



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

DIPARTIMENTO DI FISICA

**CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN
FISICA, ASTROFISICA E FISICA APPLICATA
CICLO XXVII**

Misura da remoto della temperatura superficiale nella diagnostica dei Beni Culturali: problematiche e nuovi sviluppi

Settore Scientifico disciplinare FIS/07

**Tesi di Dottorato di:
Maria Concetta Di Tuccio**

**Coordinatore: Prof. Marco Bersanelli
Supervisore: Dr. Nicola Ludwig
Co-Supervisore: Dr. Adriana Bernardi**

A.A. 2013-2014

Indice

INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1 MICROCLIMATOLOGIA NEGLI AMBIENTI MUSEALI	11
1. Parametri termo-igrometrici.....	12
1.2. Gestione degli ambienti museali	14
2. Temperatura superficiale	20
2.1. Processi di degrado e monitoraggio della temperatura superficiale	21
CAPITOLO 2 TECNICHE DI MISURA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE	25
1. Sensori a contatto	25
2. Principi della radiazione termica	28
2.1. Sensori di quasi-contatto	34
2.2. Sensori a remoto	37
2.2.1. Radiometro	37
2.2.2. Termo camera.....	39
CAPITOLO 3 EMISSIVITA' DELLE SUPERFICI NEI BENI CULTURALI ..	47
1.1. Dipendenza dell'emissività dalla rugosità superficiale	55
1.2. Analisi in laboratorio	57
1.2.1. Proprietà ottiche del vetro	58
1.2.2. Misura di emissività	59
1.2.3. Metodologia sperimentale	61
1.2.4. Risultati	66
CAPITOLO 4 INTRODUZIONE DEL NUOVO PUNTATORE	83
1. Descrizione tecnica	85
1.1. Segnale di output - termopila e termistore	92
2. Test di funzionamento	95
2.1. Auto-riscaldamento	95
2.2. Calibrazione sensore a termopila	98
2.2.1. Calibrazione termistore	98
2.2.2. Calibrazione termopila	101
2.4. Definizione del campo di vista (FOV)	108
2.3. Condizioni di misura: distanza sensore - oggetto	109

CAPITOLO 5 INFLUENZA DELLE VARIAZIONI TERMICHE SULL'ELONGAZIONE DEL LEGNO	115
1. Struttura e deformazione igroscopica del legno	118
1.1. Deformazioni in campo igroscopico.....	121
1.2. Contenuto igrometrico di equilibrio (EMC)	122
2. Analisi in laboratorio	124
4.1. Metodologia sperimentale	125
4.2. Caratterizzazione del trasduttore e supporto	135
4.2.1. Test del sistema di misura su campioni di alluminio.....	140
4.3. Deformazioni del legno in funzione delle variazioni termiche	143
CAPITOLO 6 CASI STUDIO: MUSEO DELL'OPERA DI SANTA CROCE, IL TEMPIETTO LONGOBARDO E IL RATTO DELLE SABINE.....	149
1. Museo dell'Opera di Santa Croce - Firenze.....	150
2. Tempietto Longobardo – Cividale del Friuli - Udine	165
3. Il modello del Ratto delle Sabine – Giambologna – Accademia (Firenze).....	178
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	191
APPENDICE 1	203
APPENDICE 2	211
BIBLIOGRAFIA.....	213

INTRODUZIONE

In fisica si riconosce che “nessun fenomeno fisico spontaneo è reversibile”, perciò “qualsiasi azione, incluso il naturale invecchiamento, causa una modifica irreversibile”. Questo risulta vero anche nel campo della conservazione delle opere d’arte, in cui restaurare o pulire un quadro causa un danno; immagazzinarlo, maneggiarlo o esporlo sono azioni non prive di danno; qualsiasi trattamento non potrà mai essere perfettamente reversibile. Perciò tranne rarissime eccezioni si può affermare che tutte le opere d’arte, come se fossero organismi viventi, subiscono uno spontaneo irreversibile degrado.

L’unica azione possibile è rallentare questo processo creando condizioni microclimatiche idonee per una buona conservazione che rendano meno frequenti gli interventi di restauro.

Creare delle condizioni ambientali idonee risulta spesso essere un problema molto complesso, in quanto le variabili in gioco sono numerose e i complessi fenomeni determinati dalla loro distribuzione devono essere considerati contemporaneamente e nelle loro dinamicità spaziali e temporali. Inoltre, la determinazione delle specifiche condizioni ambientali maggiormente idonee per quella particolare opera richiede una conoscenza dettagliata dell’ambiente in esame al fine di ottenere una totale visione delle problematiche in gioco.

È sempre auspicabile, quindi, un monitoraggio specifico in ogni ambiente museale, al fine di una mirata ottimizzazione delle condizioni microclimatiche.

Una fondamentale informazione in tali analisi è la conoscenza della temperatura superficiale, che permette, a differenza delle variabili microclimatiche, di ottenere indicazioni direttamente sullo stato di benessere dell'opera. Infatti essa è l'unica variabile di stato misurabile, che permette uno studio diretto sull'opera in maniera non invasiva. Bisogna, infatti, ricordare che nel campo dei Beni Culturali ci si trova spesso di fronte ad opere delicate, che non possono essere toccate, ma che tuttavia, proprio per la loro importanza culturale, richiedono continui controlli diretti del loro stato di benessere.

Da questo la necessità di utilizzare sensori che permettano, in maniera automatica e non invasiva, un monitoraggio in continuo della temperatura superficiale, sia nel tempo che nello spazio, supportando i gestori dei musei in una conservazione preventiva delle opere.

A tal fine in questo lavoro di tesi è stato usato un nuovo prototipo di sensore, recentemente sviluppato, basato sulla tecnologia radiometrica che, oltre a rispondere ai requisiti suddetti, avesse anche le caratteristiche di compattezza, maggiore accuratezza nelle misure, facilità di installazione e di utilizzo, anche da parte di personale meno esperto, nonché costi contenuti.

Il sistema rotante tri-dimensionale, su cui è stata montata la parte sensibile del nuovo puntatore all'infrarosso, permette infatti di

monitorare la temperatura superficiale a tempi determinati su una griglia di punti di misura pre-definita ad hoc, tramite un software facile da usare, in modo da registrare la temperatura superficiale nella sua distribuzione spaziale ed evoluzione temporale.

Al fine, inoltre, di ottenere delle misure più accurate in ogni nodo della griglia di misura è possibile settare, tramite un software di gestione appositamente sviluppato, il valore dell'emissività. L'esatto valore di ε viene definito preventivamente nei punti della superficie da monitorare mediante confronto tra le misure effettuate dal puntatore all'infrarosso e quelle ottenute da un sensore posto a contatto manualmente e molto sensibile; garantendo, quindi, un'elevata precisione nella misura della temperatura superficiale in ogni nodo della griglia.

Nel caso di opere collocate a grandi distanze, per le quali non è possibile l'utilizzo di sensori posti a contatto con la superficie, è importante conoscere a priori, per una più accurata misura della temperatura superficiale, l'esatto valore dell'emissività, dipendente da diverse variabili, tra cui la rugosità superficiale.

Tale dipendenza risulta essere molto importante nel campo dei Beni Culturali, in quanto si ha spesso a che fare con oggetti d'arte degradati, che presentano un'alta rugosità superficiale. In questo lavoro di tesi, quindi, al fine di ottenere dei valori di ε più accurati, sono stati effettuati esperimenti in laboratorio su campioni di vetro opportunamente preparati, per meglio comprendere la dipendenza tra rugosità superficiale ed emissività, poco indagata fino ad oggi.

L'obiettivo principale della tesi è stato, quindi, quello di sviluppare un sistema di controllo affidabile, preciso e automatico diretto principalmente ai gestori dei musei al fine di una conservazione preventiva delle opere d'arte.

Tale sistema di misura è stato infine provvisto, anche di un sistema di allarme, che si attiva quando vengono rilevate variazioni termiche, sia nello spazio che nel tempo, che possono essere considerate pericolose per il degrado delle opere d'arte. Il sistema di allarme è gestito tramite un software, in cui possono essere inseriti i range termici di tollerabilità propri di ogni singolo oggetto d'arte. Al fine di definire gli intervalli di temperatura ottimali di conservazione per i dipinti su tavola, presenti nella maggior parte dei musei europei, soprattutto italiani, in questo lavoro di tesi sono stati effettuati esperimenti su campioni di pioppo, in quanto è la specie legnosa più diffusa in Italia nel campo dei Beni Culturali.

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura hanno fin'ora evidenziato l'importanza delle variazioni di umidità relativa sul comportamento fisico del legno, definendo dei range di tollerabilità. In questo lavoro di tesi, invece, si è voluta porre l'attenzione sulle variazioni dimensionali del legno dovute alle sole variazioni di temperatura, introducendo, così, un ulteriore aspetto innovativo all'intero progetto di ricerca.

La tesi si sviluppa in sei capitoli di seguito descritti in maniera più dettagliata.

Nel primo capitolo viene fatta una panoramica delle principali problematiche presenti negli ambienti museali, con particolare attenzione all'importanza del monitoraggio della temperatura superficiale degli oggetti d'arte.

Il secondo capitolo prevede una descrizione dei sensori oggi più comunemente utilizzati nell'ambito dei Beni Culturali, mettendo in risalto vantaggi e svantaggi di ognuno.

Nel terzo capitolo viene affrontato il problema dell'emissività (ϵ) dei materiali, importante per un monitoraggio da remoto della temperatura degli oggetti d'arte. Vengono inoltre descritte le variabili da cui dipende tale parametro; in particolar modo è presa in considerazione la dipendenza della ϵ dalla rugosità superficiale, presentando i risultati ottenuti da prove fatte in laboratorio.

Il capitolo 4 contiene una descrizione del nuovo sensore per la misura da remoto della temperatura superficiale, sviluppato da uno spin-off dell'ISAC-CNR. Verranno descritte tutte le problematiche affrontate, al fine di ottenere una misura più accurata e non invasiva della temperatura superficiale.

Nel capitolo 5 viene fatta una descrizione delle principali cause di degrado dei dipinti su tavola, ponendo maggiore attenzione sull'influenza della temperatura. A tal proposito vengono descritti i primi risultati

ottenuti in laboratorio su campioni di pioppo opportunamente scelti, in quanto i principali costituenti delle opere lignee in Italia.

Infine nel capitolo 6 verrà fatta una descrizione di tre casi studio: Museo dell'Opera di Santa Croce a Firenze, Tempietto Longobardo a Cividale del Friuli (Udine) e il modello del Ratto delle Sabine del Giambologna, conservato all'accademia di Firenze. Tali studi hanno permesso di far fronte direttamente in campo alle numerose problematiche relative alla conservazione delle opere d'arte, come anche ai problemi di applicabilità dei sensori di temperatura a remoto nel campo dei Beni Culturali.

Capitolo 1

MICROCLIMATOLOGIA NEGLI AMBIENTI MUSEALI

Tutti i processi fisici, chimici e biologici che intervengono nel degrado delle opere d'arte sono strettamente correlati al microclima, ovvero alle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente circostante, che ne influenza l'avvio, ne regola la velocità di reazione e/o il successivo sviluppo. Risulta, quindi, indispensabile creare condizioni ambientali idonee per la prevenzione del degrado dei materiali che costituiscono l'opera d'arte così da rendere meno frequenti gli interventi di restauro. Questi ultimi, infatti, implicano un degrado già avvenuto, portando ad una perdita dell'originalità dell'opera.

Il monitoraggio microclimatico prevede innanzitutto un'attenta analisi dell'ambiente che circonda l'opera d'arte sia nella naturale evoluzione temporale (giorno- notte, stagioni, ecc..), sia in presenza di forzanti esterne (condizionamento/riscaldamento, illuminazione, aperture di porte esterne, visitatori, ecc..) per la maggior parte legate alla fruizione e

gestione dell'ambiente. Ciò permette di ottimizzare le condizioni ambientali, cercando di arrivare ad una stabilità su condizioni idonee auspicabile in ogni luogo che voglia contenere opere di particolare prestigio.

1. Parametri termo-igrometrici

In una attenta analisi del microclima i principali parametri termo-igrometrici che devono essere studiati sono:

- temperatura (T) [°C] indica il livello di caldo o di freddo, dando una valutazione oggettiva alle nostre sensazioni.
- umidità specifica (US) [g/Kg] che esprime il rapporto tra il numero di molecole di vapore ed il numero di molecole di aria secca più quelle del vapore stesso. È una variabile indipendente da qualsiasi processo termodinamico che potrebbe interessare la massa d'aria in questione (quindi da temperatura e volume). La sua variazione è legata alla variazione del contenuto di vapore, che può avvenire in seguito, per esempio, ad evaporazione e condensazione.
- umidità relativa (UR) [%] indica, per una data temperatura, la quantità di vapore presente in quella massa d'aria rispetto a quanto ce ne sarebbe se fosse a saturazione. È una quantità dipendente sia dalla temperatura che dalla quantità di vapore. La variazione di

uno dei due parametri o di entrambi comporta una variazione dell'umidità relativa dell'aria che, come vedremo potrebbe essere molto dannoso per una buona conservazione delle opere d'arte.

- temperatura di rugiada (TR) [°C] indica la temperatura a cui deve essere portata la massa d'aria affinché divenga satura di vapore. In tali condizioni ha inizio il processo di condensazione sulle superfici, che come vedremo è uno dei più grandi problemi per la conservazione delle vetrate antiche.
- temperatura di bulbo bagnato (T_b) [°C] è definita come la temperatura di equilibrio termodinamico del bulbo di un termometro ricoperto da una garza bagnata, soggetta ad evaporazione forzata tramite ventilazione (3-5 m/s), con l'ambiente. Tale quantità permette la misura dell'umidità relativa ambientale.

Si rimanda all'appendice 1 per una descrizione più completa e dettagliata di tutti i parametri termo-igrometrici che entrano in gioco nei vari processi.

1.2. Gestione degli ambienti museali

Le problematiche che spesso emergono da un monitoraggio microclimatico sono legate principalmente alla gestione dell'ambiente che accoglie le opere d'arte [1][2]. Infatti, in assenza di forzanti, l'ambiente rimane indisturbato e i materiali, che costituiscono il manufatto, raggiungono l'equilibrio con il microclima interno, seguendo il naturale andamento termo-igrometrico ambientale. Al contrario la presenza di fattori perturbanti porta alla formazione di gradienti termo-igrometrici, sia spaziali che temporali, potenzialmente dannosi per l'integrità delle opere, in quanto continuamente sollecitate a reagire per riportarsi in equilibrio con le nuove condizioni ambientali.

Ad esempio i materiali organici, quali legno o carta, hanno bisogno di condizioni stabili in termini sia di temperatura che di umidità relativa. L'adsorbimento/deadsorbimento di umidità da parte del materiale o variazioni termiche, in seguito al continuo cambiamento delle variabili ambientali o della temperatura superficiale, portano a continue dilatazioni o contrazioni, quindi nel tempo a degrado dell'opera.

Variazioni termo-igrometriche inoltre non danno il tempo al materiale di raggiungere i nuovi valori di equilibrio che a loro volta continuano a cambiare. Una buona gestione del microclima ambientale risulta, quindi, fondamentale per poter stabilire le più idonee condizioni e inibire le variazioni, soprattutto quelle più rapide che risultano più o meno dannose in relazione al materiale.

Da questo punto di vista piuttosto complessa è la gestione degli impianti di riscaldamento/condizionamento/umidificazione. L'immissione di aria calda/fredda o di vapore in punti singolari, infatti, comporta gradienti termo-igrometrici spaziali continuamente variabili nel tempo. Inoltre bisogna prestare molta attenzione nel controllare il funzionamento di tali sistemi mediante sonde tarate su valori termo-igrometrici consigliati per due differenti ragioni: da una parte affidare il funzionamento degli impianti a delle sonde di controllo, che sono generalmente poste in punti singolari dell'ambiente, comporta spesso l'intermittenza del sistema con conseguenti continue variazioni termo-igrometriche; dall'altra occorre fare attenzione nel semplificare il problema fornendo dei "range di tollerabilità" [3][4][5][6][7].

Quest'ultimo aspetto non è assolutamente da sottovalutare in una adeguata gestione di un ambiente museale, in quanto ogni opera, caratterizzata da una propria natura chimico-fisica, ha delle proprie esigenze di conservazione dipendenti da diversi fattori, quali ad esempio la sua storia pregressa. Bisogna inoltre considerare che un'opera abituata ad un certo microclima se portata a differenti condizioni di conservazione, anche se indicate come ottimali, potrebbe eventualmente subire stress. I range di tollerabilità sono, quindi, da considerare come indicativi e non assoluti. Questo problema viene amplificato quanto più le opere d'arte stesse sono costituite da più materiali caratterizzati da una differente risposta alle variazioni dei parametri ambientali.

Un esempio molto importante può venire dall'utilizzo delle staffe metalliche per fissare le assi di legno nella realizzazione di un supporto pittorico, come descritto da Fioravanti e Uzielli [8]. Le diverse dilatazioni per effetto delle variazioni termo-igrometriche comportano stress spesso importanti nella struttura lignea che possono tradursi in fessurazioni, e conseguente perdita, della pellicola pittorica.

Le stesse valutazioni devono essere fatte anche per un solo tipo di materiale. Ad esempio si può parlare di legno in termini generici, ma le specie di legno presenti in natura sono tante e caratterizzate da un comportamento termo-igrometrico del tutto diverso l'una dall'altra. Il caso del legno è, tuttavia, molto complesso in quanto i diversi comportamenti si manifestano anche all'interno della stessa specie legnosa.

Per ogni opera d'arte occorrerebbe, quindi, un studio specifico per definirne le sue condizioni ottimali di conservazione

Quanto detto può dare un'idea dell'alto rischio a cui si va incontro nella taratura dei sistemi di riscaldamento/raffreddamento/umidificazione utilizzando "generali" range di tollerabilità per una buona conservazione delle opere d'arte.

Per una buona gestione bisogna, inoltre, porre attenzione al posizionamento delle opere, che devono essere poste il più lontano possibile dai punti di immissione di aria più calda o fredda. L'afflusso diretto di masse d'aria con caratteristiche termo-igrometriche diverse da quelle a cui le opere d'arte si sono poste in equilibrio nel tempo porta a

repentine variazioni delle condizioni di equilibrio delle opere con conseguenze, talvolta, deleterie per la conservazione del patrimonio culturale.

Un altro aspetto molto importante in una buona gestione dei musei riguarda l'illuminazione, sia essa naturale che artificiale. Parlare di illuminazione significa parlare di energia che necessariamente colpisce l'opera e assorbita dal materiale causa fenomeni che vanno dal semplice riscaldamento (causato principalmente alla radiazione IR), con conseguenti dilatazioni termiche, tensioni meccaniche da punto a punto, ecc..., a reazioni più complesse di tipo fisico o chimico (principalmente dovuta alla parte di spettro ultravioletto), quali ad esempio scolorimento dei pigmenti colorati e delle fibre tessili, screpolamento delle vernici, scollamento degli strati pittorici, ecc...

Oltre ad un effetto diretto sulle opere colpite, l'illuminazione agisce anche sull'ambiente per l'energia immessa. Il sistema di illuminazione è costituito, come nel caso degli impianti di riscaldamento/raffreddamento, da punti singolari di emissione energetiche che alterano pesantemente sia la quantità media di energia interna di un ambiente, variabile nel tempo, sia la sua distribuzione spaziale, verticale e orizzontale. Infatti, il rilascio di energia dai corpi illuminanti che costituiscono le lampade causa un riscaldamento dell'aria circostante che diviene più calda dell'aria ambiente. Questo causa la formazione di celle convettive che risalgono verso gli strati superiori, comportando movimenti d'aria verticali che si sviluppano tra lampada e soffitto. Ovviamente questi moti delle masse

d'aria con diverse caratteristiche termo-igrometriche alterano, ancora una volta, il normale equilibrio aria-ambiente, alimentando continui scambi tra l'aria e l'opera d'arte.

Un'ulteriore elemento che influenza il naturale equilibrio ambientale e quindi delle opere è rappresentato dalla presenza di pubblico. Un'elevata concentrazione di visitatori all'interno di una sala da esposizione può trasformare un ambiente di per sé idoneo alla conservazione in un ambiente con notevoli gradienti termo-igrometrici. Per esempio si stima che ogni ora una persona emetta almeno 50g/h di vapore acqueo per semplice respirazione e sudorazione. Per un intenso afflusso di persone come ad esempio quello nella Cappella Sistina, si può calcolare che una ordinaria presenza di pubblico (mediamente circa 6000 persone al giorno concentrate nelle poche ore di apertura) può comportare un'immissione di circa 150kg/ora di vapore nell'ambiente fino ad arrivare a punte di 250-300kg/ora nei giorni di massima affluenza, con circa 15000-17000 persone [7][6]. Tale quantità di vapore immesso nell'ambiente verrà nel tempo adsorbito dai materiali presenti, che successivamente, nelle ore notturne in cui il museo è chiuso, tenderanno a restituirlo all'ambiente [9]. Continui processi di adsorbimento/deadsorbimento si traducono, ancora una volta, in continui deformazioni dell'opera che possono nel tempo tradursi in rottura e quindi perdita della stessa.

Inoltre, la continua apertura delle porte per l'entrata e uscita del pubblico, contribuisce ad un ulteriore apporto di masse d'aria nell'ambiente con caratteristiche termo-igrometriche spesso diverse da quelle interne. Si

osservano, così, continui rimescolamenti tra le masse d'aria interne ed esterne, gradienti termici o igrometrici nelle sale da esposizione con conseguente sollecitazioni dei materiali in esposizione continuamente soggetti a condizioni ambientali variabili nel tempo e nello spazio.

Inoltre, più l'ambiente viene frequentato, più alta diviene la necessità di un ricambio dell'aria interna, spesso spalancando porte e finestre senza alcun controllo [10] o tramite condotti che collegano direttamente le sale da esposizione con l'esterno [11] con ovvie conseguenze sulle opere.

Un ultimo ma non meno importante fattore da tenere presente durante un monitoraggio microclimatico è legato alla semplice e quotidiana manovra delle pulizie degli ambienti. Durante le quali si osserva spesso, ad esempio, un aumento dell'umidità specifica, e quindi dell'umidità relativa, in seguito al lavaggio dei pavimenti.

Quindi un buono studio delle condizioni microclimatiche prevede da una parte la conoscenza dell'ambiente nel suo naturale comportamento, in funzione della sua struttura architettonica e della climatologia locale, studiandolo approfonditamente nei diversi cicli stagionali e giornalieri; dall'altra la valutazione della sua alterazione dovuta alla presenza delle forzanti descritte. Solo dopo averlo conosciuto nella sua specificità è possibile agire per creare delle condizioni idonee alla conservazione del patrimonio culturale ivi contenuto.

2. Temperatura superficiale

Come l'organismo umano reagisce alle variazioni ambientali in cui vive allo stesso modo qualsiasi opera d'arte reagirà alle variazioni termigrometriche dell'ambiente in cui è immerso. Ad esempio i parametri ambientali che regolano la sensazione di benessere del soggetto sono la temperatura dell'aria, che regola gli scambi termici per convezione, l'umidità relativa dell'aria, che influenza il tasso di evaporazione dell'acqua dal corpo verso l'ambiente, la temperatura radiante delle superfici, che regola gli scambi termici per irraggiamento e la velocità relativa dell'aria che regola lo scambio di calore per convezione ed evaporazione.

Le variazioni di alcune, o tutte, queste variabili, che nel soggetto si traducono in sensazione di caldo o freddo, nei materiali possono tradursi in variazione della loro temperatura superficiale.

La temperatura superficiale è, quindi, una variabile di stato misurabile che permette di conoscere lo stato di benessere del materiale in quel particolare microclima. Monitorare in continuo tale quantità consente, così, di prevenire l'originarsi di processi che potrebbero essere dannosi per l'opera.

2.1. Processi di degrado e monitoraggio della temperatura superficiale

I corpi immersi in ambienti soggetti a innalzamento termico o direttamente colpiti da radiazione (solare o artificiale) sono a loro volta sottoposti a riscaldamento. Lo strato superficiale del corpo è il primo a riscaldarsi e la propagazione del calore negli strati sottostanti avverrà con un certo ritardo, generando un gradiente termico tra superfici e strati interni. Questo induce espansioni differenziali nei materiali e formazione di forze di trazione/compressione tra la superficie e la struttura sub-superficiale. Inoltre, più rapide fluttuazioni della temperatura comportano una maggiore differenza termica tra strato superficiale e strato più interno (quindi generazione di forze di trazione maggiori) e conseguente più veloce invecchiamento e danno per lo strato superficiale dell'opera, che generalmente è la parte culturalmente più importante. Per una buona conservazione bisogna, quindi, limitare i cicli termici o almeno cercare di ottenere delle condizioni caratterizzate da fluttuazioni molto lente, così da dare al materiale il tempo di adattarsi alle nuove condizioni.

Tuttavia va ricordato che in reali condizioni i cicli termici lavorano sempre in perfetta sinergia con l'acqua contenuta all'interno del materiale. In condizioni di equilibrio dell'opera con l'ambiente, tale contenuto igrometrico viene definito come EMC (equilibrium moisture content), che rappresenta all'equilibrio la massa d'acqua contenuta per

unità di massa di materiale anidro (verrà affrontata in seguito in maniera più approfondita). Un aumento della temperatura comporta la rottura delle condizioni di equilibrio materiale-ambiente, attivazione del processo di evaporazione e conseguente variazione del contenuto di acqua nei materiali, cambi dimensionali, stress, fessurazioni e, infine, possibile degrado dell'opera. Un attento monitoraggio in continuo della temperatura superficiale, quindi, permette di prevenire l'instaurarsi di tali processi dannosi per la conservazione del nostro patrimonio culturale. In figura 1 è mostrato un esempio di distribuzione termica superficiale misurata sul dipinti di Francesco Salviati (Deposizione della Croce), conservato al museo dell'Opera di Santa Croce di Firenze. Si può notare il massimo termico dovuto al riscaldamento della tavola dipinta in seguito all'accensione del sistema di illuminazione diretto sulle opere.

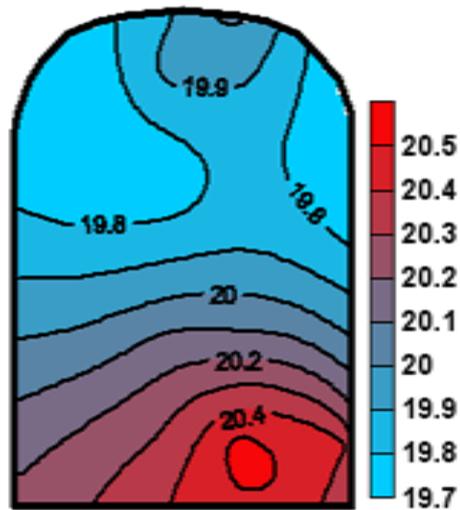


Figura 1: Distribuzione termica causata dal sistema di illuminazione diretto sulla superficie del dipinto di Francesco Salviati – Deposizione della Croce – museo dell’Opera di santa Croce –Firenze.

I processi di evaporazione sono anche dovuti a variazioni dell’umidità relativa dell’aria, che abbiamo visto essere dipendente dal contenuto di vapore nell’ambiente e dalla temperatura. Una diminuzione della umidità relativa ambientale si traduce in un raffreddamento della superficie dell’opera d’arte, in seguito alla sottrazione di calore latente al materiale da parte delle molecole di acqua evaporanti. Ancora una volta un monitoraggio in continuo della temperatura superficiale ci può dare un’indicazione dei processi in atto all’interno del materiale, che se non evitati potrebbero portare a degrado dell’opera d’arte.

Capitolo 2

TECNICHE DI MISURA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE

Per la misura della temperatura superficiale nel campo dei Beni Culturali sono possibili tre tipologie di sensori:

- sensori a contatto,
- sensori di quasi contatto,
- sensori a remoto.

Di seguito Per ogni tipologia di sensore elencheremo le caratteristiche principali, considerandone l'uso nel campo dei beni artistici.

1. Sensori a contatto

I sensori a contatto (Figura 2), generalmente utilizzati, sono delle sonde all'interno delle quali viene posta una termo-resistenza al platino (PT100), costituita da una resistenza elettrica al platino che cambia al

variare della temperatura, o un termistore. Questi ultimi sono costituiti da un materiale semiconduttore, i cui elementi subiscono una variazione di resistività elettrica in funzione della temperatura. Le misure che si possono fare possono essere molto precise e veloci. Le caratteristiche di tali strumenti dichiarati dalle case costruttrici sono, infatti, un'incertezza di $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e una costante di tempo di circa 1 sec.



Figura 2: Sensore a contatto.

Tuttavia le misure termiche a contatto sono molto delicate.

Quando i sensori sono messi a contatto con l'oggetto da monitorare scambiano calore con esso fino al raggiungimento dell'equilibrio termodinamico. Tuttavia, questo può essere compromesso da un cattivo

contatto con la superficie, lasciando il sensore e la superficie a differenti temperature. Il fenomeno si manifesta principalmente per superfici poco compatte e in generale quando la superficie è rugosa, così che solo pochi punti dell'oggetto sono in contatto con il sensore e l'aria tra le due superfici, essendo un ottimo isolante, porta ad un'alterazione delle misure.

Un ulteriore problema, nelle misure di temperatura a contatto, è che la parte esterna dei sensori, non a contatto con la superficie, può risentire dell'energia fornita dall'esterno, ad esempio per una diversa temperatura dell'aria o in seguito all'incidenza della radiazione solare. Si limitano tali effetti di disturbo con schermature e isolamenti.

Bisogna, inoltre, considerare che lo stesso sensore a contatto con la superficie risulta essere un fattore perturbante, soprattutto quando la superficie, ad esempio di un monumento, è riscaldata dalla radiazione solare. Infatti la superficie dell'oggetto che viene colpita dai raggi solari si riscalda, mentre l'area in cui il sensore è posto viene schermata e resta, quindi, più fredda. In questo caso il sensore scambia calore con lo strato superficiale più profondo arrivando in equilibrio termico con esso. In tal caso, quindi, la temperatura misurata non è quella superficiale dell'oggetto, ma degli strati sottostanti più freddi. Al contrario durante la notte, quando la superficie del monumento rilascia calore raffreddandosi, l'area sottostante al sensore resta più calda.

In condizioni stazionarie è assunto che il corpo è in equilibrio termico con l'ambiente. Quando il sensore è messo a contatto con la superficie ne

altera il bilancio termico radiativo, così come lo scambio termico per convezione e conduzione. Anche in questo caso, quindi, la presenza di un sensore a contatto altera localmente la distribuzione termica superficiale dell'oggetto. Il sensore genera un nuovo flusso di calore da e verso la superficie, e dove il contatto non è ideale viene introdotta una resistenza termica. In condizioni dinamiche, invece, la differenza tra la temperatura reale dell'oggetto e quella misurata è maggiore quando la risposta del sensore è più lenta della risposta del corpo alle variazioni termiche; in pratica questo avviene sempre a causa della perturbazione degli scambi termici dell'oggetto con l'ambiente da parte del sensore.

Solo quando il bilancio termico radiativo non influenza fortemente la temperatura superficiale dell'oggetto e le condizioni ambientali rimangono stazionarie per un tempo abbastanza lungo, le misure divengono rappresentative della temperatura superficiale.

Da quanto detto si evince che misure a contatto non adeguatamente eseguite o interpretate senza tener conto delle modalità operative possono, quindi, facilmente portare a risultati erranei. È opportuno, quindi, essere sempre molto critici e accorti nell'utilizzo dei sensori a contatto.

2. Principi della radiazione termica

La radiazione elettromagnetica che corrisponde alla trasmissione di calore è detta radiazione termica. Essa è emessa a causa di moti vibratorii

e rotatori delle molecole e degli atomi di una sostanza ed è estesa (Fig..) nel campo di lunghezze d'onda da 10^{-2} μm (UV) fino a 10^2 μm , corrispondente al campo dell'infrarosso.

Per meglio comprendere il comportamento dei corpi reali rispetto allo scambio termico si fa ricorso alla definizione di corpo nero, definito come perfetto emettitore e assorbitore di radiazione. Esso infatti emette la massima radiazione per ogni temperatura e per ogni lunghezza d'onda ed assorbe in egual modo, tutta la radiazione incidente, indipendentemente dalla lunghezza d'onda e dall'angolo di incidenza.

L'emissione di un corpo nero è descritto dalla, ormai nota, legge di Planck (rappresentata graficamente in figura 3):

$$W_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} [\text{Watt}/\text{m}^2, \mu\text{m}],$$

con $W_{\lambda b}$ emittanza energetica spettrale; h costante di Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ J sec; k costante di Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ J/K; c velocità della luce = 3×10^8 m/s.

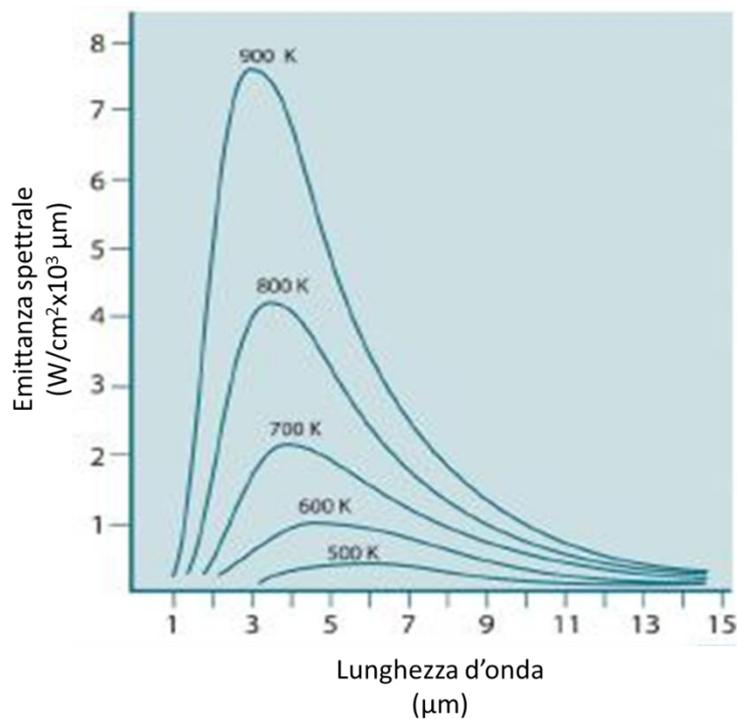


Figura 3: Emittanza energetica spettrale di un corpo nero, secondo la legge di Planck, rappresentata graficamente per diverse temperature assolute.

La lunghezza d'onda a cui si verifica la massima emissione, per una data temperatura del corpo, è data dalla legge di Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m],$$

la quale indica che all'aumentare della temperatura la massima emissione del corpo si ha per lunghezze d'onda sempre minori. Da questo si ha, ad

esempio, che per un corpo a temperatura ambiente (~ 300 K) il picco di emittanza spettrale si trova a $9,7 \mu\text{m}$.

Infine l'emittanza radiante totale per un corpo nero è data dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$W_b(T) = \sigma T^4 [\text{Watt}/\text{m}^2].$$

L'emissione di un corpo reale è legata a quella di corpo nero mediante la relazione:

$$\varepsilon(T) = \frac{W_{og}(T)}{W_b(T)},$$

che definisce la frazione di radiazione emessa da un oggetto reale rispetto a quella emessa da un corpo nero alla stessa temperatura, ed è detta emissività. L'equazione di Stefan-Boltzmann per un corpo reale diviene, quindi:

$$W_{og}(T) = \varepsilon(T)W_b(T),$$

la quale dimostra che il potere emissivo totale di un emettitore reale è identico a quello di un corpo nero alla stessa temperatura ridotta rispetto al valore di ε . Per una data temperatura tale relazione diviene:

$$W_{og} = \varepsilon \sigma T^4.$$

L'emissività, che per il corpo nero è uguale all'unità, per i corpi reali risulta essere sempre minore di 1. Infatti una radiazione incidente sulla superficie di un corpo reale può essere trasmessa, riflessa e assorbita (Figura 4); pertanto possono essere definiti i seguenti coefficienti:

- **Coefficiente di assorbimento α** : rapporto tra la radiazione assorbita e quella incidente,
- **Coefficiente di riflessione ρ** : rapporto tra la radiazione riflessa dalla superficie del corpo e la radiazione incidente,
- **Coefficiente di trasmissione τ** : rapporto tra la radiazione trasmessa attraverso la superficie e la radiazione che vi incide.

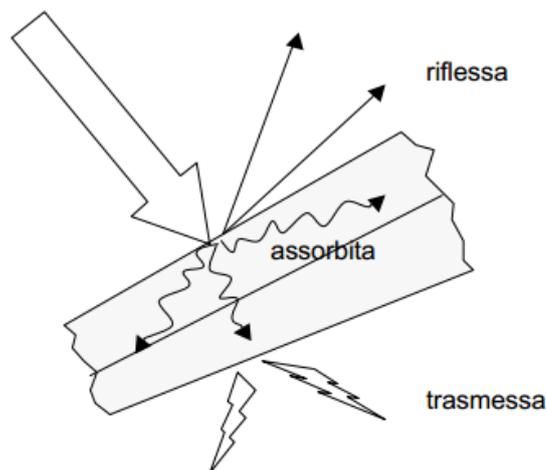


Figura 4: Assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione incidente per un corpo reale.

Dal principio di conservazione di energia si ha che:

$$I_{tot} = I_{ass} + I_{rifl} + I_{tras} ,$$

dove la quantità I è detta irradianza ed indica la quantità di radiazione incidente su una superficie. Da questa si ha che:

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

Ogni coefficiente ha un valore compreso tra zero e uno dipendente, ovviamente, dalla sua capacità di assorbire, riflettere e trasmettere la radiazione.

Per oggetti opachi si ha che $\tau = 0$ e di conseguenza la radiazione incidente può essere solo assorbita o riflessa, la relazione diventa quindi:

$$1 = \alpha + \rho.$$

Dalla legge di Kirchoff :

$$\alpha = \varepsilon,$$

ovvero la quantità di radiazione assorbita è uguale alla quantità di radiazione emessa dal corpo. Quindi la relazione per i corpi reali opachi diviene:

$$1 = \varepsilon + \rho,$$

che per un corpo nero, caratterizzato da un coefficiente di riflessione nullo, è $\varepsilon = 1$.

2.1. Sensori di quasi-contatto

I sensori di quasi-contatto (Figura 5) sono costituiti da uno schermo parabolico metallico (acciaio inox) esternamente riflettente ($\varepsilon = 0,07$), che permette di eliminare la radiazione infrarossa emessa o riflessa dagli altri corpi circostanti all'oggetto di misura. All'interno, invece, concentra sulla parte sensibile dello strumento tutta la radiazione diretta e diffusa emessa dalla superficie in esame. Questo schermo in pratica realizza una cavità virtuale di "corpo nero", come se il sensore venisse a trovarsi in equilibrio radiante all'interno del corpo. La temperatura misurata è, quindi, quella di equilibrio tra la radiazione emessa dalla superficie misurata e quella irraggiata dall'assorbitore.



Figura 5: Sensore di quasi- contatto.

In figura 6 è mostrato uno schema del funzionamento del sensore di temperatura di quasi contatto, in cui si vede la cavità parabolica che permette di raccogliere tutta la radiazione proveniente dalla superficie e dirigerla, mediante riflessione, verso la parte sensibile. Raccogliendo tutta la radiazione emessa, la cavità si comporta come un corpo nero perfetto e la misurazione non richiede la conoscenza dell' emissività del corpo, che emette secondo la legge di Stefan-Boltzmann.

I sensori di quasi-contatto sono caratterizzati da una risoluzione di $0,1^{\circ}\text{C}$ e un errore di $\pm 1\%$ di lettura massima, fortemente dipendente dalla modalità di misura. Infatti, tali sensori devono essere posti in prossimità della superficie senza sfiorarla, per essere certi che la parte sensibile non sia colpita da radiazione spuria, proveniente dagli altri corpi circostanti e/o riflessa dalla superficie in esame.

Nel campo dei Beni Culturali tali tipi di sensori sono preferibili rispetto

ai sensori di temperatura a contatto, in quanto spesso si ha a che fare con superfici delicate e preziose che non possono essere toccate. Questi sensori permettono, anche, di eliminare il rischio di contaminazione o di danneggiamento della superficie degli oggetti misurati.

Tuttavia ci si trova, quasi sempre, di fronte a delle opere d'arte lontane e difficili da raggiungere, dove si è impossibilitati anche ad utilizzare sensori di quasi contatto. Per questo vengono spesso utilizzati sensori a remoto, che permettono una misura della temperatura superficiale a grandi distanze.

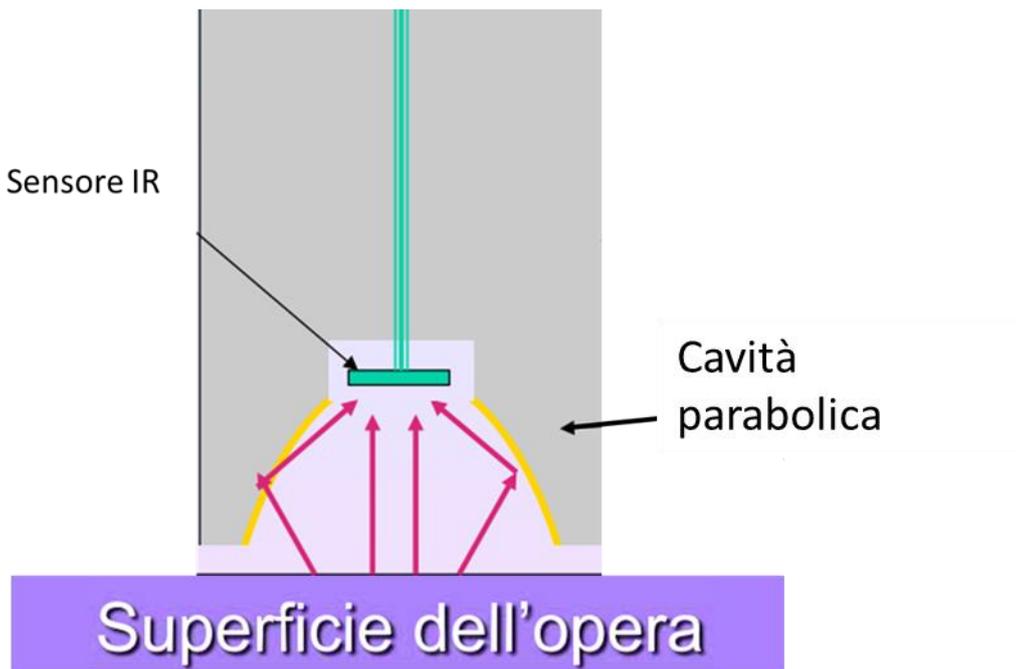


Figura 6: Schema di funzionamento del sensore di quasi contatto.

