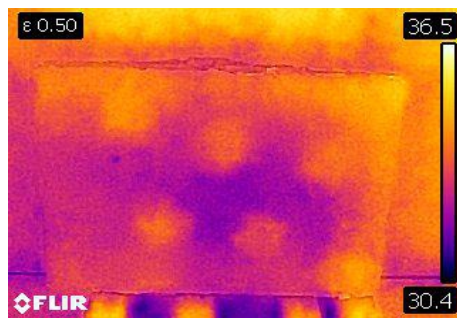


Figura 5.11: Termogramma del pannello grigio a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

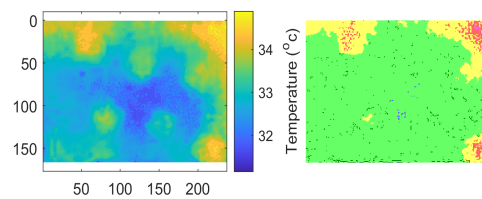


Figura 5.12: Immagine processata del pannello grigio a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

Sono stati riportati alcuni termogrammi acquisiti durante la fase di raffreddamento. I termogrammi relativi a tale fase mostrano come la distribuzione della temperatura superficiale decresca rapidamente tendendo a mostrare una distribuzione uniforme alla fine della sequenza termografica (dopo circa 10 minuti dallo spegnimento della lampada). L'ultima immagine (a t_{10}) è la registrazione della temperatura dopo il completo rilascio dell'energia accumulata nella fase di riscaldamento.

Dai primi risultati acquisiti è stato possibile notare come il riscaldamento indotto portasse il sistema, nel giro di soli 180 secondi a uno stato in cui erano facilmente visibili i punti difettati. Le temperature massime e minime di ogni termogramma analizzato decrescono all'aumentare del tempo di raffreddamento, a tal punto che il pannello torna ad avere, dopo 10 min, quasi la stessa temperatura rilevata prima della fase di riscaldamento ($T_{\min} \text{ a } t_{\text{amb}} = 28,5^{\circ}\text{C}$ e $T_{\max} \text{ a } t_{\text{amb}} = 34,6^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} \text{ a } t_{10} = 30,4^{\circ}\text{C}$ e $T_{\max} \text{ a } t_{10} = 36,5^{\circ}\text{C}$). Questi risultati si potranno percepire meglio nel test lungo, dove uno sbalzo termico maggiore farà sì che i punti difettati saranno ancora più evidenti.

Da notare i punti in cui sono stati posti i difetti alle estremità del pannello, così come quelli sul livello 1 – inferiore, tendono a raffreddarsi più lentamente, a differenza degli altri.

5.1.2 Analisi del campione grigio nel test a lunga durata ($\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$)

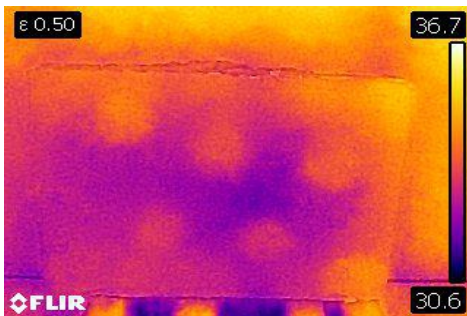


Figura 5.13: Termogramma del pannello grigio a temperatura ambiente

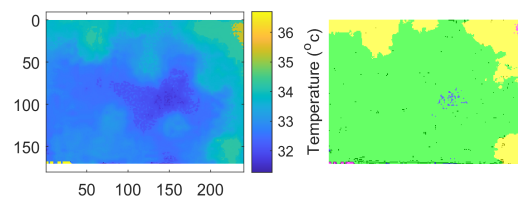


Figura 5.14: Immagine processata del pannello grigio a temperatura ambiente

Nel termogramma si nota la presenza di piccoli distacchi, segnalati come aree più calde (di colore giallo – arancione e temperatura variabile tra 35 e 36°C), mentre l'area circostante risulta essere molto più fredda (in azzurro – blu con temperature di $32/33^{\circ}\text{C}$).

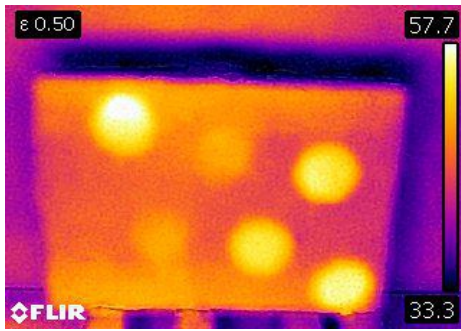


Figura 5.15: Termogramma del pannello grigio subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

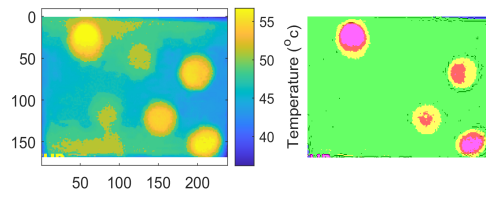


Figura 5.16: Immagine processata del pannello grigio subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

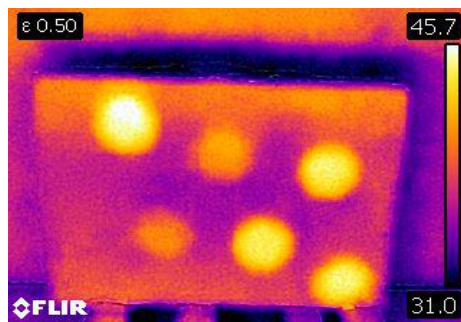


Figura 5.17: Termogramma del pannello grigio a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

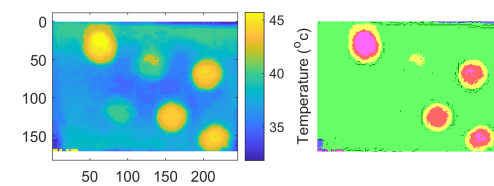


Figura 5.18: Immagine processata del pannello grigio a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

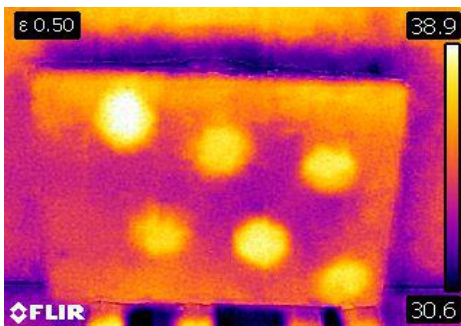


Figura 5.19: Termogramma del pannello grigio a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

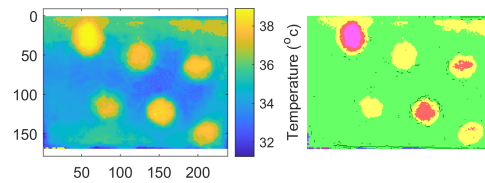


Figura 5.20: Immagine processata del pannello grigio a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

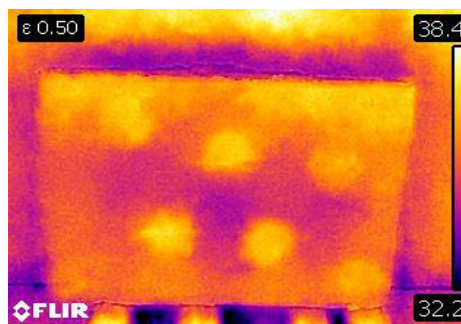


Figura 5.21: Termogramma del pannello grigio a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

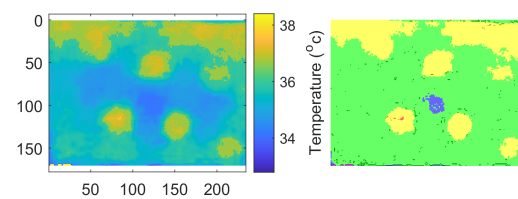


Figura 5.22: Immagine processata del pannello grigio a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

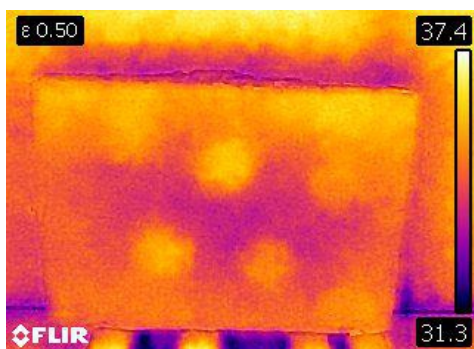


Figura 5.23: Termogramma del pannello grigio a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

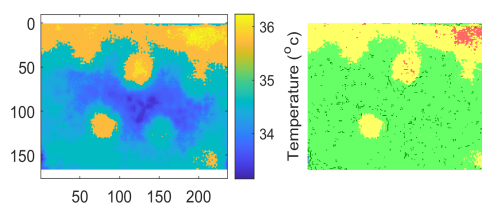


Figura 5.24: Immagine processata del pannello grigio a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

Si è già detto che nei punti con difettosità la temperatura risulta più alta rispetto a quelli circostanti. In questo test, dove il processo di riscaldamento è stato più lungo (6 minuti rispetto ai 3 del test breve, quindi è stato impiegato circa il doppio del tempo) poiché si è stabilito di raggiungere un gradiente termico di ben 10°C rispetto alla temperatura ambiente superficiale del pannello, si riescono a distinguere in maniera abbastanza chiara gli altri due difetti (quelli sul livello 1 - inferiore) non percepibili nel test breve. Questo risultato è molto evidente a t_{10} , infatti i difetti posti ad una maggiore profondità sono quelli che si raffreddano anche più lentamente.

Si deduce quindi che nella sequenza in riflessione, come comunemente accade anche per dipinti murali, le aree a maggior riscaldamento denotano l'impiego di materiali a maggiore inerzia termica, strati pittorici più spessi o presenza di delaminazioni subsuperficiali, mentre le aree che presentano un minor riscaldamento identificano le zone con una maggiore conducibilità termica e/o minore spessore materico.

In questo esperimento, dopo 10' dallo spegnimento della lampada riscaldante, il termogramma a t_{10} presenta temperature differenti da quelle rilevate a t_{amb} del pannello, in quanto i 10°C di calore aggiuntivi indotti attraverso la sorgente di calore non sono stati 'smaltiti' in soli 10 minuti. La fase di raffreddamento totale avrebbe avuto bisogno di più tempo: è stata stimata una durata di circa 15 minuti, a differenza dei 10 nel test breve.

5.2 Elaborazione dei termogrammi del campione con superficie colorata

La seconda operazione di elaborazione delle immagini termiche, invece, è relativa ai test effettuati sul campione in seguito all'applicazione delle tempere. Questo campione presenta, oltre alle zone di distacco con ubicazione nota già ampiamente descritte nel paragrafo precedente, una gamma di colori in superficie al fine di ricreare la tecnica dell'affresco. I colori sono stati scelti con attenzione: si va dai colori neutri come il bianco e il nero, a quelli caldi come il giallo, l'oro e il rosso fino al blu, che è un colore freddo. Anche la loro disposizione segue un determinato criterio di logica, in quanto i diversi colori assorbono una quantità di calore differente: si è ipotizzato di applicare i colori con un grado di assorbimento maggiore su quelle aree difettate che sono risultate dall'analisi già eseguita più efficienti nel trattenere il flusso indotto di calore. Questo esperimento sarà utile per comprendere se le aspettative saranno conformi ai risultati che otterremo.

È bene tenere presente che anche il colore della superficie *influisce* sull'assorbimento della radiazione luminosa prodotta dalla sorgente e conseguentemente dalla temperatura rilevata sugli strati pittorici. Infatti il colore di una superficie influenza gli esiti termografici, indipendentemente dal materiale di cui è costituita.

5.2.1 Analisi del campione colorato nel test a breve durata

($\Delta T = 5^\circ\text{C}$)

Come già fatto nell'analisi del campione prima della stesura dei colori, si riportano qui sotto i termogrammi ottenuti e le relative elaborazioni a determinati intervalli di tempo dallo spegnimento della lampada.