2.2. Sensori a remoto

I sensori di temperatura a remoto più comunemente utilizzati nell'ambito dei Beni Culturali sono radiometro e termo camera. Di seguito verrà fatta una descrizione più dettagliata dei due sensori, al fine di evidenziare i rispettivi vantaggi e svantaggi.

2.2.1. Radiometro

Il radiometro (Figura 7), chiamato anche termometro all'infrarosso, calcola la temperatura della superficie di corpi dalla potenza della radiazione infrarossa irradiata.



Figura 7: Radiometro o termometro all'infrarosso.

Nelle applicazioni più comuni il rivelatore è un bolometro, costituito da una termopila, in grado di assorbire la radiazione elettromagnetica generalmente compresa tra gli $8\mu\text{m} - 14\mu\text{m}$, termicamente isolato. La radiazione assorbita provoca un innalzamento della temperatura che può essere misurata con sensibili termometri, solitamente costituiti da una resistenza elettrica a filo di platino. In alcuni modelli il termometro è lo stesso elemento assorbente, in altri i due elementi sono distinti. Tali dispositivi misurano, quindi, l'energia emessa dal corpo in esame secondo la legge di Stefan-Boltzmann, dalla quale conoscendo il valore dell'emissività del corpo in esame si può risalire alla sua temperatura.

I radiometri sono, generalmente, caratterizzati da una bassa accuratezza, dell'ordine dei 2°C , a causa, sia della riflessione proveniente da altri corpi, che lo rende un sensore utilizzabile solo per oggetti opachi, che del contributo dell'atmosfera interposta tra l'oggetto e il sensore. La radiazione proveniente dalla superficie di misura, infatti, può essere attenuata, in qualche misura, dall'atmosfera nel percorso di misurazione. A queste deve aggiungersi una certa quantità di radiazione emessa dalla stessa atmosfera. Come mostrato in figura 8 l'atmosfera presenta delle zone di buona trasparenza, dette finestre atmosferiche, alternate ad altre di assoluta opacità. Si osserva che nel range di lunghezze d'onda a cui tali sensori lavorano, l'atmosfera è caratterizzata da un alto coefficiente di trasmissione ($\sim 80\%$); con minore effetto sulla misura, soprattutto se si lavora ad una distanza di pochi metri.

Nelle usuali condizioni di misura a cui si lavora nel campo dei Beni Culturali, tale contributo può essere trascurato; anche a causa dei valori di umidità relativa controllati che caratterizzano gli ambienti museali. Si può, infatti osservare in figura 8, che il vapore acqueo è il componente dell'aria maggiormente responsabile dell'assorbimento della radiazione infrarossa nelle finestre atmosferiche di interesse.

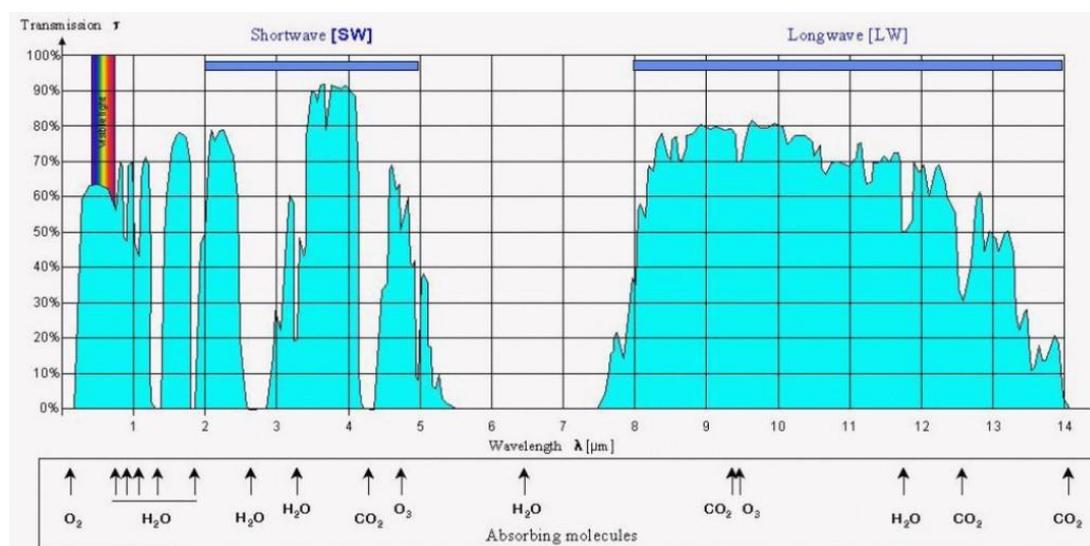


Figura 8: Trasmittanza dell'atmosfera valutata alla distanza di un miglio marino e componenti dell'aria maggiori responsabili dell'assorbimento della radiazione nei punti indicati.

2.2.2. Termo camera

La termografia è una tecnica di telerilevamento, effettuata tramite l'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso. Più precisamente questa gamma di strumenti permette, come il radiometro, di misurare

l'energia infrarossa emessa dai corpi e di correlarla alla temperatura superficiale del corpo stesso, sviluppando un'immagine digitale rappresentata in falsi colori.

Attraverso l'utilizzo della termo camera (Figura 9) è, perciò, possibile risalire alla mappa termica della "scena" inquadrata mediante l'interpretazione della radiazione percepita dall'elemento sensibile della termo camera stessa.



Figura 9: Termocamera

Le termo camere presenti oggi sul mercato si dividono in due tipologie: raffreddate e non raffreddate. Le prime presentano una più alta precisione nella misurazione e costituite da sensori miniaturizzati detti foto rilevatori, dispositivi realizzati con materiali semiconduttori nei quali il rilascio di cariche elettriche è direttamente proporzionale

all'assorbimento dei fotoni. Uno dei foto rilevatori più utilizzati è l'antimonio di indio (InSb), raffreddato alla temperatura dell'azoto liquido a 77 K, caratterizzato da un tempo di risposta inferiore a 1 μ s e da un spettro d'onda limitato all'intervallo tra i 2 μ m e i 5 μ m. La necessità di raffreddare il sensore deriva dal fatto che a basse temperature il sensore non emette radiazione ma ne assorbe in maniera proporzionale alla sua temperatura, riuscendo a delineare una mappatura delle varie temperature con una precisione più elevata, dovuta ad un migliore rapporto segnale/rumore, quanto più è freddo. La bassa temperatura del sensore, inoltre, va ad attenuare in maniera sensibile il rumore delle schede elettroniche e del sensore stesso.

Le termo camere non raffreddate, chiamate anche microbolometriche, differiscono dalle precedenti perché non necessitano di un sistema di raffreddamento. Il micro bolometro, che costituisce la parte sensibile di tali termo camere, è costituito da una matrice di rilevatori divisibili in due categorie: i sensori termici e i sensori a quanti. I primi, costituiti da materiali metallici o semiconduttori, sono generalmente più economici rispetto ai secondi e hanno una buona risposta su tutto il range di lunghezze d'onda (8 μ m - 14 μ m), con un tempo di risposta maggiore dei sensori a quanti. Questi ultimi operano in base all'effetto fotoelettrico, ovvero sono costituiti da materiali che assorbono fotoni nel range di lunghezze d'onda richiesto e sono in grado di aumentare il livello energetico degli elettroni, determinando la formazione di un potenziale elettrico.

In figura 10 sono mostrati i range di lunghezza d'onda a cui i detector

costituenti le termo camere, più diffuse oggi nel mercato, lavorano.

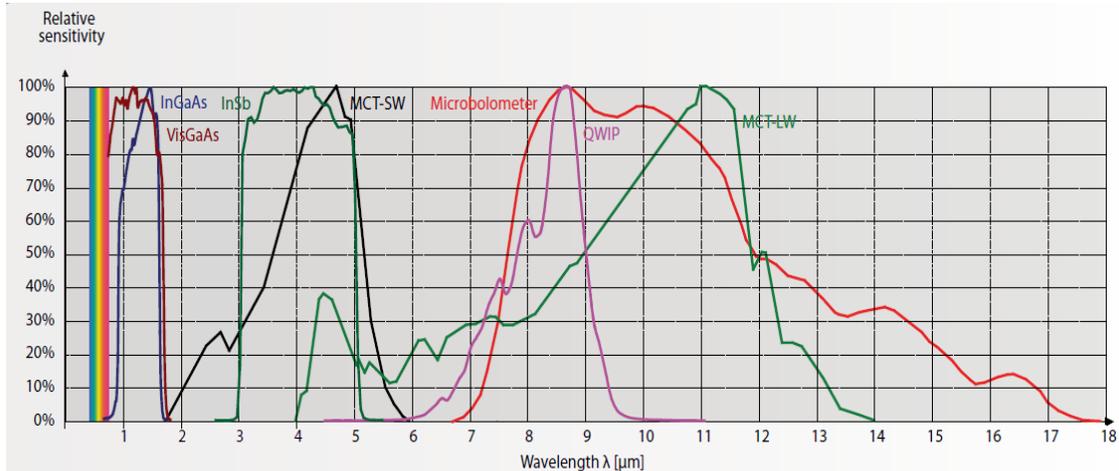


Figura 10: Risposta spettrale dei principali detector costituenti le termo camere.

A differenza del radiometro, l'analisi termografica permette, tramite software, di eliminare la radiazione riflessa dalla superficie misurata, così da renderla utilizzabile per qualsiasi tipo di superficie; anche se l'accuratezza ottenibile nella misura di oggetti caratterizzati da un alto coefficiente di riflessione diviene molto più bassa.

In figura 11 sono schematizzate le grandezze utilizzate nell'equazione di calcolo della termo camera, di seguito esposta:

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{ogg} + (1 - \varepsilon)\tau W_{rifl} + (1 - \tau)W_{atm},$$

dove W_{tot} è l'energia totale irradiata ricevuta dalla termocamera; $\varepsilon\tau W_{ogg}$ è la quantità di energia ricevuta dall'oggetto a temperatura T_{ogg} , con ε

emissività del corpo e τ è la trasmittanza dell'atmosfera. $(1-\varepsilon)\tau W_{\text{refl}}$ è la quantità di energia riflessa dall'oggetto e ricevuta dalla termo camera, dove $(1-\varepsilon)$ è la riflettanza dell'oggetto, ed infine $(1-\tau)W_{\text{atm}}$ è l'emissione dall'atmosfera, in cui $(1-\tau)$ definisce l'emittanza dell'atmosfera a temperatura T_{atm} . Quest'ultima grandezza, come già precedentemente esposto, può essere trascurata nelle usuali condizioni di misura nel campo dei Beni Culturali.

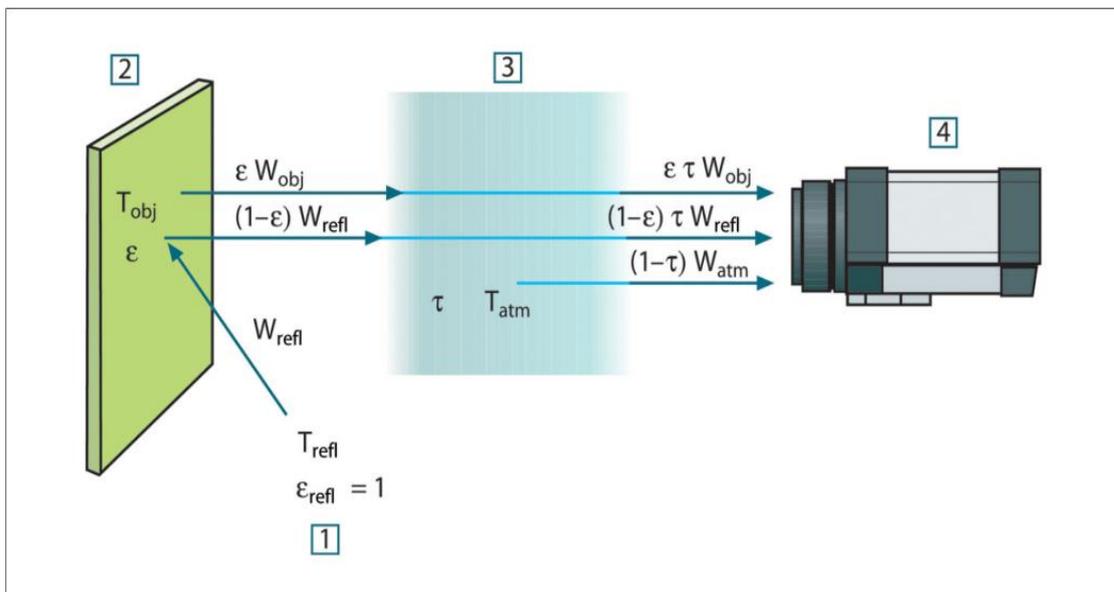


Figura 11: Rappresentazione schematica della situazione di misurazione termografica generale; in cui 1 rappresenta l'area circostante, 2 l'oggetto da misurare, 3 l'atmosfera interposta tra la termo camera e l'oggetto, 4 termocamera.

In tale trattazione si suppone che la temperatura degli oggetti circostanti sia la stessa per tutti e pari a T_{refl} ; inoltre viene fatta l'ipotesi che

l'emissività totale dell'area circostante l'oggetto sia 1. Quest'ultima ipotesi può essere considerata valida se si suppone che tutte le radiazioni che urtano le superfici dell'area circostante un oggetto verranno alla fine assorbite dalle superfici stesse.

L'accuratezza ottenibile tramite analisi termografica è dell'ordine di $\pm 2^{\circ}\text{C}$, poiché essa non ha come obiettivo la misurazione assoluta dell'oggetto, ma piuttosto va considerata un'analisi per comparazione.

Le limitazioni all'uso della termografia sono legate all'alto costo dell'apparecchiatura e alla necessità di un operatore esperto per l'utilizzo e l'analisi dei dati. Quest'ultimo aspetto risulta essere molto importante, soprattutto quando si ha la necessità di monitorare contemporaneamente oggetti caratterizzati da emissività diversa. Infatti, a differenza del radiometro, che essendo una misura puntuale permette di settare volta per volta il valore "esatto" dell'emissività, durante l'analisi termografica il valore di ϵ viene settato per l'intera area monitorata. Solo in un secondo momento, mediante l'utilizzo di sofisticati software è possibile analizzare le immagini termografiche, variando opportunamente il valore di ϵ e ottenere dei risultati più accurati.

Dalla necessità di un monitoraggio automatizzato puntuale e in continuo, sia nello spazio che nel tempo, per una più accurata misura della temperatura superficiale degli oggetti d'arte, al fine di una migliore conservazione del nostro patrimonio culturale, è stato sviluppato un nuovo sensore a remoto, di seguito descritto, che cerca di unire le

caratteristiche del radiometro e termo camera. Infatti da una parte permette un'analisi puntuale della superficie più accurata anche quando si vogliono misurare superfici caratterizzate da emissività diversa, dall'altra permette un monitoraggio in continuo, sia nello spazio che nel tempo, al fine di ottenere delle mappe termiche dell'intera superficie sia spaziali che temporali, che non richiedono l'intervento di un operatore esperto. Inoltre nell'equazione di calcolo si tiene conto del contributo atmosferico e della radiazione riflessa dall'oggetto alla radiazione totale incidente sul sensore.

Capitolo 3

EMISSIVITA' DELLE SUPERFICI NEI BENI CULTURALI

Per una buona conservazione delle opere d'arte, abbiamo visto, essere molto importante un attento monitoraggio sia delle variabili termometriche che della temperatura superficiale degli oggetti d'arte. Quest'ultima, infatti, è molto importante nell'analisi dei flussi di calore, e quindi dei cicli termo-igrometrici che interessano l'oggetto in questione, nonché nello studio del processo di condensazione superficiale. La formazione di acqua sulla superficie di materiali poco igroscopici, quali ad esempio il vetro, è la causa di importanti fenomeni di deterioramento quali la corrosione [12][13]. La condensazione su una superficie avviene quando la temperatura di quest'ultima risulta inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria antistante; una accurata misura della temperatura superficiale può, quindi, diventare molto importante per la salvaguardia delle importanti vetrate artistiche.

Inoltre deve essere ricordato che nel campo dei beni culturali non è sempre possibile poter utilizzare sensori di temperatura a contatto, che per quanto più precisi, come già descritto, soffrono di altre problematiche. Ad esempio richiedono un perfetto contatto con la superficie difficile da raggiungere soprattutto quando si ha a che fare con superfici degradate; inoltre molto spesso tali superfici non sono raggiungibili o addirittura non possono essere toccate per il loro grande valore culturale e artistico.

Da questo si evince la necessità di utilizzare sensori a remoto che possano dare valori di temperatura il più vicino possibile a quelli reali e ciò implica avere più precisi valori di emissività.

Abbiamo definito nel capitolo 2 l'emissività di un corpo come la frazione di energia irraggiata da un dato materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura. Essa misura, quindi, la capacità di un dato materiale di irraggiare energia. Oltre che dalla tipologia di materiale, l'emissività dipende anche dalla temperatura del corpo stesso, dall'angolo di emissione e dalla lunghezza d'onda. L'emittanza monocromatica $[W_{\lambda,\theta}(T)]$ viene definita come la potenza radiante emessa alla lunghezza d'onda λ nella direzione (θ,φ) per unità di area emittente normale alla direzione considerata ($dA \cos\theta$), per unità di angolo solido ($d\omega$) e per unità di intervallo di lunghezza d'onda ($d\lambda$). Detta dq la potenza irradiata la $i_{\lambda,\theta}$ è data da:

$$W_{\lambda,\theta}(T) = \frac{dq}{dA \cos\theta d\omega d\lambda}$$

e viene misurata in [Watt/(m²sr μm)].

Possiamo, ora, definire l'emissività monocromatica direzionale $\varepsilon_{\lambda,\theta}(T)$ come:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(T) = \frac{W_{\lambda,\theta}(T)}{W_{\lambda,\theta,b}(T)}$$

con $W_{\lambda,\theta,b}$ emissione monocromatica direzionale del corpo nero che sia alla stessa temperatura del corpo. Da tale relazione si evince, così, che l'emissività del corpo dipenderà dalla lunghezza d'onda del corpo, dall'angolo di emissione e dalla sua temperatura.

Generalmente, nelle applicazioni pratiche, viene fatta la cosiddetta approssimazione di corpo grigio, definito come un emettitore caratterizzato da una emissività minore di uno e indipendente sia dalla lunghezza d'onda che dalla direzione di emissione (diffusore perfetto). Nell'approssimazione di corpo grigio, quindi, l'emissività del corpo è dipendente dalla sola temperatura, ed è data da:

$$\varepsilon(T) = \frac{W_{og}(T)}{W_b(T)};$$

mentre per un emettitore perfettamente diffondente l'emissività dipenderà sia dalla lunghezza d'onda che dalla temperatura, ed è data dalla seguente

relazione:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{W_{\lambda,og}(T)}{W_{\lambda,b}(T)}.$$

In base, quindi, al comportamento emissivo degli oggetti possiamo definire tre “tipologie” di superfici:

- ❖ Superficie nera $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\theta} = \varepsilon = 1$;
- ❖ Superficie grigia $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\theta} = \varepsilon < 1$: in questo caso l'emissione del corpo è del tutto indipendente sia dalla lunghezza d'onda λ che dalla direzione θ ;
- ❖ Superficie reale $\varepsilon_{\lambda,\theta}$: l'emissività varia al variare sia della lunghezza d'onda λ che della direzione θ .

L'emissività e l'emittanza relative alle tre tipologie di superfici sopradescritte sono mostrate in figura 12, in cui la dipendenza dall'angolo di emissione viene trascurata.

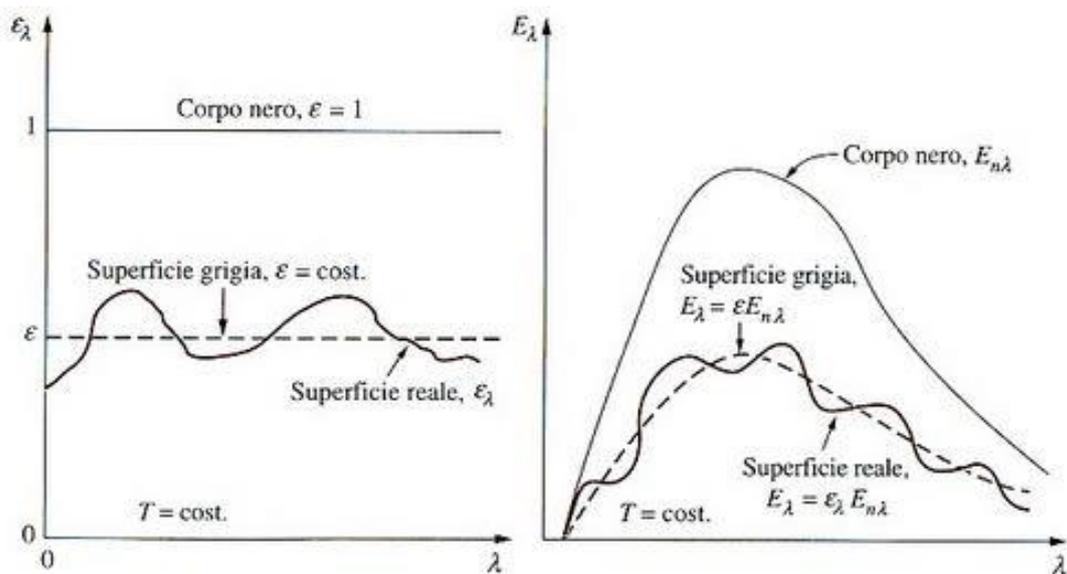


Figura 12: Differenza tra emissività spettrale ed emittanza spettrale tra un corpo grigio e nero rispettivamente. È qui trascurata la dipendenza dall'angolo di emissione

È di facile intuizione capire come un'approssimazione di corpo grigio, nella misura della temperatura superficiale, possa introdurre errori più o meno significativi a seconda di quanto grandi sono le differenze tra emissività monocromatica di un corpo e la sua emissività globale.

In letteratura si trovano valori della ϵ_λ specifici per diversi materiali e relativi ad una data temperatura o range di temperatura, in cui viene fatta la sola approssimazione di superficie perfettamente diffondente.

Tale dipendenza può essere trascurata nel caso in cui il sensore utilizzato per la misura della temperatura superficiale sia sensibile ad un certo range di lunghezze d'onda. In questo caso, infatti, l'emissività è calcolata

integrando i singoli valori spettrali entro l'intervallo di interesse, commettendo un errore tanto più piccolo quanto più il corpo in quell'intervallo di lunghezze d'onda si comporta come un corpo nero.

Come esempio in tabella 1 sono indicati i valori dell'emissività per alcuni dei materiali più diffusi nel campo dei Beni Culturali [50], riferiti ai range spettrali tipicamente utilizzati dall'analisi termografica e alle temperature di interesse.

Come descritto nel capitolo 2, nel processo di scambio termico per irraggiamento, l'emissività di un corpo è correlabile al coefficiente di assorbimento secondo la legge di Kirkhoff. Tale relazione possiamo riscriverla, per le diverse tipologie di materiale, come segue:

- $\alpha_{\lambda,\theta} = \varepsilon_{\lambda,\theta}$: l'emissività monocromatica direzionale risulta uguale al coefficiente di assorbimento monocromatico direzionale e questa relazione è valida per tutte le tipologie di superfici.
- $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$: l'emissività monocromatica risulta uguale al coefficiente di assorbimento monocromatico. Tale relazione è valida se la superficie del corpo emette in modo diffuso.
- $\alpha = \varepsilon$: l'emissività globale è uguale al coefficiente di assorbimento globale. Risulta valida nel caso di corpi neri e grigi.

Da quanto detto consegue che non è sempre possibile stabilire univocamente l'emissività di un corpo reale; ma risulta fondamentale uno

studio specifico per le diverse superfici per una più accurata misura della temperatura superficiale.

Tuttavia nello spettro IR al di sopra dei 5 μm , la maggior parte dei materiali è caratterizzata da curve spettrali molto simili (scalata dal coefficiente di emissione) a quella di un corpo nero consentendo, quindi, misure accurate.

Materiale	Specifiche	Temperatura (°C)	Range spettrale	emissività
Bronzo	Poroso, ruvido	50-150	[2-20] μm	0,55
Gesso	Prima mano di intonaco	20	[2-20] μm	0,91
Gesso idrato		20	[2-20] μm	0,8-0,9
Legno	Bianco, umido	20	[2-20] μm	0,7 – 0,8
Legno	Quercia piallata	70	[8-14] μm	0,88
Legno	Pino, 4 campioni differenti	70	[8-14] μm	0,81 – 0,89
Mattone	Muratura, intonacato	20	[2-20] μm	0,94
Oro	Lucidato	130	[2-20] μm	0,02 – 0,03
Stucco	Ruvido calce	10-90	[2-20] μm	0,91
Porcellana	Bianca, brillante		[2-20] μm	0,70 – 0,75
Porcellana	Vetrificata	20	[2-20] μm	0,92

Tabella 1: Valori di emissività di alcuni materiali più diffusi nel campo dei beni culturali – (FLIR- Systems – manuale per l'utente).

1.1. Dipendenza dell'emissività dalla rugosità superficiale

Oltre che dalle variabili sopra descritte l'emissività può essere influenzata anche dalla finitura superficiale dell'oggetto. Per finitura superficiale si intende sia la rugosità della superficie del corpo che l'eventuale presenza di inclusioni estranee o zone chimicamente o fisicamente alterate. Quest'ultimo aspetto è stato studiato da Brodu et al. 2013 [14] su leghe di alluminio.

Nel campo dei Beni Culturali questo aspetto potrebbe risultare molto importante a causa del diverso degrado e , quindi, del diverso stato di finitura che caratterizza le superfici.

L'influenza dello stato superficiale sul valore di emissività è stata già messa in evidenza sia sperimentalmente [14][15][16][17][18][19], soprattutto per materiali metallici, che attraverso modelli [17], [20], [21],[22], [23], [24], [25].

Le diverse sperimentazioni evidenziano una forte influenza della rugosità sull'emissività spettrale per differenti leghe di alluminio[15][16][17], come anche l'influenza delle microstrutture superficiali per la grafite [20]. È stato osservato un aumento dell' emissività, per tutte le lunghezze d'onda di osservazione, con le dimensioni di microstrutture e rugosità superficiali. È evidenziata, inoltre, una relazione tra le dimensioni delle rugosità superficiali e la distribuzione delle emissività spettrali. Ad esempio Chang-Da Wen et al. 2004 [16], calcolando l'emissività

spettrale nel range (2,05 μm – 4,72 μm) per leghe di alluminio, hanno evidenziato che, per superfici con più piccole finiture superficiali, l'emissività spettrale decresce fino ad un valore della lunghezza d'onda di 3,5 μm per poi crescere leggermente per valori maggiori di λ . Tale andamento non è osservato, invece, per superfici caratterizzate da maggiori dimensioni delle rugosità, per le quali l'emissività continua a decrescere all'aumentare della lunghezza d'onda. In tali studi è, quindi, messo in evidenza come le dimensioni delle rugosità superficiali influenzino il comportamento emissivo della superficie in relazione alla lunghezza d'onda di osservazione.

Usando l'ottica geometrica un modello è stato proposto per determinare l'emissività di un corpo grigio caratterizzato da una rugosità superficiale [21].

L'emissività per differenti rugosità superficiali può essere espressa come:

$$\varepsilon_i = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - 1 \right) \frac{R_i}{R_k} \right]^{-1},$$

con ε_i e ε_k i valori dell'emissività dello stesso materiale con diversa rugosità superficiale. Mentre R_i e R_k sono i fattori di rugosità delle due superfici considerate.

Nel caso di superfici levigate la relazione diventa:

$$\varepsilon_r = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right) R \right]^{-1},$$

dove ε_r , ε_s sono le emissività della superficie ruvida e levigata rispettivamente; R il fattore di rugosità.

Allo scopo di approfondire tale relazione per i materiali più diffusi nell'ambito dei Beni Culturali sono stati realizzati esperimenti in laboratorio. L'obiettivo di tale studio è stato quello di definire quanto le caratteristiche delle superfici potessero influenzare il valore dell'emissività [51]

1.2. Analisi in laboratorio

Per poter isolare il solo contributo delle rugosità sulla emissività sono stati scelti campioni caratterizzati da superfici levigate così da rendere controllabile il processo di abrasione.

Per questo tra i materiali più diffusi nel campo dei Beni Culturali (legno, intonaco, ecc..) i campioni di vetro erano quelli che potevano rispondere meglio alle nostre esigenze. Infatti il legno, come l'intonaco, sono già di per se caratterizzati da una superficie non ben levigata, che avrebbe reso ardua la preparazione delle superfici in laboratorio; generando delle rugosità superficiali del tutto casuali.

I campioni di vetro utilizzati sono usuali vetrini da laboratorio (Thermo Scientific –glass slides) e non campioni di vetrate artistiche, in quanto queste ultime hanno, in gran parte, già subito processi di degrado, e sono, quindi, ormai caratterizzate da una rugosità superficiale che potrebbe influenzare la loro capacità di emissione.

I campioni sono stati opportunamente preparati in laboratorio; la rugosità è stata caratterizzata mediante Microscopio a Forza Atomica e Microscopio a Scansione Elettronica quindi successivamente associata ai valori di emissività relativa, ottenuta con tecnica termografica.

1.2.1. Proprietà ottiche del vetro

Come mostrato in figura 13 il vetro ordinario risulta opaco alla radiazione infrarossa per lunghezze d'onda maggiori di circa $4 \mu\text{m}$ [26]. Questo assicura che la trasmittanza del vetro è nulla e la radiazione incidente può essere o assorbita o riflessa. Questo è un ulteriore fattore che ha portato alla scelta di campioni da laboratorio e non campioni di vetrate artistiche, in quanto queste ultime hanno un comportamento ottico dipendente dalla loro composizione chimica, che rende l'applicabilità della tecnica termografica specifica caso per caso.

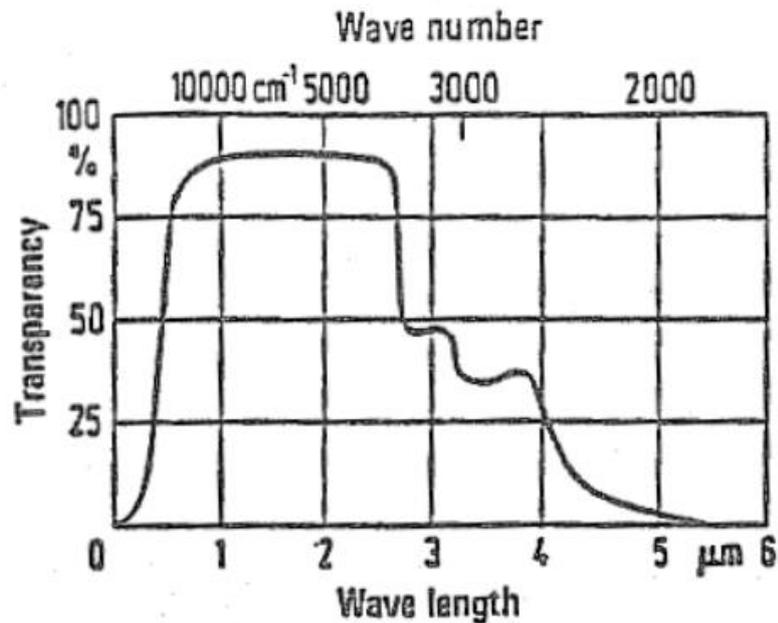


Figura 13: Trasparenza dei comuni vetri silicatici alle diverse lunghezze d'onda. Si osserva che per valori di λ maggiori di 5 μm il vetro risulta trasparente.

Per una buona diagnostica termografica bisogna tenere conto che il vetro è un buon riflettore speculare [26]. Nonostante la riflettanza del vetro a lunghezze d'onda infrarosse sia trascurabile, la sua caratteristica speculare può alterare l'immagine termografica e quindi portare a errori nella misura di temperatura.

1.2.2. Misura di emissività

Per un oggetto opaco di temperatura T_o ed emissività ϵ_m , immerso in un ambiente a temperatura T_a , l'intensità di radiazione misurata dalla termocamera è [27],[28]:

$$I_m = \varepsilon_m I_o + (1 - \varepsilon_m) I_a,$$

dove $\varepsilon_m I_o$ è l'intensità di radiazione emessa dalla superficie di un oggetto e $(1 - \varepsilon_m) I_a$ è l'intensità di radiazione ambientale riflessa dalla superficie dell'oggetto. In tale relazione viene trascurata l'intensità di radiazione assorbita ed emessa dall'atmosfera, in quanto la distanza tra l'oggetto e la termo camera è piccola.

Nel caso di una misura relativa, in cui un materiale è di riferimento (indicato dal pedice r) e l'altro è quello di cui si vuole conoscere il valore dell'emissività (indicato con il pedice m), il rapporto tra le emissività è dato da:

$$R = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_r} = \frac{I_m - I_a}{I_r - I_a},$$

con I_m , I_r e I_a le intensità di radiazione misurate dalla termo camera in corrispondenza del materiale di cui si vuole conoscere l'emissività, del materiale di riferimento e dell'ambiente rispettivamente.

In questo caso specifico il I_m e I_r si riferiscono allo stesso materiale caratterizzato, però, da una diversa rugosità superficiale.

Per una valutazione statistica più accurata di tale rapporto per ogni quantità sono state prese circa 200 misure, così da poter avere un appropriato

campione statistico. Il valore delle intensità è, quindi, dato dalla media sull'intero set di misure per ogni campione.

L'incertezza nella misura di emissività è calcolata mediante la teoria di propagazione degli errori, la cui equazione generale per una generica funzione $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ è:

$$\delta_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u_1} \Delta u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_2} \Delta u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial u_n} \Delta u_n\right)^2};$$

che nel caso specifico diventa:

$$\delta R = \sqrt{R^2 \left[\frac{(\partial I_m^2 + \partial I_a^2)}{(I_m - I_a)^2} + \frac{(\partial I_r^2 + \partial I_a^2)}{(I_r - I_a)^2} \right]}.$$

1.2.3. Metodologia sperimentale

L'apparato sperimentale per la misura di emissività consiste in una piastra di alluminio di circa due cm di spessore completamente colorata di nero, così da diminuire eventuali effetti di riflessione dovuti alla piastra

stessa. Essa è inserita verticalmente nell'apertura di un forno (Figura 14) da cui riceve calore e il suo spessore garantisce l'uniformità di temperatura dei campioni posti sulla superficie esterna.

Per migliorare il processo di conduzione tra campioni e la superficie della piastra di alluminio è stato interposto un sottile strato di pasta conduttiva eliminando eventuali intrusioni di aria, rendendo, così, più facile il processo di misura.



Figura 14: Apparato sperimentale utilizzato per scaldare i campioni di vetro durante il processo di misura. I campioni sono stati messi nella parte centrale della piastra di alluminio, al fine di evitare effetti di bordo.

I campioni sono stati riscaldati per circa 120 minuti, a 30°C e 50°C, così da raggiungere una condizione di equilibrio termico sulla superficie dei campioni. Questo ci ha permesso, anche, di studiare l'effetto della temperatura sul valore di emissività, entro il range termico di interesse per gli oggetti d'arte.

La radiazione riflessa è stata misurata utilizzando il metodo del riflettore [52] [53]. Il foglio di alluminio è stato posto nel campo di vista della termo camera e l'intensità di radiazione del "riflettore" è stata misurata mediante il software ThermoCamTM researcher durante il processo di analisi dati. Tale metodo ha permesso, però, di eliminare una intensità di radiazione riflessa costante per ogni campione, non tenendo conto della riflessione speculare specifica di ogni campione.

Le intensità sono misurate con una ThermoCam SC 3000 – QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector cooled – della Flir (Figura 15). Il range spettrale è compreso tra 8 e 9 μm (Figura 16), sensibilità di 20 mK a 30°C e accuratezza pari a $\pm 1^\circ\text{C}$ per temperature fino a 150°C, mentre di $\pm 2^\circ\text{C}$ oltre i 150°C. Durante l'acquisizione dei dati termografici la termo camera è posta ad un'angolazione fissa di 45° rispetto alla normale alla superficie.



Figura 15: ThermoCam SC 3000 – QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector cooled – della Flir

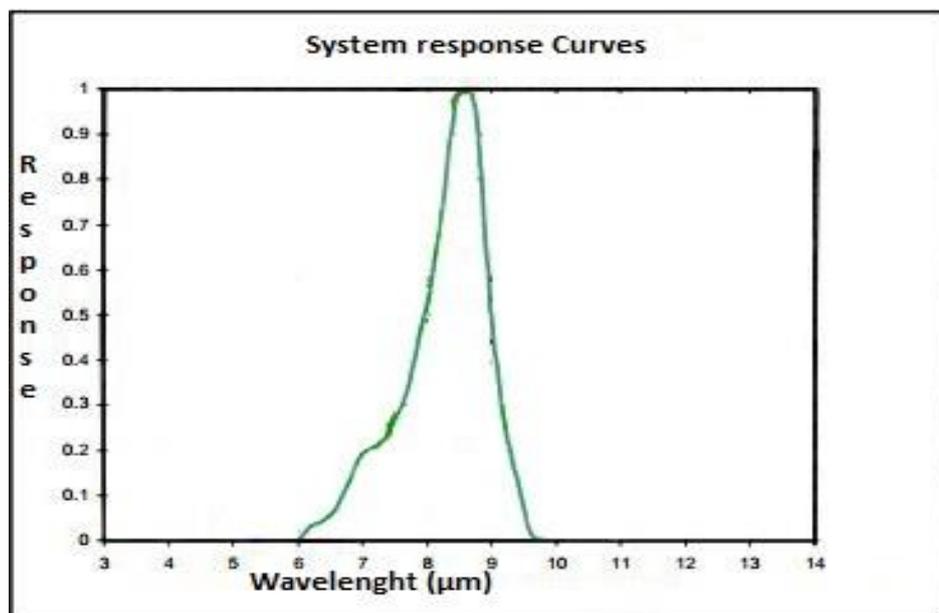


Figura 16: Risposta spettrale della termo camera utilizzata durante l'esperimento. Modello ThermoCam SC300 QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector.

La linearità tra la reale radiazione emessa dall'oggetto misurato e l'object signal (OS), dato come output dalla termocamera, è stata verificata da Marinetti et al. 2012 [29], confermando che l'utilizzo di tale quantità non introduce errori nella misura.

Al fine di investigare quanto la rugosità superficiale possa influenzare la capacità di emissione, i campioni sono stati trattati con tre differenti carte, caratterizzate da particelle abrasive di differente diametro (d): P500 - $d = 30,2 \mu\text{m}$, P1200 - $d = 15,3 \mu\text{m}$ infine P2400 - $d = 8,4 \mu\text{m}$. Inoltre sono stati considerati due differenti tempi di abrasione: 60 s e 90 s. In tabella 2 sono elencate le caratteristiche dei diversi campioni utilizzati.

Nome del campione	Finitura superficiale	Tempo di abrasione (s)
500 A	carta P500 ($d = 30,2 \mu\text{m}$)	60
500 B		90
1200 A	carta P1200 ($d = 15,3 \mu\text{m}$)	60
1200 B		90
2400 A	carta P2400 ($d = 8,4 \mu\text{m}$)	60
2400 B		90

Tabella 2: In tale tabella sono indicati i diversi campioni utilizzati nell'esperimento. Viene indicata sia la finitura superficiale che il tempo di abrasione che caratterizza i diversi campioni.

La superficie dei campioni è stata pulita adottando la seguente procedura per 9 volte [30], lasciando asciugare i campioni in aria prima di ogni sequenza :

- Sapone liquido diluito in acqua distillate
- Risciacquare con acqua distillata per eliminare residui di sapone
- Immersione in alcool isopropilico per 10-15 s
- Immersione in acetone per 10-15 s

Alla fine dell'intera procedura i campioni sono stati fatti asciugare in forno ad una temperatura di 60°C per 30 s.

Le rugosità superficiali dei campioni è stata analizzata mediante due differenti tecniche: microscopio a scansione elettronica (Scanning electron Microscope – SEM), FEG - ESEM FEI – Quanta 200F, e microscopio a forza atomica (Atomic Force Microscope – AFM), NanoEducator Scanning Probe Microscope (NANOSCOPE).

1.2.4. Risultati

Le figure 17-18 mostrano l'andamento del rapporto delle emissività del campione abraso e quello di prova, precedentemente definito e indicato con R, in funzione della rugosità superficiale dei campioni. Le immagini

si riferiscono a tempi di abrasione di 60s e 90s rispettivamente, e per le due diverse temperature di misura (30°C e 50°C).

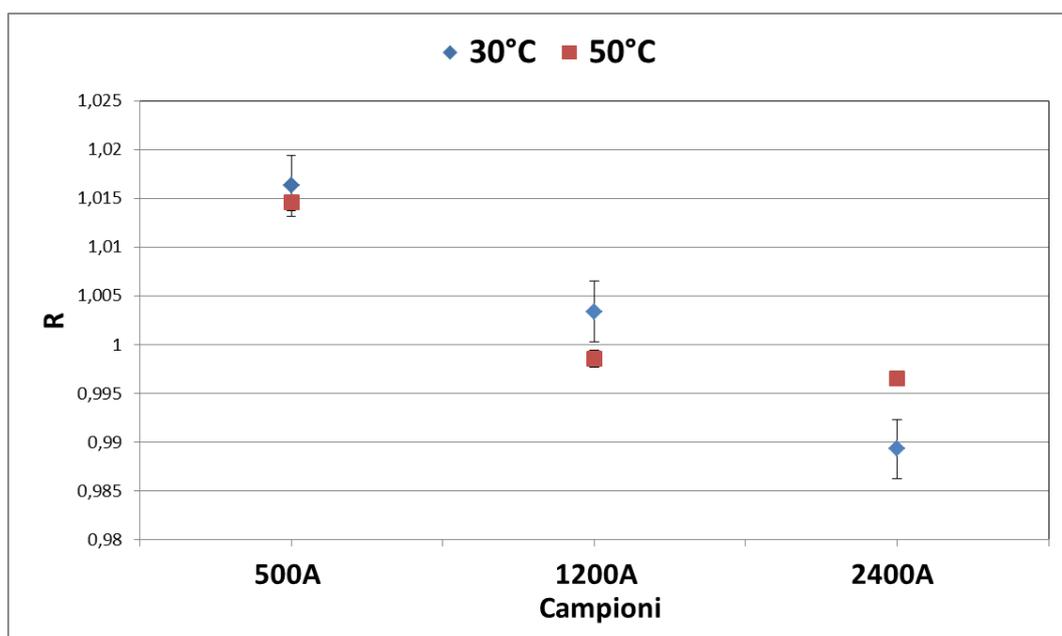


Figura 17: Campioni abrasi con carte P500, P1200 e P2400, per un tempo di abrasione di 60s

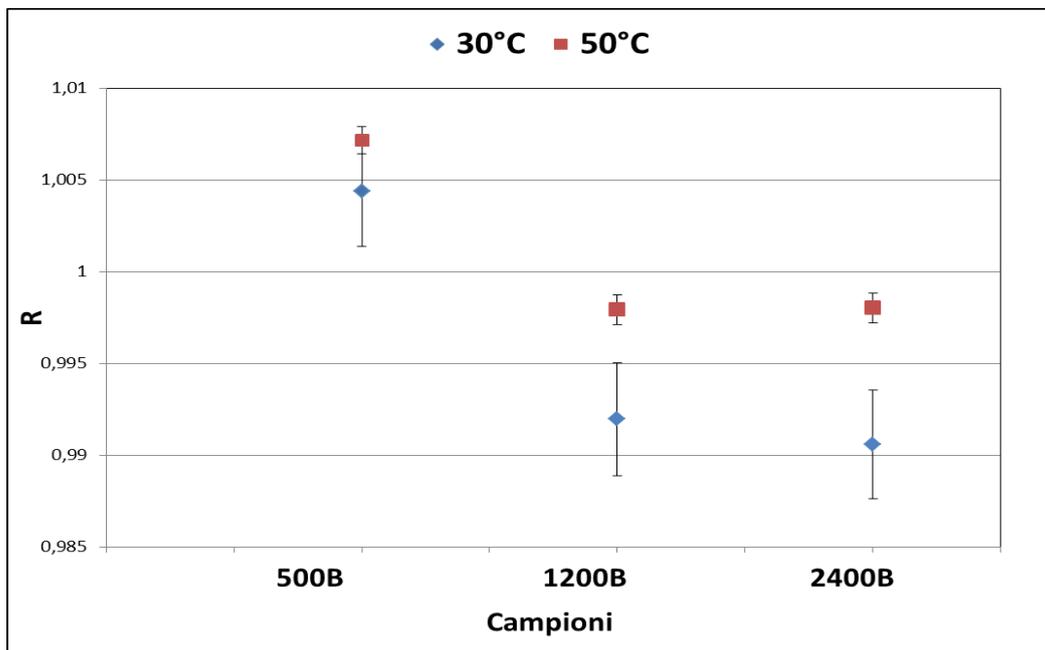


Figura 18: Campioni abrasi con carte P500, P1200 e P2400, per un tempo di abrasione di 90s

Si osserva, nelle due immagini sopra, un' aumento del valore di R (da destra verso sinistra) all'aumentare delle rugosità superficiali dei campioni; mostrate nelle sottostanti immagini SEM (Figure19-20).

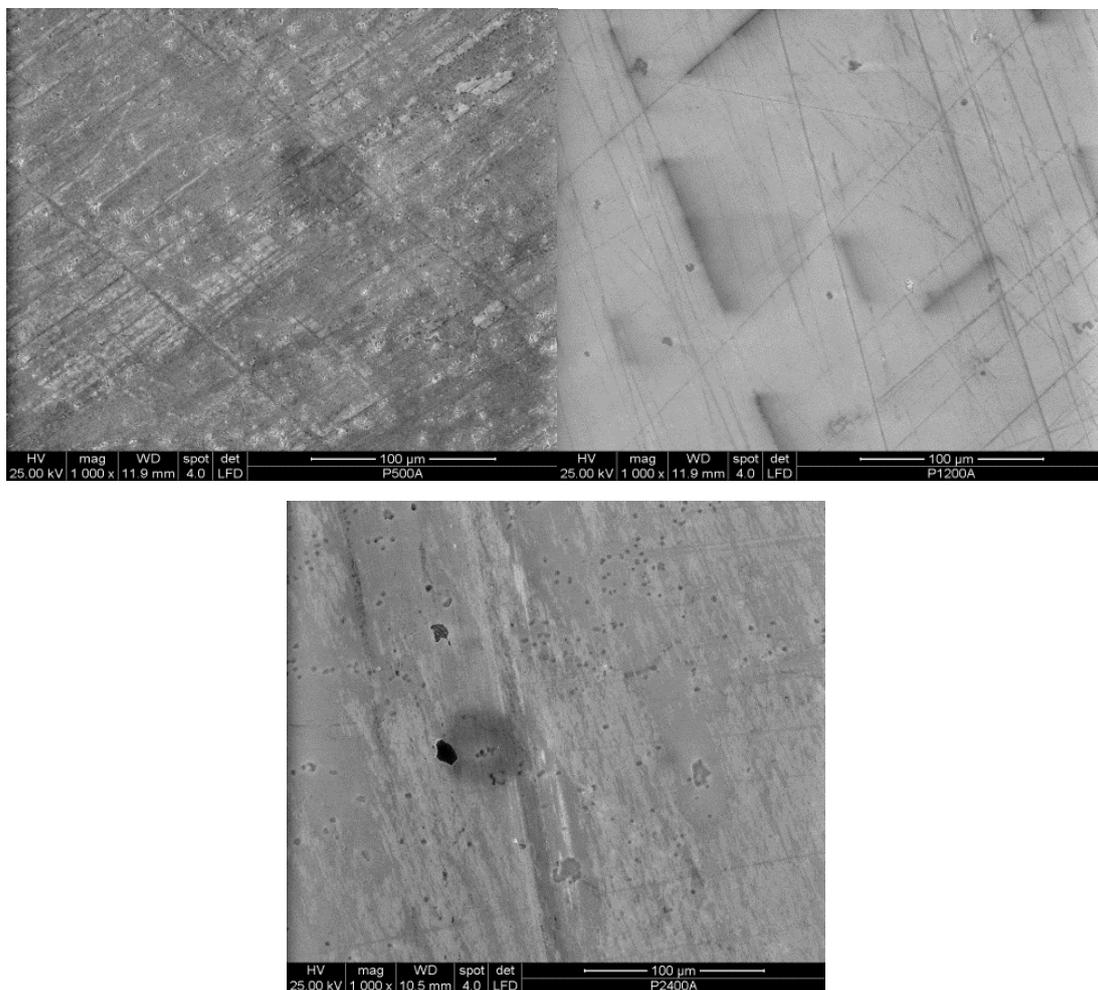


Figura 19: Immagini SEM dei campioni abrasivi con carte diverse (P500, P1200, P2400 rispettivamente) e per un tempo di 60s (indicati con la lettera A).

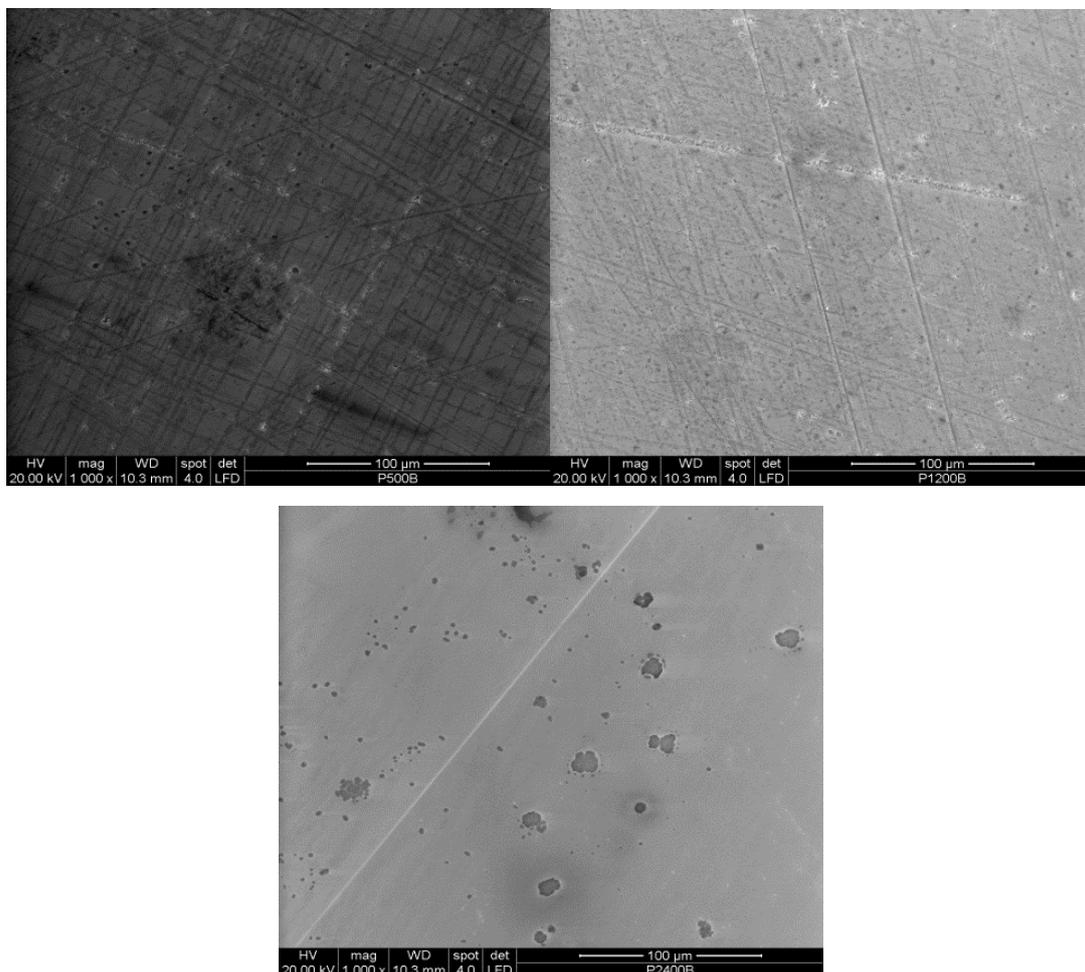


Figura 20: Immagini SEM dei campioni abrasivi con carte diverse (P500, P1200, P2400 rispettivamente) e per un tempo di 90s (indicati con la lettera B).

I campioni abrasivi con carta di più grossa grana (P500- Figura 17-relativa ad un minore tempo di abrasione), hanno un valore di R maggiore di 1; evidenziando che la finitura superficiale ha variato la capacità emissiva del campione rispetto a quello di riferimento. Infatti, essendo R definito come il rapporto tra le emissività del campione con una certa rugosità superficiale e il campione di prova, un valore di tale parametro uguale ad

uno indicherebbe una uguale capacità di emissione dei due campioni. Inversamente, si osserva per i campioni abrasi con una carta caratterizzata da particelle abrasive di diametro 8,4 μm (P2400), che mostrano un valore di R minore di uno. Ciò indica che la superficie del campione sia stata in realtà levigata ulteriormente rispetto al campione di riferimento. Infine per i campioni 1200A (carta P1200) è stato ottenuto un valore del rapporto tra le emissività del campione abrase e quello di prova vicino all'unità. Questo è dovuto al fatto che le rugosità di tali superfici non hanno dimensioni tali da influenzarne la capacità emissiva. I campioni abrasi per 90s hanno un comportamento leggermente meno marcato dei precedenti. In particolare si può osservare che le superfici abrasi con carta P1200 e P2400 hanno un comportamento emissivo molto simile, soprattutto a temperature di 50°C. Le immagini SEM dei campioni abrasi per un tempo di 60s (Figura 21) suggeriscono che responsabili delle variazioni di emissività siano, in realtà, le microstrutture proprie della superficie più che le rugosità indotte dalle particelle abrasive durante la preparazione dei campioni in laboratorio.

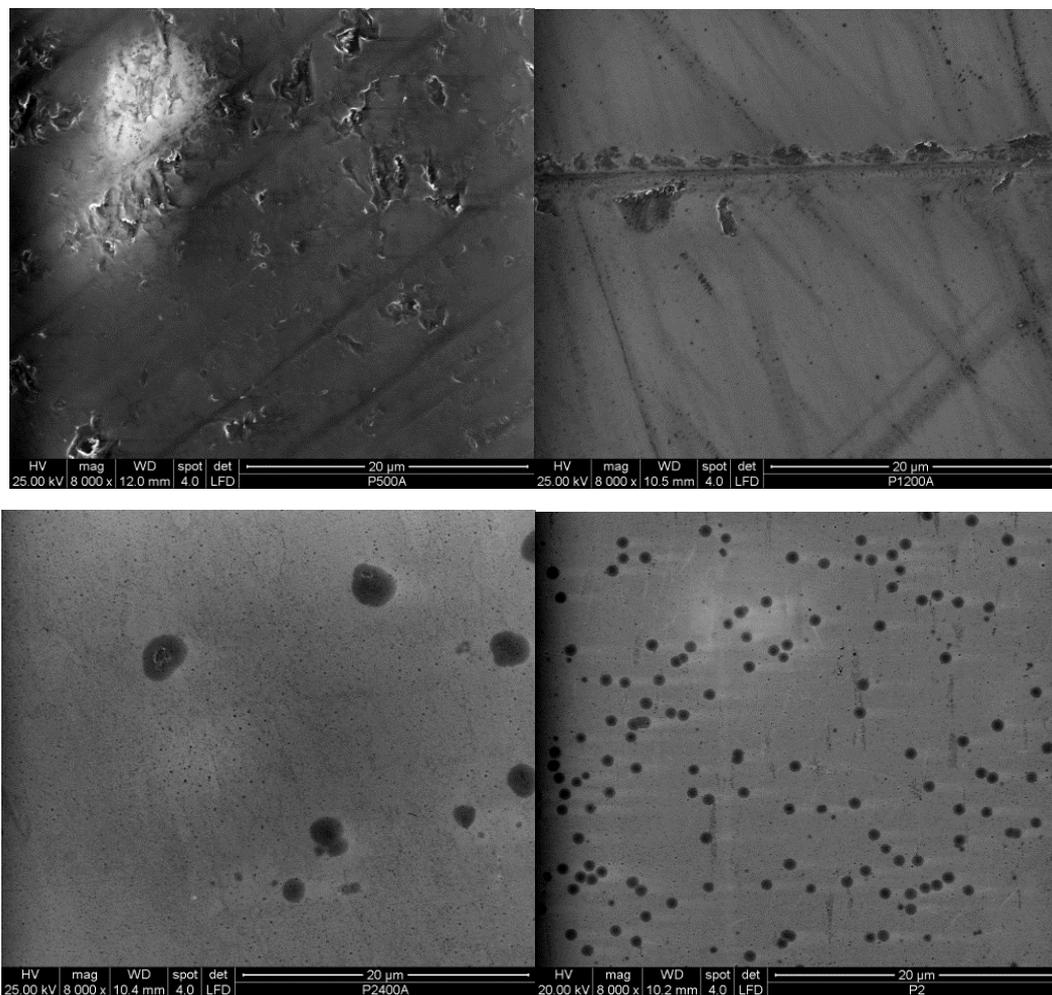


Figura 21: Confronto tra le superfici dei campioni 500A, 1200A, 2400A e il campione di riferimento rispettivamente. Le immagini SEM hanno un ingrandimento di 8000x al fine di mettere meglio in evidenza le diverse microstrutture superficiali dei campioni.

Durante il processo di abrasione, infatti, è stato eliminato il layer superficiale dei campioni, portando in superficie le microstrutture interne del materiale.

In figura 21, si osserva una variazione della densità di tali microstrutture andando dal campione abraso con carta P500 a quello abraso con carta più fine (P2400). Dal confronto, infatti, con il campione di prova si può vedere che tali microstrutture sono tanto più dense quanto più la grana della carta utilizzata è grossa.

Il variazione di emissività misurata è, quindi, attribuibile alla variazione della densità di tali microstrutture sub-superficiali.

In figura 22 sono mostrate, come esempio, alcune delle microstrutture sub-superficiali osservate sui campioni 1200B e 2400B.

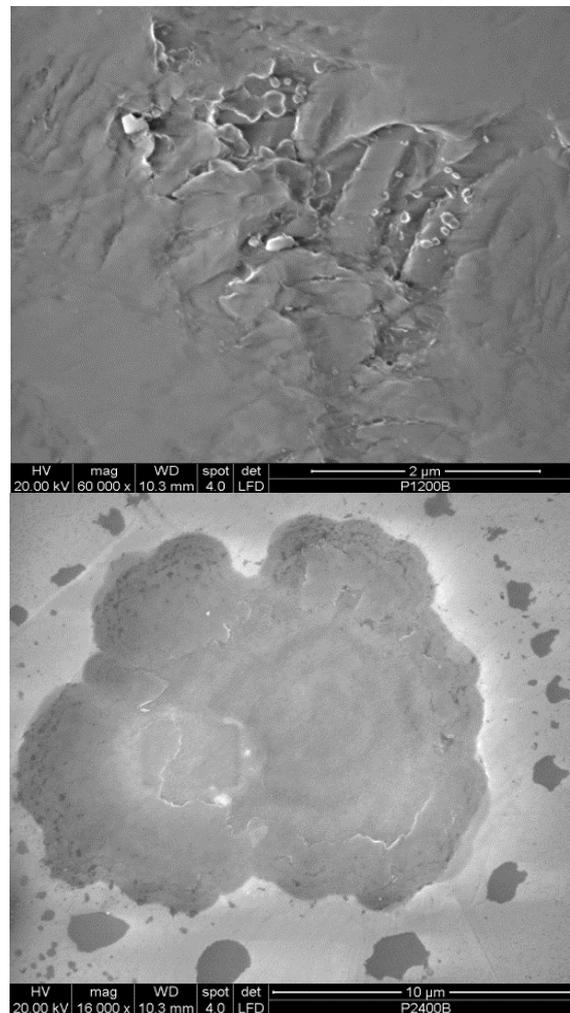
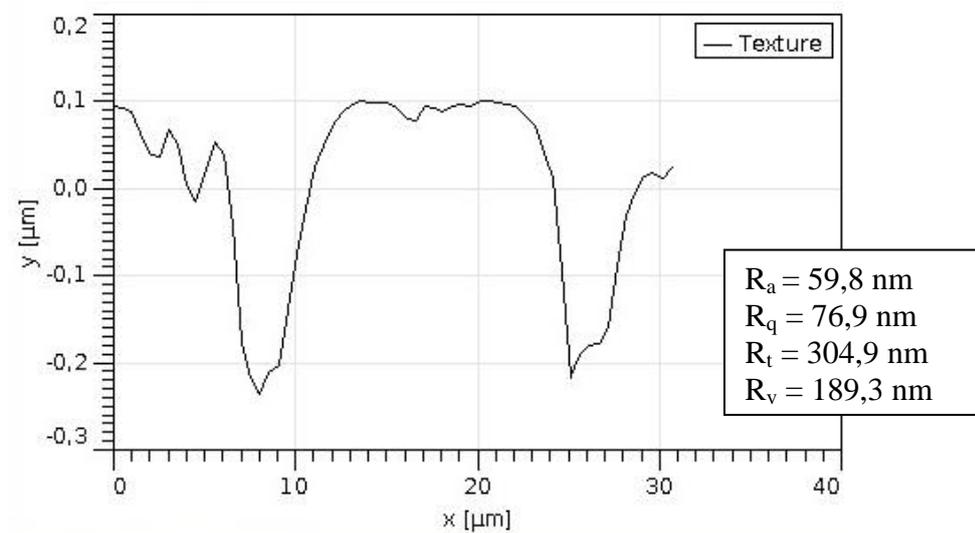
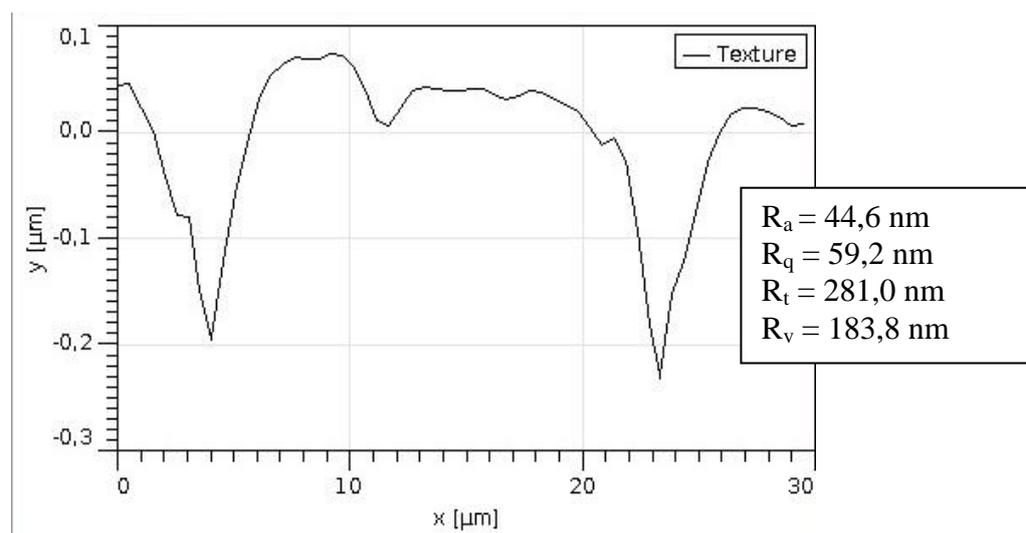


Figura 22: Alcuni esempi delle microstrutture interne al materiale, ottenute in seguito al processo di abrasione.

L'analisi superficiale tramite microscopio a forza atomica ci ha permesso di avere delle dimensioni medie, in altezza e larghezza, delle rugosità generate dalle particelle abrasive così come di alcune delle microstrutture del materiale.

Come esempio sono riportati alcuni dei profili delle rugosità dei campioni 500B e 1200B (Figure 23-24) rispettivamente.



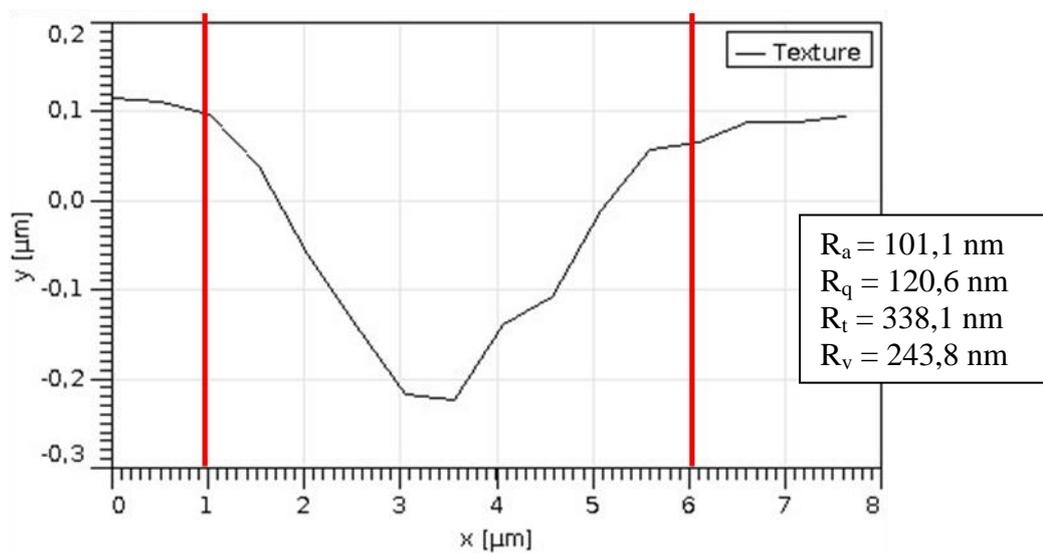
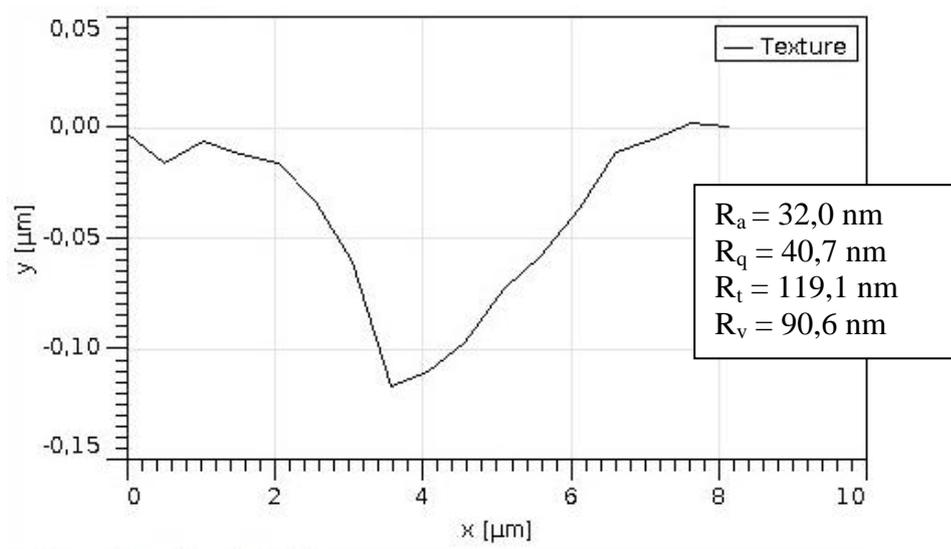


Figura 23: Profilo e relativa tabella dei valori statistici (campioni 500B).



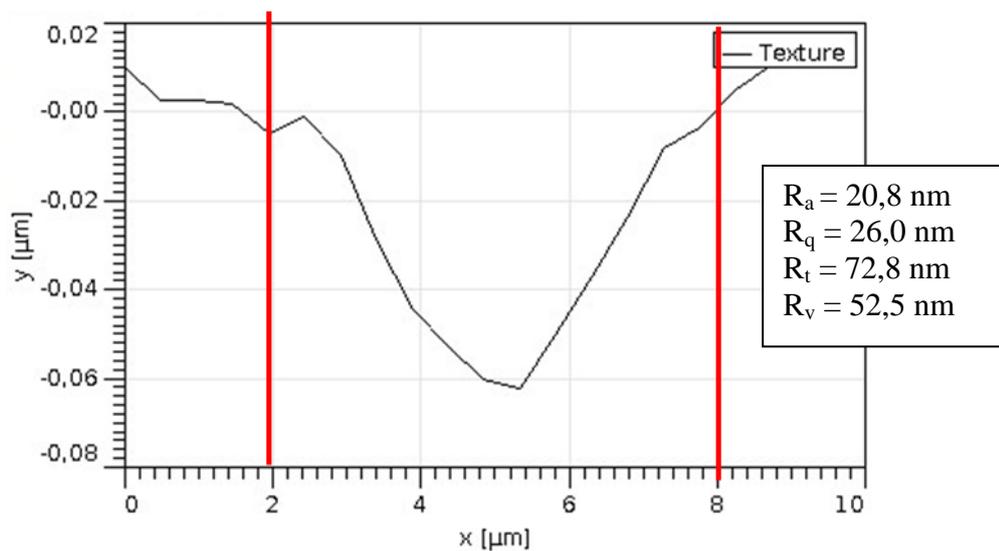


Figura 24: Profilo e relativa tabella dei valori statistici (campioni 1200B).

I valori statistici (definiti in appendice 2), riportati nelle immagini 23 e 24, si riferiscono alle altezze delle rugosità. Le dimensioni ottenute sono dell'ordine dei nanometri. Mentre le larghezze misurate (evidenziate dalle due barre rosse nelle immagini 23 e 24) sono micrometriche, circa 6 μm per il campione 500B e tra 2-4 μm per il campione 1200B.

Per confronto nelle figure 26-27 sono mostrati, come esempio, il profilo orizzontale e verticale (1 e 2 nella figura 25), con le rispettive dimensioni statistiche, di una microstruttura sub-superficiale del campione 1200B.

Si osserva che le dimensioni relative all'altezza della microstruttura restano anche in questo caso dell'ordine dei nanometri, mentre le larghezze dei profili orizzontali e verticali sono circa 15 μm e 10 μm rispettivamente.



Figura 25: Profili orizzontali e verticali della cavità “intrinseca” della superficie

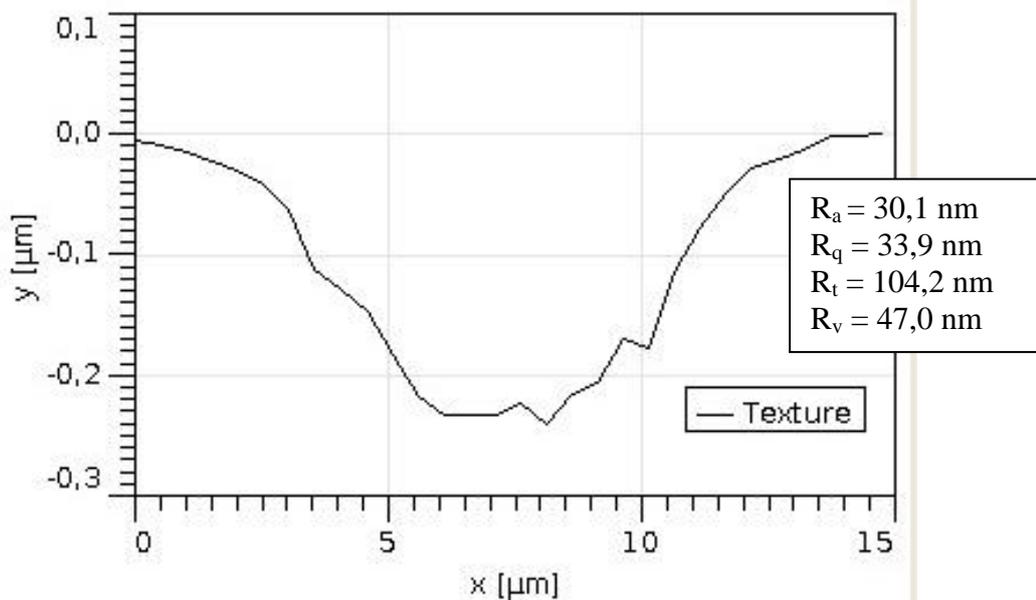


Figura 26: Profilo orizzontale della microstruttura sub-superficiale.

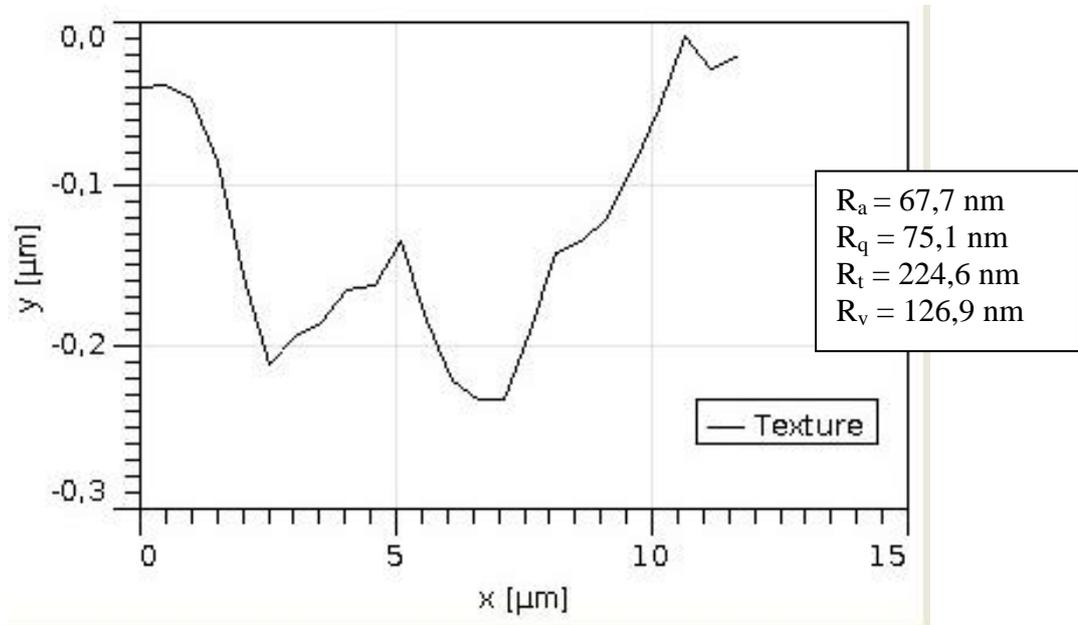


Figura 27: Profilo verticale della microstruttura superficiale

Si conclude, quindi, che tali strutture sub-superficiali, avendo dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda infrarossa, a cui è sensibile la termocamera, si comportano come dei corpi neri. Esse, infatti, intrappolano la radiazione infrarossa incidente comportando un aumento del valore di ϵ del campione.

Le dimensioni statistiche in altezza riportate danno un limite inferiore alla loro effettiva dimensione, a causa dei limiti di risoluzione del sistema di misura (2 nm); nelle altre due dimensioni (x, y) la risoluzione spaziale è dell'ordine di 50 nm.

Infine, in riferimento alla figura 28, i risultati sembrerebbero mostrare una influenza della temperatura sul comportamento emissivo dei campioni, soprattutto per quelli caratterizzati da una minore rugosità superficiale (cerchio blu). Infatti si osserva che l'emissività dei campioni a 30°C sia molto minore rispetto a quella a 50°C. Tale comportamento è, tuttavia, dovuto alla radiazione riflessa che gioca un ruolo maggiore nel bilancio energetico dei campioni misurati a temperatura minore.

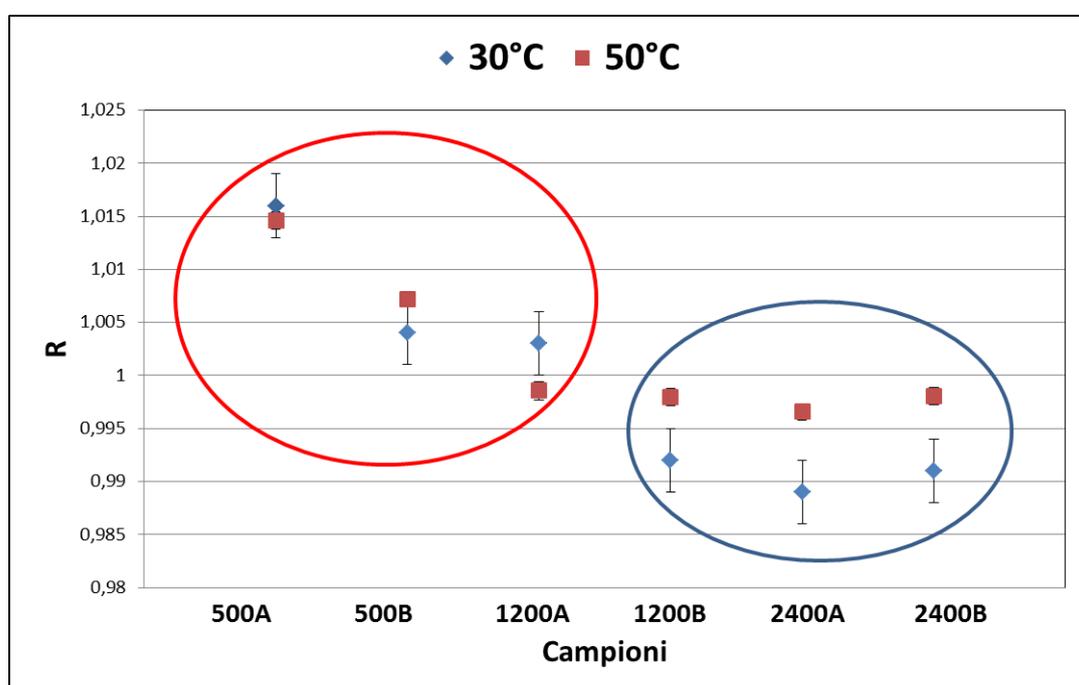


Figura 28: Influenza della temperatura sul comportamento emissivo dei campioni caratterizzati da una diversa finitura superficiale.

Per i campioni con una maggiore rugosità superficiale (cerchio rosso) non viene messa in evidenza nessuna influenza della temperatura sul valore di emissività.

Possiamo, quindi, concludere che nel range di temperatura indagato, non è stata evidenziata nessuna influenza sul comportamento emissivo dei campioni.

I risultati esposti non ha evidenziato variazioni di emissività tali da poter avere una influenza sulle misure di temperatura superficiale.

Tuttavia bisogna ricordare che in tale esperimento non è stata considerata la riflessione speculare specifica di ogni campione, che potrebbe avere avuto un ruolo importante nei risultati.

Capitolo 4

INTRODUZIONE DEL NUOVO PUNTATORE

Dalla conoscenza dei limiti di misura dei sensori a remoto oggi in commercio un nuovo puntatore all'infrarosso è stato sviluppato da uno spin-off dell'ISAC – CNR di Padova (Figura 29) e conseguentemente calibrato, al fine di ottenere delle misure di temperatura superficiale più accurate.

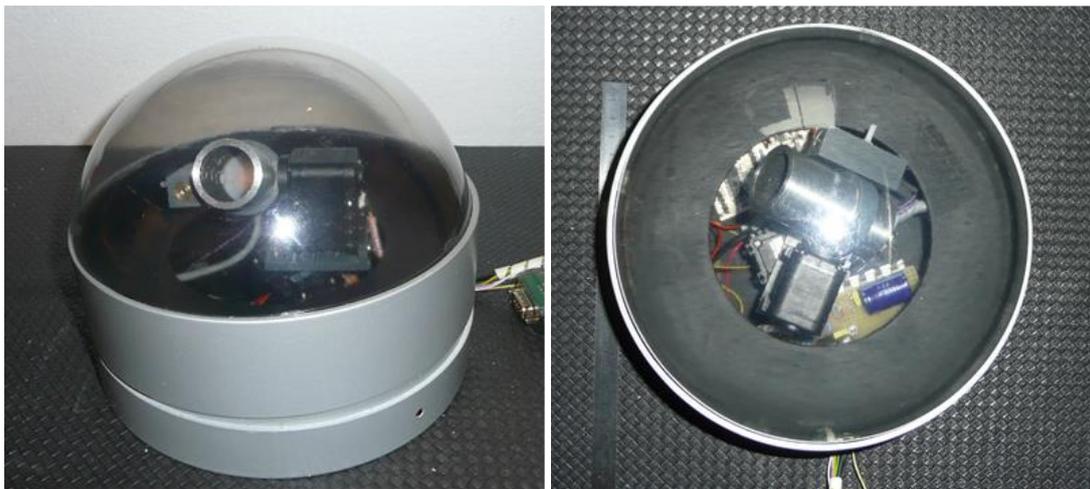


Figura 29: Vista laterale e dall'alto del nuovo puntatore all'infrarosso

La tecnologia del nuovo puntatore si basa su quella radiometrica in combinazione con un sistema rotante tridimensionale, che consente di rilevare misure multiple puntuali sulla superficie oggetto di analisi. Questo permette di rilevare misure in continuo, sia nel tempo che nello spazio; controllando, quindi, la risposta della superficie agli stimoli ambientali, che soprattutto negli ambienti museali possono portare repentine variazioni spaziali e temporali delle condizioni climatiche. Tutte le misure vengono effettuate in modo automatico e possono essere sia registrate in locale che trasmesse in remoto.

L'obiettivo era, quindi, quello di sviluppare un sistema di controllo automatico diretto principalmente ai gestori dei musei al fine di una conservazione preventiva delle opere d'arte. A tal fine è stato introdotto un sistema di allarme, che si attiva quando il sistema rileva variazioni termiche, sia nello spazio che nel tempo, tali da essere dannose per le opere. Il sistema è gestito tramite un software, in cui possono essere inseriti i range di tollerabilità propri di ogni singolo oggetto d'arte. Esso permette, inoltre, di definire specifiche griglie di punti di misura sulla superficie, nonché i tempi di scansione, tramite un'interfaccia facile da usare e quindi utilizzabile, anche, da un operatore meno esperto.

Infine, è possibile settare il valore di emissività per ogni nodo della griglia di misura; permettendo una misura automatica e più accurata della temperatura superficiale. Quest'ultimo punto è molto importante quando si vogliono monitorare più oggetti d'arte con una diversa capacità emissiva, sia perché costituiti da materiali differenti, sia perché

caratterizzati da diverse proprietà superficiali (finitura superficiale, pigmentazione, ecc..).

1. Descrizione tecnica

La parte sensibile del puntatore consiste in un sensore a termopila della Melexis (Figura 30) caratterizzato da sensibilità spettrale maggiore del 70% nel range di lunghezze d'onda tra 7,5 μm e 13,5 μm .



Figura 30: Termopila della Melexis utilizzata.

Il sensore è costituito da termopile collegate in serie, al fine di aumentare il segnale di uscita, e ricavate per incisione micromeccanica di un substrato di $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Un bordo di silicone isola l'elemento di misura

dal case. I giunti caldi della termopila sono sulla membrana, mentre quelli freddi sono sotto il bordo di silicone. Poiché la membrana ha una piccola massa e una bassa conduttività termica cambia rapidamente la sua temperatura quando la radiazione infrarossa emessa dal corpo, di cui si vuole conoscere la temperatura, la colpisce. Il giunto freddo è a contatto con il fondello del case, in cui è inserita una termo resistenza che ne misura la temperatura. La differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo produce una differenza di potenziale, correlata alla differenza di temperatura tra l'oggetto e il sensore. La misura della temperatura assoluta dell'oggetto è ottenuta rapportando il segnale di output della termopila alla temperatura del sensore, misurata dal termistore integrato nella membrana.

In figura 31 è mostrato l'assetto del sensore a termopila.

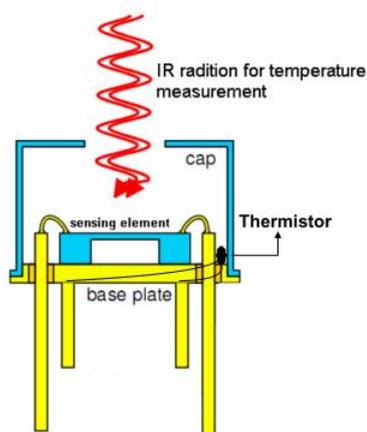


Figura 31: Principio fisico di funzionamento del sensore a termopila.

Buone condizioni di misura si hanno con significativi segnali di uscita. Ma nel caso di misure prossime alla temperatura ambiente è necessario ridurre il rumore del sistema (o modificare la temperatura di riferimento). Il sensore è stato, quindi, incapsulato in una copertura di alluminio, per la sua alta conduttività termica, permette un continuo scambio termico tra il sensore e l'ambiente; assicurando una costanza delle condizioni termiche nell'intorno del sensore.

Per lo sviluppo della parte ottica è stata utilizzata una comune lente di Fresnel (Figura 32), trasparente all'infrarosso, con una lunghezza focale di 9,4 mm e dimensioni di 25,4 x 25,4 mm (<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/infrared-ir-fresnel-lenses/2042>).



Figura 32: Lenti di Fresnel utilizzate per la costruzione dell'ottica del puntatore.

Infine come mostrato in figura 33, al fine di eliminare quanto più possibile radiazione spuria, ovvero non proveniente dal punto monitorato,

è stato montato un tubo in alluminio nella parte anteriore della lente. Quest'ultimo è stato termicamente isolato e internamente lavorato con piccole intaccature, per evitare che radiazione spuria raggiunga la parte sensibile del puntatore tramite riflessione.