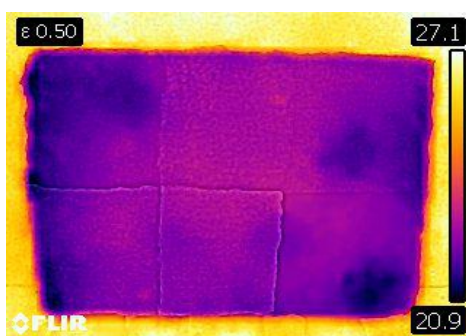


Figura 5.25: Termogramma del pannello colorato a temperatura ambiente

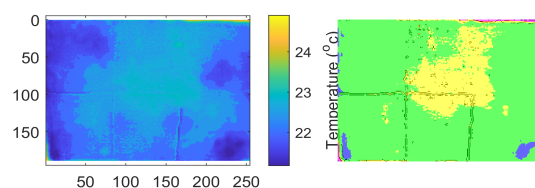


Figura 5.26: Immagine processata del pannello colorato a temperatura ambiente

Nel termogramma ottenuto a temperatura ambiente, è già possibile individuare da una parte i colori che sono rappresentati con tonalità più scure (blu – violetto), relative a una temperatura inferiore, variabile tra i 18 e i 20°C, che sono il blu, il bianco, il giallo e il nero, e dall'altra quei colori, come il rosso e l'oro che invece si manifestano con una temperatura maggiore attraverso delle tonalità tendenti al giallo. Questa analisi, però, può essere solo *qualitativa*, in quanto nella realtà il blu, essendo un colore scuro vicino al nero, assorbe più calore e di conseguenza la zona relativa dovrebbe presentare una temperatura elevata. Probabilmente questa incongruenza rispetto a ciò che dovrebbe accadere è dovuta alla composizione chimica delle tempere in commercio, che sono state utilizzate in sostituzione della tecnica vera e propria dell'affresco, dove i pigmenti, generalmente di origine minerale, vengono stemperati in acqua su intonaco fresco. Inoltre, l'aggiunta di un ulteriore strato sulla superficie del pannello, ossia quello pittorico, fa sì che nessun difetto subsuperficiale sia visibile a t_{amb} nell'immagine termica.

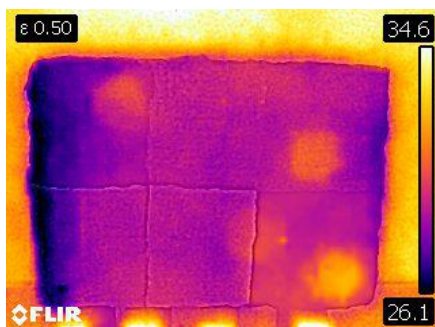


Figura 5.27: Termogramma del pannello colorato subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

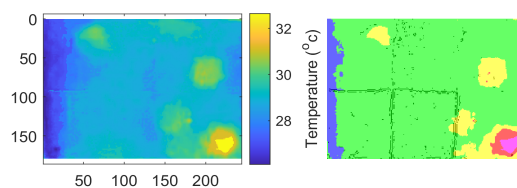
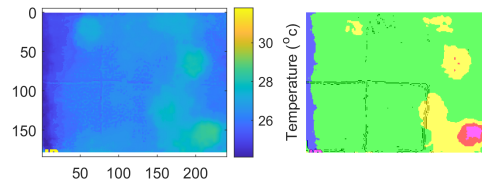
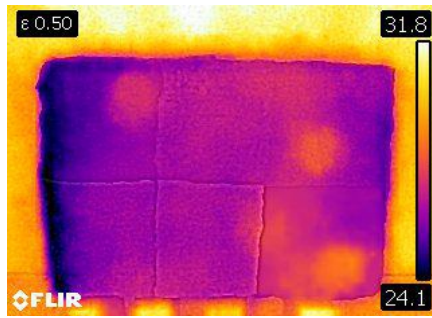


Figura 5.28: Immagine processata del pannello colorato subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

Anche nell'immagine relativa al momento esatto in cui è stata spenta la lampada riscaldante, la zona sinistra del pannello rimane quella più fredda, giungendo nei mattoni colorati in blu e in giallo ad una $T = 26,1^\circ\text{C}$ (colore nero sul termogramma). Nella fascia centrale i difetti posti sul livello 1 - inferiore sono rimasti non individuabili, mentre il flusso di calore ha reso visibili i 4 dischi sul livello 2 – superiore. Il più visibile è quello posto nel vertice in basso a destra.



Dall'immagine si può notare che a queste lunghezze d'onda i risultati corrispondono assolutamente alle aspettative: colori tendenti al bianco riflettono quasi al 100% la luce che li colpisce, colori come il nero e il rosso la assorbono quasi completamente.

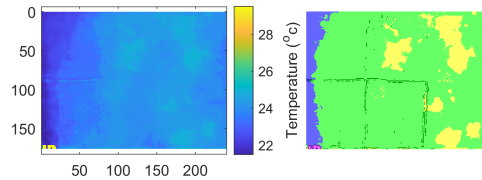
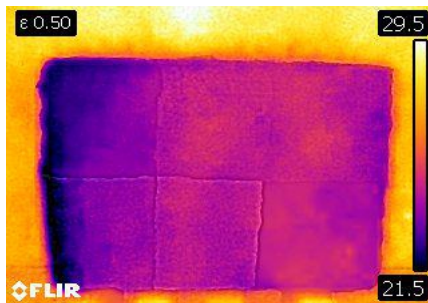


Figura 5.31: Termogramma del pannello colorato a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

Figura 5.32: Immagine processata del pannello colorato a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

Dopo 3 minuti i difetti non sono più visibili sul termogramma. Dall'immagine processata si può notare che le zone più calde del pannello sono quelle dove sono state applicate le tempere di colore nero, rosso e oro.