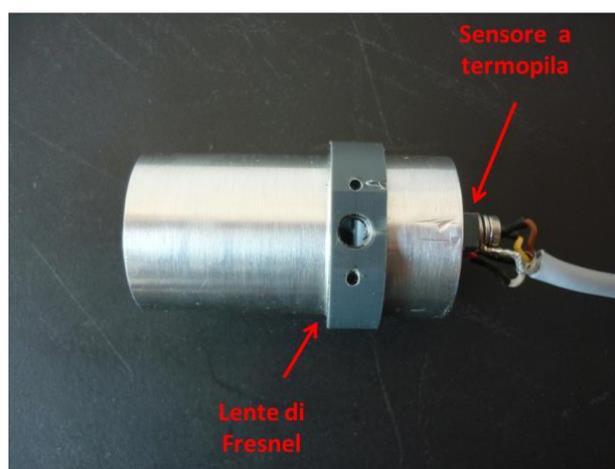


Figura 33: Tubo in alluminio che “avvolge” tutte le parti del puntatore (sensore e lente). La lunghezza serve come schermo a tutte le emissioni laterali. Internamente è stato intagliato per evitare che la radiazione spuria raggiungesse il sensore tramite riflessioni.

La variazione del puntamento del sistema è ottenuto con due servomotori di precisione, montati uno sull'altro, come mostrato in Figura 34.

Per l'individuazione del punto di misura, il sistema è accoppiato ad un puntatore laser (Figura 35) a bassa energia, che garantisce l'identificazione esatta del punto da monitorare. Per evitare problemi alle superfici delle opere d'arte da monitorare il laser può essere azionato solo quando necessita e per brevi periodi.

In figura 36 è mostrata una visione di insieme dall'alto del puntatore.



Figura 34: Servomotori montati uno sull'altro per permettere al puntatore un movimento tri-dimensionale.

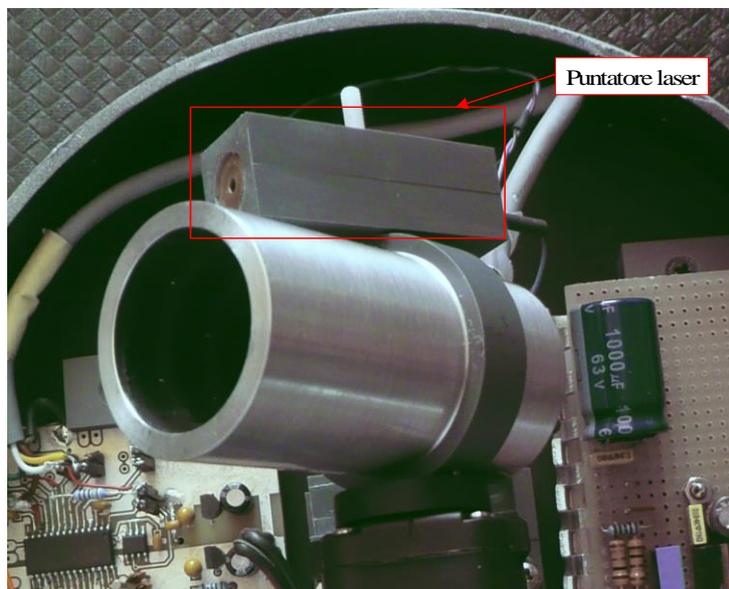


Figura 35: Vista del puntatore laser posto sullo stesso asse del sensore, al fine di identificare con accuratezza il punto da monitorare.

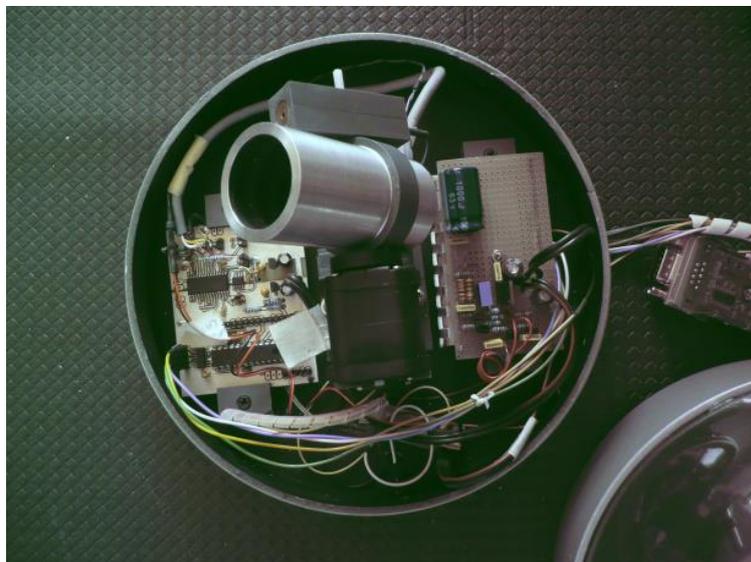


Figura 36: Visione d'insieme del puntatore.

Inoltre un sensore esterno di temperatura manualmente posto a contatto, per breve tempo, ad alta precisione (nel range di 0,02-0,03 °C) consentirebbe di aumentare la precisione della misura ottenuta con il sensore all'infrarosso. Infatti confrontando i due valori di temperatura superficiale, ottenuti dal puntatore e dal sensore a contatto, entrambi collegati in rete, può essere definito un più esatto valore di emissività. Tale sensore potrebbe essere usato o solo per la taratura al momento dell'installazione o per un monitoraggio in continuo in punti meglio accessibili, mentre in contemporanea il puntatore all'infrarosso eseguirebbe la misura in altri meno accessibili della stessa superficie. Questo permetterebbe un controllo in continuo e automatico della misura dell'emissività che verrebbe via software utilizzata per il calcolo della temperatura superficiale vera degli altri punti meno accessibili.

Va, però, ricordato che nel campo dei Beni Culturali sensori di temperatura a contatto non sempre possono essere utilizzati per i motivi precedentemente descritti. Da questo la necessità di conoscere l'influenza delle diverse variabili sull'esatto valore di emissività, così da poter garantire una più accurata misura della temperatura superficiale anche per gli oggetti d'arte per i quali non è possibile utilizzare il suddetto sensore a contatto.

1.1. Segnale di output - termopila e termistore

Poniamo ora l'attenzione sui due principali componenti del sensore: termopila e termistore.

Per facilitare la comprensione della fisica che è alla base del funzionamento delle termopile IR è utile ragionare in termini di flusso di calore piuttosto che di temperatura. La potenza assorbita dal sensore dipende dall'area e dal campo di vista del sensore stesso, nonché dalla sua efficienza nell'assorbire la radiazione incidente. Non deve essere trascurato il fatto che lo stesso sensore emette radiazione termica funzione della temperatura del suo contenitore: l'ammontare di radiazione netta assorbita dal dispositivo dipenderà, quindi, dalla differenza di temperatura tra l'oggetto da misurare e il sensore stesso.

È possibile, quindi, identificare il sensore a termopila come un misuratore che rileva il flusso di calore che transita fra l'oggetto osservato ed il contenitore esterno del rivelatore. La differenza di temperatura fra l'oggetto ed il contenitore della termopila produce una differenza di potenziale correlata a tale flusso.

Dalla legge di Stefan – Boltzmann si ha, quindi:

$$V_{out} = \alpha (\varepsilon T_{ogg}^4 - T_{sens}^4),$$

dove α , detta fattore strumentale, definisce la capacità del sensore nel convertire differenze di temperatura; ε è l'emissività dell'oggetto.

Per essere maggiormente precisi bisognerebbe assumere come temperatura del sensore quella del corpo sensibile ma, poiché la differenza di temperatura fra questo ed il contenitore esterno è generalmente dell'ordine dei mK, tale approssimazione è giustificata.

Solitamente tali sensori sono calibrati su corpi neri, con valore unitaria di emissività, per cui si ha:

$$V_{out} = \alpha(T_{ogg}^4 - T_{sens}^4).$$

La costante di proporzionalità, α , può essere determinata puntando un oggetto di temperatura nota. Tale procedura non richiede alcuna conoscenza sui dettagli interni del sensore ed è indipendente dalla distanza dell'oggetto, purchè il sensore mantenga un angolo di vista costante.

Il valore di tale fattore strumentale α , detto anche sensibilità, per il sensore a termopila utilizzato per la costruzione del puntatore è: $4,28^{\pm 25\%} \times 10^{-13} \text{ V/K}^4$, per l'intero campo di vista del sensore. Quest'ultimo è di 88° relativo al 50% del segnale della termopila.

L'equazione di calibrazione è valida nel caso in cui l'oggetto da misurare possa essere approssimato, entro il range di sensibilità del sensore, ad un corpo grigio, consentendo così l'utilizzo della legge di Stefan-Boltzmann.

Al fine di un corretto calcolo della temperatura assoluta dell'oggetto, la temperatura del sensore è misurata da un termistore posto all'interno del contenitore.

I termistori sono dei trasduttori elettrici che sfruttano la variabilità della resistenza elettrica di un materiale semiconduttore con la temperatura.

Si possono classificare in:

- NTC (Negative Temperature Coefficient): la resistenza decresce all'aumentare della temperatura,
- PTC (Positive Temperature Coefficient): la resistenza cresce al crescere della resistenza.

Il termistore integrato nel sensore a termopila della Melexis è di tipo PTC, caratterizzato da una maggiore sensibilità. La relazione tra la resistenza e la temperatura per tali termistori è molto complessa e difficilmente approssimabile con un'equazione matematica; è, quindi, definita dai costruttori mediante calibrazione.

Nel caso specifico tale relazione è:

$$R(T) = R(25^{\circ}\text{C})[1 + TC_1(T - 25^{\circ}\text{C}) + TC_2(T - 25^{\circ}\text{C})^2],$$

dove $R(25^{\circ}\text{C})$ è il valore della resistenza alla temperatura di riferimento di 25°C e uguale a $24^{\pm 30\%}\text{k}\Omega$; $TC_1 = 6500^{\pm 20\%}\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ e $TC_2 = 16\text{ppm}/^{\circ}\text{C}^2$.

2. Test di funzionamento

Per una migliore caratterizzazione del puntatore sono stati fatti diversi test in laboratorio, di seguito descritti.

2.1. Auto-riscaldamento

Poiché il segnale di output del sensore a termopila è proporzionale alla differenza di temperatura tra l'oggetto ed il sensore è necessario che quest'ultimo sia mantenuto ad una temperatura quanto più diversa da quella dell'oggetto da misurare, al fine di ottenere una misura accurata della temperatura superficiale.

È stata quindi monitorata sia la componente elettronica che quella meccanica dei servomotori, così da poter definire se e quanto tale autoriscaldamento possa influenzare le misure.

Il monitoraggio è stato condotto, per circa 10 ore, mediante termocamera AVIO TVS 700, con un detector microbolometrico operante nel range di lunghezze d'onda (8-12 μm); in un intervallo di temperatura tra (-20; +400) °C ed una sensibilità termica di 0,07 °C (a 30°C).

I risultati, mostrati nelle figure 37-38, indicano un riscaldamento di circa 1°C della componente elettronica quando il sensore non è in movimento; mentre il movimento tridimensionale ha portato ad un aumento di

temperatura dei servomotori e della stessa elettronica di circa 4°C dopo circa 10 ore di monitoraggio.

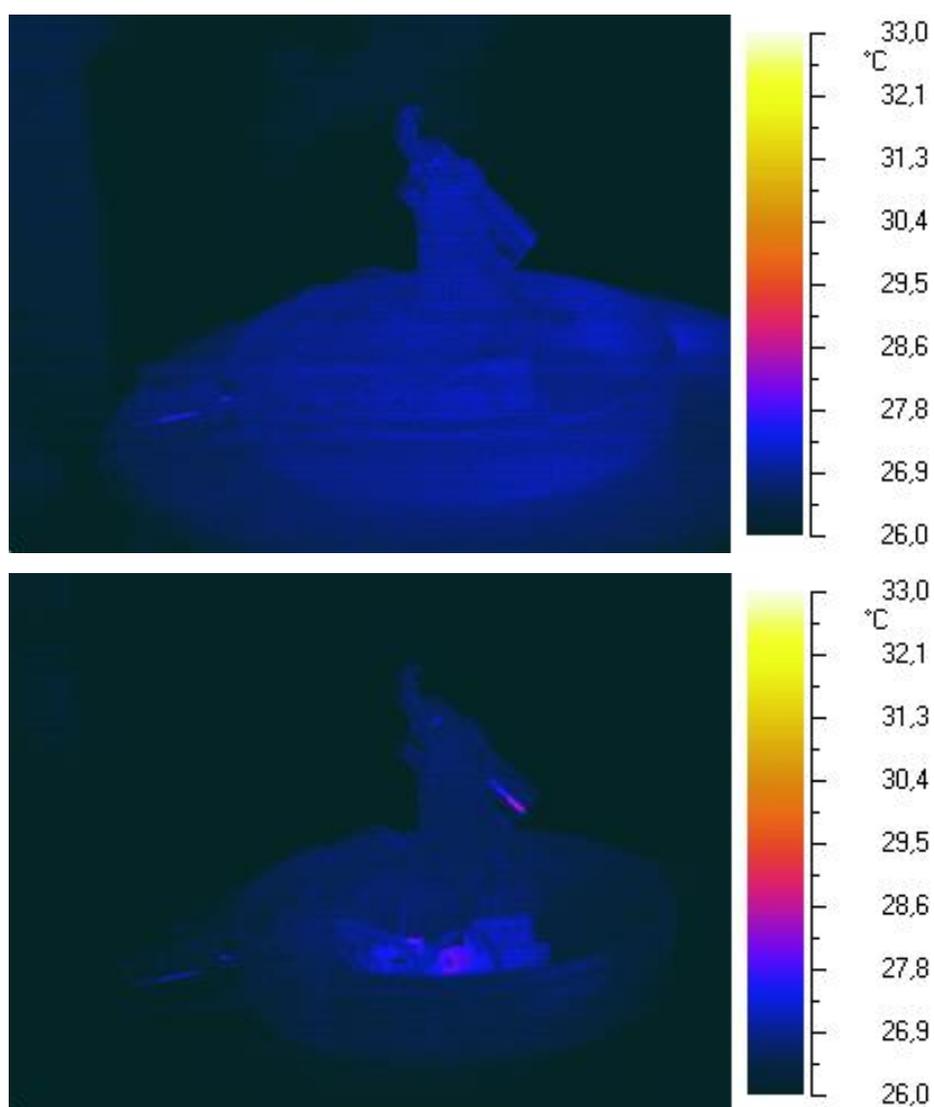


Figura 37: Monitoraggio del puntatore tramite termo camera AVIO TVS 700, al fine di evidenziare un eventuale riscaldamento dell'elettronica quando il sensore non è in movimento.

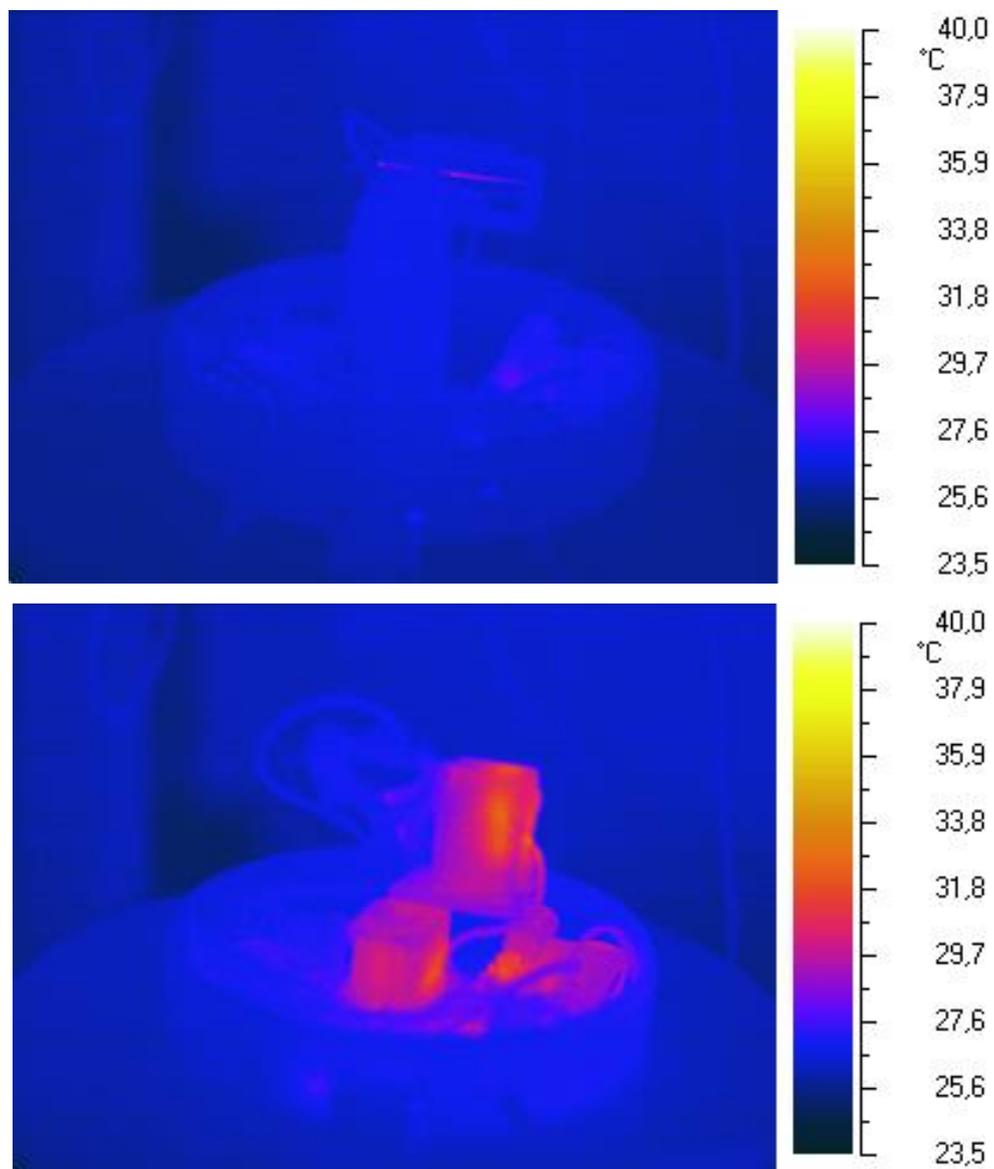


Figura 38: Monitoraggio tramite termo camera AVIO TVS 700 sia della parte meccanica (servomotori) che dell'elettronica, durante il movimento 3-D del sensore.

L'alto potere riflettente dell'alluminio, che circonda il sensore, assicura che il trasferimento termico per irraggiamento non sia tale da influenzare le misure, per cui può avvenire, in questo caso, solo per convezione.

Al fine di limitare l'influenza sulle misure, in seguito al riscaldamento delle masse d'aria, la componente elettronica è stata allontanata dalla parte sensibile del sensore.

L'isolamento del tubo di alluminio assicura, infine, che il riscaldamento dei servomotori misurato limiti fortemente l'influenza sulle misure.

2.2. Calibrazione sensore a termopila

Al fine di una misura più accurata della temperatura superficiale dell'oggetto, l'introduzione della componente elettronica ha reso necessario un processo di calibrazione delle due componenti: termopila e termistore.

2.2.1. Calibrazione termistore

La calibrazione del termistore è stata condotta in condizioni di temperatura controllata mediante l'utilizzo del bagno termico e di una sonda termica di verifica (Selelogic). Quest'ultima permetteva un controllo continuo della effettiva stabilità del bagno termico durante le misure; essa è, infatti, una sonda ad alta precisione (incertezza $0,01^{\circ}\text{C}$) che copre un campo di temperature tra $(-196^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C})$.

In figura 39 è mostrata la curva di calibrazione, ottenuta interpolando, con una polinomiale di secondo grado, i punti di temperatura misurati a 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 40°C, 50°C. Si osservi che l'output del termistore è espresso in termini del segnale di uscita del convertitore analogico - digitale.

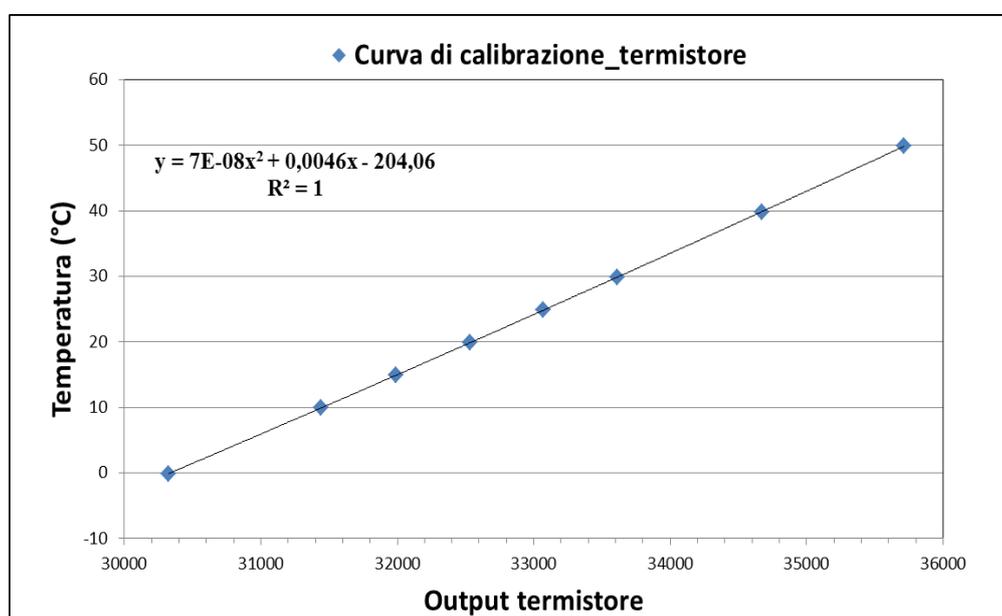


Figura 39: Curva di calibrazione del termistore ottenuta in condizioni di temperatura controllata mediante l'utilizzo del bagno termico e di una sonda termica di verifica (Selelogic). I punti di di temperatura misurati sono stati: 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 40°C, 50°C.

La tabella di conversione così ottenuta è usata in una Look_Up Table (LUT) per il calcolo delle temperature intermedie ai valori di calibrazione, entrambe inserite nel software di gestione del puntatore. Per limitare i tempi di risposta del termistore la funzione di calcolo, definita

nella LUT, utilizza un'approssimazione lineare tra due punti consecutivi di calibrazione, introducendo degli errori nella determinazione della temperatura (figura 40).

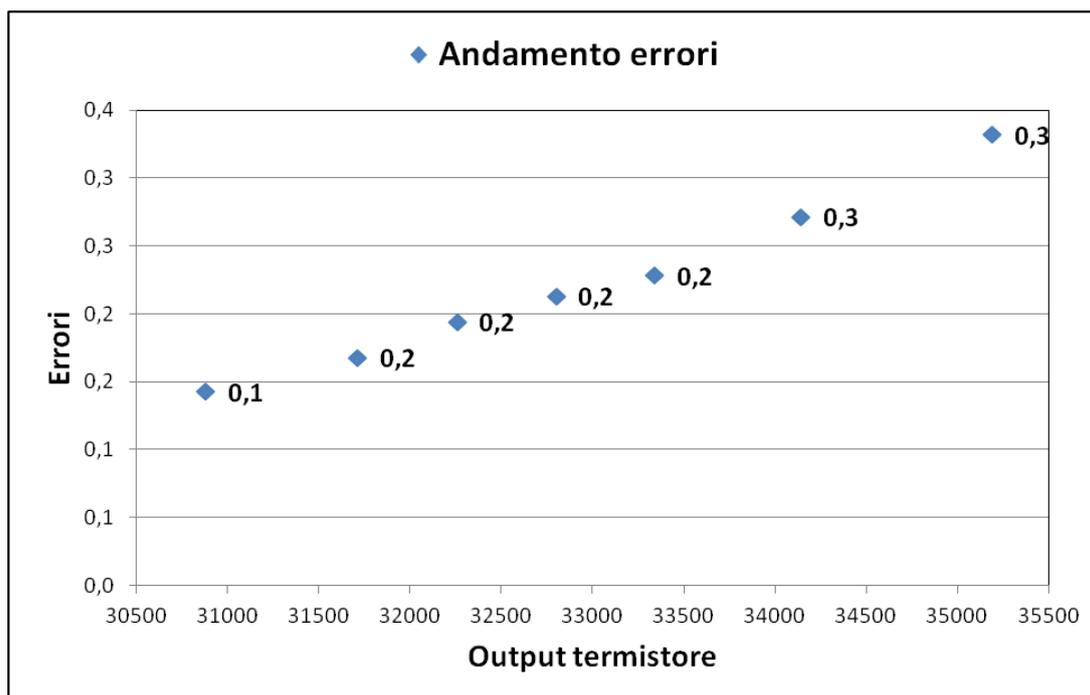


Figura 40: Errori nella determinazione della temperatura a cui si trova il sensore a termopila. Gli errori sono dovuti all'approssimazione lineare che la LUT fa tra due punti di calibrazione consecutivi.

I valori in grafico corrispondono all'errore massimo nel punto centrale di ogni intervallo di temperatura, dove l'andamento lineare si discosta maggiormente da quello reale mostrato in figura 39.

Si osserva che l'errore commesso a più alte temperature è maggiore a causa della maggiore non linearità della relazione $R(T)$ per il termistore.

L'accuratezza della misura di temperatura è 0,3°C.

2.2.2. Calibrazione termopila

La temperatura assoluta dell'oggetto da misurare è calcolata mediante la seguente relazione, valida per un corpo nero ($\varepsilon = 1$), tramite il software di gestione:

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{V_{out}}{\alpha} + T_{sens}^4},$$

le cui quantità sono state precedentemente definite.

Una accurata misura della temperatura oggetto richiede, però, un accurato valore del fattore strumentale (o sensibilità) α , definito tramite un attento processo di calibrazione, oltre che della temperatura del sensore.

Per la calibrazione della termopila è stato immerso nel bagno termico un corpo nero (Figura 41) costruito ad hoc, la cui temperatura è stata continuamente controllata con la sonda di riferimento (Selelogic).

Il sensore è stato poi posto sull'apertura (Figura 42) del corpo nero (non immersa nel bagno termico), così che la radiazione potesse incidere solo sulla parte sensibile, e, inoltre, isolato per evitare che il termistore venisse influenzato durante le misure.



Figura 41: Corpo nero costruito per una prima calibrazione della termopila. La parte immersa nel bagno termico è costituita di alluminio e internamente completamente dipinta di nero. La parte esterna è servita come appoggio per il puntatore, la cui parte sensibile era diretta verso l'interno del bagno termico.



Figura 42: Immagine dall'altro del corpo nero utilizzato per la calibrazione della termopila. Si osserva l'apertura del corpo nero su cui è stato poggiato il puntatore, con la parte sensibile rivolta verso l'interno. La sonda di riferimento è stata posta più vicina possibile al corpo nero, così che le due temperature (corpo nero e sonda di riferimento) avessero una temperatura confrontabile.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che, nonostante gli accorgimenti presi, il sensore risentiva fortemente delle masse d'aria calda provenienti dal bagno termico rendendo poco affidabile la calibrazione.

Il nuovo apparato sperimentale messo a punto per ottenere una più accurata misura è consistito in una piastra di alluminio, inserita verticalmente nell'apertura di un forno, di circa due cm di spessore, completamente colorata di nero. Da una parte lo spessore garantiva una distribuzione superficiale uniforme della temperatura, costantemente

monitorata tramite una comune Pt100 posta fuori dal campo di vista del sensore; dall'altra la superficie nera, con un valore di emissività prossimo all'unità, ha permesso una buona approssimazione di corpo nero. Inoltre le condizioni di misura controllate hanno assicurato un'ulteriore diminuzione della possibile influenza della radiazione riflessa sulle misure. La temperatura superficiale (T_{ogg}) è stata calcolata tramite tecnica termografica (Thermacam SC3000), a 25°C, 30°C, 35°C e 40°C, selezionando, durante il processo di analisi dati, un'area corrispondente al campo di vista del sensore. Il diametro di quest'ultima era di circa 5,24 cm per una distanza sensore – oggetto di 50 cm.

L'output delle due componenti del sensore a termopila (V_{out} e T_{sens}) corrispondono ad una media di 100 misure ogni 0,09 secondi, mentre la T_{ogg} è definita sulla media di 6 termogrammi, tramite il software Grayess IRT analyzer.

In figura 43 è mostrata la curva di calibrazione ottenuta, in cui il valore del fattore strumentale è dato dal valore del coefficiente angolare della retta interpolante, pari ad un valore medio di $1,47 \times 10^{-13} \text{ V/K}^4$.

Si osservi che in figura 43 i valori di output della termopila non sono misurati in volt, ma corrispondono ai valori in uscita dal convertitore analogico-digitale.

Dalla figura 44 si può osservare che i valori di sensibilità calcolati per ogni temperatura di calibrazione sono entro i $2\sigma_\alpha$ dal valore medio, dove σ è pari a $5,12 \times 10^{-7}$. I valori di α e σ_α in figura 44 non sono stati

calcolati in V/K^4 , in quanto il segnale di output della termopila utilizzato nel calcolo è relativo al segnale in uscita dal convertitore analogico-digitale.

La conversione del segnale di output della termopila in Volt comporterebbe una semplice variazione numerica ai risultati ottenuti.

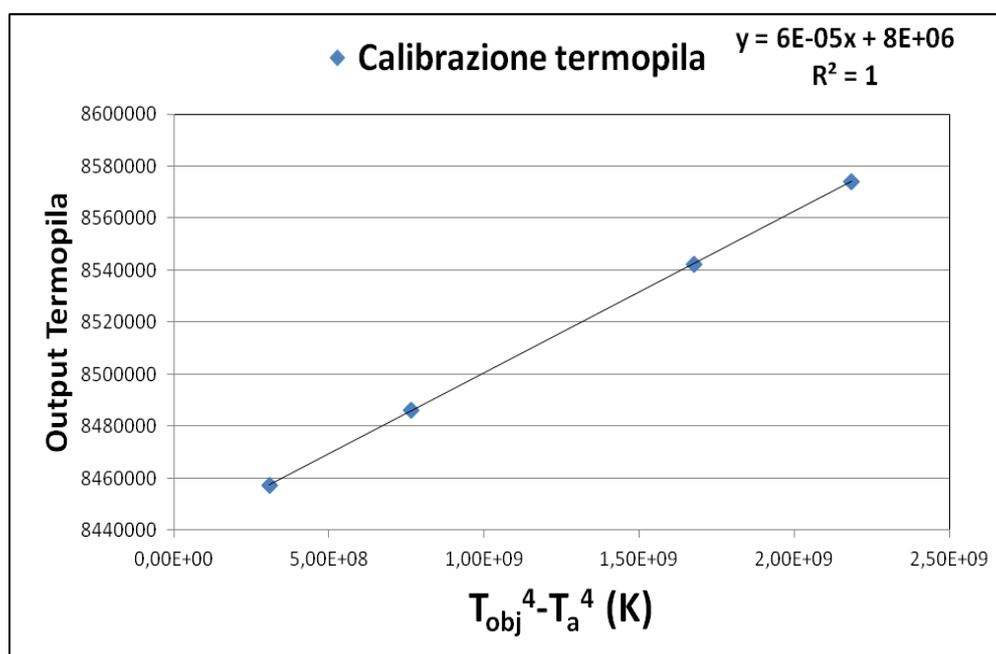


Figura 43: Curva di calibrazione della termopila. In ordinata i valori di output non sono misurati in Volt, ma corrispondono ai valori di uscita del convertitore analogico digitale.

Il fattore strumentale così calcolato verrà utilizzato dal software per il calcolo della temperatura superficiale. Si può osservare che la calibrazione è relativa ad un corpo nero per limitare gli errori dovuti

all'emissività, che può essere introdotta mediante software nelle misure in campo.

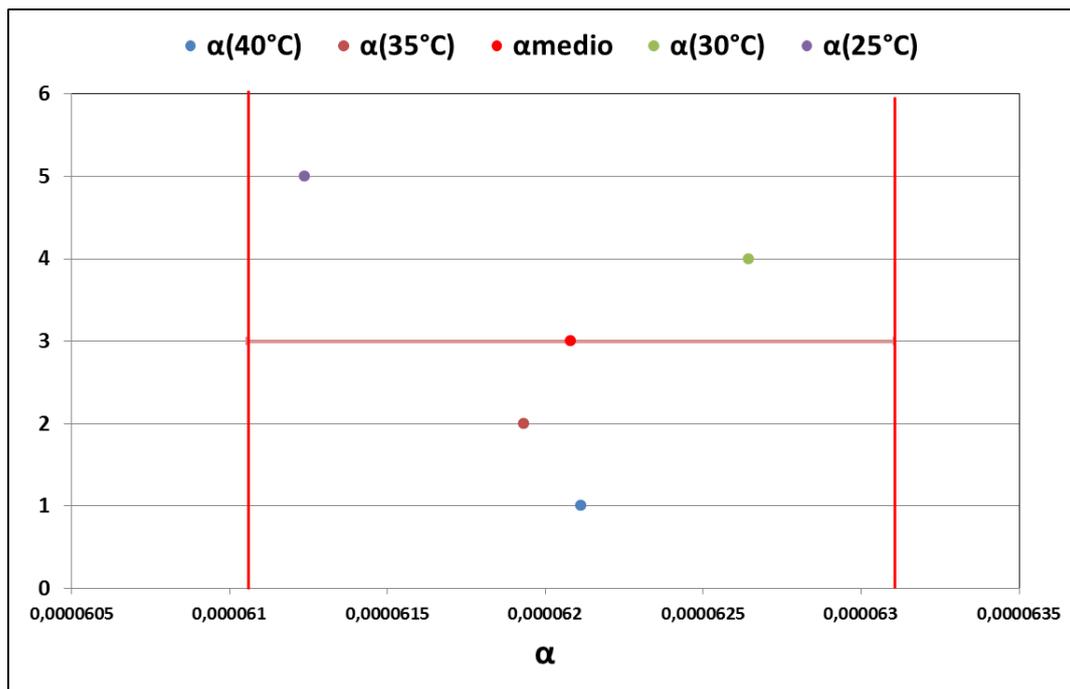


Figura 44: Valori strumentali (sensibilità) calcolati per ogni temperatura di calibrazione. Si osserva che tutti sono entro i 2σ del valore medio.

L'errore massimo sulla temperatura superficiale è stata calcolata mediante la teoria di propagazione degli errori, la cui equazione generale per una generica funzione $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ è:

$$\delta_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u_1} \Delta u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_2} \Delta u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial u_n} \Delta u_n\right)^2};$$

che diviene nel caso specifico:

$$\delta T_o = \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{V_{IR}}{\alpha} + T_a^4\right]^{3/2}} \times \left[\left(\frac{\delta V_{IR}}{4\alpha}\right)^2 + \left(\frac{V_{IR}}{4\alpha^2} \delta\alpha\right)^2 + (T_a^3 \delta T_a)^2 \right]},$$

dove:

- V_{IR} : è l'output della termopila alla massima temperatura di calibrazione, calcolato in termini di segnale di uscita del convertitore analogico-digitale,
- δV_{IR} è l'errore massimo di non linearità della termopila, calcolato alla massima temperatura di calibrazione,
- α è il valore medio del fattore strumentale definito precedentemente, in seguito alla calibrazione della termopila,
- $\delta\alpha$ è la deviazione standard del fattore strumentale prima definita,
- T_a è la temperatura a cui si trova il sensore, ottenuta dal termistore, corrispondente al punto massimo di calibrazione,

- δT_a è l'errore del termistore corrispondente al massimo valore di calibrazione.

L'errore massimo nel calcolo della temperature superficiale ottenuto è pari a $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Tale valore molto più basso degli errori che caratterizzano i sensori a remoto più diffusi nel campo dei beni culturali (radiometro e termocamera), permetterà di ottenere una misura della temperatura superficiale molto più accurata.

2.4. Definizione del campo di vista (FOV)

Per il calcolo del campo di vista del sensore è stata utilizzata una resistenza al quarzo posta dietro una lastra di alluminio, caratterizzata da una fessura verticale di dimensioni 5mm x 20 cm; in modo da avere una sorgente puntiforme entro il campo di sensibilità del sensore. Il puntatore è stato, poi, montato su una testa rotante graduata per un movimento orizzontale del sensore in un range angolare di 20° (-10° ; $+10^\circ$), a step di 1° . Ad ogni passo è stata registrata la risposta della termopila e normalizzata rispetto al valore massimo di risposta secondo la relazione seguente:

$$Term_{out} (\%) = 100 \times \frac{term_{out}}{term_{out}(\max)}$$

dove $term_{out}$ è l'output della termopila per ogni step e $term_{out} (max)$ è il massimo segnale di output della termopila.

Il campo di vista del puntatore ottenuto è di 6° , come mostrato in figura 45, corrispondente al 50% del segnale della termopila.

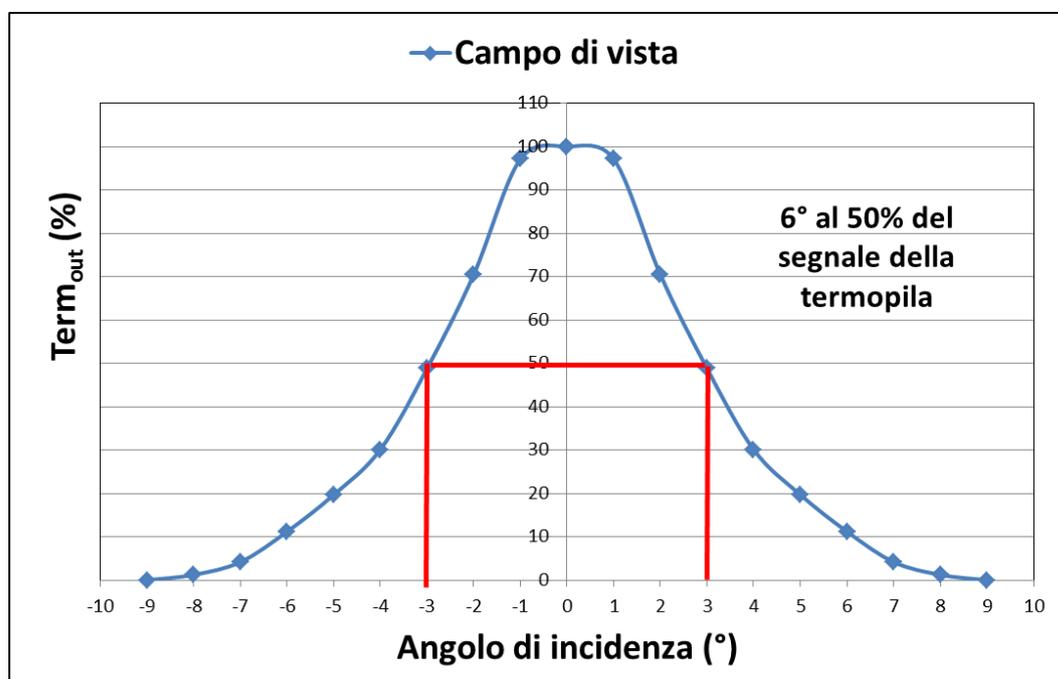


Figura 45: Campo di vista del puntatore all'infrarosso, pari a 6° al 50% del segnale di output della termopila.

2.3. Condizioni di misura: distanza sensore - oggetto

La distanza ottimale a cui il puntatore deve essere posto, per una misura più accurata della temperatura superficiale, è stata definita teoricamente mediante la seguente legge fondamentale delle lenti sottili (formula di Huygens):

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f},$$

dove p è la distanza lente-oggetto, q è la distanza lente-immagine ed f è la distanza focale (9,4 mm). Quest'ultima, calcolata ad una lunghezza d'onda di 10 μm , che corrisponde al valore centrale dell'intervallo di λ a cui il sensore è sensibile, introduce una perdita di energia trascurabile alle altre lunghezze d'onda.

Il risultato ottenuto, mostrato in figura 46, indica che già una distanza sensore –oggetto di circa 2 metri assicura una completa focalizzazione della radiazione sul sensore. Si osserva, infatti, che la distanza a cui si forma l'immagine (q) è uguale alla distanza focale della lente (f).

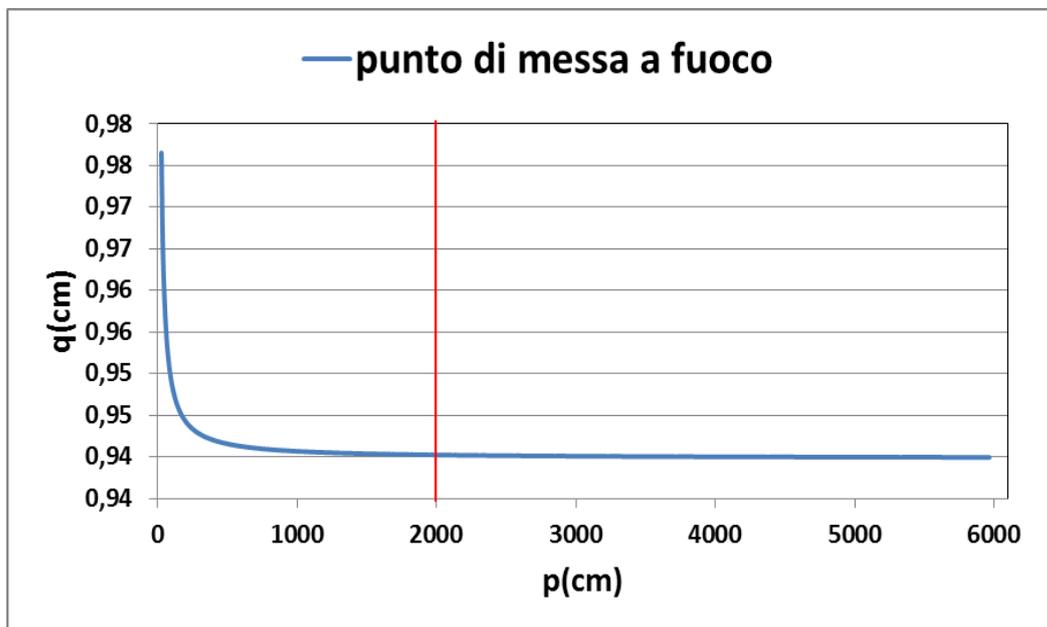


Figura 46: Variazione del punto di messa a fuoco al variare della distanza sensore-oggetto ottenuta tramite la formula di Huygens, valida in approssimazione di lente sottile.

Va osservato, che il risultato ottenuto è ottimale per i nostri scopi, valutando che il puntatore all'infrarosso è stato ideato per il monitoraggio di oggetti d'arte di grandi dimensioni, come ad esempio i dipinti su tavola conservati al museo dell'Opera di Santa Croce, o posti a grandi distanze.

Non bisogna dimenticare, inoltre, che in molti casi, negli ambienti museali è necessario posizionare gli strumenti a grandi distanze, per non impedire la fruizione delle opere d'arte da parte dei visitatori.

Le perdite di energia dovute alla lente sono dovute principalmente a due fenomeni: perdita per assorbimento (Figura 47), inclusa nella

caratterizzazione del fattore strumentale (α) e perdita per scorretta focalizzazione.

Nel secondo caso la perdita è stata verificata valutando il segnale di uscita del sensore a termopila per una superficie più estesa del FOV a temperatura costante.

Le perdite di energia per l'assorbimento da parte del vapore acqueo, presente nell'atmosfera tra sensore e superficie, non sono state considerate, in quanto, come precedentemente detto, nel campo dei Beni Culturali si ha a che fare con ambienti caratterizzati da un valore di UR poco influente sulle misure.

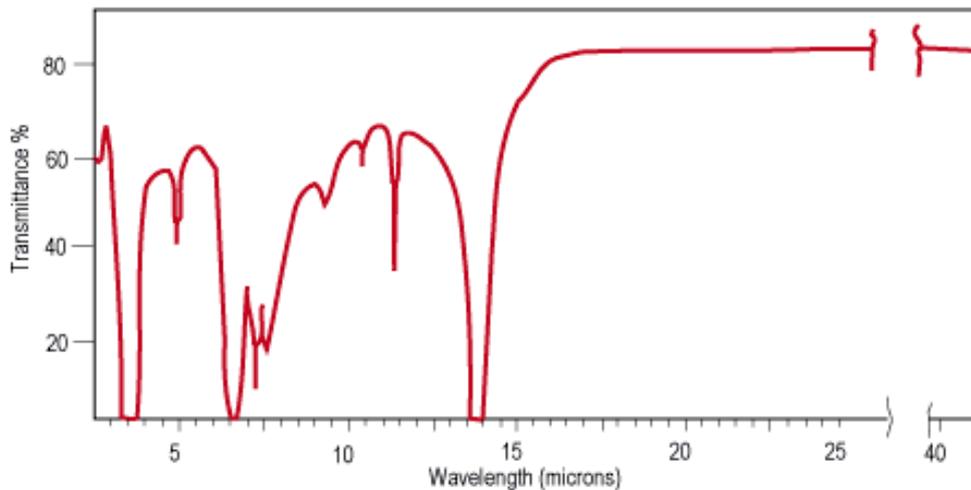


Figura 47: Trasmittanza delle lente di Fresnel utilizzata nella costruzione del puntatore alle diverse lunghezze d'onda. Le percentuali sono relative ad un campione di spessore di 0,457 mm.

L'apparato sperimentale è lo stesso di quello usato per la calibrazione della termopila (vedi paragrafo 2.2.2), ad eccezione della termocamera.

Le misure sono state eseguite a temperatura di 30°C, 40°C, 55 °C variando la distanza sensore-oggetto da 0,25 m a 2 m con step di 25 cm.

Questo ha permesso, anche, di quantificare sperimentalmente la perdita di energia per distanze sensore-oggetto inferiori ai 2 metri. Il sensore a termopila è stato messo ad una distanza focale relativa ad un oggetto posto a 25 cm.

In figura 48 mostriamo, come esempio, il risultato ottenuto a 55°C, in cui si evidenzia una perdita di energia dovuta alla lente di Fresnel di circa 5°C (cerchio rosso).

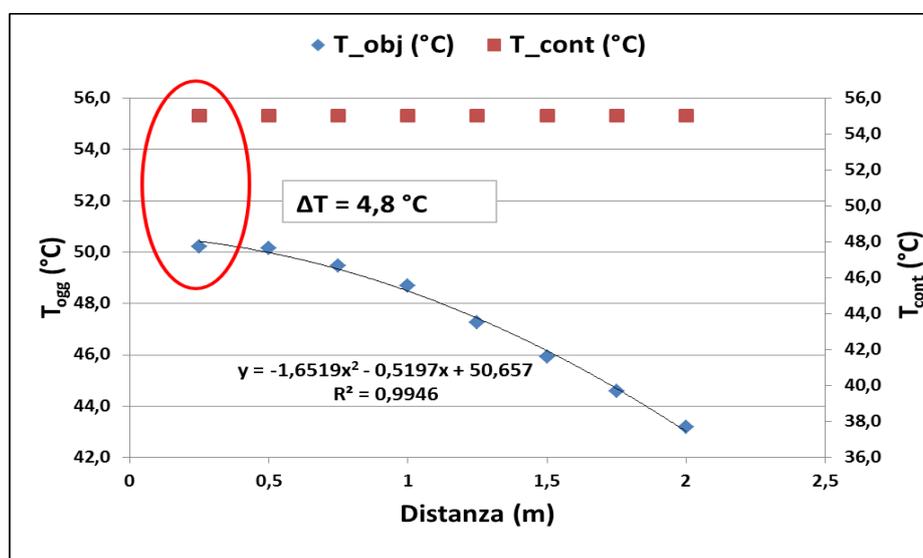


Figura 48: Nel grafico si può osservare la perdita di radiazione a causa della variazione del punto di messa a fuoco al variare della distanza sensore-oggetto. La misura è relativa ad un valore di temperatura di 55°C e il sensore è stato messo a fuoco, per facilità dell'assetto sperimentale, ad una distanza di 25 cm.

Un confronto diretto con le misure di temperatura ottenute dal sensore a contatto, collegato al puntatore, permetterà, durante la fase di installazione, di correggere la perdita di energia dovuta alla lente di Fresnel, consentendo, così, misure più accurate di temperatura superficiale.

Tale metodo è stato sviluppato ad hoc a causa dell'impossibilità di correggere la perdita di energia dovuta all'ottica tramite un processo di calibrazione. Infatti bisogna ricordare che il segnale di output del sensore a termopila non è direttamente proporzionale alla temperatura dell'oggetto da misurare, ma risulta essere proporzionale alla differenza di temperatura tra l'oggetto e il sensore stesso.

I risultati mostrati in figura 48, relativi alla perdita di energia in seguito alla variazione della distanza sensore-oggetto a 55°C, ci danno un'indicazione della possibile entità della diminuzione della temperatura oggetto al variare della distanza. Si osserva una diminuzione graduale della temperatura oggetto andando da una distanza di 25 cm fino alla massima distanza di misura, a cui è stata misurata la diminuzione massima di temperatura di circa 7°C. Tale valore è stato calcolato sottraendo il contributo della lente.

Tali perdite di energia possono, tuttavia, essere corrette in fase di calibrazione tramite il sensore a contatto. Questo permetterebbe, quindi, di ottenere delle accurate misure di temperatura superficiale anche a distanza minore di 2 m.

Capitolo 5

IINFLUENZA DELLE VARIAZIONI TERMICHE SULL'ELONGAZIONE DEL LEGNO

Come discusso, per una buona conservazione delle opere d'arte è importante un monitoraggio dei parametri termo-igrometrici così come della temperatura superficiale. Quest'ultima permette una conoscenza diretta dello stato di benessere dell'opera immersa in un particolare microclima, dando informazioni circa i processi fisici che possono avvenire all'interno del materiale.

Poiché ogni opera d'arte risponde diversamente alle sollecitazioni ambientali, è importante conoscere a fondo la reazione di ognuna, al fine di comprendere le migliori condizioni di conservazione, che possono essere, però, solo indicative. Infatti soprattutto quando si ha a che fare con manufatti artistici entrano in gioco numerose variabili, quali ad esempio la loro storia pregressa o la loro diversa struttura composita,

rendendo difficile definire le migliori condizioni di conservazione.

Un caso rappresentativo è dato dai dipinti su tavola, che differiscono tra di loro sia per quanto riguarda i supporti lignei [31] che per gli strati preparatori e pittorici, caratterizzati a loro volta da una diversa storia e attuale stato di conservazione.

Nello studio dei dipinti su tavola non è possibile scindere i due elementi legno e dipinto vero e proprio, in quanto l'intima unione di materiali così eterogenei, che rispondono in tempi e modalità diverse al variare dei fattori termici e igrometrici, rende problematica la conservazione delle opere stesse.

La stabilità degli stati preparatori e pittorici, infatti, è fortemente condizionata dai delicati rapporti di equilibrio ed elasticità che legano legno, gesso, colla e pigmento [31] [32] [33] [34] [35]. Nella maggior parte dei casi, comunque, i danni più gravi alla struttura e alla godibilità del dipinto devono essere attribuiti all'azione, diretta o indiretta, del supporto ligneo [36]. Le variazioni dimensionali e le deformazioni che il legno subisce in seguito a variazioni termo-igrometriche [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] possono causare stati di tensione che si ripercuotono sullo strato pittorico che, avendo un diverso grado di deformabilità, subisce una serie di traumi che possono risultare anche di gravissima entità. Ad esempio, il sollevamento del colore dovuto all'alternanza di fasi di rigonfiamento e ritiro del legno causati da escursioni termo-igrometriche. Bolle di colore localmente distaccato,

sovrapposizioni fra due lembi di pellicola pittorica, la formazione di cretti, la cosiddetta micro-craquelure o, ancora, la sconnessione di due tavole con conseguenti lesioni estese e spaccature nel colore sono ulteriori danni attribuibili al ritiro del legno.

I lavori presenti in letteratura hanno evidenziato, principalmente, l'importanza delle variazioni di umidità relativa (quindi contenuto di umidità interno del materiale) sul comportamento fisico del legno, definendo dei range di tollerabilità. Variazioni dimensionali del legno dovute ai soli gradienti termici, non legate, cioè, ad un cambiamento del contenuto di umidità interna del materiale, sono considerate di secondaria importanza, e, quindi, ad oggi poco studiate.

Al fine di una conoscenza più approfondita del comportamento fisico del legno sottoposto ai soli gradienti termici, per una migliore conservazione dei dipinti su tavola, in questo lavoro di tesi sono stati effettuati esperimenti in laboratorio su campioni di pioppo, in quanto è la specie legnosa più diffusa in Italia nell'ambito dei Beni Culturali.

Per poter comprendere la reazione fisica del legno a sollecitazioni esterne di seguito verranno descritte alcune delle sue più importanti caratteristiche.

1. Struttura e deformazione igroscopica del legno

A livello di organizzazione ultrastrutturale [36] [46] l'unità di riferimento del legno è rappresentata dalle micro-fibrille, disposte parallelamente all'asse del tronco (direzione longitudinale), caratterizzate nella loro parte centrale dalla aggregazione di singole catene di cellulosa (Figura 49).

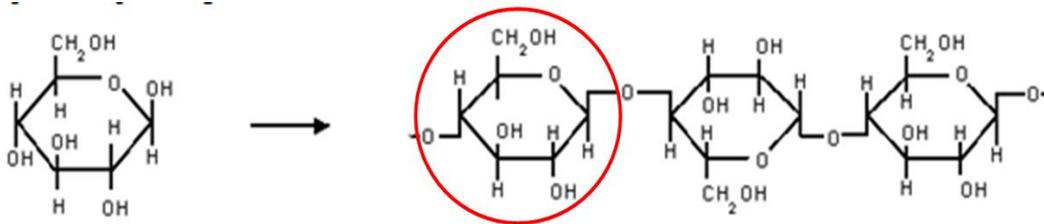


Figura 49: Struttura molecolare della cellulosa.

Il legame delle singole unità di glucosio (contrassegnate in figura da un cerchio rosso) è piuttosto stabile (60-80 cal/mole) e non facilmente scindibile, conferendo alla cellulosa (quindi alla micro-fibrilla) un'ottima resistenza alle sollecitazioni longitudinali (compressione e trazione). I numerosi gruppi ossidrilici (R-OH) presenti sulla catena di cellulosa possono formare con ad altri gruppi simili legami di tipo polare, detti

legami a idrogeno. Tali legami hanno un'energia di legame molto più bassa dei precedenti (3-5 cal/mole) e consentono alle singole catene di cellulosa di legarsi tra loro a formare le micro-fibrille, che sono caratterizzate da una più modesta resistenza alle sollecitazioni trasversali (perpendicolari alla direzione delle micro-fibrille).

Tale organizzazione ultrastrutturale è alla base, anche, del comportamento anisotropo del legno a livello igroscopico. Infatti, i gruppi ossidrilici che non sono impegnati nella struttura della micro-fibrilla fungono da punti di aggancio per le molecole di acqua, che possono legarsi alla struttura e divenire, di fatto, uno dei costituenti del legno. Tuttavia il numero di gruppi (-OH), seppur grande, è finito, per cui la quantità di acqua che il legno può mantenere direttamente legata alla sua struttura è limitata, ed è chiamata "acqua di saturazione".

Le molecole di acqua, anche se molto piccole, sono caratterizzate da una loro dimensione fisica ben definita, che, in seguito ai fenomeni di equilibramento igroscopico con l'ambiente, liberandosi o legandosi (adsorbimento o desorbimento) alla struttura della micro-fibrilla ne provocano variazioni dimensionali (ritiro o rigonfiamento). La disposizione dei gruppi (-OH) lungo le catene di cellulosa fa sì che tali variazioni dimensionali interessino maggiormente la direzione trasversale della micro-fibrilla rispetto a quella longitudinale, introducendo, così, un comportamento igroscopico anisotropo del legno.

Il comportamento del legno a livello macroscopico rimane coerente con quello delle micro-fibrille, dato che la maggior parte di esse tende a

disporsi, all'interno delle pareti cellulari, parallelamente all'asse del tronco, determinando la direzione della fibratura.

Per meglio comprendere l'anisotropia del legno a livello macroscopico, è utile introdurre le direzioni anatomiche del legno (Figura 50):

- direzione longitudinale: parallela alle fibrature e, quindi, all'asse del tronco,
- direzione tangenziale: tangente agli anelli di accrescimento,
- direzione radiale: corrispondente al raggio del tronco.

In ogni punto le tre direzioni anatomiche definiscono tre sezioni fondamentali: trasversale (TR), radiale (LR) e quella tangenziale (LT), che possono coesistere su uno stesso pezzo di legno.

Le diverse variazioni dimensionali, causate dalle escursioni termometriche, lungo le tre direzioni producono deformazioni e fessurazioni sulla tavola lignea. Chiamando β_t , β_r , β_l i ritiri tangenziali, radiali e longitudinali rispettivamente, i loro rapporti sono circa $\beta_t : 2,6 = \beta_r : 1 = \beta_l = 0,1$ [47][48].

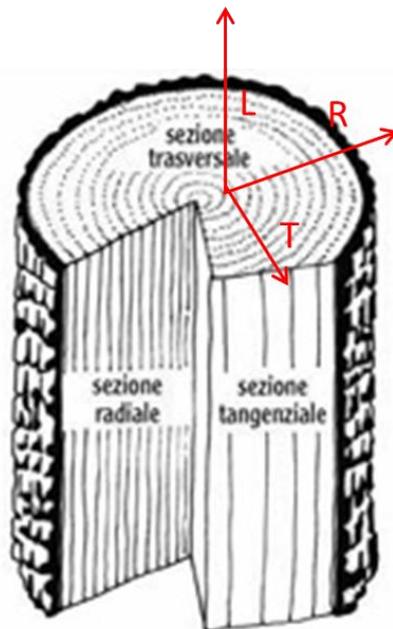


Figura 50: Direzioni anatomiche fondamentali del legno.

1.1. Deformazioni in campo igroscopico

L'umidità (U) contenuta nel legno è, quindi, responsabile delle sue deformazioni ed è definita dalla seguente relazione:

$$U = \frac{(m - m_0)}{m_0} \times 100;$$

dove m è la massa del pezzo di legno nelle condizioni di umidità da determinare e m_0 è la massa dello stesso pezzo allo stato anidro, cioè

completamente privo di umidità. Quest'ultima può essere ottenuta mantenendo il campione di legno in una stufa ventilata a 103°C fino a peso costante.

Variazioni dimensionali avvengono al di sotto di un limite caratteristico, generalmente definito intorno al 30% ma indicativamente può variare tra il 22% ed il 40% (dipendentemente dalla specie legnosa, densità del legno, sua storia pregressa, ecc..), il legno perde l'acqua legata (acqua di saturazione) innescando il ritiro volumetrico. Al contrario al di sopra di questo limite l'acqua, sotto forma di vapore, viene definita libera, in quanto non legata alla parete cellulare e quindi non coinvolta in fenomeni di ritiro e rigonfiamento.

1.2. Contenuto igrometrico di equilibrio (EMC)

Il legno è un materiale igroscopico, cioè ha la capacità di scambiare la propria acqua di saturazione direttamente con l'atmosfera circostante; quando si trova circondato da aria umida (caratterizzata da un certo valore di umidità relativa), si ha contemporaneamente una continua evaporazione di molecole d'acqua dal legno nell'aria circostante, ed una continua "cattura" di molecole di vapore da parte delle pareti cellulari (quindi delle micro-fibrille). Una differenza di velocità tra questi due fenomeni, che sono sempre concomitanti, in seguito ad una variazione di

UR, provoca variazioni dell'umidità del legno (adsorbimento, se questa aumenta; desorbimento, se diminuisce). Velocità identiche, invece, corrispondono ad una situazione di equilibrio tra legno ed aria circostante; definendo un contenuto di umidità nel legno costante, detto contenuto igrometrico di equilibrio (EMC – equilibrium moisture content).

In prima approssimazione, i valori di equilibrio sono simili per tutte le specie legnose [49], e dipendono solo dalle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente. In realtà ciascun pezzo tende ad equilibrarsi a valori che possono essere diversi da quelli tipici, e che dipendono sia da fattori legati al pezzo stesso (specie, caratteristiche proprie del pezzo, quale ad esempio il taglio, ecc.), sia dal fenomeno di isteresi igroscopica. Qualsiasi pezzo di legno tende a raggiungere o ripristinare l'equilibrio igroscopico con le condizioni termo-igrometriche ambientali ogni qualvolta queste subiscano una variazione; è pertanto importante mantenerle il più costante possibile.

Inoltre, il contenuto igrometrico di equilibrio può variare in seguito a riscaldamento, soprattutto diretto (radiazione naturale o artificiale), della superficie, che deve essere, quindi, evitato il più possibile. A tale scopo è auspicabile un monitoraggio in continuo della temperatura superficiale dell'oggetto.

2. Analisi in laboratorio

Da quanto detto si evince, quindi, l'importanza dell'interazione acqua-legno nei processi di ritiro e rigonfiamento del materiale, dovuti, principalmente, a variazioni del contenuto igrometrico di equilibrio.

Abbiamo visto che esso è influenzato sia da variazioni delle variabili termo-igrometriche ambientali che da variazioni della temperatura superficiale del manufatto. In quest'ultimo caso, oltre che risposte dimensionali del legno in seguito a variazioni della EMC, si ha anche una più veloce propagazione dell'onda termica all'interno del materiale, con conseguente espansione termica del legno.

Questo evidenzia una stretta interazione dinamica delle due variabili nel processo di deformazione del legno; ed è facile intuire la difficoltà di scindere i due contributi.

Tuttavia, in questo lavoro di tesi ci si è posti l'obiettivo di definire come e quanto la sola temperatura influenzi il comportamento fisico del legno fino ad oggi poco approfondito, in quanto considerato di secondaria importanza. Sono stati, quindi, condotti in laboratorio esperimenti su un campione di pioppo, in quanto è la specie più diffusa in Italia nel campo dei Beni Culturali (dipinti su tavola e sculture policrome).

Per poter isolare il solo contributo termico sul processo di deformazione del legno è stato mantenuto costante il contenuto igrometrico di equilibrio, mediante una bilancia ad alta precisione (1/1000 g). Infatti, dalla relazione definita nel paragrafo 1.1, si evince che un valore costante

della massa del campione corrisponde ad un valore costante della EMC. Ciò assicura che le deformazioni misurate possano essere attribuibili alle sole variazioni di temperatura.

Le dimensioni del campione di pioppo utilizzato nell'esperimento sono 1,5 cm x 10,25 cm in direzione longitudinale e radiale rispettivamente, e 3 mm in direzione tangenziale.

4.1. Metodologia sperimentale

L'apparato strumentale è costituito in una camera climatica (Figura 51), appositamente costruita, per il continuo controllo delle variabili termigrometriche ambientali (T e UR), misurate tramite sensirion SHT75.



Figura 51: Camera climatica appositamente costruita per il controllo delle variabili microclimatiche (temperatura e umidità relativa).

Il sensore di temperatura (range di misura: 0°C – 65°C; risoluzione di 0,01 °C) è stato calibrato in bagno termico, come descritto nel precedente capitolo, alle temperature di 0°C, 10°C, 20°C, 25°C, 30°C, 40°C, 60°C, 61°C, 63°C, 65°C. Al fine di ottenere una più completa analisi statistica dei dati sono state registrate 100 misure per ogni valore di temperatura. La curva di calibrazione è ben approssimata da un andamento lineare, come indicato in figura 52, permettendo di ottenere un'accuratezza nelle misure di $\pm 0,02^\circ\text{C}$. La tabella di calibrazione, così ottenuta, è stata utilizzata in una Look_Up Table per il calcolo delle temperature intermedie ai valori di calibrazione. Il sensore di umidità relativa è caratterizzato da un'accuratezza di $\pm 1,8\%$ e risoluzione di 0,05 % in un range di misura (-20%; + 80%).

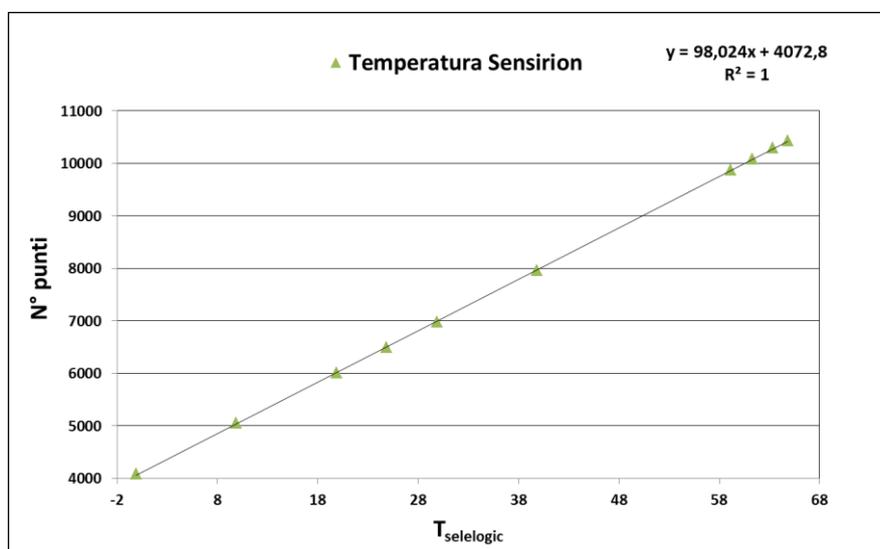


Figura 52: Curva di calibrazione ottenuta in condizioni di temperatura controllata in bagno termico, con l'ausilio di una sonda di alta precisione (Selelogic).

Un sistema di ventilazione ha permesso di ottenere una distribuzione omogenea dei valori di temperatura e umidità relativa all'interno della camera climatica.

L'esperimento è stato condotto in un range di temperatura tra 25°C e 55°C, con step di 5°C. Al fine di mantenere costante, durante l'intero esperimento, il valore del contenuto igrometrico di equilibrio del campione un preliminare processo di taratura (successivamente descritto) ha permesso di definire i rispettivi valori di umidità relativa per ogni step di T.

La massa del campione di legno, e quindi la sua EMC, è stata mantenuta costante tramite una bilancia ad alta precisione della Ohaus, modello Adventure Pro AV413C (Figura 53), fondo scala di 410g e accuratezza di 0,001g. Il continuo monitoraggio della massa ha permesso di ridurre il più possibile variazioni dimensionali del campione dovute all'adsorbimento o deassorbimento di acqua, ed evidenziare, così, il solo contributo termico alle deformazioni.

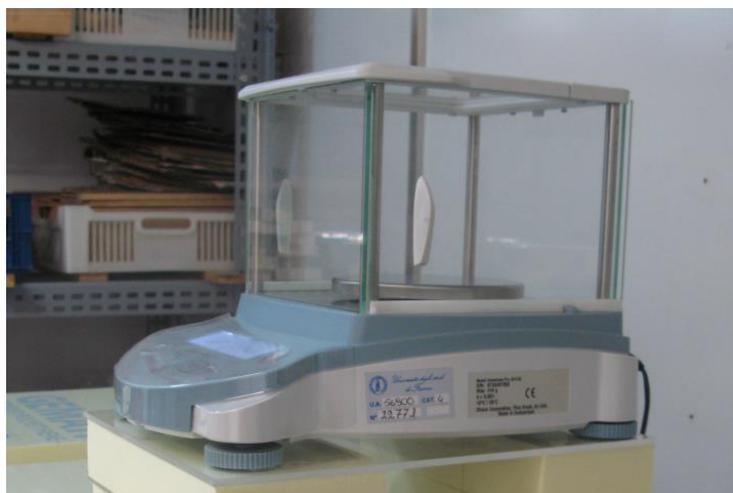


Figura 53: Bilancia ad alta precisione. Ohaus, modello Adventurer Pro AV413C; fondo scala di 410g e un'accuratezza di 0,001g.

Come mostrato in figura 51 la bilancia è stata posta fuori dalla camera climatica e supportata da materiale isolante, al fine di evitare, da una parte, influenze dovute all'elettronica soprattutto per alti valori della temperatura, dall'altra problemi di condensa sul piatto della bilancia, che potesse andare ad influenzare l'accurato monitoraggio della massa.

Il campione di pioppo, è stato inserito all'interno della camera climatica tramite un filo metallico continuamente collegato alla bilancia esterna. Per garantire un'ulteriore stabilità nella misura della massa del campione di legno sono stati agganciati alla base del filo metallico degli usuali bulloni metallici. Essi hanno permesso, infatti, di evitare che il movimento del campione dovuto alla ventilazione interna della camera climatica potesse influenzarne le misure.

Il campione è stato inizialmente portato ad una condizione di equilibrio con una temperatura di 25°C ed un valore di umidità relativa del 65,5% relativo ad un contenuto igrometrico di equilibrio di circa il 12%, come indicato da Simpson et al. 1998 [58]. La massa del campione misurata in laboratorio, corrispondente a tali valori di T e UR è pari a 1,862 mg. Al fine di mantenere tale valore costante (quindi costante la EMC iniziale), durante l'intero esperimento, è stato necessario un processo di taratura iniziale al fine di definire i valori di umidità relativa per lo specifico campione utilizzato nell'esperimento ad ogni step di temperatura. Bisogna, infatti, ricordare che ogni pezzo di legno risponde diversamente alle sollecitazioni ambientali esterne; inoltre la legge di Simpson, che definisce la relazione esistente tra le tre variabili (EMC, T, UR), è una media fatta su un ampio numero di campioni, quindi, i valori indicati potrebbero differire, anche se di poco, da quelli reali.

La massa è stata mantenuta costante ad ogni step di temperatura variando il valore di umidità relativa inserendo la giusta quantità di vapore acqueo all'interno della camera climatica, mediante un'unità PMCG [59].

Nelle figure 54 e 55, come esempio, sono mostrati gli andamenti di umidità relativa - temperatura e massa rispettivamente, relativi allo step di 45°C. Si osserva, in figura 54, un aumento di umidità relativa al fine di riportare la massa del campione di legno al valore iniziale di 1,862. Infatti in seguito all'aumento di temperatura da 40°C a 45°C la massa del campione tende a diminuire (indicato dalla freccia rossa), per una evaporazione del vapore acqueo in esso contenuto.

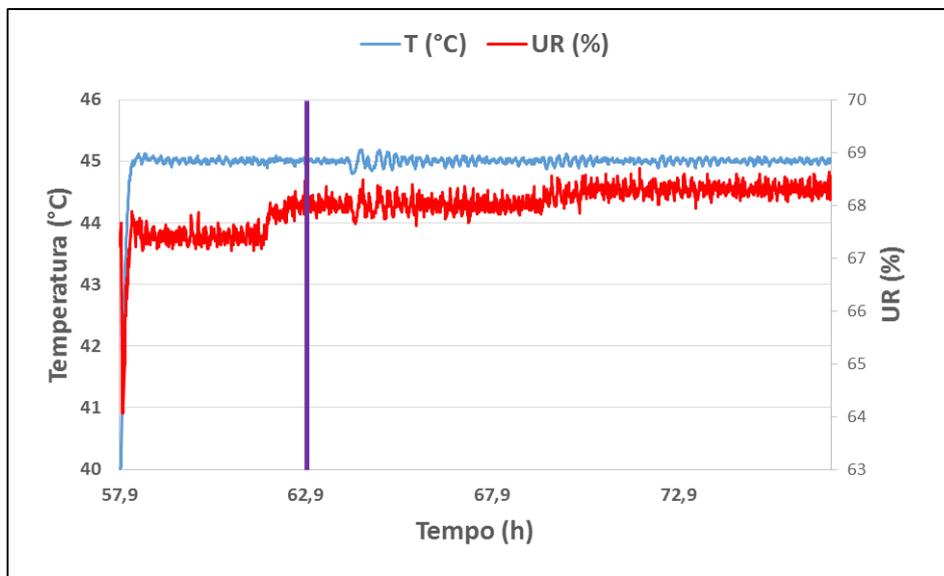


Figura 54: Andamento dell'umidità relativa e temperatura relative allo step di 45°C.

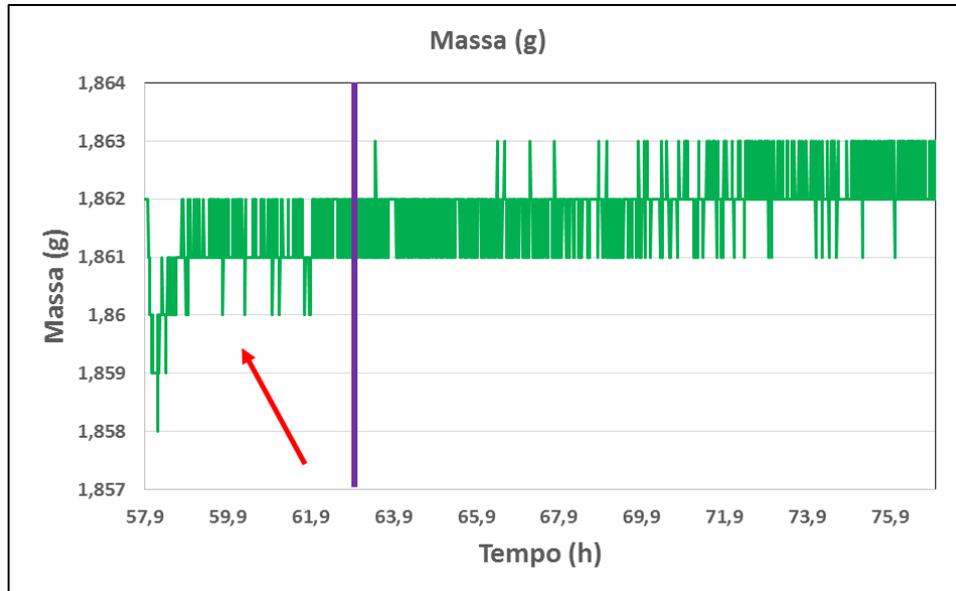


Figura 55: Andamento della massa del campione di legno corrispondente a valori di UR e T di 45°C e 68,2 % rispettivamente.

Al fine di permettere al nostro campione di raggiungere l'equilibrio con le condizioni ambientali della camera climatica, per ogni step le variabili in gioco vengono monitorate per circa 20 ore. Si osserva che già dopo 4 ore (linea viola nelle figure 54-55), il campione ha raggiunto il valore desiderato della massa. Infatti in figura 56 si vede che la differenza tra le medie orarie relative alla quarta e quinta ora di monitoraggio (freccia verde), per lo step di temperatura di 45°C, risulta essere minore dell'accuratezza della bilancia (che ricordiamo essere 0,001 g). Tale comportamento è osservato per tutto il tempo del monitoraggio indicando un andamento asintotico della massa del campione. A questo punto può essere definito il valore associato dell'umidità relativa. In figura 56 sono mostrate anche le medie orarie calcolate sui valori di UR; si osserva che tale valore può essere definito con molta precisione, in quanto anche in tal caso le differenze tra le medie orarie risultano essere al di sotto dell'accuratezza del sensore di umidità relativa.

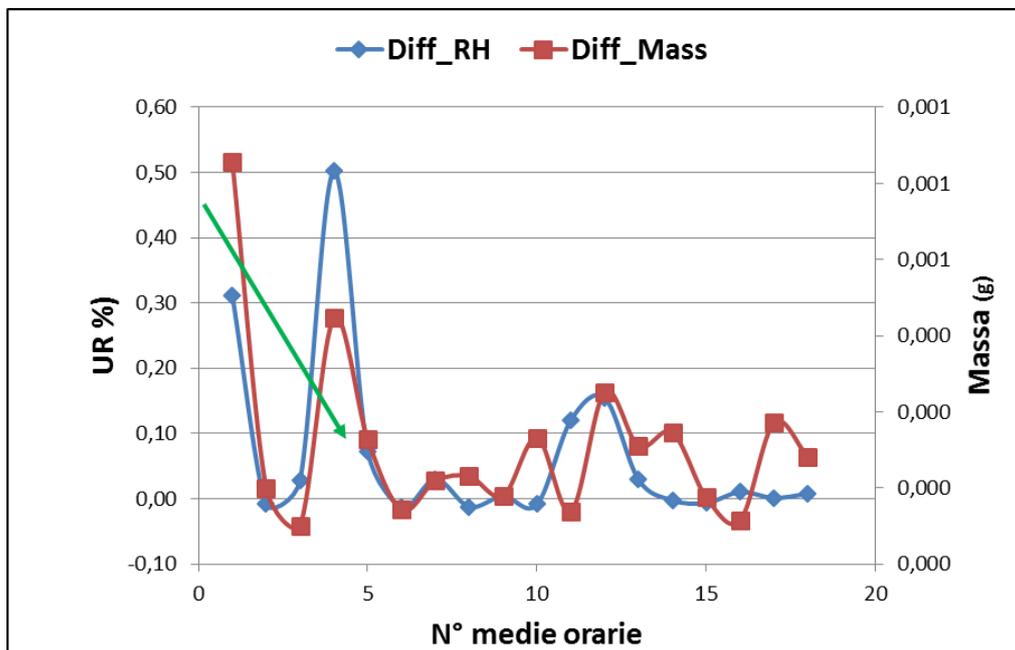


Figura 56: Medie orarie della massa del campione calcolate per l'intero monitoraggio a 45°C. Si osserva che già dopo due ore (freccia verde) le medie orarie differiscono da quelle precedenti di un valore al di sotto del millesimo di grammo.

Il processo di taratura ha permesso, così, di definire i valori di umidità relativa per ogni step di temperatura mostrati in tabella 3; Essi sono stati successivamente utilizzati nell'esperimento al fine di assicurare un valore costante della EMC e, quindi, di studiare l'influenza della sola temperatura sulle variazioni dimensionali del legno.

Temperatura (°C)	Umidità relativa (%)
25	65,5
30	66,0
35	66,5
40	67,4
45	68,2
50	69,6
55	71,6

Tabella 3: Valori di equilibrio di temperatura e umidità relativa corrispondenti ad una valore del 12% dell'EMC.

Le misure di elongazione sono state, quindi, condotte sullo stesso campione di legno, con un trasduttore elettronico (Figure 57-58) della Monitran MTN/EUGL000.5-358270, range di misura (0-1) mm, sensibilità 4879.0000 mV/mm e linearità migliore del 25%.

In figura 57 è mostrato l'intero apparato strumentale, costruito ad hoc, utilizzato per la misura delle variazioni dimensionali, costituito dal trasduttore (evidenziato in rosso) e dal supporto in alluminio per il campione.

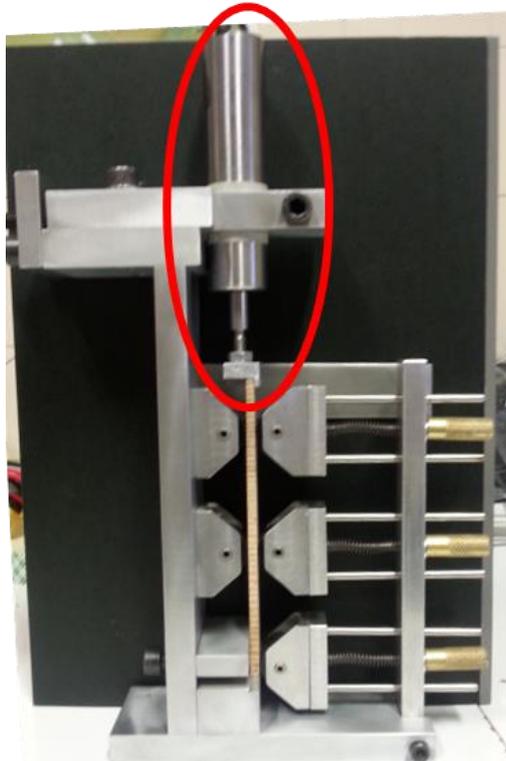


Figura 57: Trasduttore della Monitran per la misura delle variazioni dimensionali lungo la direzione radiale del campione più supporto in alluminio

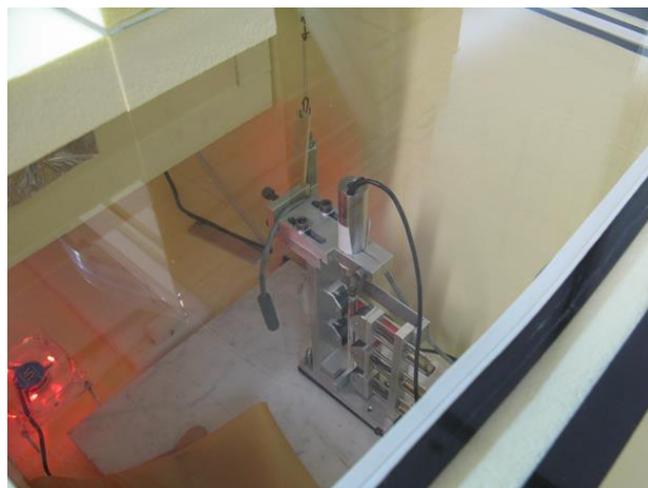


Figura 58: Vista dall'alto del trasduttore più supporto del campione di pioppo.

4.2. Caratterizzazione del trasduttore e supporto

Al fine di isolare il contributo dell'intero sistema di misura (trasduttore e supporto) sull'elongazione del campione di legno, sono state eseguite delle prove preliminari su uno standard di riferimento, nello stesso range di temperatura in cui sono state, in seguito, misurate le variazioni dimensionali del campione di pioppo.

Lo standard utilizzato è stato vetro borosilicato – Standard Reference Material 731- certificato dal National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg – Mariland).

Le deformazioni termiche del sistema (Figura 59), elencate in tabella 4 con le rispettive deviazioni standard, sono state calcolate da una media di tre set di misure, ognuna ottenuta dalla relazione:

$$\Delta def_{trasd} = \Delta def_{tot} - \Delta def_{stand},$$

dove Δdef_{tot} è la deformazione totale (sistema – standard), misurata sperimentalmente entro un certo intervallo di temperatura, e Δdef_{stand} è la rispettiva deformazione dello standard di riferimento calcolato nello stesso range di temperatura. Ogni termine è calcolato in funzione dei valori iniziali di riferimento a 25°C. I valori ottenuti, che rappresentano, quindi, la deformazione del sistema alla relativa temperatura, saranno

sottratti ai relativi valori di deformazione misurate, isolandone, così, le reali variazioni dimensionali termiche del legno.

ΔT (°C)	$\Delta def_{\text{measure_system}}(\mu\text{m})$	Deviazione standard
10	9,96	0,06
15	20,92	0,25
20	32,85	0,04
25	46,69	0,41
30	63,98	0,45
35	82,36	0,04

Tabella 4: Valori della deformazione del sistema di misura (supporto del campione e trasduttore), ottenuti da una media su tre ripetizioni di misure, con le rispettive deviazioni standards.

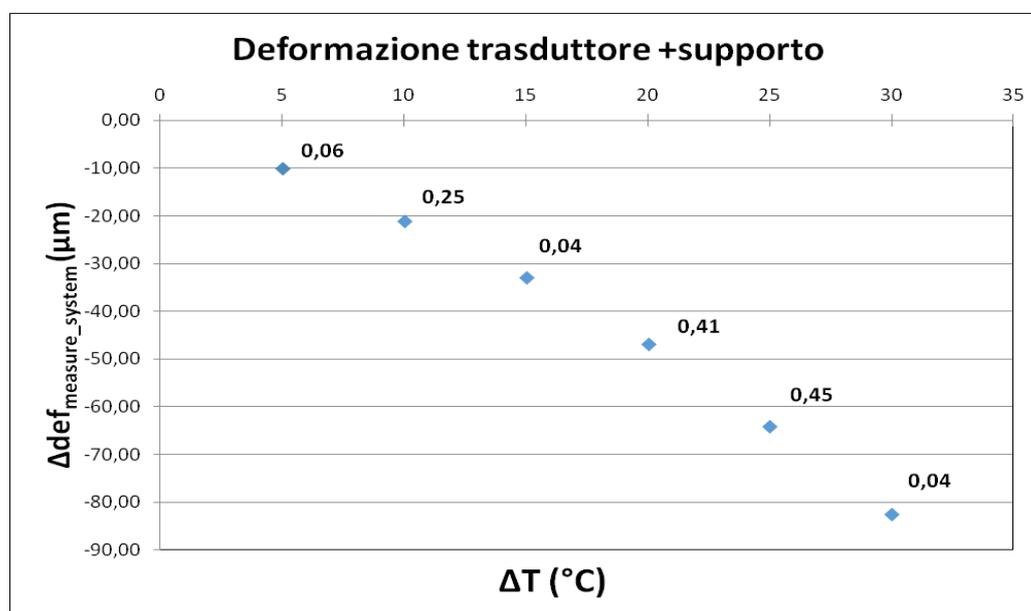


Figura 59: Valori assoluti della deformazione del sistema di misura (supporto del campione e trasduttore), ottenuti da una media di tre ripetizioni di misure

Per ogni set di misura l'andamento della deformazione (Δdef_{tot}) monitorato per circa 28 ore è stato considerato asintotico quando la differenza tra le medie orarie era di 0,05, permettendo di ottenere il relativo valore di deformazione. Nelle figure 60 e 61 sono mostrate, come esempio, le medie orarie calcolate per il terzo set di misure alla temperatura di 50°C. Si è osservato per tutti i set di misura che il sistema raggiungeva l'asintoto dopo circa 10 ore (figura 61). Questo ha assicurato che le misure di elongazione del campione di legno non venissero influenzate dalla risposta termica del sistema.