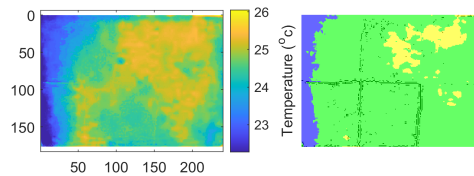
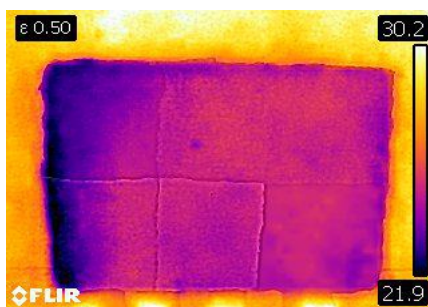


Figura 5.33: Termogramma del pannello colorato a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

Figura 5.34: Immagine processata del pannello colorato a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

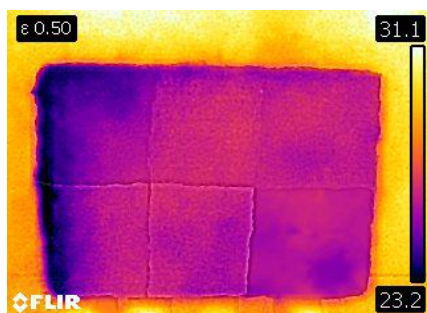


Figura 5.35: Termogramma del pannello colorato a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

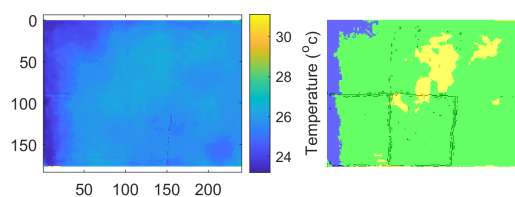


Figura 5.36: Immagine processata del pannello colorato a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

In funzione del tempo crescente, le aree difettate visibili a t_0 perdono man mano la propria luminosità, arrivando, dopo 10 minuti dallo spegnimento della fonte di calore, ad una situazione del tutto analoga a quella riscontrabile a t_{amb} . Per quanto riguarda i colori, la zona gialla, blu, nera e parte della bianca vede il decrescere della temperatura in modo graduale, a differenza degli altri (rosso, ma soprattutto oro) che si sono rivelati essere buoni trattenitori di calore, poiché a t_{10} manifestano una $T = 27^{\circ}\text{C}$, in confronto dei 29°C misurati all'interruzione del flusso riscaldante.

5.2.2 Analisi del campione colorato nel test a lunga durata ($\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$)

In questa analisi si parte da una situazione termografica simile a quella a t_{amb} già analizzata nel test a breve durata del campione colorato.

Il colore oro risulta essere il colore più caldo a temperatura ambiente; questo però è dovuto probabilmente alla sua composizione chimica, essendo l'unico colore acrilico.

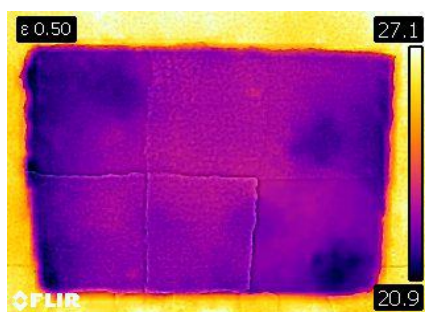


Figura 5.37: Termogramma del pannello colorato a temperatura ambiente

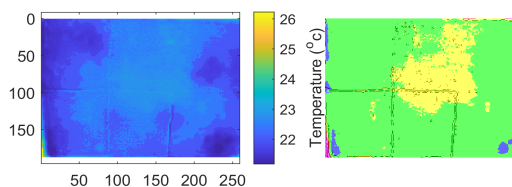


Figura 5.38: Immagine processata del pannello colorato a temperatura ambiente

Nel termogramma riportato di seguito, è evidente una rilevante differenza nelle temperature dei difetti visibili, che ora hanno una temperatura rispettivamente di circa 40°C, mentre la T_{max} raggiunta con un gradiente di 5°C era di 35°C. Anche i colori mostrano una influenza nella variazione della temperatura di differente entità: le zone che trattengono meno calore (blu, giallo) manifestano una T di circa 30°C, a fronte dei 22 °C percepiti nel precedente test. Nonostante la lampada porti la temperatura superficiale ad avere 10°C in più rispetto a quella di t_{amb} , nell'immagine termica sono leggermente visibili i difetti posti sul livello 1 – inferiore. Vedremo però che saranno gli ultimi a raffreddarsi.

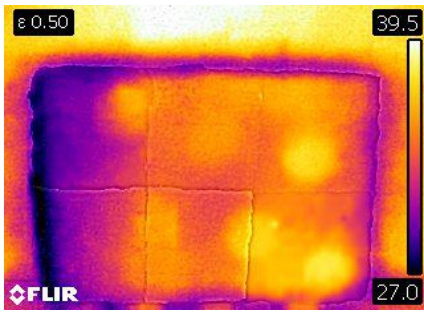


Figura 5.39: Termogramma del pannello colorato subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

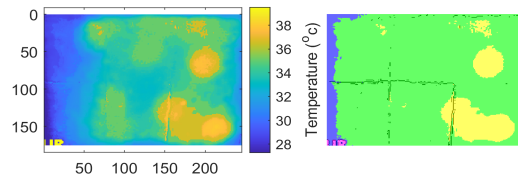


Figura 5.40: Immagine processata del pannello colorato subito dopo lo spegnimento della lampada (a t_0)

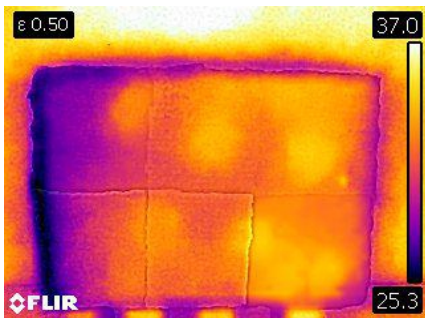


Figura 5.41: Termogramma del pannello colorato a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

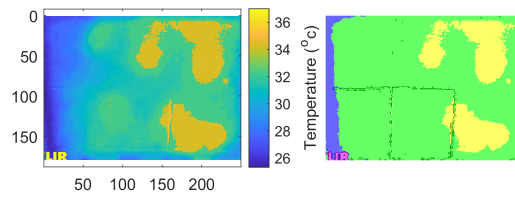


Figura 5.42: Immagine processata del pannello colorato a 1 minuto dallo spegnimento della lampada (a t_1)

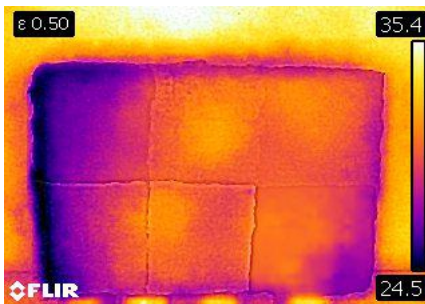


Figura 5.43: Termogramma del pannello colorato a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

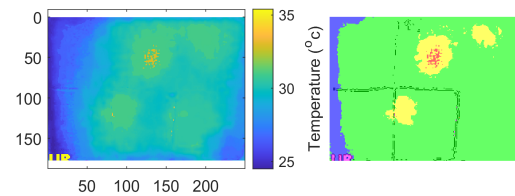


Figura 5.44: Immagine processata del pannello colorato a 3 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_3)

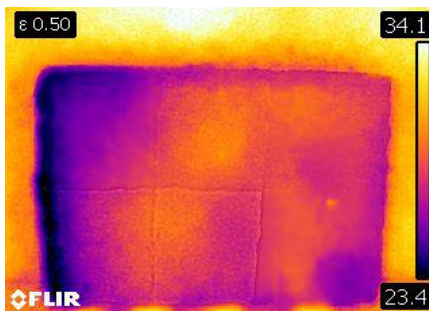


Figura 5.45: Termogramma del pannello colorato a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

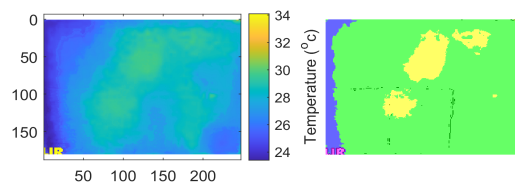


Figura 5.46: Immagine processata del pannello colorato a 6 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_6)

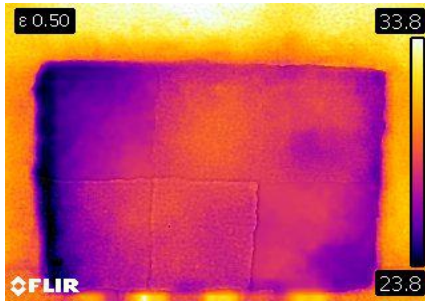


Figura 5.47: Termogramma del pannello colorato a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

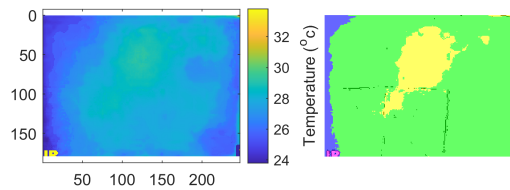


Figura 5.48: Immagine processata del pannello colorato a 10 minuti dallo spegnimento della lampada (a t_{10})

Come è possibile notare, i difetti posti sul livello 1 – inferiore tendono a raffreddarsi più lentamente, a differenza di quelli posti sul livello 2 – superiore. E' proprio la situazione messa in evidenza dall'immagine processata a t_3 . A t_{10} la parte di pannello colorata con l'oro risulta essere ancora particolarmente calda.

Dallo studio eseguito ne deriva che l'energia termica obbedisce alle stesse *leggi di conservazione dell'energia* leggera: se una certa sostanza riflette la maggior parte delle lunghezze d'onda della luce, anche la maggior parte dell'energia termica verrà riflessa. I colori scuri assorbono molto più calore di quelli più leggeri perché assorbono più energia luminosa. Infatti, più il colore è vicino al nero, più calore assorbe dalle fonti di luce (fatta eccezione del blu nel nostro esperimento per motivazioni già spiegate). È noto che la luce visiva è composta da *numerose diverse lunghezze d'onda colorate* che formano una luce bianca quando combinate. Pertanto, nei colori chiari come i gialli, la maggior parte delle lunghezze d'onda della luce viene riflessa indietro e solo in parte viene assorbita come luce o calore. Il nero è l'ultimo assorbitore di calore: assorbe tutta la luce sullo spettro visivo, creando un vuoto di luce. Come risultato dell'assorbimento di tutte le lunghezze d'onda della luce, il nero è il colore più caldo possibile. Il bianco è il contrario: si tratta del colore più freddo possibile. La luce bianca è la somma di tutte le lunghezze d'onda, quindi riflette tutto il calore che riceve.

6. Conclusioni

L'attività svolta ha posto l'attenzione sull'applicabilità di una tecnica completamente non invasiva, basata su un sistema di termografia attiva ad infrarossi per la diagnosi e il monitoraggio dello stato di salute di affreschi antichi. Nelle prove svolte erano noti a priori posizione e dimensioni dei difetti e disposizione dei colori; in questo caso è stato semplice, mediante un confronto tra i vari dati di output, vedere quale è la *risposta dinamica* nei punti con i difetti, come varia il comportamento in funzione del materiale con cui è stato emulato il vuoto e come influisce il colore sui risultati dell'analisi. È stata applicata questa metodologia al caso reale, in quanto, per avere dei risultati pertinenti su di una struttura della quale non si conosce la risposta dinamica, occorre realizzare numerose prove ed effettuare confronti tra queste.

La termografia si è rivelata essere una tecnica di telemetria in grado di determinare la temperatura superficiale degli oggetti. La distribuzione di temperatura viene rilevata analizzando l'energia emessa nell'infrarosso (invisibile all'occhio umano) e da tutti i corpi che si trovano a temperatura diversa dallo zero assoluto. Gli strumenti che captano questa energia sono capaci di produrre in uscita la distribuzione termica della scena come immagine in falsi colori (associando un colore ad ogni valore di temperatura) e/o come matrice di valori numerici.