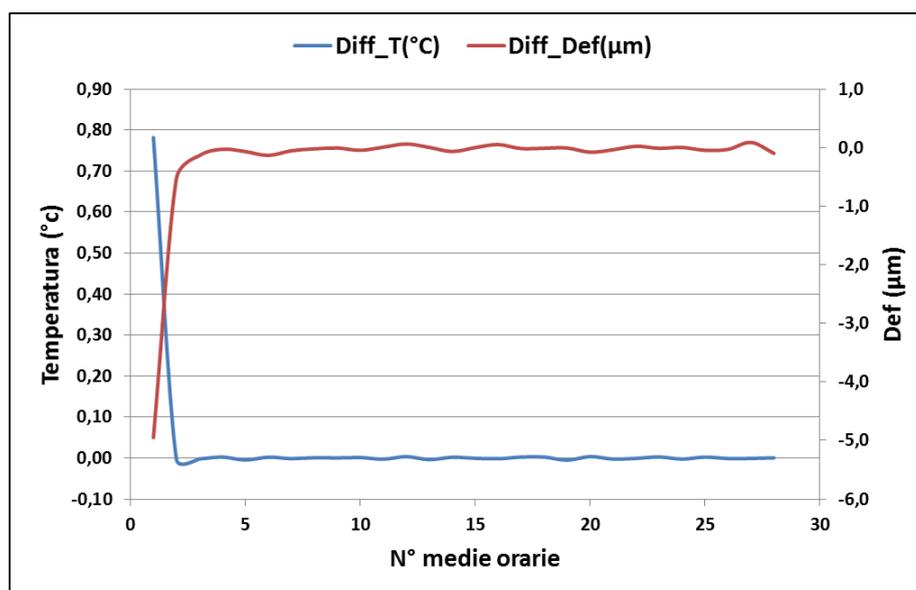


Figura 60: Medie orarie relative al terzo set di misure di deformazione, al fine di definire l'influenza del sistema trasduttore-supporto, per una temperatura di 50°C.

Per completezza sono state inserite anche le medie orarie della temperatura.

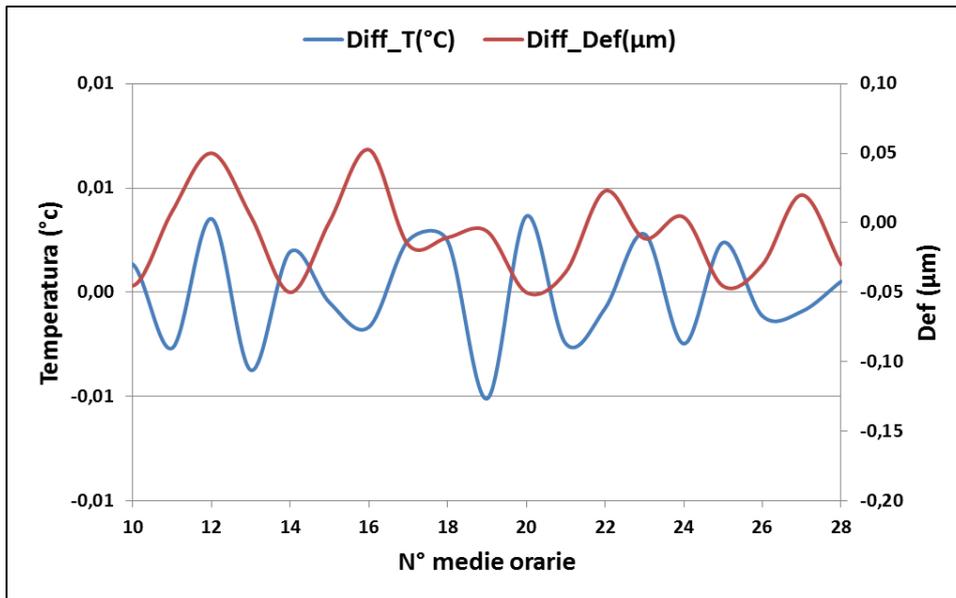


Figura 61: Ingrandimento dalla decima ora di monitoraggio delle medie orarie relative al terzo set di misure di deformazione e per una temperatura di 50°C.

Le variazioni unitarie del sistema per ogni steps di temperatura sono, invece, mostrate in tabella 5 con i rispettivi errori relativi calcolati dalla seguente relazione:

$$\frac{\Delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma \Delta def_{measure_{system}}}{\Delta def_{measure_{system}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \Delta T}{\Delta T}\right)^2},$$

dove x è definito $\Delta def_{measure_system}/\Delta T$ e $\sigma\Delta T$ è l'errore sulla misura di temperatura aria di 0,04 °C, ottenuto come somma dei singoli errori sulle misure di temperatura.

ΔT (°C)	$\Delta def_{measure_system}/\Delta T$ ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)	Errore
10	1,99	0,09
15	2,09	0,06
20	2,19	0,05
25	2,33	0,05
30	2,56	0,04
35	2,75	0,04

Tabella 5: Valori assoluti di deformazione unitaria del sistema di misura (supporto del campione e trasduttore), con i rispettivi errori sperimentali.

Si osserva che i dati sono ben descritti da una polinomiale di secondo grado, come mostrato in figura 62, e i valori assoluti, mostrati in tabella 5, aumentano all'aumentare della temperatura. Questo indica che per valori maggiori di temperatura è maggiore l'espansione termica del sistema rispetto a quella del vetro borosilicato.

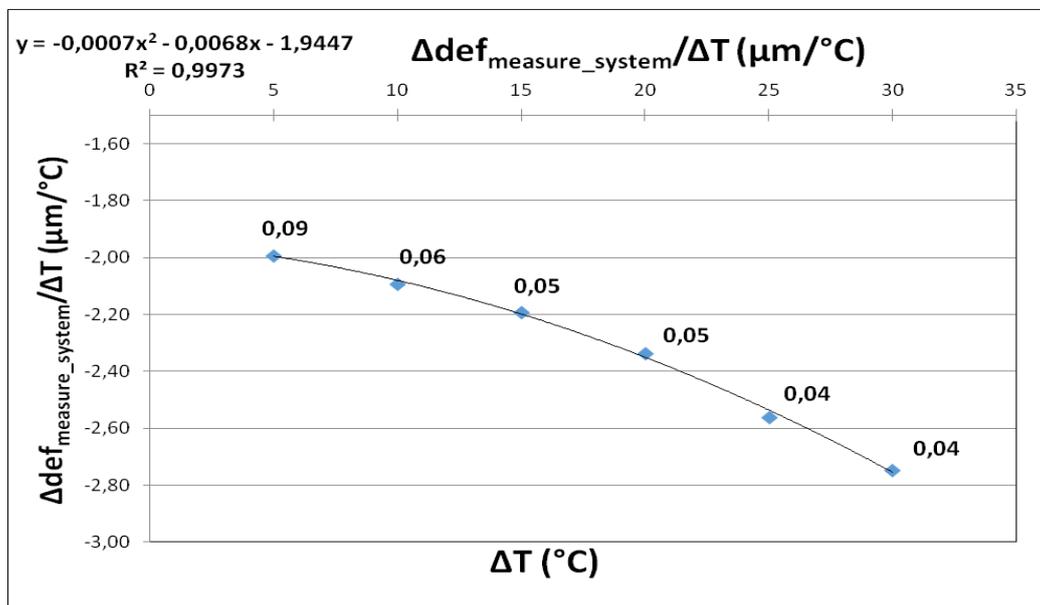


Figura 62: Variazione unitaria del sistema di misura (supporto del campione e trasduttore) in funzione degli step di temperatura.

I risultati ottenuti da questa prima calibrazione del sistema di misura indicano una buona affidabilità dell'intero assetto sperimentale.

4.2.1. Test del sistema di misura su campioni di alluminio

Al fine di una migliore caratterizzazione del comportamento termico del sistema di misura sono state effettuate ulteriori prove in laboratorio su un campione di alluminio di lunghezza 10 cm.

Poiché è noto che l'alluminio ha una deformazione lineare con la temperatura e un coefficiente di deformazione termica lineare, α_{lin} , di

circa $2,3/4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tali misure avrebbero permesso di provare l'affidabilità dell'assetto sperimentale.

In figura 63 si può notare, infatti, che l'andamento lineare della deformazione dell'alluminio con la temperatura ed il coefficiente di dilatazione termico lineare, di $\alpha_{\text{lin}} = 2,0 \times 10^{-5} \pm 5,7 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, sono congruenti con i dati in letteratura. Il valore di α_{lin} è stato definito dalla media di tre set di misure effettuate nel range di temperatura tra 25°C e 55°C , con step di 5°C .

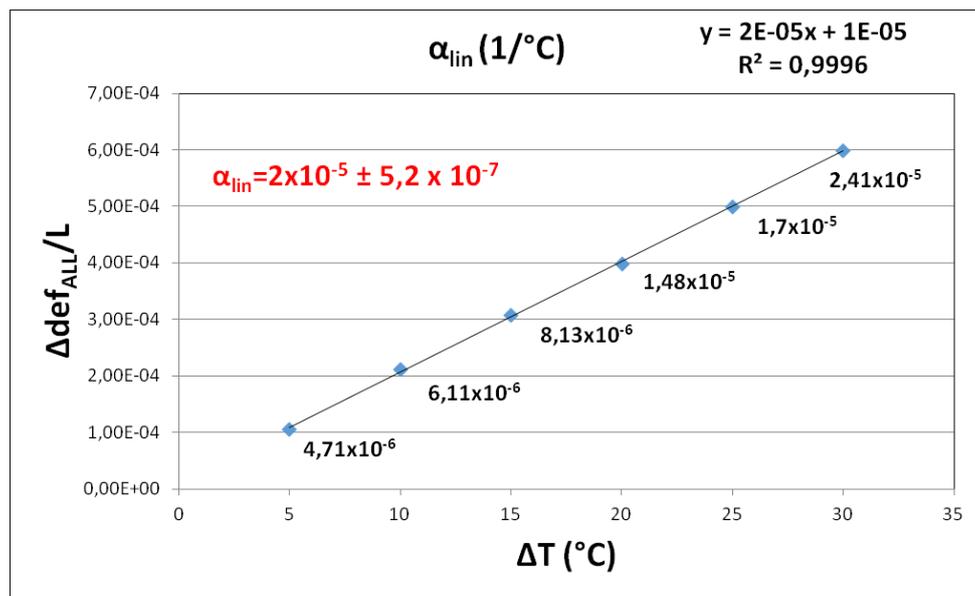


Figura 63: Coefficiente lineare di dilatazione termica dell'alluminio, ottenuto da una media di tre misure effettuate entro un range di temperatura ($25^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}$) con step di 5°C .

In tabella 6 sono indicati i valori di $\Delta def_{All}/L$, dove L è la lunghezza del campione di alluminio (L=10 cm), con le rispettive deviazioni standard calcolate sui tre set di misura.

ΔT (°C)	$\Delta def_{all}/L$	Deviazione standard
5	$1,05 \times 10^{-4}$	$4,71 \times 10^{-6}$
10	$2,11 \times 10^{-4}$	$6,11 \times 10^{-6}$
15	$3,08 \times 10^{-4}$	$8,13 \times 10^{-6}$
20	$3,98 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-5}$
25	$4,99 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-5}$
30	$5,99 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-5}$

Tabella 6: Valori della deformazione dell'alluminio per i diversi intervallo di temperatura, calcolati da una media dei tre set di misura, con le rispettive deviazioni standard.

Le deformazioni dell'alluminio (Δdef_{All}) sono state calcolate dalla seguente relazione:

$$\Delta def_{All} = \Delta def_{tot} - \Delta def_{trasd},$$

in cui Δdef_{tot} è la deformazione totale (sistema di misura e alluminio) misurata sperimentalmente, mentre Δdef_{trasd} è il contributo del sistema di misura definito nel precedente processo di calibrazione.

Anche in questo caso l'andamento del valore di deformazione (Δdef_{tot}) è stato considerato asintotico quando la differenza tra due successive medie orarie non superava un valore di 0,05.

Dal confronto dei coefficienti di dilatazione termica lineare, teorici e sperimentali, nonché dall'effettiva deformazione termica lineare ottenuta sperimentalmente per l'alluminio, si evince ancora una volta la buona affidabilità dell'apparato sperimentale.

4.3. Deformazioni del legno in funzione delle variazioni termiche

Per il calcolo delle deformazioni del campione di pioppo sono stati effettuati due set di misura, nell'intervallo di temperatura (25°C - 55°C), con step di 5°C. Al fine di evitare eventuali influenze dovute all'isteresi del materiale le misure sono state effettuate solo per valori di temperatura crescenti. Ricordiamo, infatti, che il valore dell'umidità di equilibrio del campione potrebbe essere diversa a seconda che essa venga raggiunta in seguito a desorbimento o adsorbimento di acqua, quindi in seguito a diminuzione o aumento di temperatura dell'ambiente. Questo avrebbe richiesto una diversa taratura di RH, per il raggiungimento di uno stesso valore di EMC, per temperature crescenti e decrescenti.

Le deformazioni sono state calcolate mediante la seguente relazione:

$$\Delta def_{legno} = \Delta def_{tot} - \Delta def_{trasd},$$

dove i rispettivi termini sono stati già precedentemente definiti.

Il monitoraggio per ogni set di misura ha avuto una durata di 24 ore per evitare l'influenza sulle misure dovute al sistema (trasduttore-supporto) in seguito a variazioni termiche. Infatti, come precedentemente descritto, dopo 10 ore la deformazione termica del sistema del sistema era completata. Questo ha assicurato che il campione fosse in equilibrio con le nuove condizioni ambientali, così che le variazioni igroscopiche non andassero ad influenzare il comportamento fisico del legno. Si è visto, infatti, che questo avveniva già dopo circa 4 ore.

In figura 64 sono mostrate le deformazioni, calcolate rispetto al valore di riferimento misurato a 25°C, in funzione dei rispettivi intervalli di temperatura.

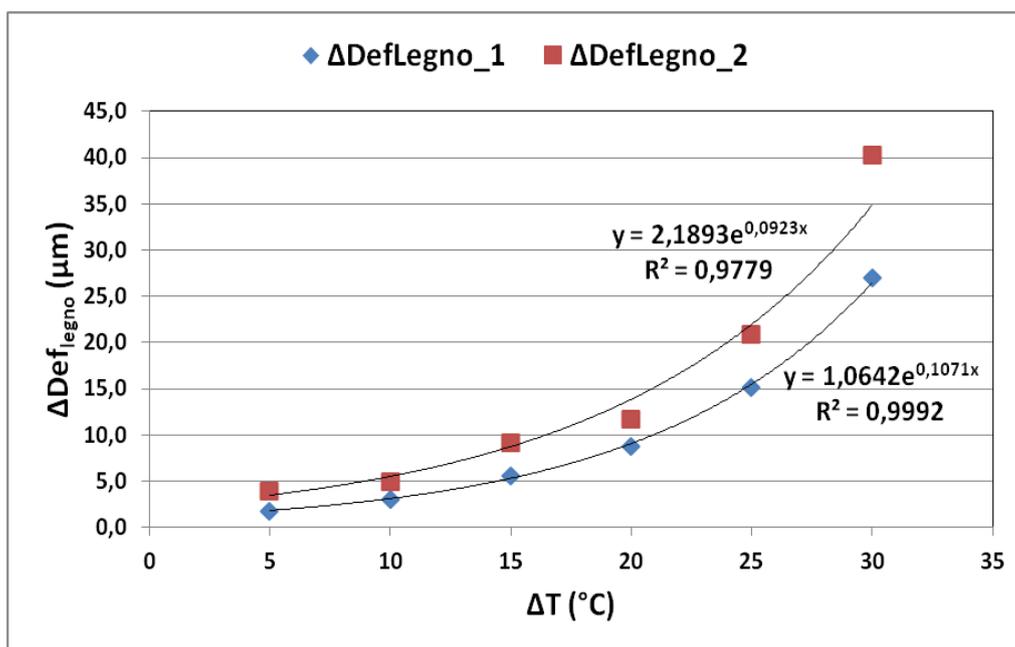


Figura 64: Deformazioni del campione di pino calcolate nel range di temperatura tra 25°C e 55°C, con step di 5°C. Si osserva che i due set di misure sono caratterizzati da coefficienti di correlazione e valori assoluti di deformazione differenti.

I risultati ottenuti evidenziano un andamento esponenziale della deformazione con la temperatura, con una deformazione di circa 30 μm per una variazione di temperatura di 30°C. Questo indica un'influenza termica sulle variazioni dimensionali del legno non trascurabile, soprattutto per valori maggiori di temperatura. Tuttavia, tale andamento potrebbe essere stato leggermente influenzato da problemi di condensa del vapore acqueo sulla bilancia, comportando degli errori sui valori misurati della massa del campione. Infatti durante le misure, al fine di mantenere la EMC costante è stato continuamente immesso vapore e di conseguenza aumentato il valore dell'umidità relativa interna, come mostrato in tabella 3.

Inoltre, si può osservare che i due set di misura sono caratterizzati da differenti valori assoluti di deformazione.

Questo comportamento è stato attribuito all'importanza della "memoria" del campione dei processi subiti durante la prima serie di misure; infatti i valori della massa del campione ottenuti dopo il secondo set di misura per gli stessi step di T e UR, risultano differenti da quelli inizialmente calcolati e non costanti ai diversi valori di temperatura e umidità relativa, come mostrato in tabella 6.

Temperatura (°C)	Umidità relativa (%)	Massa inizialmente settata (mg)	Massa calcola- ta dopo i due set di misura (mg)
25	65,5	1,862	1.843
30	66,0	1,862	1.841
35	66,5	1,862	1.839
40	67,4	1,862	1.839
45	68,3	1,862	1.840
50	69,6	1,862	1.842
55	71,6	1,862	1.842

Tabella 6: Confronto delle masse del campione di pioppo prima e dopo le misure. Si osserva che una variazione di tali valori dovuti probabilmente all'importanza della storia pregressa del campione di legno.

Tale diversa risposta in massa, quindi in EMC, che ha caratterizzato principalmente il secondo set di misura, influenza la risposta dimensionale del campione di pioppo, introducendo un contributo igroscopico alle deformazioni del materiale anche a più basse temperature.

Tuttavia, si può dire che, nonostante la difficoltà nel contrastare l'igroscopicità del legno, l'andamento osservato risulta essere indicativo del comportamento del campione di pioppo quando sottoposto alle sole sollecitazioni termiche; sottolineando, quindi, un contributo termico alla deformazione non trascurabile, al contrario dei risultati oggi presenti in letteratura.

È possibile, infatti, prevedere una risposta simile del campione di legno alle variazioni di temperatura anche in completa assenza del contributo igroscopico, in quanto quest'ultimo è stato già quasi completamente eliminato.

Possiamo concludere che tale esperimento ha permesso di fare un primo passo verso la difficile comprensione dell'effetto della sola temperatura sul comportamento termico del legno, mai studiato a fondo fino ad oggi a causa della difficoltà di isolare l'influenza termica da quella igroscopica.

Al fine di diminuire ulteriormente tale contributo nel processo di deformazione verranno effettuate ulteriori misure, utilizzando una bilancia decimillesimale. Una migliore risoluzione in massa permetterebbe, infatti, una più accurata taratura dei valori di T e UR relativi ad un valore più

preciso del contenuto igrometrico di equilibrio; garantendo l'assenza di deformazioni dovute a variazioni di umidità del campione.

Questo ci permetterà di definire un'equazione matematica più precisa, che descriva il comportamento del legno in seguito alle sole variazioni di temperatura.

Capitolo 6

CASI STUDIO: MUSEO DELL'OPERA DI SANTA CROCE, IL TEMPIETTO LONGOBARDO E IL RATTO DELLE SABINE

Verranno presentati di seguito i casi studio in cui sono state applicate le diverse tecniche di misura di temperatura superficiale, al fine di studiarne i limiti direttamente in campo. Hanno, inoltre, permesso di affrontare direttamente le varie problematiche relative ad una buona conservazione del nostro patrimonio culturale.

In particolare saranno mostrati i risultati ottenuti mediante tecnica radiometrica sui dipinti su tavola conservati nel museo di Santa Croce (Firenze), uno studio della distribuzione termica superficiale effettuato mediante termografia sulle statue in stucco che adornano l'interno del

Tempietto Longobardo (Cividale del Friuli – Udine) ed infine l’analisi del Ratto delle Sabine del Giambologna mediante un diverso approccio di termografia attiva, conservata all’Accademia di Firenze.

Per completezza verrà, inoltre, introdotto il monitoraggio microclimatico condotto nel museo di Santa Croce e nel Tempietto Longobardo, i cui risultati non saranno descritti in quanto fuori dall’obiettivo di questa tesi.

1. Museo dell’Opera di Santa Croce - Firenze

L’obiettivo della prima analisi microclimatica [54] all’interno del museo dell’Opera di Santa Croce è stato quello di studiare i principali rischi ambientali, legati soprattutto alla gestione, per una migliore conservazione delle opere d’arte conservate, in particolare i dipinti su tavola – Deposizione della Croce di Francesco Salviati e Discesa di Cristo dal Limbo di Agnolo Bronzino – l’affresco di Taddeo Gaddi (Albero della Vita e Ultima cena) e il famoso crocifisso di Cimabue (figure 65-68), tutti conservati, precedentemente, nella sala sei del museo.

In seguito allo spostamento dei maggiori dipinti per prevenire il rischio di alluvioni, è in corso un nuovo monitoraggio microclimatico per la valutazione dell’idoneità delle condizioni ambientali all’interno delle nuove sale. Quest’ultimo non è qui descritto.



Figura 65: Deposizione della Croce di Francesco Salviati - Olio su tavola.



Figura 66: Discesa di Cristo dal Limbo di Agnolo Bronzino – Dipinto su tavola.



Figura 67: Crocifisso di Cimabue – Dipinto su tavola.



Figura 68: Albero della Vita e Ultima cena di Taddeo Gaddi -affresco

Per lo studio del microclima all'interno e all'esterno del museo sono state monitorate in continuo, per un anno, le principali variabili termigrometriche (temperatura e umidità relativa dell'aria) interne. Inoltre, un sensore posto all'esterno del museo ha permesso di correlare le variazioni interne al museo con quelle climatiche esterne. In figura 69 è mostrata la pianta del museo in cui sono evidenziate le posizioni dei sensori; sulla

Sono state, inoltre, effettuate quattro campagne manuali di misura all'interno del museo, della durata di circa 3 giorni ciascuna, una per ogni stagione dell'anno per ottenere con sufficiente dettaglio una completa analisi spazio-temporale della dinamica microclimatica e dei processi indotti all'interno dell'ambiente. Contemporaneamente sono state effettuate delle campagne radiometriche al fine di monitorare a distanza le variazioni di temperatura superficiale delle opere di maggior rilievo all'interno del museo. Il radiometro utilizzato è un Ultimax – infrared thermometer della Ircon, operante nel range di temperatura (-50 °C +1000°C).

Le misure manuali sono state eseguite circa ogni due ore nell'arco della giornata iniziando i rilievi da prima dell'apertura del museo a 1-2 ore dopo la chiusura.

Di seguito verranno esposti i soli risultati radiometrici, al fine di evidenziare l'importanza di un monitoraggio in continuo della temperatura superficiale per una migliore conservazione preventiva delle opere d'arte.

L'indagine radiometrica dei tre dipinti principali (Deposizione della Croce – Discesa di Cristo dal Limbo ed il Crocifisso di Cimabue) e dell'affresco di Taddeo Gaddi (Albero della vita e Ultima Cena) è stata focalizzata sull'individuazione delle cause perturbanti la distribuzione termica delle opere, legate soprattutto alla gestione, quali: incidenza di-

retta della radiazione naturale e artificiale, variazioni dei parametri ambientali in seguito all'apertura delle porte, ecc...

In figura 70 è mostrata la distribuzione termica giornaliera, durante la campagna di misura effettuata in primavera, sul dipinto di Salvati. Si osserva l'influenza dei farette nella parte bassa dell'opera, che comportano una variazione di temperatura di circa $2,9^{\circ}\text{C}$. Sulla stessa tavola dipinta sono stati misurati gradienti termici giornalieri nella parte superiore di circa $3,5^{\circ}\text{C}$, dovuti all'incidenza della radiazione solare proveniente dalla finestra posta in prossimità dell'opera, come mostrato in figura 71.

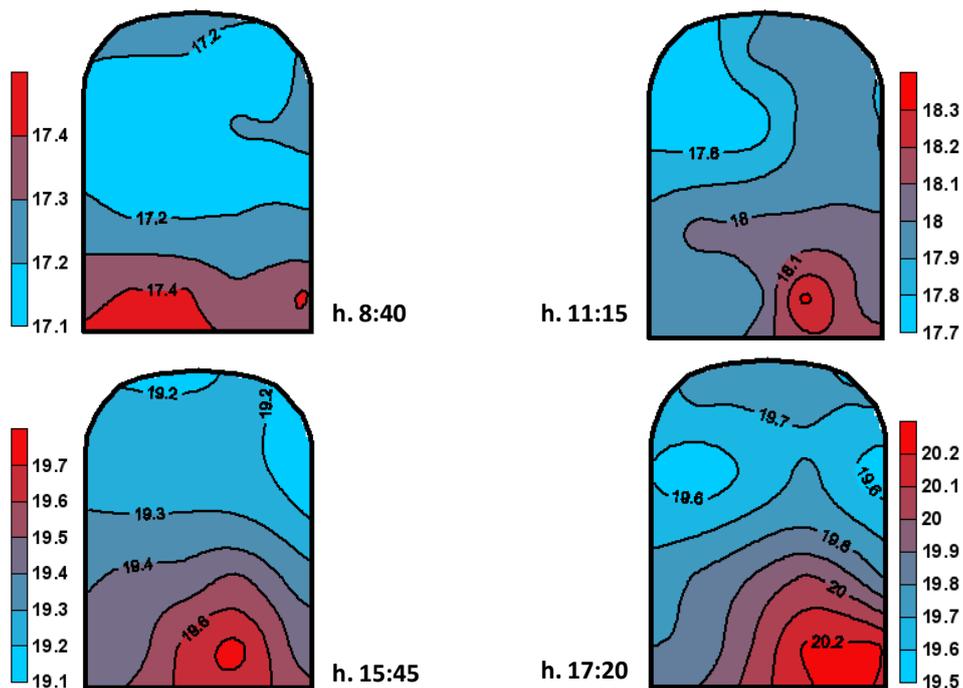


Figura 70: Deposizione della Croce di Francesco Salvati. Mappe di temperatura relative alla campagna di misura primaverile, in cui si osserva, in basso, l'incidenza diretta della radiazione artificiale.

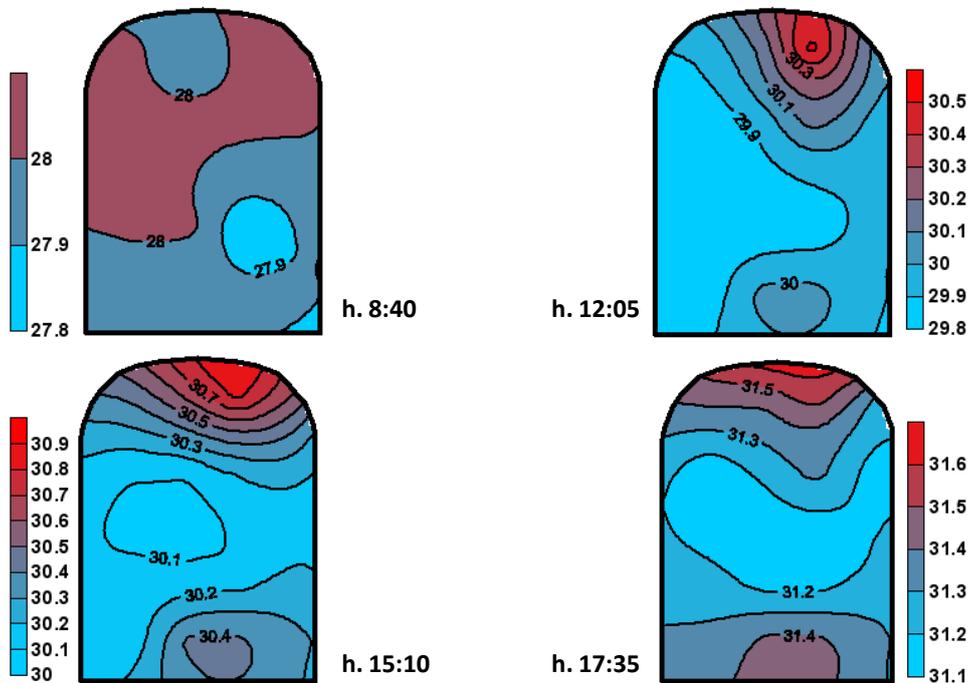


Figura 71: Deposizione della Croce di Francesco Salvati. Mappe di temperatura relative alla campagna di misura estive, in cui la radiazione solare incidente comporta un gradiente termico giornaliero di circa $3,5^{\circ}\text{C}$.

L'effetto dell'incidenza dei raggi solari è visibile soprattutto nei mesi estivi, quando la radiazione solare è più forte e riesce a penetrare anche la schermatura della finestra.

Questi due effetti provocano, oltre che un gradiente termico temporale, anche un gradiente termico spaziale, che può raggiungere valori di circa 1°C in seguito alla continua esposizione della tavola dipinta all'incidenza della radiazione.

Gli stessi fenomeni di eguale identità sono stati osservati sulla tavola dipinta di Agnolo Bronzino, *Discesa di Cristo dal Limbo*. In questo caso i due effetti sono spesso sommabili, a causa dell'assenza di schermatura della finestra, che comporta un riscaldamento puntuale dell'opera anche nei mesi invernali in cui la radiazione solare è più debole.

Molto significativo è il risultato del monitoraggio radiometrico effettuato sull'affresco di Taddeo Gaddi, in cui è visibile l'effetto della scarsa coibentazione del soffitto sulla distribuzione termica. Esso, infatti essendo collocato su un'intera parete la cui facciata posteriore è direttamente rivolta all'esterno, risente della climatologia giornaliera e stagionale.

Il riscaldamento dell'aria a contatto con il tetto colpito dalla radiazione solare, in associazione alla stabilità atmosferica interna, determina la suddivisione dell'opera in due aree a differente livello termico (Figura 73): quella superiore generalmente più calda rispetto a quella inferiore (con differenza fino a 2,1°C principalmente nei mesi estivi). In figura 72 è mostrata l'immagine termografica, con la relativa immagine visibile, effettuata sul tetto, in cui si vede il maggiore riscaldamento in prossimità dell'affresco (cerchio blu).

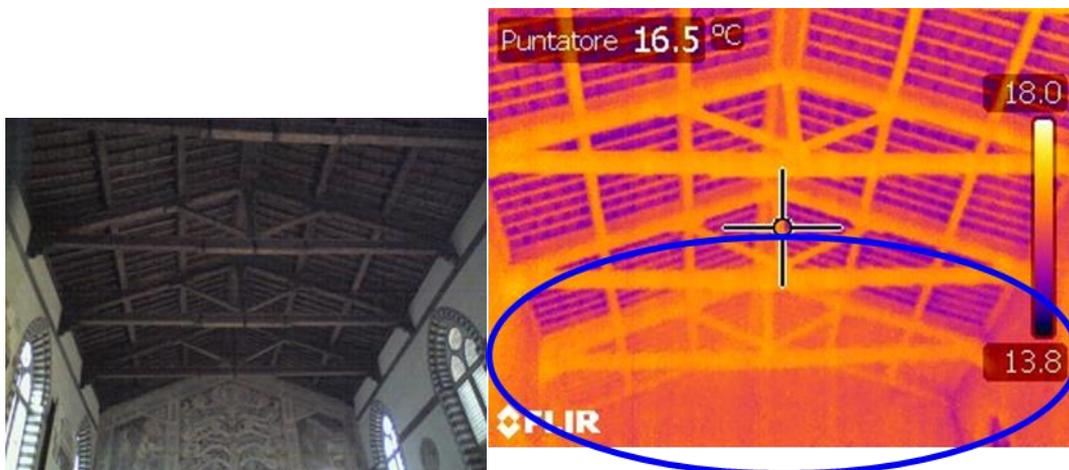


Figura 72: termografia del tetto, relativa alla campagna di misura primaverile, in cui si vede un maggior riscaldamento in prossimità dell'affresco (cerchio blu)

A causa di questo aumento di temperatura si determinano marcate escursioni giornaliere sia sulla superficie complessiva dell'affresco¹ (differenza termica giornaliera di 5,1°C) sia sul singolo punto² (differenza termica giornaliera di 4,6°C nel punto in alto), che possono causare stress nei materiali utilizzati per la pittura.

¹ Calcolata come differenza tra il punto più caldo e quello più freddo nell'arco dell'intera giornata.

² Definita come differenza giornaliera tra il valore termico massimo e minimo del punto più caldo.

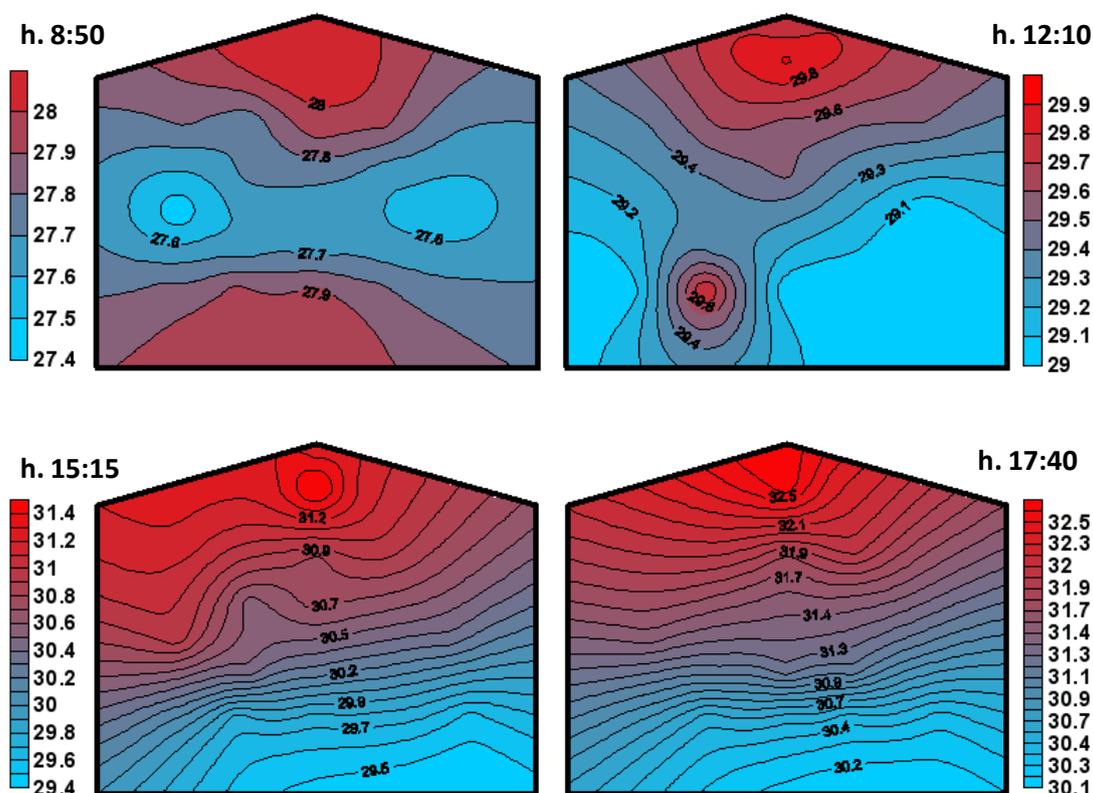


Figura 73: L'albero della Vita e ultima Cena di Taddeo Gaddi. Si osservano variazioni termiche giornaliere fino ad un massimo di circa 5,1 °C, soprattutto nei mesi estivi, a causa della scarsa coibentazione del soffitto.

In figura 74 è mostrato l'effetto delle lampade utilizzate per una migliore illuminazione in occasione di concerti o eventi organizzati all'interno della sala 6, che comportano un aumento della temperatura superficiale di circa 3°C. Da notare che tali risultati sono stati ottenuti durante le ore serali, quando, invece, normalmente si registrerebbero condizioni di stabilità termica dopo la chiusura del museo al pubblico.

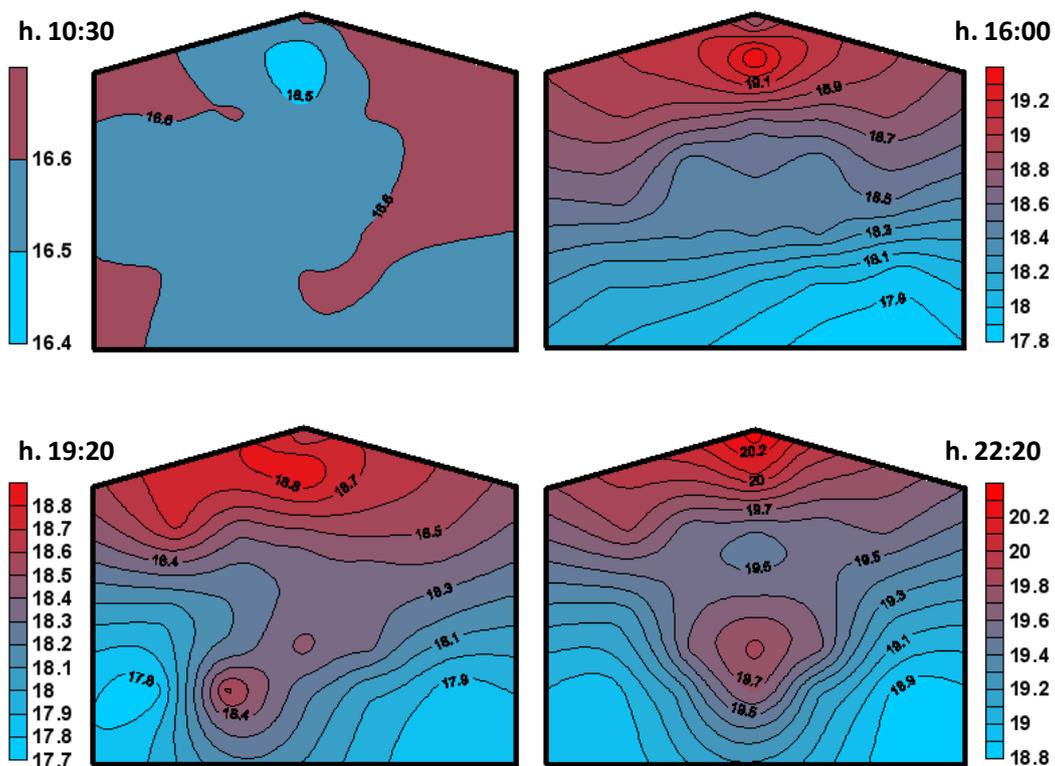


Figura 74: L'albero della Vita e ultima Cena di Taddeo Gaddi. Si osserva l'influenza della radiazione artificiale, direttamente puntata sulla superficie dell'affresco, in occasione di un concerto organizzato nella sala 6 del museo.

Inoltre è stato rilevato un gradiente termico stagionale su tutte le opere monitorate, di circa 20°C, come mostrato, ad esempio, nella figura 75, relativa al Crocifisso del Cimabue.

In figura 76 è evidenziata la corrispondenza tra l'andamento dei valori medi stagionali di temperatura del Crocifisso e dell'ambiente nell'arco dell'intero anno di monitoraggio.

Tuttavia è da tenere presente che le variazioni stagionali avvengono in un lasso di tempo abbastanza lungo, pertanto l'opera non subisce stress re-

pentini, bensì ha il tempo di assestarsi portandosi gradualmente alle nuove condizioni di equilibrio con l'ambiente.

Al contrario le variazioni giornaliere risultano a volte non opportune per la conservazione e devono essere, pertanto, continuamente monitorate (sia spazialmente che temporalmente) al fine di evitare stress termici dannosi per l'opera.

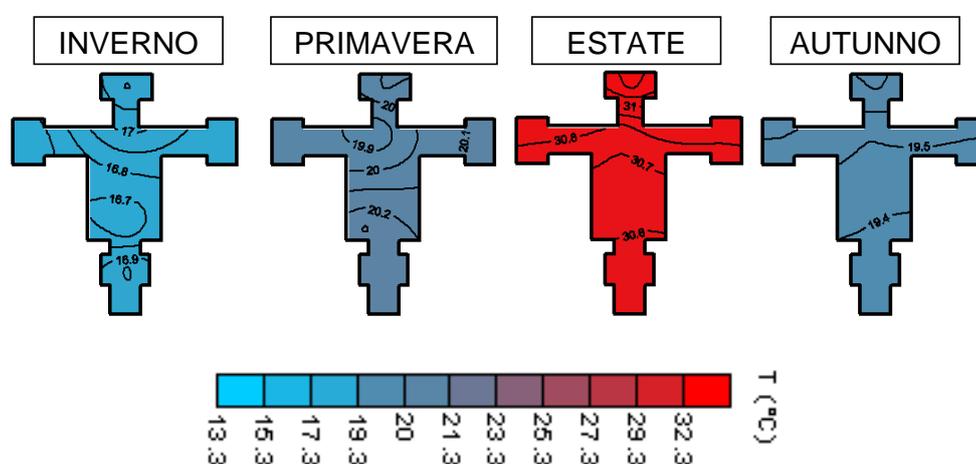


Figura 75: Mappe rappresentative delle 4 stagioni che mostrano la variazione dai minimi dell'inverno ai massimi dell'estate

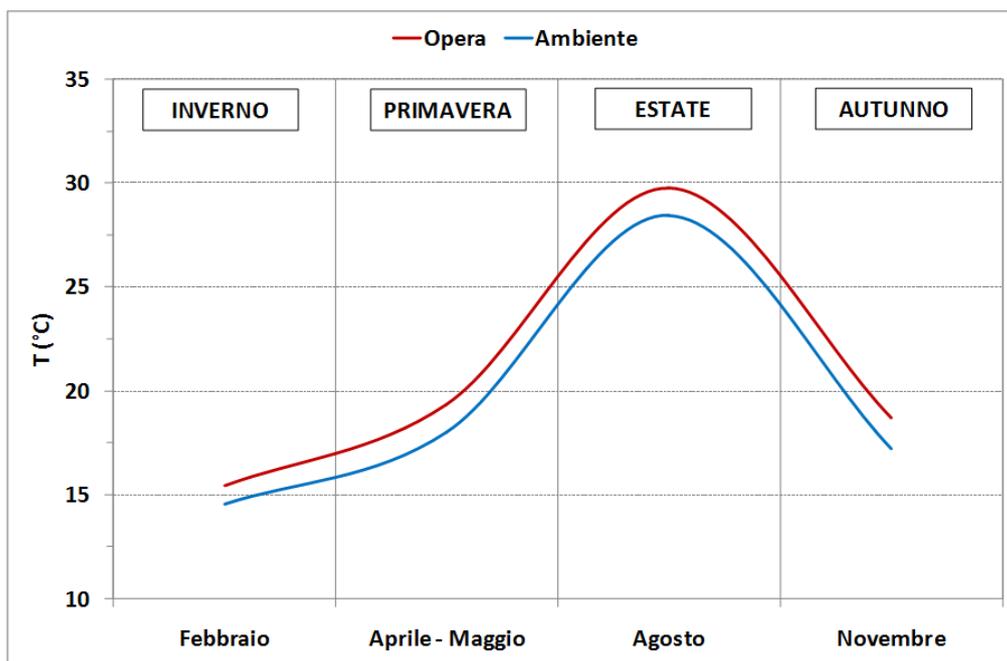


Figura 76: Andamento dei valori medi stagionali di temperatura del Crocifisso e dell'ambiente nell'arco dell'intero anno di monitoraggio

2. Tempietto Longobardo – Cividale del Friuli - Udine

Il monitoraggio microclimatico [55] all'interno del Tempietto Longobardo (Figura 77) è stato condotto tra il 2011 ed il 2012, con l'obiettivo di valutare le condizioni microclimatiche, soprattutto vicino alle statue in stucco che adornano il muro ovest, e migliorare la gestione dell'ambiente. In particolare lo studio microclimatico si è concentrato sulla comprensione dei possibili fenomeni di degrado in atto, legati a fattori ambientali, che giustificassero il differente stato di conservazione nelle due parti della parete ovest.