Si evince come diventa assolutamente complesso utilizzare la termografia per la misura della temperatura a distanza, in quanto la scelta dell'emittanza nei manufatti di origine storica non è un parametro realmente 'tabulabile', ma solamente ottenibile per via sperimentale. Si intuisce che la termografia è in realtà un'ottima tecnica diagnostica per immagini che può essere sfruttata a livello qualitativo, al fine di riscontrare l'esistenza o meno di *gradienti termici* particolari o anomali dovuti alla presenza di difetti sub-superficiali su pareti edilizie e, in particolare, su opere d'arte. La non invasività del sistema permette di effettuare misure ripetute nel tempo, verificando i mutamenti al variare delle condizioni ambientali e monitorando l'evoluzione del degrado. Inoltre si è visto come il comportamento termico può mostrare importanti variazioni anche tra zone adiacenti di materiale omogeneo in relazione al colore dell'area in esame, al tipo di superficie e allo stato conservativo e a parametri che influiscono sull'assorbimento non omogeneo dei materiali e ne alterano la temperatura superficiale.

Con la presente tesi si è allora cercato di individuare possibili fattori che alterano la lettura della temperatura sulla superficie di un affresco. Ciò è stato realizzato attraverso indagini termografiche: si è partiti da test in laboratorio e i risultati sono stati analizzati in seguito attraverso algoritmi in MatLab. Si è allora giunti ad una conclusione, che permette di individuare sia come l'emissività dei colori che la presenza di difetti dietro la superficie osservata vadano ad influenzare la lettura della temperatura. Dal momento in cui viene accesa la lampada si rileva un aumento di temperatura diverso per ogni test (a breve e lunga durata). Inizialmente la crescita della temperatura nel tempo ha andamento rettilineo. Si nota che nei quattro casi esaminati il processo transitorio, oltre che lo stato di equilibrio, è diverso, evidenziando il ruolo del colore della superficie assorbente nel processo di interazione. Il colore determina le *proprietà di assorbimento* della superficie nella fase transitoria ed anche lo stato di equilibrio del sistema con l'ambiente: ciò è tanto più evidente quanto più lento è il processo. Nel caso del mattone con colore nero, la variazione di temperatura nel tempo è la più rapida e la temperatura di equilibrio finale è la maggiore: si ha quindi la maggiore efficienza del processo di assorbimento e anche la maggiore efficacia dello stesso. Per il colore bianco, rispetto a quello nero, si rileva pendenza minore (ossia una variazione di T inferiore) e minore temperatura di equilibrio, infatti il bianco ha un alto coefficiente di riflessione soprattutto nel visibile; per gli altri colori si sono ottenuti dei risultati intermedi. Per "pendenza" si indica la rapidità con cui varia la temperatura nel tempo, una proprietà caratteristica del processo di scambio associato al colore delle varie aree, comunemente associata alla 'rapidità di risposta del colore'.

Nonostante i risultati ottenuti siano stati in linea con le aspettative, sono stati conseguiti buone conclusioni soprattutto per le misurazioni più lunghe, in cui lo sbalzo termico maggiore ha permesso una risposta più rapida nell'individuazione dei difetti. In seguito alle analisi effettuate, si elencano i colori in ordine decrescente, in funzione del grado di assorbimento del calore: nero, oro, rosso, bianco, giallo, blu. In generale, gli *esiti* sono stati *positivi*: per avere indicazioni maggiori sarebbe stato però necessario eseguire un più elevato numero di prove. Innanzitutto sarebbe stato importante variare la distanza tra il sistema termocamera – lampada e il pannello inquadrato, ciò avrebbe permesso di confermare la solidità dei risultati ottenuti. Inoltre sarebbe stato utile riscaldare la parete per più tempo, per poter valutare meglio anche i difetti sul livello 1 - inferiore, non molto visibili a causa di un potere di assorbimento del calore non abbastanza elevato; difatti materiali edilizi simili al

cemento hanno una conducibilità termica circa pari a $2 \text{ [W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]$ e hanno pertanto tempi di risposta lunghi.

In futuro sarà inoltre necessario integrare software di modellazione 3D e di calcolo numerico come MatLab, al fine di individuare profondità e dimensioni degli eventuali difetti trovati, che ad oggi sono macchie nel termogramma caratterizzabili solo qualitativamente. Ciò richiede un approccio di tipo ‘soft-sensing’, una tecnica per stimare i parametri che non sono fisicamente misurati, partendo da dati reali. Applicare questa tecnica al presente lavoro permette di estendere in modo virtuale lo strumento termocamera, consentendo di estrapolare informazioni non ricavabili dall’immagine termografica.

Bibliografia

1. Gallone A. *Analisi fisiche e conservazione. Edifici, dipinti murali, sculture po-licrome e arredi*. Franco Angeli (1990)
2. Matteini M., Moles A. *La chimica nel restauro. I materiali dell'arte pittorica*. Nardini Editore (2007)
3. Danti C., Matteini M., Moles A. *Le pitture murali. Tecniche, problemi, conser-vazione*. Centro Di (1990)
4. Massa V., Scicolone G. *Le vernici per il restauro. I leganti*. Nardini Editore (1994)
5. Botticelli G., *Metodologia di restauro delle pitture murali*. Centro Di (1996)
6. Redi F., Forgione A., Armillotta F. *Stratigrafia degli elevati e nuove tecnologie diagnostiche. Archeologia dell'edilizia storica in situazioni d'emergenza*. One Group Edizioni (2016)
7. Bellini A. *Tecniche della conservazione*. Ex Fabrica – Franco Angeli (2009)
8. <http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia> (2009-2010)
9. Mangiavacca F. *Sviluppo e validazione sperimentale di una tecnica non di-struttiva per il monitoraggio dello stato di salute di affreschi antichi*. Tesi di laurea – UNIPR (2008)
10. Caglio S., Poldi G., Redaelli V. *Termografia: uno strumento utile per l'esame di dipinti su supporto mobile?* Ricerca scientifica.
11. Baraccani D. *La termografia: una tecnica di controllo non distruttivo*. Tesi di laurea – UNIBO (2012)
12. Predari L. *Metodi acustici e vibrazionali per l'individuazione di difetti in into-naci ed affreschi*. Tesi di laurea – UNIPR (2009)
13. Ferretti C. *Rilievo di difetti su affreschi mediante termografia attiva: sviluppo di una procedura per l'acquisizione e l'analisi automatica dei dati*. Tesi di laurea – UNIVPM (2017)

Appendice I: Cemento Grigio

Scheda Tecnica



Cemento Grigio

cod. 102153 - 62035 - 62034 - 132693



Caratteristiche chimiche:	Determinazioni	Metodo di prova	Valori Tipici di Riferimento
	Perdita al fuoco	% EN 196/2	-
	Residuo insolubile	% EN196/2	-
	Solfati	% EN 196/2	2,9
	Cloruri	% EN 196/21	0,015
	Crono VI solubile in acqua	% pr EN 196/10	<0,0002
	Saggio pozzolanicità	EN 196/5	-
Caratteristiche fisiche:	Stabilità di volume	mm EN 196/3	0
	Tempo di inizio presa	min EN196/3	140
	Spandimento	% UNI 7044	105
	Superficie specifica	cm ² /g EN 196/6	4850
Resistenze meccaniche:	2 giorni	N/mm ² EN 196/1	28,0
	7 giorni	N/mm ²	-
	28 giorni	N/mm ²	50,0
Caratteristiche aggiuntive:	n tenuti in alcali C3A e C4AF		
	Na ₂ O equivalente	% EN 196/21	0,55
	Alluminato tricalcico	% UNI 10595	5,0
	Alluminio tetraalcico	% UNI 10595 9,5	50,0

Appendice II: Biocalce Intonaco

Biocalce® Intonaco

Intonaco naturale certificato, eco-compatibile, di pura calce naturale NHL 3.5 a norma EN 459-1, per intonacature altamente traspiranti, ideale nel GreenBuilding e nel Restauro Storico. Contiene solo materie prime di origine rigorosamente naturale e minerali riciclati. A ridotte emissioni di CO₂ e bassissime emissioni di sostanze organiche volatili. A ventilazione naturale attiva nella diluizione degli inquinanti indoor, batteriostatico e fungistatico naturale. Riciclabile come inerte a fine vita.

Biocalce® Intonaco è idoneo per l'intonacatura traspirante e protettiva di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne.



GREENBUILDING RATING®

Biocalce® Intonaco
 - Categoria: Inorganici minerali naturali
 - Malte, intonaci e decorazione naturale

rating 5

Altezza efficace (m)	Numero sviluppo batterico e fungine	Bassissime emissioni VOC	Emissioni di CO ₂ /kg	Contenuto di minerali riciclati
0.5	✓	✓	79 g	71%

PLUS PRODOTTO

- Naturale, poroso e altamente traspirante lascia il muro libero di respirare
- Batteriostatico e fungistatico naturale classificato B+ e F+ (metodo CSTB)
- Protegge e mantiene la muratura sana nel tempo

ELEMENTI NATURALI

	Pura Calce Naturale NHL 3.5 (verifica)		Sabbia Silicea Lavata di Origine Naturale (0,1 mm)
	Pozzolana Naturale Estratta (verifica)		Cottone Densificato Granulato (0-25 mm)
	Sabbia Silicea Lavata di Origine Naturale (0,1-0,45 mm)		

CAMPI D'APPLICAZIONE

Destinazione d'uso
 Intonacatura traspirante e protettiva di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne. Biocalce® Intonaco è particolarmente adatto per intonacare nell'Edilizia del Benessere® dove l'origine rigorosamente naturale dei suoi ingredienti garantisce il rispetto dei parametri fondamentali di porosità, igroscopicità e traspirabilità richiesti. Biocalce® Intonaco è idoneo per intonacature nel Restauro Storico la scelta di ingredienti della tradizione come calce naturale, pozzolana naturale, pietra, marmo e granito sapientemente dosati garantisce interventi conservativi nel rispetto delle strutture esistenti e dei materiali originari.

Non utilizzare
 Su supporti sporchi, decoesi, polverulenti, vecchie pitture o rasature. Asportare dalle superfici le incrostazioni saline interstiziali.

INDICAZIONI D'USO

Preparazione dei supporti
 Il fondo deve essere pulito e consistente, privo di parti friabili, di polvere e muffe. Eseguire la pulizia delle superfici con idrosabbiaatura o sabbiaatura e successivo idrolavaggio a pressione per rimuovere completamente residui di precedenti lavorazioni (scialbi, vecchie rasature, concrezioni saline, ecc.) che possano pregiudicare l'adesione. Asportare la malta d'allettamento inconsistente tra i conci murari. Utilizzare Biocalce® Muratura con la tecnica del noccio e/o del cucci-scuci per ricostruire le parti mancanti della muratura in modo da renderla planare. Bagnare sempre i supporti prima dell'applicazione dell'intonaco.

* ÉMISSION DANS L'AIR INTÉRIEUR Information sur le niveau d'émission de substances volatiles dans l'air intérieur, présentant un risque de toxicité par inhalation, sur une échelle de classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

Appendice

INDICAZIONI D'USO

Preparazione

Applicazione manuale: Biocalce® Intonaco si prepara impastando 1 sacco da 25 kg con circa 5,1 litri d'acqua pulita in betoniera a tazza. L'impasto si ottiene versando prima l'acqua nella betoniera pulita ed aggiungendo poi tutta la polvere in unica soluzione. Attendere che il prodotto raggiunga la giusta consistenza in corso di miscelazione. Inizialmente (1 – 2 minuti) il prodotto appare asciutto; in questa fase non aggiungere acqua. Miscelare in continuo per 4 – 5 minuti fino ad ottenere una malta omogenea, soffice e senza grumi. Usare tutto il prodotto preparato senza recuperarlo nella successiva miscelata. Tenere il materiale immagazzinato in luoghi protetti dal caldo estivo o dal freddo invernale. Impiegare acqua corrente non soggetta all'influenza delle temperature esterne. La qualità della malta, garantita dalla sua origine rigorosamente naturale, sarà compromessa dall'aggiunta di qualsiasi dose di cemento.

Applicazione

Applicazione meccanizzata: Biocalce® Intonaco, grazie alla sua particolare finezza e plasticità tipica delle migliori calce idrauliche naturali, è ideale per applicazioni con intonacatrice. L'eccellente coesione della pasta allo stato fresco ne ha permesso la certificazione WTA con l'estensione all'applicazione meccanizzata. Le prove di validazione di Biocalce® Intonaco alle specifiche WTA sono state eseguite con intonacatrice attrezzata con i seguenti accessori: Miscelatore, Statore 30, Rotore 30+, Turbostatore, Turborotore, tubo portamateriale 25x37 mm, lunghezza metri 10/20 e lancia spruzzatrice.