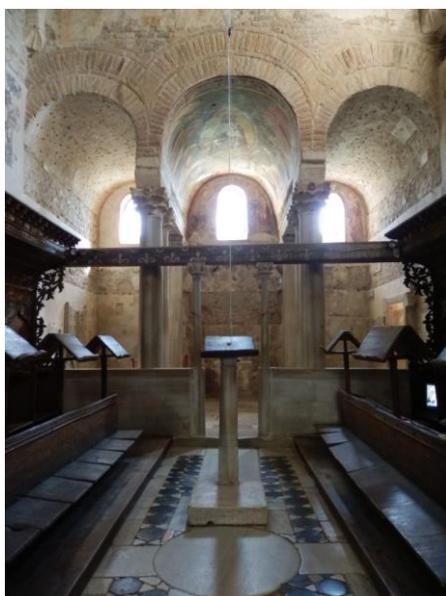


Figura 77: Vista interna del tempietto Longobardo – Cividale del Friuli (Udine).

Il monitoraggio prevedeva sia misure in continuo delle principali variabili termo-igrometriche che campagne di misura manuali stagionali. In figura 78 è mostrata l'ubicazione dei sensori di T e UR interni ed esterni al tempietto e degli anemometri, collocati in posizioni strategiche per lo studio del movimento delle masse d'aria interne. Il sistema comprendeva anche una stazione meteo per il confronto con le condizioni climatiche esterne (non indicato nella mappa).

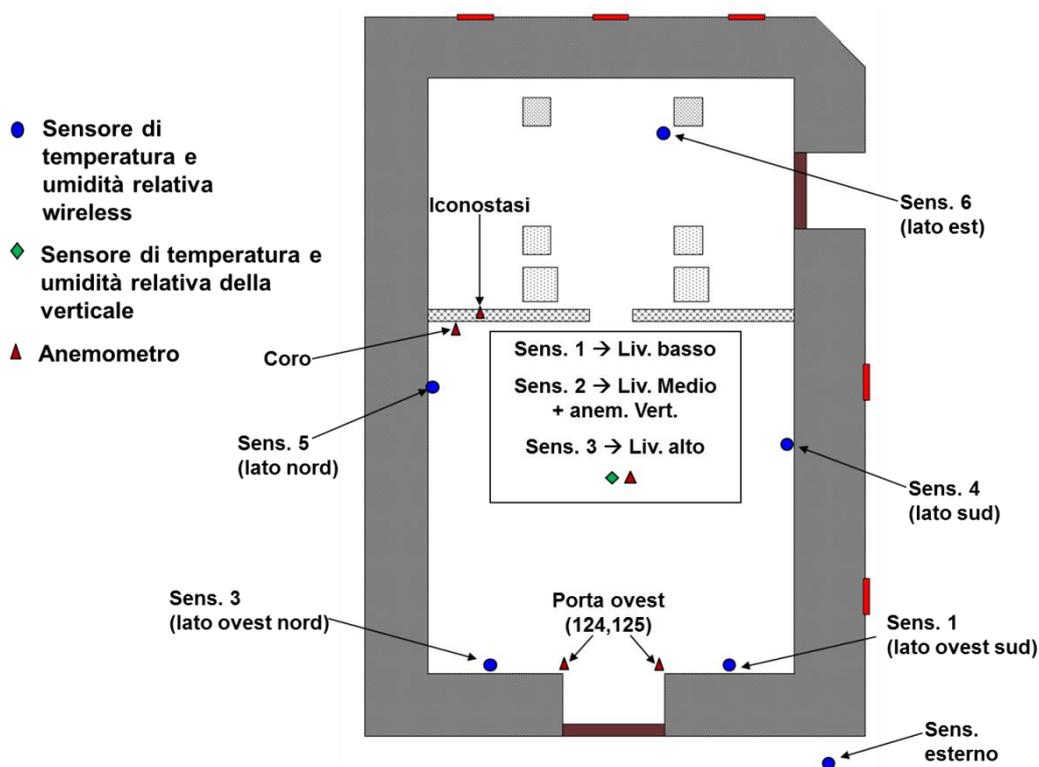


Figura 78: Ubicazione dei sensori all'interno del tempietto longobardo.

Oltre alle misure in continuo, per alcuni giorni nelle stagioni più significative per la climatologia locale, ossia invernale ed estiva, sono

state eseguite delle campagne di misura manuali, a scadenze temporali prefissate nel corso della giornata (circa ogni 2-3 ore), iniziando i rilievi da prima dell'apertura del Tempio al pubblico a poco dopo la sua chiusura. Le misure manuali consistevano nella misura di temperatura e umidità relativa dell'aria mediante uno psicrometro elettronico, allo scopo di ottenere informazioni sulla dinamica spazio-temporale dei tre parametri microclimatici principali: temperatura, umidità specifica e umidità relativa.

Durante le campagne manuali sono stati inoltre eseguiti dei rilievi termografici, in particolare della parete ovest, adornata delle sei statue in stucco, mediante una FLIR B400 caratterizzata da un detector microbolometrico ed un'accuratezza di $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Le campagne termografiche sono state condotte a supporto dei risultati microclimatici, ottenuti nelle vicinanze delle statue (Figura 79- posizione dei sensori), che avevano evidenziato fenomeni di riscaldamento localizzato causati dall'incidenza della radiazione solare.

Di seguito verranno illustrati alcuni dei risultati del monitoraggio in continuo della temperatura dell'aria nelle vicinanze delle due statue centrali della parete ovest, per un confronto con i relativi dati termografici.



Figura 79: Posizione dei sensori di Temperatura e umidità relativa posti ai piedi delle statue (cerchio rosso).

Il monitoraggio microclimatico in continuo ha messo in evidenza un riscaldamento differenziale dei due lati della parete ovest dovuto alla diversa altezza del sole rispetto all'orizzonte nei diversi mesi dell'anno. Si osserva, infatti, in figura 80 che il lato sud-ovest è interessato dalla radiazione solare soprattutto nei mesi di settembre-ottobre e febbraio-marzo, mentre nel lato nord-ovest si osservano i picchi relativi all'incidenza solare da novembre a gennaio. La massima escursione giornaliera³ registrata è di circa 6°C nella parte destra della parete ovest e di circa 7°C nella parte sinistra.

³ Corrispondente alla massima differenza giornaliera tra temperatura massima e minima registrata durante l'intero anno di monitoraggio dai sensori posti ai piedi delle statue.

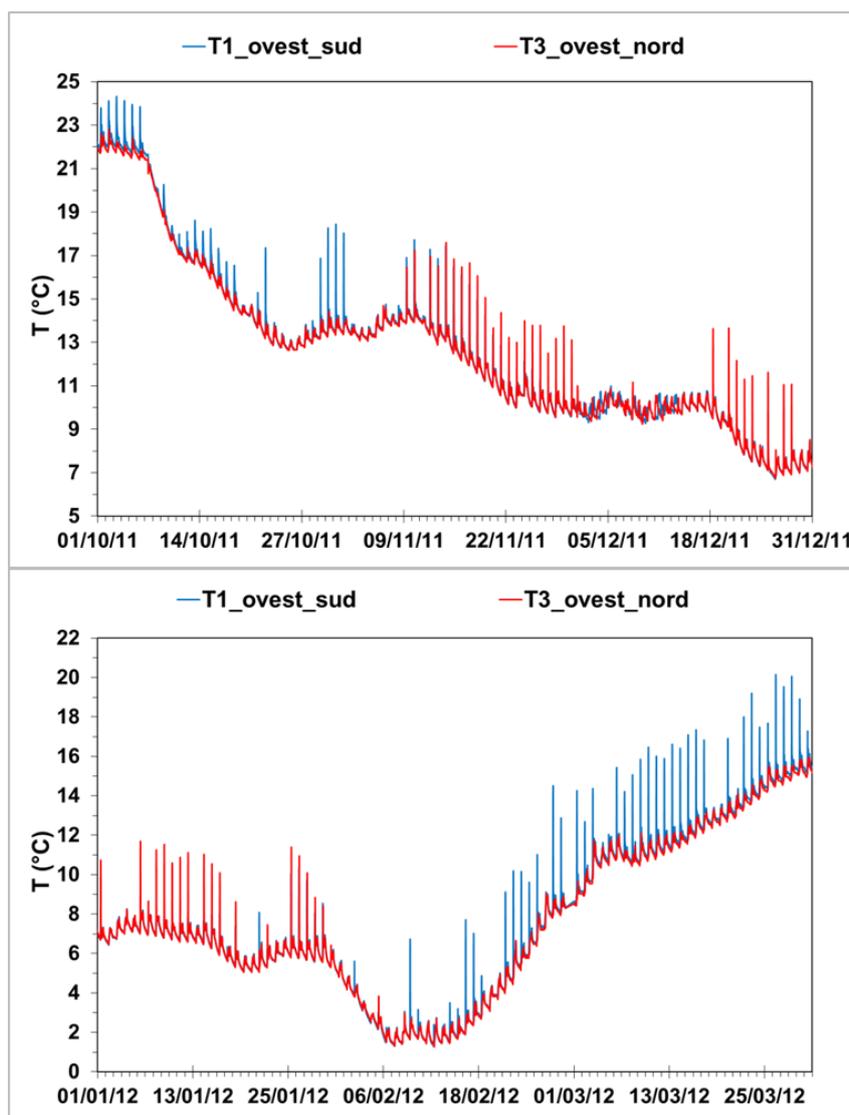
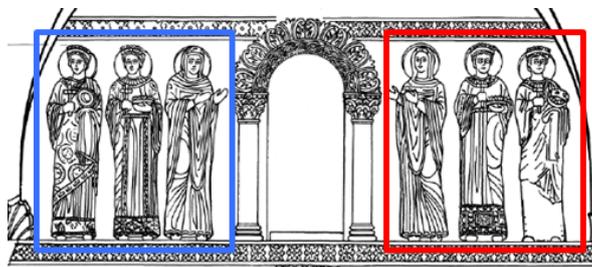


Figura 80: Monitoraggio microclimatico in continuo relativo alle due pareti del muro ovest, mediante i sensori di temperatura posti ai piedi delle due statue centrali, come precedentemente indicato.

Le campagne di misura termografiche, effettuate in alcuni giorni dell'anno, risultano essere in buon accordo con i relativi risultati microclimatici.

In figura 81 sono mostrati gli andamenti termici dell'aria, misurati ai piedi delle due statue centrali nei due lati del muro ovest, e la rispettiva misura termografica eseguita il giorno 30/03/2012 alle ore 10:45. I risultati delle due metodologie sono in buon accordo, evidenziando un aumento localizzato della temperatura causato dalla diretta incidenza della radiazione solare proveniente dalla finestra posta nella parete sud (a sinistra nell'immagine IR fuori campo). La differenza di temperatura misurata ai piedi delle due statue centrali, nel momento di massimo riscaldamento, è di circa 1,5 °C per l'aria e di circa 1°C sulla superficie, a causa dell'inerzia termica del materiale.

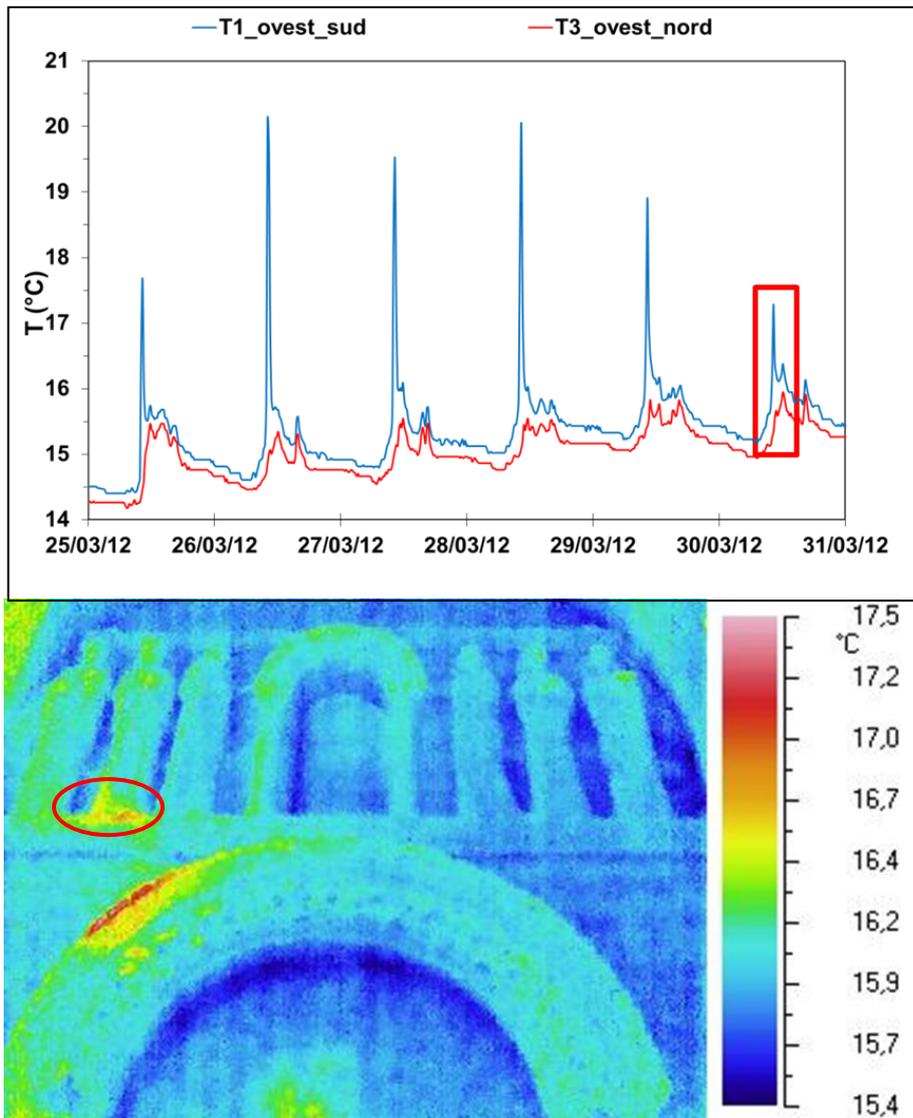


Figura 81: Incidenza della radiazione solare ai piedi della statua centrale nella parte sinistra del muro ovest, evidenziata sia dalle analisi microclimatiche (riquadro in rosso) che dalle campagne di misura termografiche. La termografia si riferisce al giorno 30/03/2012 alle ore 10:45

In figura 82 è mostrata la distribuzione spaziale orizzontale della temperatura superficiale delle statue dei due lati della parete ovest, ottenuta dall'analisi del termogramma dello stesso giorno. Si osserva una distribuzione uniforme della temperatura in corrispondenza delle teste delle statue (top in figura), mentre si evidenzia un andamento decrescente della temperatura dei piedi delle statue (bottom in figura), andando da sinistra verso destra, a causa dell'incidenza della radiazione solare. In figura è cerchiato in verde il picco corrispondente all'influenza solare visibile nella termografia di figura 81 (cerchio rosso).

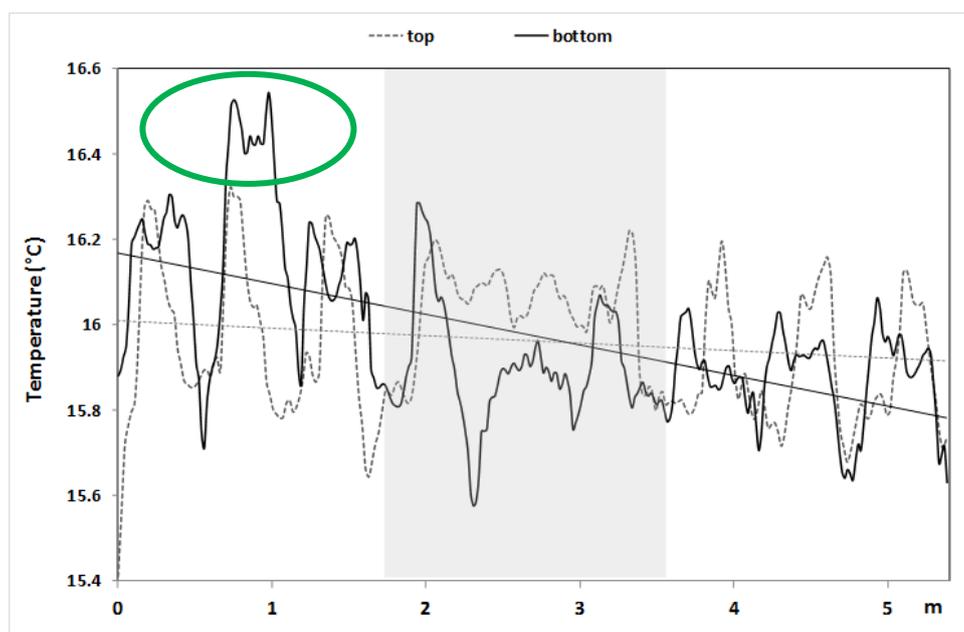


Figura 82: Profili orizzontali della temperatura superficiale delle statue nella parete ovest (30/03/2012 ore 10:45). Le linee di tendenza evidenziano l'andamento costante in corrispondenza delle teste e un andamento decrescente, andando da sinistra verso destra, all'altezza dei piedi.

Per confronto in figura 83 sono mostrati i risultati relativi al 03/01/2012, in cui non è visibile l'incidenza dei raggi solari. L'assenza di picchi termici (riquadro rosso), è dovuta alle condizioni di maltempo che caratterizzavano il periodo contiguo alla campagna termografica. La distribuzione termica verticale delle statue si riporta alle normali condizioni, caratterizzate da un andamento decrescente andando dalla testa ai piedi delle statue. Infatti, questi ultimi sono fortemente influenzati dall'inerzia termica del muro sottostante, al contrario delle teste che, essendo più sporgenti, scambiano calore con l'atmosfera circostante.

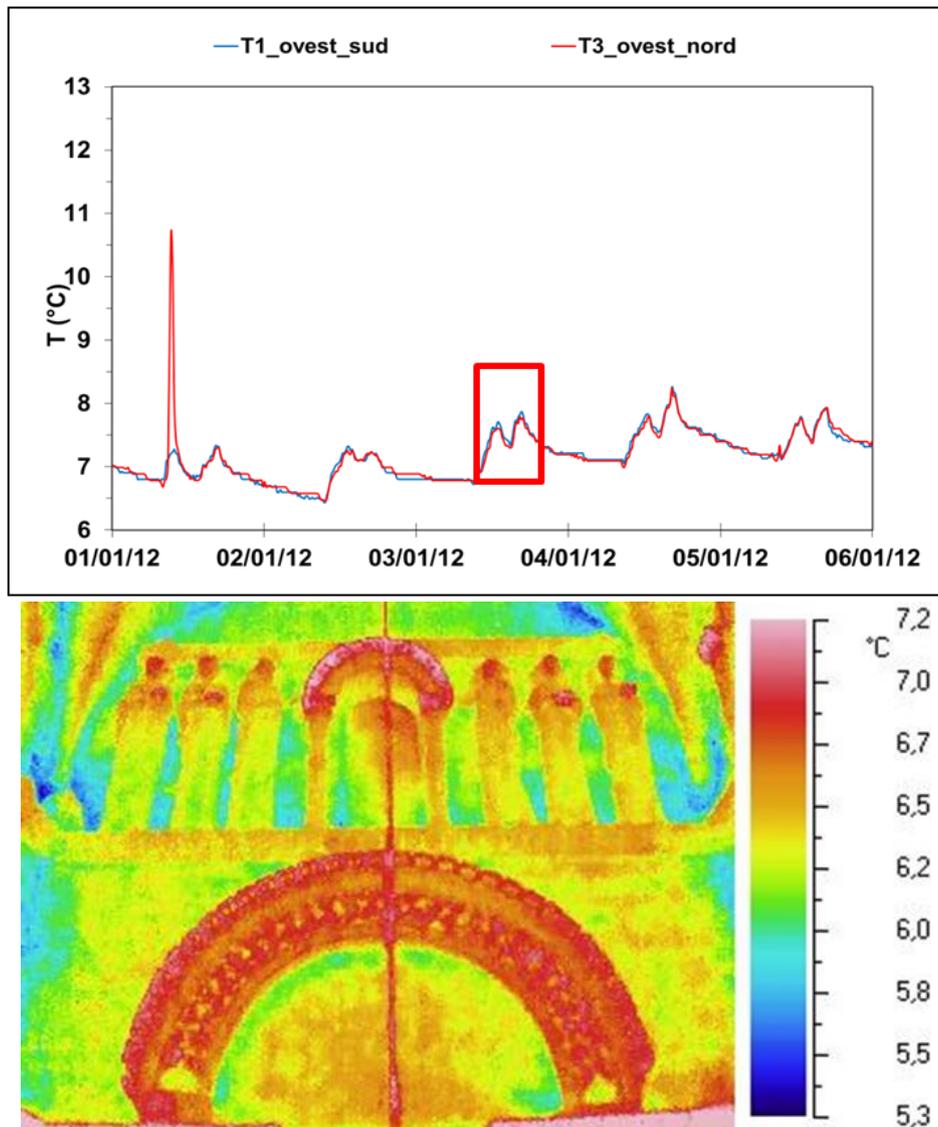


Figura 83: Grafici degli andamenti della temperatura dell'aria registrata dai sensori collocati ai piedi delle statue e termogramma relativo alle campagne manuali del 03/01/2012 (ore 12:48) .

In figura 84 è mostrato, come rappresentativo, il profilo termico verticale della statua centrale nella parte sinistra della parete ovest registrato durante le campagne termografiche di giugno, quando il sole, troppo alto

all'orizzonte, non colpisce la parete ovest. In questa stagione è infatti maggiormente visibile il naturale andamento termico delle statue non essendoci fattori perturbativi.

Da notare che i valori dei gradienti termici dipendono dalla stagione e dall'ora del giorno, in cui sono state effettuate le termografie.

In assenza di sole la distribuzione termica orizzontale tra i due lati della parete ovest, sia all'altezza dei piedi che delle teste, è caratterizzata da un andamento costante, non evidenziando la presenza di picchi come osservato nell'immagine termografica di marzo.

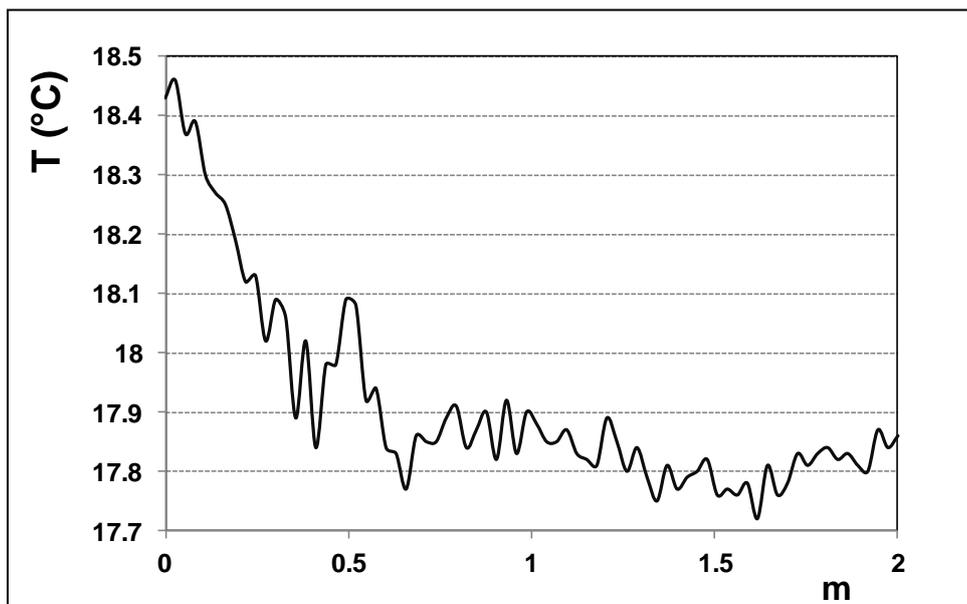


Figura 84: Profilo verticale della statua centrale nella parte sinistra della parete ovest. Si osserva una distribuzione termica decrescente andando dalla testa ai piedi della statua. Il profilo è relativo alla termografia effettuata il 06/06/2012, ore 17:30.

Per approfondire le variazioni di temperatura dell'aria misurate in vicinanza della parete ovest è stata eseguita una statistica delle escursioni termiche giornaliere su entrambi i lati, vale a dire un conteggio del numero di volte in cui la differenza tra la temperatura massima e minima del giorno si è mantenuta entro determinati intervalli. Il calcolo si è concentrato nei mesi autunnali e invernali, in cui erano visibili i picchi causati dalla radiazione solare. Si tenga, inoltre, presente che a causa dell'assenza di dati in continuo relativi alla temperatura superficiale delle statue, non è possibile un confronto con i risultati microclimatici, di conseguenza l'indicazione ottenuta è solo indirettamente riferibile a ciò che può avvenire sulla superficie degli stucchi.

La statistica (Figura 85) mostra che la maggior parte delle escursioni termiche giornaliere si mantiene inferiore a 2°C ; si verificano anche escursioni superiori a 2°C , ma la frequenza è della stessa entità nei due lati della parete.

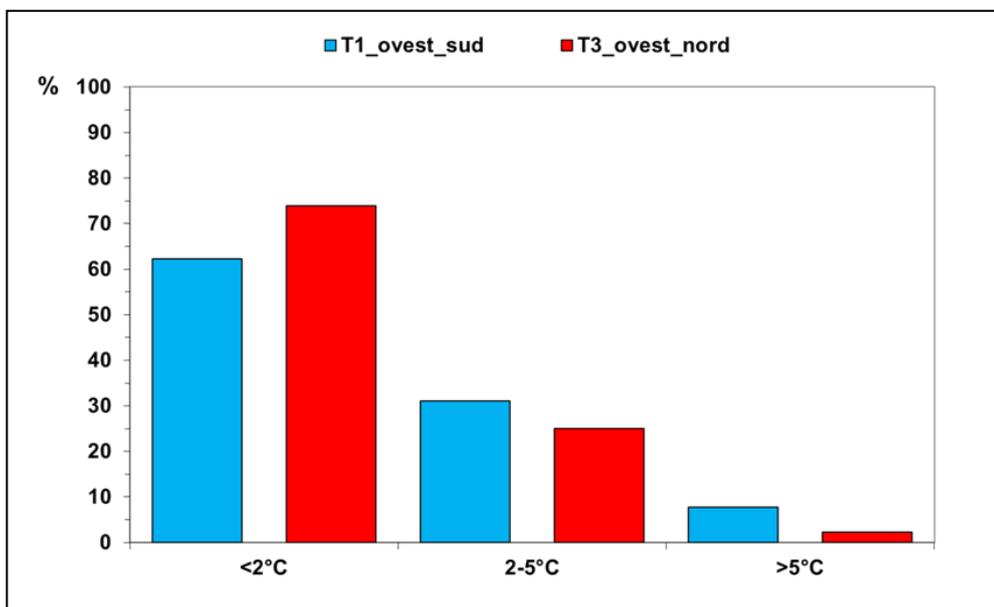


Figura 85: Numero di escursioni termiche giornaliere in autunno ed inverno nei due lati della parete ovest espresso in percentuale di tempo

Questo risultato non mette in evidenza particolari condizioni microclimatiche differenziali attuali, che spiegherebbero il diverso stato di conservazione delle statue nelle due parti delle pareti ovest oggi osservato. Le diverse condizioni di conservazione, oggi osservate, potrebbero essere, quindi, imputate a condizioni climatiche passate.

Tuttavia l'effetto delle attuali variazioni termiche, a cui si associano quelle igrometriche, potrebbero avere un differente impatto se il materiale presenta già segni di degrado, come è stato osservato visivamente soprattutto nel lato destro della parete ovest.

Analisi in continuo della temperatura superficiale avrebbero permesso un più accurato confronto con i dati microclimatici e permesso uno studio più approfondito delle condizioni superficiali delle statue

3. Il modello del Ratto delle Sabine – Giambologna – Accademia (Firenze)

Il Ratto delle Sabine (Figura 86) è uno dei più antichi modelli originali a scala 1:1 che si siano conservati in tutto il mondo. Essi servivano per eseguire l'opera su marmo con maggiore sicurezza e talvolta venivano utilizzati anche per fare prove sul luogo di collocazione.



Figura 86: Modello del Ratto delle Sabine.

La lavorazione dell'opera in marmo, oggi conservata in piazza della Signoria a Firenze, è stata in gran parte realizzata da collaboratori di provata esperienza, ma solo assai parzialmente dalla diretta mano dell'artista. Per questo motivo si può dire che il modello è in realtà più autografo della stessa opera in marmo.

Gli interventi di restauro⁴ commissionati dal Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, al fine di preservare l'opera, sono stati affiancati e preceduti da numerose indagini scientifiche.

In particolare la campagna di indagine radiografica⁵ ha evidenziato che la struttura, principalmente costituita da terra cruda, ha al suo interno un'armatura composta da elementi lignei, di differenti dimensioni e tipologia, giuntati tra loro mediante chiodature metalliche. Si presuppone che in alcune posizioni, non avendo trovato la presenza di inserti metallici, le giunzioni siano state effettuate con tecniche differenti quali incastri e/o incollaggi con bende. In alcune parti del manufatto (per esempio ventre e testa del Romano) si presume che nella costruzione siano state utilizzate stoffe o altri materiali più leggeri del gesso/argilla, probabilmente per rendere l'opera più leggera e meno soggetta al ritiro nel processo di solidificazione.

Le differenti proprietà fisiche di questi materiali, soprattutto il loro peso specifico, in relazione ai continui spostamenti subiti negli anni, hanno causato la formazione di crack superficiali e sub-superficiali nella statua.

⁴ Arte R.O.S.A. Restauro - Milano

⁵ Art – test s.a.s. - Firenze

Al fine di valutare il livello di degrado superficiale della statua è stata condotta una campagna termografica, con l'obiettivo di dimostrare la possibile connessione tra i crack precedentemente individuati [56].

La metodologia utilizzata è consistita nell'introduzione di aria calda (circa 50°C) direttamente nei crack considerati critici, soprattutto dal punto di vista statico, e verificando per mezzo di una termocamera l'emergere di aria calda dai crack connessi, nella parte opposta ai punti di infiltrazione. Il sistema di riscaldamento utilizzato è stato un convenzionale convettore termico (potenza 1200 W), a cui è stato direttamente collegato un tubo di plastica morbida, per un riscaldamento localizzato della superficie del manufatto corrispondente ai crack da investigare. Al fine di evitare l'influenza della radiazione ambientale durante il processo di riscaldamento il tubo è stato ricoperto con carta argentata.

Le termografie sono state eseguite con una termocamera "AVIO TVS 700" operante nel range spettrale (8-12 μm), caratterizzata da un detector microbolometrico. L'intervallo di temperatura a cui la termocamera lavora è (-20°C; +400°C) con una sensibilità termica di 0,07°C (a 30°C).

Durante l'immissione dell'aria calda nei crack è stata continuamente monitorata la temperatura superficiale nell'intorno del punto di infiltrazione, per evitare un surriscaldamento delle altre parti della statua.

Al fine di valutare l'efficacia del metodo sono stati effettuati studi preliminari in laboratorio usando dei campioni costituiti da materiali (per esempio terra cruda, legno, chiodi metallici e paglia) aventi proprietà

termo-fisiche simili a quelli che compongono la statua.

Tali modelli sono stati costruiti utilizzando usuali mattoni di terracotta, i cui fori sono stati riempiti con diverse combinazioni di questi materiali, lasciando un percorso libero (diametro medio di pochi millimetri, similmente a quelli osservati precedentemente in campo sul modello) per il passaggio dell'aria calda. Questi studi hanno permesso di determinare il tempo massimo richiesto per il riscaldamento, affinché l'aria calda attraversasse l'intero crack, senza un significativo e dannoso aumento della temperatura nell'intorno del punto di infiltrazione.

Le caratteristiche dei cammini liberi (profondità e lunghezza) dei campioni, così come la combinazione dei materiali utilizzati, sono stati valutati preliminarmente in campo, confrontando i risultati delle analisi radiografiche e il quadro fessurativo, ottenuti dagli altri studi effettuati durante il progetto di restauro.

Il mattone di terracotta utilizzato nella costruzione dei modelli in laboratorio poteva ben simulare la parte esterna del modello reale, che ricordiamo essere costituito di terra cruda. Infatti la sola differenza tra i due materiali è la procedura di essiccamento: da una parte la terra cruda viene essiccata al sole in modo naturale, dall'altra il mattone utilizzato nella simulazione viene cotto in una fornace.

I risultati di seguito mostrati sono relativi ai campioni di dimensione (15x31,5x4,5) cm, caratterizzati da due differenti composizioni interne: materiale composito (legno, paglia e terra cruda) e terra cruda, in quanto meglio descrivono gli scenari osservati nel modello reale. Infatti, il

campione costituito da sola terra cruda simula i crack più superficiali della statua, mentre quello composto da materiali compositi imita i crack più profondi della statua, composta internamente soprattutto da legno.

In figura 87 è mostrato l'andamento della temperatura superficiale, nell'intorno del punto di infiltrazione di aria calda, per i campioni costituiti da materiale composito (linea blu) e terra cruda (linea rossa) rispettivamente, durante il processo di immissione di aria calda.

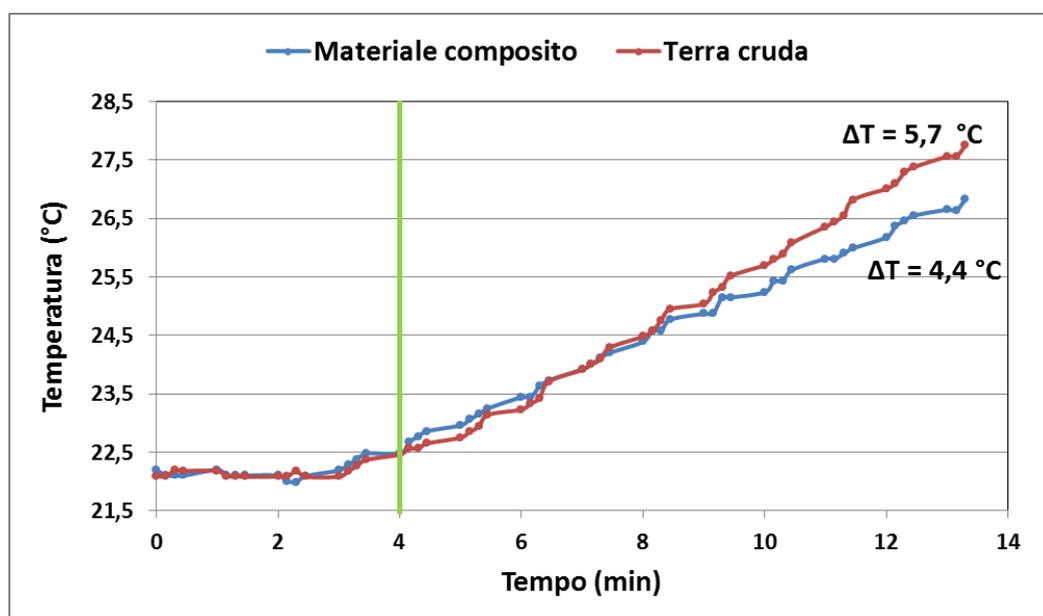


Figura 87: Andamento della temperatura superficiale, nell'intorno del punto di infiltrazione di aria calda, dei due campioni nel tempo.

Poiché non è stato possibile misurare esattamente la temperatura superficiale del punto di infiltrazione a causa della presenza del convettore termico, la temperatura superficiale è stata valutata seguendo l'andamento nel tempo del punto vicino più caldi. Questo era a circa 1

cm dal punto di immissione dell'aria calda ed è stato preso come riferimento per l'analisi dell'andamento termico superficiale. Si può notare un aumento della temperatura di circa $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in entrambi i campioni dopo un tempo di riscaldamento di 3-4 minuti (linea verde). Le misure contemporaneamente condotte per monitorare l'effettiva fuoriuscita di aria calda nel punto opposto a quello di immissione (Figura 88), hanno indicato, per il campione costituito da materiale composito, un aumento di temperatura di circa 3°C dopo 3-4 minuti di riscaldamento (freccia rossa).

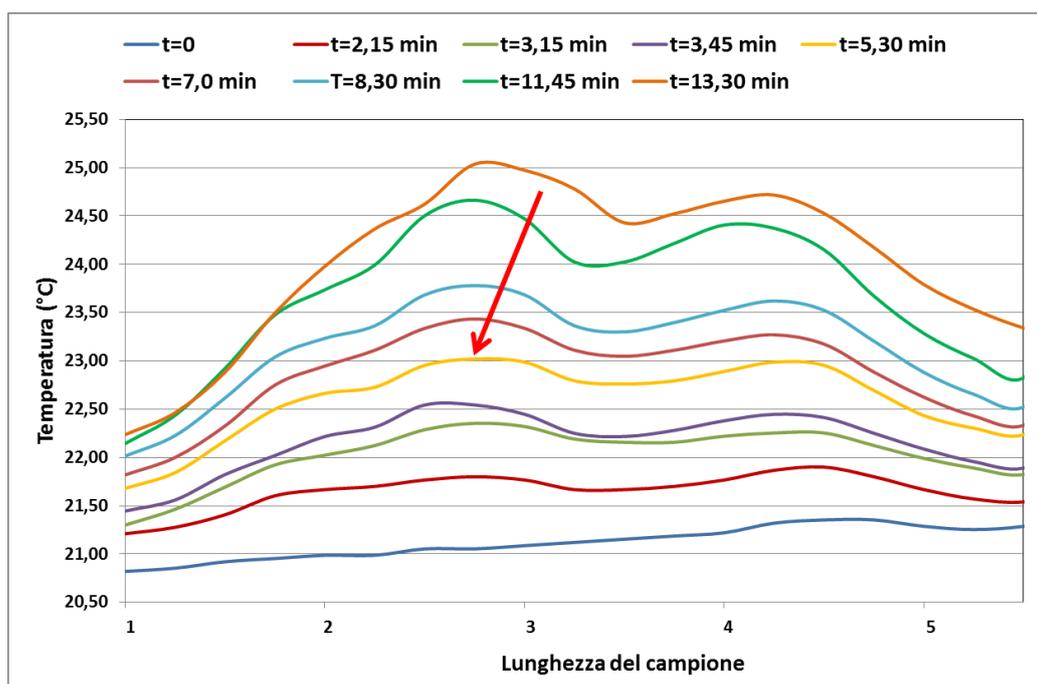


Figura 88: Aumento della temperatura superficiale nella parte opposta al punto di immissione di aria calda, per il campione costituito da materiale composito (legno, paglia e terra cruda).

È stato, quindi, scelto questo tempo di riscaldamento, in quanto il conseguente aumento della temperatura, da una parte è risultato sufficiente per un accurato monitoraggio termografico, dall'altra si mantiene entro i limiti di conservazione del legno definiti da Thomson ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) [57]. È stato considerato solo il range di tollerabilità del legno in quanto, come emerso dalle analisi radiografiche, è il maggior costituente interno della modello del Giambologna, nonché il materiale che richiede dei limiti più restrittivi per una buona conservazione.

Il tempo di riscaldamento delle parti della statua costituite da sola terra cruda è stato scelto in base al cammino coperto dall'aria calda attraverso i crack connessi, non essendoci particolari restrizioni in temperatura per la conservazione del materiale. In figura 89 è mostrato l'aumento nel tempo della temperatura osservato nella parte opposta al punto di infiltrazione, per il campione costituito da sola terra cruda. Si osserva che anche in questo caso un tempo di riscaldamento di circa 3 minuti (indicato dalla freccia rossa) è sufficiente a produrre un aumento di temperatura (circa 3°C) utile ad un'accurata analisi termografica.

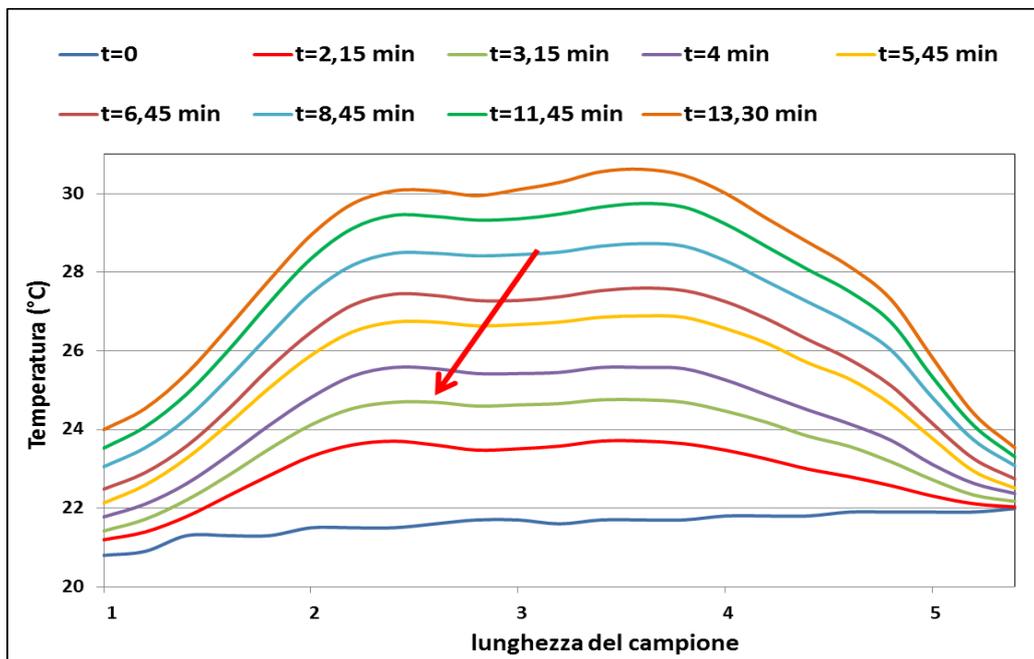


Figura 89: Aumento della temperatura osservato dalla parte opposta al punto di infiltrazione di aria calda, per il campione costituito da sola terra cruda. Si osserva un aumento di circa 3°C dopo un tempo di riscaldamento di 3 – 4 minuti.

Tali risultati ottenuti in laboratorio hanno confermato la possibilità di utilizzare la metodologia in campo senza alcun rischio per la conservazione del modello del Ratto delle Sabine.