Biocalce® Intonaco si applica facilmente a cazzuola o a spruzzo come un intonaco tradizionale. Preparare il fondo eseguendo, se necessario, il rincoccio al fine di regolarizzare i supporti. Applicare il rinzaffo, formare le fasce di livello, intonacare, staggiare e frattazzare in fase di indurimento.

Biocalce® Intonaco va posto in opera rispettando la regola d'arte in passate successive di spessore massimo di 2 cm anche se il prodotto sostiene spessori maggiori. Questo sistema tradizionale di applicazione evita la formazione di microfessure. I riporti d'intonaco su rinzaffo o precedenti passate devono avvenire quando lo strato sottostante è indurito. Si può ottenere la finitura desiderata in funzione della lavorazione scelta. Curare la maturazione del prodotto indurito inumidendolo nelle prime 24 ore.

Pulizia

Biocalce® Intonaco è un prodotto naturale, la pulizia degli attrezzi si effettua con sola acqua prima dell'indurimento del prodotto.

ALTRE INDICAZIONI

Nell'intonacatura di murature d'epoca miste, oppure in muratura con zone tamponate in materiale diverso è consigliato l'inserimento di una rete portaintonaco zincata o sintetica antiacida nell'intonaco Biocalce® Intonaco al fine di prevenire possibili fenomeni fessurativi. Qualora si debba applicare Biocalce® Intonaco su sottofondi compatti o inassorbenti applicare sempre preventivamente Biocalce® Rinzaffo e verificarne l'avvenuta adesione.

Prevedere, in esterno, un distacco da pavimenti, camminatoi o superfici orizzontali in genere onde evitare fenomeni di adescamento capillare.

I muri realizzati con blocchi in calcestruzzo cellulare vanno preparati in ottemperanza alle prescrizioni dei produttori stessi: non bagnare né rinzaffare dette superfici; prepararle prima dell'intonacatura con un'applicazione a pennello o rullo del consolidante-uniformante di assorbimento Biocalce® Fondo.

Inoltre, sempre sui muri in cemento cellulare, prevedere l'inserimento della rete di armatura Rinforzo V 50 all'interno delle due mani di rasante realizzate con uno dei prodotti a scelta tra Biocalce® Intonachino Fino o Granello.

VOCE DI CAPITOLATO

Nell'Edilizia del Benessere® si realizzerà un intonaco ad altissima porosità, igroscopicità e traspirabilità per muri interni ed esterni con malta di pura calce idraulica naturale NHL 3.5, pozzolana naturale extrafine e inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0 – 2,5 mm, GreenBuilding Rating® 5 (tipo Biocalce® Intonaco). Le caratteristiche richieste, ottenute esclusivamente con l'impiego di materie prime di origine rigorosamente naturale, garantiranno un'altissima traspirabilità dell'intonaco (coefficiente di resistenza al vapore acqueo ≤ 6), un'elevata porosità della malta indurita ($\geq 40\%$), una naturale conducibilità termica (pari a 0,54 W/(m K)) ed una notevole aria occlusa in fase d'impasto ($\geq 20\%$). L'intonaco naturale dovrà soddisfare anche i requisiti della norma EN 998/1 – GP / CS II / W1, adesione 0,2 N/mm², reazione al fuoco classe A1. L'intonaco avrà uno spessore non superiore ai 20 mm per passata, fasce di livello, finitura a rustico sotto staggia, riquadratura di spigoli e angoli sporgenti, esclusi oneri per ponteggi fissi. L'applicazione sarà da eseguire a mano o con intonacatrice.

Resa Biocalce® Intonaco: $\approx 13 \text{ kg/m}^2$ per cm di spessore.

DATI TECNICI SECONDO NORMA DI QUALITÀ KERAKOLL

Tipo di malta	malta per scopi generali per intonaci interni/esterni (GP)	EN 998-1
Natura chimica del legante	pura Calce Idraulica Naturale NHL 3.5	EN 459-1
Intervallo granulometrico	0 – 2,5 mm	EN 1015-1
Massa volumica apparente della polvere	$\approx 1,28 \text{ kg/dm}^3$	UEAtc
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale in luogo asciutto	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	$\approx 5,1 \text{ l} / 1 \text{ sacco } 25 \text{ kg}$	
Consistenza malta fresca 0'	$\approx 174 \text{ mm}$	EN 1015-3
Massa volumica apparente della malta fresca	$\approx 1,61 \text{ kg/dm}^3$	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essiccata	$\approx 1,4 \text{ kg/dm}^3$	EN 1015-10
pH impasto	≥ 12	
Aria occlusa / Aria occlusa intonacatrice	$\geq 20\%$	EN 413-2
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore max per strato	$\approx 2 \text{ cm}$	
Resa	$\approx 13 \text{ kg/m}^2$ per cm di spessore	

Rilevazione dati a $+20 \pm 2$ °C di temperatura, $65 \pm 5\%$ U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

Biocalce® Intonaco Code: BB02 2019/07

Ringraziamenti

Ringrazio i miei relatori Prof. Francesco Corvaro e Prof.ssa Barbara Marchetti per avermi dato la possibilità di svolgere il tirocinio su un argomento estremamente interessante e per avermi guidato fino alla stesura della tesi.

Ringrazio la mia collega e amica Dott.ssa Marta Di Domenica per aver svolto con me l'esperienza di tirocinio.

Ringrazio il Dott. Matteo Vitali per il costante supporto durante il tirocinio.

Ringrazio tutti i tecnici di laboratorio per l'aiuto nei momenti di necessità e per aver fornito tutti i materiali di cui avevamo bisogno.

Ringrazio Maddalena Peroni con cui ho condiviso ogni emozione in questi ultimi 2 anni della mia vita.

Ringrazio infine tutti i miei colleghi e amici di corso e tutti coloro che mi sono stati vicini in questi 4 anni di università.

Grazie dal profondo del mio cuore.