Di seguito sono mostrate alcune delle immagini termiche registrate in campo.

Nel termogramma in figura 90, relativo al braccio destro della Sabina (riquadro rosso nell'immagine visibile), si osserva la fuoriuscita di aria calda nella parte opposta al riscaldamento (indicato dalla freccia), che evidenzia la reale connessione tra le due fessurazioni.

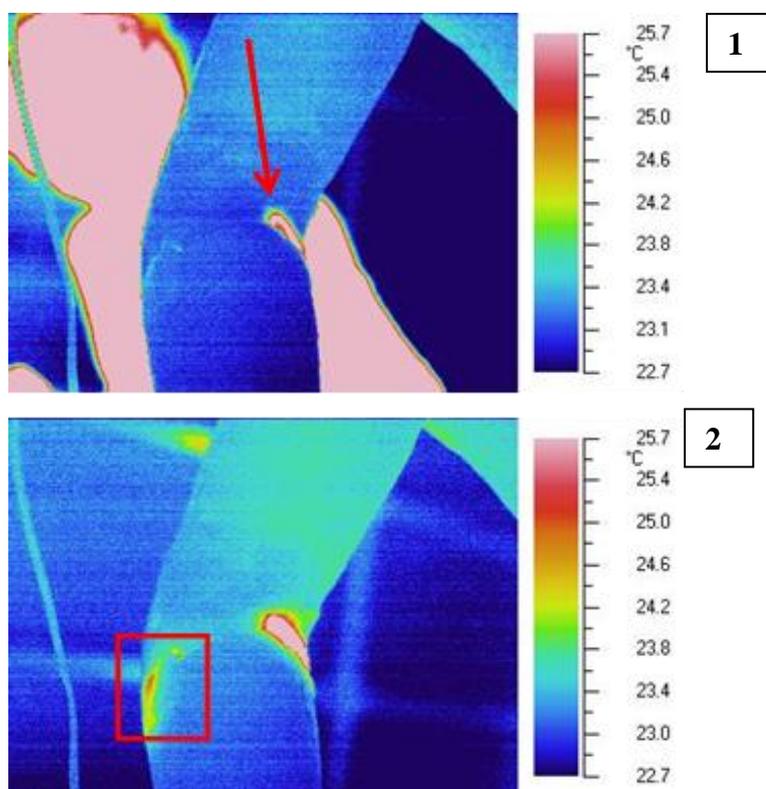
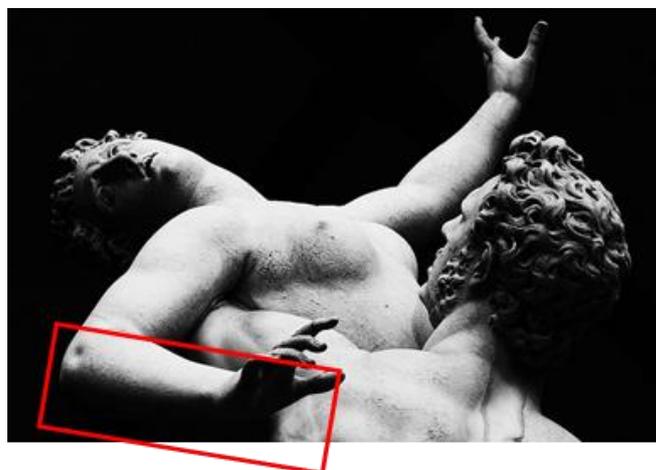


Figura 90: Braccio destra della Sabina. Il riscaldamento, come mostrato nel termogramma 1), è stato realizzato nella parte interna del braccio, tra il gomito e l'avambraccio, dalla parte opposta sono ben visibili (zone in rosso/ giallo) i punti di sfiato di aria calda.

Un altro importante risultato è mostrato in figura 91, in cui il riscaldamento è stato effettuato nella giunzione fra la gamba destra del Romano e il busto del Sabino (riquadro rosso nell'immagine visibile a sinistra) . L'immagine termografica registrata nella parte opposta al punto di infiltrazione evidenzia anche in questo caso la fuoriuscita di aria calda, sottolineando l'efficacia del metodo.

In figura 92 è mostrato un esempio in cui non sono stati evidenziati crack connessi al punto di infiltrazione, visibile nell'immagine termica sulla destra.

Applicando questa metodologia sono stati indagati 13 crack inizialmente considerati critici, di cui solo 4 hanno dato un segnale positivo con un affioramento di aria calda dalla parte opposta al punto di infiltrazione, mentre nei restanti punti il calore veniva disperso all'imbocco della fessurazione e non procedeva in alcuna direzione seguendo canalizzazioni sub-superficiali o strutturali del manufatto.

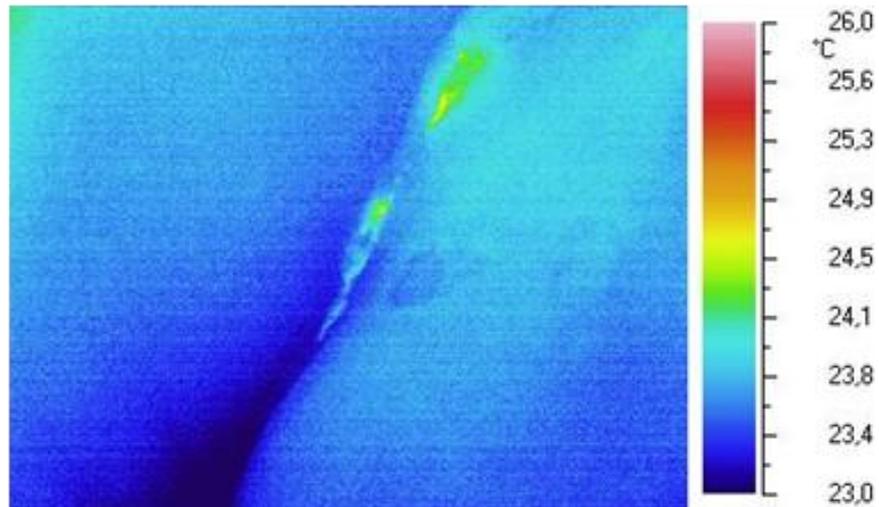


Figura 91: Gamba destra romano/ schiena sabino: il riscaldamento è stato effettuato nella giunzione fra i due corpi evidente nella immagine visibile a sinistra tra il busto del sabino e la parte posteriore della gamba destra del romano. Il termogramma mette in evidenza i punti di sfiato, indicando la presenza di fessure passanti.

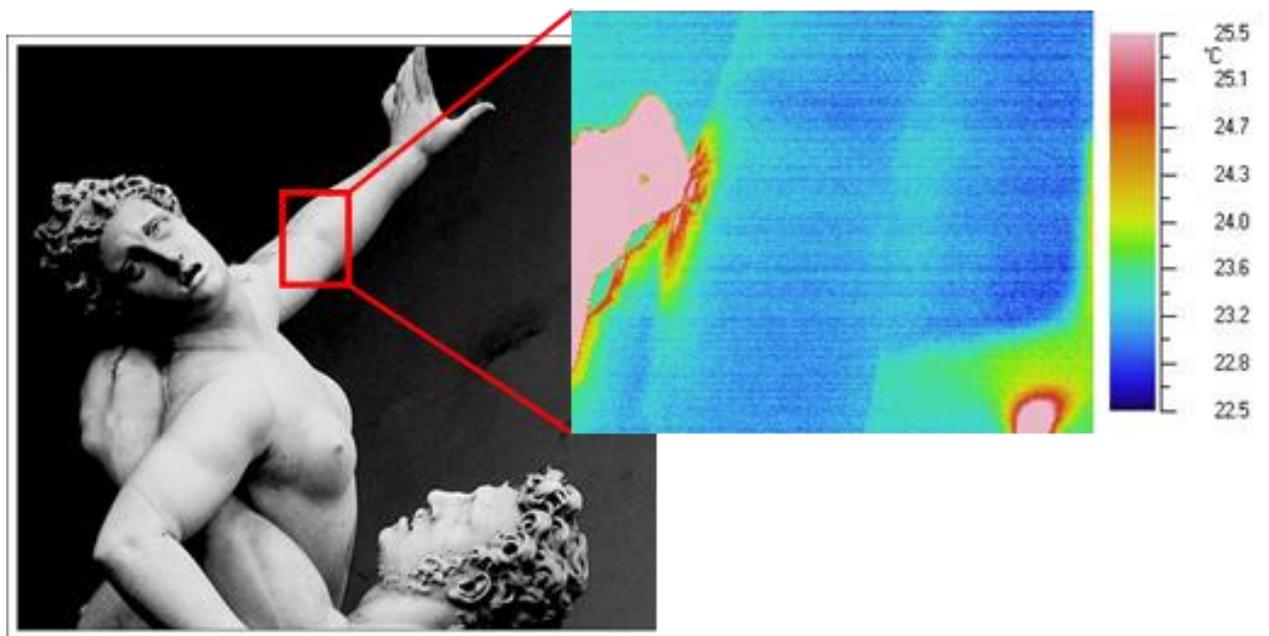


Figura 92: Braccio Sinistro della Sabina. In questo termogramma non è visibile nessun punto di sfiato, indicando che non c'è nessun crack connesso al punto di infiltrazione visibile nell'immagine infrarossa.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro di tesi sono state affrontate le problematiche legate al monitoraggio da remoto della temperatura superficiale di oggetti d'arte, tramite l'utilizzo di un nuovo sensore all'infrarosso che permettesse di eseguire nel tempo e nello spazio un controllo automatico e più accurato della temperatura superficiale. Il fine è un controllo in real-time della dinamica della temperatura di preziosi beni artistici e di un eventuale allarme di attenzione al curatore responsabile del benessere dell'opera, quando il sistema misura variazioni di temperatura oltre il range di tollerabilità di quello specifico oggetto d'arte. Effettuare in modo corretto e preciso questo obiettivo comporta l'analisi di una serie di problematiche piuttosto vaste e complesse e a volte anche trascurate perché considerate poco importanti ma poco scientificamente approfondite. In questa tesi si è cercato di affrontare e cominciare a comprendere, almeno in parte, queste problematiche.

Abbiamo nel corso della tesi descritto come i sensori di temperatura superficiale oggi in commercio soffrano di alcune limitazioni, sia dal

punto di vista dell'accuratezza nelle misure (radiometro e termo camera), che dal punto di vista dell'applicabilità nel campo dei Beni Culturali (sensori a contatto e di quasi-contatto). In particolare se da una parte, per una migliore accuratezza nelle misure, sono preferibili i sensori di temperatura a contatto o di quasi-contatto, dall'altra per le opere d'arte si dovrebbe sempre evitare ogni contatto in quanto superfici preziose, spesso, inoltre, non facilmente raggiungibili e/o caratterizzate da superfici rugose.

Misurazioni mediante sensori a remoto sono, quindi, preferibili, e soprattutto non invasive.

Al fine di effettuare un monitoraggio automatizzato e in continuo della temperatura superficiale degli oggetti d'arte e di superare le problematiche relative agli strumenti di misura oggi in commercio, è stato costruito da uno spin-off del CNR-ISAC un nuovo sensore per misure da remoto.

Durante il lavoro di tesi sono state affrontate le varie problematiche connesse alla misura tramite questo nuovo sensore al fine di ottenere una misura più accurata e precisa della temperatura superficiale.

Come dettagliatamente descritto nel capitolo 4 la tecnologia di tale strumento è quella radiometrica sensibile nel range di lunghezze d'onda tra 7,5 μm e 13,4 μm , dotata di un sistema rotante tri-dimensionale per misure multiple (sia spazialmente che temporalmente) puntuali e automatizzate sulla superficie oggetto di analisi.

L'accurato lavoro di calibrazione dello strumento effettuato durante il

lavoro di tesi ha permesso di ottenere un'accuratezza di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ molto più alta di quella degli usuali sensori a remoto, che è di $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

La formula di Huygens (v. paragrafo 2.3-capitolo 4), valida per l'approssimazione di lenti sottili, ha permesso di definire le migliori condizioni di misura, al fine di eliminare la perdita di energia causata dalla variazione del punto di messa a fuoco in seguito alla variazione della distanza sensore-oggetto. Le conclusioni sono state che già una distanza sensore-oggetto di due metri assicura una completa focalizzazione della radiazione sul sensore, permettendo delle misure accurate della temperatura superficiale.

Il risultato ottenuto risulta quindi essere ottimale per l'applicazione nel campo dei Beni Culturali per due ragioni principali: da una parte l'impossibilità di installare il sensore a piccole distanze dalla superficie a causa della fruizione delle opere, dall'altra perché il sensore è stato ideato per il monitoraggio di grandi opere poste, generalmente, a grandi distanze.

La problematica relativa alla perdita di energia dovuta alla non completa trasparenza alla radiazione infrarossa della lente di Fresnel presente nel dispositivo è stata misurata in laboratorio ed è risultata di circa 5°C . Tale problematica di misura può essere risolta, in fase di installazione del sistema di monitoraggio, confrontando la temperatura superficiale dell'opera misurata mediante un sensore posto manualmente a contatto ad alta precisione ($0,02-0,03^{\circ}\text{C}$) con quella ottenuta tramite il nuovo puntatore. Questo permette, quindi, di correggere tale errore sistematico e

ottenere misure di temperatura superficiale più accurate.

Tale metodologia di approccio, messa a punto e verificata in laboratorio, si è resa necessaria a causa dell'impossibilità di correggere la perdita di energia dovuta all'ottica tramite un processo di calibrazione, come avviene nel caso delle termocamere. Infatti il segnale di output del sensore a termopila non è direttamente proporzionale alla temperatura dell'oggetto da misurare, come invece avviene per la termocamera, ma risulta essere proporzionale alla differenza di temperatura tra l'oggetto e il sensore stesso, come più dettagliatamente è stato descritto nel capitolo 4.

Tramite le suddette metodologie di correzione e installazione le misure di temperatura superficiale effettuate tramite il nuovo puntatore all'infrarosso risulteranno più accurate ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) rispetto agli usuali sensori a remoto ($\pm 2^{\circ}\text{C}$).

A questo si aggiunge che tale sistema di monitoraggio ha come output semplici misure di temperatura puntuali comprensibili da chiunque e non necessitano quindi di un operatore esperto per l'analisi e l'interpretazione dei risultati, quale risulta essere quello dell'analisi di un'immagine termografica.

Inoltre la tecnologia utilizzata oltre a essere semplice, risulta anche di basso costo e di facile utilizzo, permettendo di superare il problema dell'alto costo, che caratterizza le apparecchiature termografiche.

Il nuovo puntatore all'infrarosso, inoltre, è dotato di un software di gestione realizzato ad hoc che permette, di settare il valore di emissività

per ogni punto monitorato della superficie dell'oggetto d'arte comportando una misura più accurata controllo della temperatura superficiale in ogni punto di misura.

L'esatto valore di ε per ogni punto della griglia da monitorare, viene definito, durante il processo di installazione, tramite la misura della temperatura superficiale mediante il sensore ad elevata sensibilità (0,02-0,03 °C), opportunamente calibrato in laboratorio e posto a contatto manualmente, consentendo, così, tramite confronto, di settare preventivamente la ε .

Tuttavia non sempre risulta possibile effettuare tale operazione per cui, nell'impossibilità di utilizzare sensori posti a contatto con la superficie da monitorare, ad esempio nel caso di opere collocate a grandi distanze, è comunque importante cercare di conoscere a priori l'esatto valore della ε che può essere influenzata da vari fattori quali ad esempio la rugosità superficiale.

A tal fine perciò, in questo lavoro di tesi, a causa dell'alta rugosità che caratterizza le opere d'arte, è stata studiata la dipendenza della ε dalla rugosità superficiale, cosa poco approfondita sino ad oggi per i materiali più diffusi nel campo dei Beni Culturali.

Come spiegato in dettaglio nel capitolo 3 si è scelto di affrontare il problema analizzando questa possibile dipendenza per due diverse temperature e per due differenti tempi di abrasione.

I risultati ottenuti hanno evidenziato un effettivo aumento del valore di emissività con la rugosità superficiale, soprattutto per i campioni abrasivi

per un tempo minore.

Tale variazione di ε in funzione della rugosità è risultato essere attribuibile alle microstrutture sub-superficiali del materiale, venute alla luce in seguito al processo di abrasione, che ha eliminato il layer superficiale del materiale. Le analisi effettuate tramite microscopio a scansione elettronica hanno evidenziato, infatti, una diminuzione della densità di tali microstrutture andando dal campione abraso con carta più grossa (P500) a quello abraso con carta caratterizzata da più piccola grana (P2400). Si può, quindi, concludere che una maggiore densità di tali microstrutture comportano un aumento del valore dell'emissività.

Inoltre, le analisi effettuate tramite microscopio a forza atomica hanno evidenziato una larghezza di tali strutture dell'ordine della lunghezza d'onda infrarossa, a cui la termocamera utilizzata è sensibile (8-9 μm), e che potrebbero influenzare, quindi, il comportamento emissivo del campione. Si è interpretato che il comportamento è legato al fatto che tali rugosità comportandosi come dei corpi neri, intrappolano la radiazione infrarossa incidente aumentando il loro potere emissivo. Tuttavia, le variazioni di emissività misurate non sono tali da influenzare in modo sensibile le misure di temperatura superficiale.

In conclusione lo studio ha permesso di affermare che la dipendenza di ε dalla rugosità superficiale può essere trascurata nella misura della temperatura superficiale, almeno per le rugosità indagate.

Ciò non toglie che considerando l'effettiva dipendenza riscontrata, per altre dimensioni di rugosità le conclusioni non possano essere diverse.

Non si esclude che le misure effettuate siano affette dalla riflessione speculare propria di ogni campione, in quanto nel processo di analisi, come spiegato nel paragrafo 1.2.3 (capitolo 3), è stata eliminata, tramite il metodo del riflettore, una quantità costante dell'intensità di radiazione riflessa, uguale per tutti i campioni.

Infine, i risultati delle analisi effettuate a due temperature hanno evidenziato che non vi è nessuna influenza della temperatura sul comportamento emissivo dei campioni, almeno nel range di temperatura caratteristici delle opere d'arte.

Oltre all'inserimento del valore dell' ϵ per ogni specifico punto della griglia, il software di gestione può includere i range termici di tollerabilità per ogni singolo materiale, gestendo, così, il sistema di allarme che si attiva quando vengono rilevate variazioni termiche superficiali che potrebbero essere dannose per l'opera, aiutando nella gestione nel management dei musei. Queste repentine variazioni termiche possono essere infatti legate a accensioni improvvise di illuminazione diretta verso l'opera o all'entrata della radiazione luminosa da una finestra che va a colpire alcune zone di un'opera creando improvvisi e repentini gradienti termici.

Ovviamente la determinazione dei range termici di tollerabilità è un campo vastissimo e ad oggi poco approfondito. In questo lavoro di tesi è stato, quindi, definito un primo approccio partendo dall'analisi di uno dei

materiali più diffusi in Italia nel campo dei Beni Culturali, in particolare per i dipinti su tavola, il pioppo. L'obiettivo dell'analisi è stato, quindi, quello di mettere in evidenza quanto la sola temperatura potesse influire sulla deformazione del legno, responsabile della formazione di crack nei dipinti su tavola, in modo avulso dall'umidità relativa, fin'ora considerata la maggior responsabile e perciò già largamente studiata.

I risultati ottenuti spiegati in dettaglio nel capitolo 5 mostrano una variazione esponenziale della deformazione del campione di pioppo all'aumentare della temperatura, evidenziando un'influenza termica non trascurabile sulla deformazione del legno, soprattutto in corrispondenza di alti valori della temperatura. Per escursioni di temperatura di circa 30°C, infatti, è stata misurata una deformazione media del campione, con una dimensione iniziale di 10,25 cm in direzione radiale, di circa 30 µm. Tale esperimento, che voleva verificare la sola dipendenza termica, ha permesso, inoltre, di evidenziare la difficoltà nel contrastare il comportamento igroscopico del legno, che, nonostante i numerosi accorgimenti presi nel difficile settaggio iniziale dell'apparato strumentale ha comunque leggermente influenzato le deformazioni del campione di pioppo nel range di temperatura considerato. L'andamento osservato può essere, comunque, considerato indicativo del comportamento del legno sottoposto a sollecitazioni termiche. Pertanto è attendibile prevedere una simile risposta anche in completa assenza del contributo igroscopico, in quanto durante i numerosi esperimenti quasi completamente eliminato.

Al fine di definire, quindi, un'equazione matematica che descrivesse il comportamento fisico del legno in funzione delle sole variazioni di temperatura devono essere eseguiti ulteriori studi con tecnologie di controllo più sofisticate di quelle disponibili, quali ad esempio l'uso di una bilancia deci-millesimale, che permettano di effettuare misure più precise che aiutino ad eliminare completamente il contributo igroscopico del legno. Un controllo più preciso della massa permetterebbe, infatti, di ottenere una più accurata taratura dei valori di T e UR relativi ad un valore più preciso del contenuto igrometrico di equilibrio, garantendo, così, l'assenza di deformazioni igroscopiche.

Tale esperimento ha comunque permesso di fare un ottimo passo in avanti nella conoscenza scientifica in un settore a tutt'oggi non ancora profondamente studiato, permettendo di definire il giusto approccio da utilizzare per la difficile conoscenza dell'effetto della sola temperatura sul comportamento termico del legno.

L'ultimo capitolo della tesi ha descritto alcuni casi studio che hanno permesso di valutare direttamente in campo le problematiche legate alla conservazione delle opere d'arte, nonché di definire i limiti di applicabilità dei sensori di temperatura a remoto al fine di una migliore conservazione delle opere d'arte.

Nel caso del museo di S. Croce, ad esempio, in presenza di opere particolarmente grandi colpite sia da illuminazione artificiale che naturale

penetrante dalle finestre il puntatore potrebbe essere un ottimo sistema di controllo e verifica quotidiano degli stress cui le opere potrebbero essere sottoposte.

Viceversa, lo studio effettuato sulla statua del Giambologna, il Ratto delle Sabine, evidenzia, come in questo particolare caso sarebbe inefficiente l'utilizzo del puntatore.

È importante, quindi, non perdere di vista i risultati che si vogliono ottenere, nella scelta del sistema di misura della temperatura superficiale

In conclusione si può affermare che questo lavoro di tesi ha aperto nuove prospettive di ricerca, che potranno essere utili anche in altri ambiti di applicazione.

L'evoluzione futura del puntatore all'infrarosso sarà quella di renderlo più versatile, che potesse rispondere a tutte le esigenze, sarà introdotta una tecnologia automatizzata a fuoco variabile, consentendo così un'applicabilità più ampia dello strumento.

Dovrà inoltre essere indagata ulteriormente la dipendenza dell'emissività dalla rugosità superficiale degli oggetti d'arte, effettuando ulteriori misure in laboratorio su campioni caratterizzati da rugosità maggiori. Questo permetterà anche di conoscere il limite massimo delle dimensioni delle rugosità che influenzano il comportamento emissivo dei materiali. Ulteriori studi dovranno essere, inoltre, effettuati su campioni di vetro al

fine di evidenziare se e come la radiazione specularmente riflessa dalla superficie possa influenzare le misure.

La ricerca, dopo una migliore messa a punto dell'apparato strumentale, dovrà inoltre proseguire negli studi del campione di pioppo per arrivare alla definizione di un'equazione matematica che descriva la dipendenza dello strain dalla temperatura. Infine sarà interessante proseguire analizzando altre specie legnose che costituiscono il nostro patrimonio culturale, al fine di definire, se possibile, un'equazione matematica generale per tutte le specie.

APPENDICE 1

I parametri termo-igrometrici utili per uno studio microclimatico sono:

- Temperatura (T): condizione che determina la direzione del flusso di calore tra due corpi. Dal punto di vista termodinamico la temperatura rappresenta l'energia cinetica media traslazionale delle molecole di gas, generalmente definita come:

$$E_c = \frac{3}{2} kT$$

dove $k = 1.38 \times 10^{-16}$ erg K^{-1} è la costante di Boltzaman. Poiché l'aria è composta principalmente da molecole biatomiche l'energia cinetica totale è definita come

$$E_t = \frac{5}{2} kT.$$

Da queste relazioni la T è anche chiamata Temperatura molecolare. In meteorologia viene anche chiamata temperatura di bulbo asciutto in contrapposizione alla temperatura di bulbo bagnato, che verrà definita in seguito. La temperatura viene misurata in Kelvin

(K) nella cosiddetta scala assoluta che si fa partire dallo zero assoluto e che assegna al punto di fusione del ghiaccio 273,16 K e al punto di ebollizione dell'acqua 373,16 K. La scala centigrada assegna ai due valori nominati le temperature di 0°C e di 100°C rispettivamente.

- Pressione parziale di vapore acqueo (e_v): è la pressione esercitata dalle molecole di vapore presenti in una massa d'aria ed è definita come:

$$e_v = m_v R_v \frac{T}{V}$$

dove R_v è la costante universale del vapore pari, nel sistema di misura internazionale, a 461,525 J/Kg K; la e_v si misura in ettopascal (hPa) o in mbar. Questa relazione, quindi, esprime il contributo da parte del vapore acqueo alla pressione atmosferica.

- Pressione di saturazione di vapore acqueo (e_{sat}): è la pressione esercitata dalle molecole di vapore alla loro massima concentrazione permessa dalla temperatura della massa d'aria, ed è espressa dalla legge empirica di Magnus:

$$e_{sat}(T) = e_{sat}(0) * 10^{\frac{aT}{b+T}}$$

dove $e_{sat}(0) = 6,11$ mbar, $a = 7.5$ e $b = 237,3$ °C. Fisicamente la

pressione di saturazione viene definita dicendo che quando l'aria umida, a pressione atmosferica p e temperatura T , coesiste in equilibrio con una superficie piana d'acqua alle stesse temperatura e pressione, la e_v raggiunge il valore di saturazione e_{sat} detto anche tensione di vapore saturo. In altre parole una massa d'aria ad una determinata temperatura può contenere solo e soltanto una certa quantità di molecole di vapore; al di sopra di tale concentrazione il vapore non può esistere in tale stato e le molecole condensano.

Per temperature minori di 0°C la pressione di saturazione deve essere calcolata rispetto al ghiaccio e le due costanti nell'equazione precedente diventano $a=9,5$ e $b = 265,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tale quantità è del tutto indipendente dal volume occupato dalla massa d'aria umida, infatti se esso aumenta si ha evaporazione comportando un aumento della quantità di vapore acqueo e mantenendo la $e_{sat}(T)$ costante. Allo stesso modo se diminuisce il volume a disposizione della massa d'aria umida il vapore condensa mantenendo ancora la pressione di saturazione costante.

- Umidità specifica (US): è il rapporto tra la massa di vapore contenuto nell'aria m_v e la massa complessiva di vapore e di aria secca (m_v+m_a) ed è espresso in Kg/Kg:

$$us = \left[\frac{m_v}{m_v + m_a} \right].$$

in g/kg diviene:

$$US = 1000 * \left[\frac{m_v}{m_v + m_a} \right].$$

L'umidità specifica è un parametro indipendente sia dalla temperatura che dal volume, rimane quindi invariato in qualsiasi processo che non coinvolga direttamente la produzione o la condensazione di vapore. In condizioni di saturazione si ha l'umidità specifica di saturazione (US_{sat}) che rappresenta la massima massa di vapore che quella massa d'aria con quelle caratteristiche termiche può contenere.

L'umidità specifica può anche essere espressa in termini dell'umidità relativa, che verrà definita di seguito, come:

$$US \approx 37,95 \cdot 10^{\frac{aT}{b+T}} \left(\frac{UR}{p} \right).$$

Spesso, soprattutto in fisica dell'atmosfera, viene utilizzato al posto dell'umidità specifica un altro parametro detto rapporto di mescolanza definito come:

$$rm = m_v/m_a$$

misurato anch'esso in Kg/Kg e se moltiplicato per 1000, come per l'US, in g/Kg.

- Umidità assoluta (UA): detta anche densità di vapore acqueo è la quantità di vapore acqueo contenuto nell'unità di volume espressa in Kg/m³:

$$ua = m_v/V$$

che espresso in g/Kg diviene:

$$UA = ua * 1000.$$

Tale quantità risulta quindi dipendente sia dalla quantità di vapore acqueo che dal volume occupato dalla massa d'aria, che è una grandezza dipendente da eventuali compressioni o espansioni della massa d'aria stessa.

- Umidità relativa (UR): è dato dal rapporto tra la massa di vapore contenuta in un qualsiasi volume di atmosfera e la massa di vapore che si avrebbe se alla stessa temperatura quello stesso volume di atmosfera fosse in saturazione:

$$ur = \frac{m_v}{m_s}$$

Tale quantità ha, quindi, una dipendenza diretta dalla massa di vapore acqueo contenuto in un certo volume di aria e di conseguenza dalla pressione di vapore acqueo così come dall'umidità specifica. Inoltre è inversamente proporzionale alla massa di vapore acqueo alla saturazione, ovvero alla umidità specifica di saturazione che dipende dalla temperatura. Di conseguenza è possibile approssimare tale quantità come:

$$ur = \frac{e_v}{e_{sat}} = \frac{us}{us_{sat}}.$$

In termini pratici questo spiega perchè, mantenendo costante la temperatura, si ha un aumento di umidità relativa all'aumentare della massa di vapore acqueo. Viceversa se il contenuto di vapore contenuto in quel dato volume di atmosfera è mantenuto costante un aumento di temperatura comporta una diminuzione di umidità relativa. Di conseguenza se si vuole mantenere il valore di ur costante in un dato ambiente (che può essere quello museale) le variazioni di entrambe le quantità devono essere tali da compensarsi l'una con l'altra.

La ur è una quantità adimensionale ed usuale esprimerla in termini percentuali, quindi:

$$UR = 100 * ur.$$

Matematicamente l'UR può essere calcolata come:

$$UR = \frac{100[10^{aT_b/(b+T_b)} - 0,0001098 p (T - T_b)]}{10^{\frac{7,5T}{273,3+T}}}$$

dove p è la pressione atmosferica espressa in mbar T e T_b espresse in °C, a=7,5 e b= 237,3 °C. La T_b detta temperatura di bulbo bagnato e sarà definita in seguito.

- Temperatura di rugiada (TR): è la temperatura a cui deve essere portata l'aria per raffreddamento perché avvenga la saturazione di vapore d'acqua rispetto all'acqua libera, senza che nel frattempo avvengano variazioni di p o US. Questa quantità, misurata in °C, la si esprime come segue:

$$TR = \frac{237,3 \left[237,3 \log\left(\frac{UR}{100}\right) + T \log\left(\frac{UR}{100}\right) \right] + 7,5T}{1779,75 - 273,3 \log\left(\frac{UR}{100}\right) - T \log\left(\frac{UR}{100}\right)}$$

- Distanza dal punto di rugiada (DTR): definita la temperatura di rugiada si ha:

$$DTR = T - TR$$

ed è dipendente sia dalla temperatura dell'aria che dal suo grado di saturazione. In termini matematici è esprimibile come:

$$DTR = T - \frac{237,3 \left[237,3 \log \left(\frac{UR}{100} \right) + T \log \left(\frac{UR}{100} \right) \right] + 7,5T}{1779,75 - 273,3 \log \left(\frac{UR}{100} \right) - T \log \left(\frac{UR}{100} \right)},$$

che può essere approssimata come:

$$DTR \approx \left(\frac{(273,3 + T)}{7,5} \right) * (2 - \log UR).$$

- Temperatura di bulbo bagnato (T_b): definita come la temperatura di equilibrio a pressione costante indicata da un termometro ricoperto da una garza imbibita di acqua ad evaporazione adiabatica tramite una ventilazione forzata alla velocità di 3-5 m/s. L'abbassamento termico $T - T_b$, detto anche depressione di bulbo bagnato, è dovuto all'assorbimento di calore da parte dell'acqua che evapora ed è tanto maggiore quanto maggiore è l'evaporazione, quindi quanto minore è il contenuto di vapore nell'aria a quella temperatura, cioè quanto minore è l'UR.

APPENDICE 2

I parametri statistici per la caratterizzazione della rugosità superficiale dei materiali tramite microscopio a forza atomica (AFM) sono:

- Rugosità media (R_a): valore medio aritmetico degli scostamenti dal profilo reale della superficie rispetto alla linea media. Tale misura è riferita ad una lunghezza di base l del profilo analizzato per evitare l'influenza da altri tipi di irregolarità. È definite come:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j|.$$

dove $r_j = z_j - z_m$.

- Media quadratica media (R_q): media quadratica media degli spostamenti dei punti del profilo dalla linea media; tale parametro, essendo una media quadratica è più

sensibile ai bruschi scostamenti del profilo da un andamento regolare ed è in generale maggiore rispetto al valore R_a .

È definito come:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2},$$

con $r_j = z_j - z_m$.

- Altezza massima rugosità (R_t):

$$R_t = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right| + \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|,$$

con $r_j = z_j - z_m$.

- Massima profondità di valle (R_v):

$$R_v = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right|,$$

con $r_j = z_j - z_m$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bernardi A., *Conservare opere d'arte, Il microclima negli ambienti museali*. Perugia: Il Prato, 2003.
- [2] Camuffo D., *Microclimate for Cultural Heritage*. Netherlands: Elsevier, 1998.
- [3] B. A., Nardini M., and Becherini F., "Inquinamento atmosferico e microclima al museo Correr," in *II Congresso Nazionale di Architettura*, pp. 163–175.
- [4] C. D. and Bernardi A., "Il condizionamento estivo dei musei: il Museo Correr (Venezia), la Galleria degli Uffizi (Firenze) e il Museo del Louvre (Parigi)," presented at the First International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural heritage in the Mediterranean Basin, Palermo, 1996, pp. 1679–1685.
- [5] Camuffo D., Brimblecombe P., B. H.J., Van Grieken R., S. G., Valentino A., B. A., Blaeds N., S. D., De Bock L., G. K., Wieser M., and Kim O., "Environmental Risk to Cultural Heritage related to Unsound of Technology and Mass Tourism at the Correr Museum, Venice," vol. *The Science of the Total Environment*, no. 236, pp. 135–152, 1999.
- [6] "Il microclima nella Cappella Sistina | Camuffo, D. e Bernardi, A.," *Europeana*. [Online]. Available: http://www.europeana.eu/portal/record/2023823/istituti_ProdottoDellaRicerca_html_cds_075_id_139306.html. [Accessed: 09-Dec-2014].
- [7] "The Microclimate of the Sistine Chapel, Rome." [Online]. Available: http://www.academia.edu/6918824/The_Microclimate_of_the_Sistine_Chapel_Rome. [Accessed: 09-Dec-2014].
- [8] G. degli Uffizi, *La Madonna d'Ognissanti di Giotto restaurata*. Centro Di, 1992.
- [9] C. D. and Bernardi A., "Dinamica del microclima e scambi termigrometrici tra pareti e atmosfera interna nella Cappella sistina," no. IV, pp. 211–257, 1986.

- [10] Bernardi A. and Becherini F., “Un nuovo approccio allo studio del degrado delle vetrate antiche,” *Rivista della Stazione sperimentale del vetro*, vol. 4, pp. 28–37, 2002.
- [11] A. Bernardi, “Microclimate in the British museum, London,” *Mus. Manag. Curatorship*, vol. 9, no. 2, pp. 169–182, Jun. 1990.
- [12] A. Bernardi, F. Becherini, M. Verità, P. Ausset, M. Bellio, U. Brinkmann, H. Cachier, A. Chabas, F. Deutsch, M.-P. Etcheverry, F. Geotti Bianchini, R. H. M. Godoi, V. Kontozova-Deutsch, R. Lefèvre, T. Lombardo, P. Mottner, C. Nicola, I. Pallot-Frossard, S. Rölleke, H. Römich, G. Sommariva, M. Vallotto, and R. Van Grieken, “Conservation of stained glass windows with protective glazing: Main results from the European VIDRIO research programme,” *J. Cult. Herit.*, vol. 14, no. 6, pp. 527–536, Nov. 2013.
- [13] A. Bernardi, F. Becherini, G. Bassato, and M. Bellio, “Condensation on ancient stained glass windows and efficiency of protective glazing systems: two French case studies, Sainte-Chapelle (Paris) and Saint-Urbain Basilica (Troyes),” *J. Cult. Herit.*, vol. 7, no. 1, pp. 71–78, Jan. 2006.
- [14] E. Brodu, M. Balat-Pichelin, J.-L. Sans, and J. C. Kasper, “Influence of roughness and composition on the total emissivity of tungsten, rhenium and tungsten–25% rhenium alloy at high temperature,” *J. Alloys Compd.*, vol. 585, pp. 510–517, Feb. 2014.
- [15] C.-D. Wen and I. Mudawar, “Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and temperature determination using multispectral radiation thermometry (MRT) algorithms,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 11, no. 5, pp. 551–562, Oct. 2002.
- [16] C.-D. Wen and I. Mudawar, “Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 17–18, pp. 3591–3605, Aug. 2004.
- [17] C.-D. Wen and I. Mudawar, “Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 23–24, pp. 4279–4289, Nov. 2006.
- [18] A. Seifert, K. Boboridis, and A. W. Obst, “Emissivity Measurements on Metallic Surfaces with Various Degrees of Roughness: A Comparison of Laser Polarimetry and Integrating

- Sphere Reflectometry,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 25, no. 2, pp. 547–560, Mar. 2004.
- [19] T. Fu, P. Tan, and M. Zhong, “Experimental research on the influence of surface conditions on the total hemispherical emissivity of iron-based alloys,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 40, pp. 159–167, Jul. 2012.
- [20] F. Wang, L. Cheng, H. Mei, Q. Zhang, and L. Zhang, “Effect of Surface Microstructures on the Infrared Emissivity of Graphite,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 35, no. 1, pp. 62–75, Jan. 2014.
- [21] Agababov, “Effect of the roughness of the surface of a solid body on its radiation properties and methods for their experimental determination,” *Eff. Rough. Surf. Solid Body Its Radiat. Prop. Methods Their Exp. Determ.*, vol. Teplofizika Vysokikh Temperature, no. 6, pp. 78–87, 1968.
- [22] S.G. Agababov, “Effect of secondary roughness on the emissive properties of solid bodies,” *Eff. Second. Rough. Emissive Prop. Solid Bodies*, vol. Teplofizika Vysokikh Temperature, no. 8, pp. 220–222, 1970.
- [23] S.G. Agababov, “Effect of the roughness factor on radiation properties of solids,” *Eff. Rough. Factor Radiat. Prop. Solids*, vol. Teplofizika Vysokikh Temperature, no. 8, pp. 770–773, 1970.
- [24] S. G. Agababov and L.I. Eksler, “Influence of the geometric characteristics of the relief of the surface of a solid on its radiation properties,” *Influ. Geom. Charact. Relief Surf. Solid Its Radiat. Prop.*, vol. Teplofizika Vysokikh Temperature, no. 9, pp. 522–526, 1971.
- [25] S.G. Agababov, “Effect of roughness factor on the radiation properties of a solid body with random roughness,” *Eff. Roughness Factor Radiat. Prop. Solid Body Random Rough.*, vol. Teplofizika Vysokikh Temperature, no. 13, pp. 314–317, 1975.
- [26] A. Krenzinger and A. C. de Andrade, “Accurate outdoor glass thermographic thermometry applied to solar energy devices,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 1025–1034, Aug. 2007.
- [27] P. Bison, A. Bortolin, G. Cadelano, G. Ferrarini, and E. Grinzato, “Emissivity Measurement of Semitransparent Textiles,” *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2012, p. e373926, Dec. 2012.

- [28] R. P. Madding, “Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations,” 1999, vol. 3700, pp. 393–401.
- [29] S. Marinetti and P. G. Cesaratto, “Emissivity estimation for accurate quantitative thermography,” *NDT E Int.*, vol. 51, pp. 127–134, Oct. 2012.
- [30] L. Arnelao, R. Bertocello, S. Coronaro, and A. Glisenti, “Inorganic thin coating deposition to consolidate and protect historical glass surfaces. Part1: cleaning of the glass substrates. Part2. Synthesis, deposition and characterization of the protective siliceous film,” *Inorg. Thin Coat. Depos. Consol. Prot. Hist. Glass Surf. Part1 Clean. Glass Substrates Part2 Synth. Depos. Charact. Prot. Siliceous Film*, vol. Science and Technology for Cultural Heritage, no. 7(2), pp. 47–69, 1998.
- [31] Antonio Borri, *Studi sulla conservazione e il restauro del patrimonio artistico e architettonico ligneo*. Perugia: quattroemme, 2006.
- [32] V. Dorge and F. C. Howlett, *Painted Wood: History and Conservation*. Getty Publications, 1998.
- [33] M. Łukomski, “Painted wood. What makes the paint crack?,” *J. Cult. Herit.*, vol. 13, no. 3, Supplement, pp. S90–S93, Sep. 2012.
- [34] M. F. Mecklenburg, C. S. Tumosa, and D. Erhardt, “Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity,” in *Painted wood: history and conservation (Part 6: Scientific Research)*, V. Dorge and F. C. Howlett, Eds. The Getty Conservation Institute, 1998, pp. 464–483.
- [35] M. F. Mecklenburg, *Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity And Temperature in Museums and Galleries*. .
- [36] K. Dardes and A. Rothe, *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 24–28 April 1995*. Getty Publications, 1998.
- [37] S. Jakiela, Ł. Bratasz, and R. Kozłowski, “Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 21–37, Jan. 2008.
- [38] P. Dionisi Vici, P. Mazzanti, and L. Uzielli, “Mechanical response of wooden boards subjected to humidity step variations: climatic

- chamber measurements and fitted mathematical models,” *J. Cult. Herit.*, vol. 7, no. 1, pp. 37–48, Jan. 2006.
- [39] R. Rémond, J. Passard, and P. Perré, “The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending,” *Eur. J. Mech. - ASolids*, vol. 26, no. 3, pp. 558–572, May 2007.
- [40] J. Zhou, C. Hu, S. Hu, H. Yun, G. Jiang, and S. Zhang, “EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE BENDING PERFORMANCE OF WOOD-BASED PANELS,” *BioResources*, vol. 7, no. 3, pp. 3597–3606, Jun. 2012.
- [41] D. W. Green, J. W. Evans, J. D. Logan, and W. J. Nelson, “Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature,” *For. Prod. J.*, vol. 49, no. 10, pp. 82–94, 1999.
- [42] Nadir Ayrimis, U. Buyuksari, and Nusret As, “Bending Strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperature,” *Bend. Strength Modul. Elast. Wood-Based Panels Cold Moderate Temp.*, vol. Cold Regions Science and Technology, pp. 40–43, 2010.
- [43] I. Smith, *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley & Sons, 2003.
- [44] P. Mazzanti, M. Togni, and L. Uzielli, “Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (*Populus alba* L.) across the grain,” *J. Cult. Herit.*, vol. 13, no. 3, Supplement, pp. S85–S89, Sep. 2012.
- [45] P. Bekhta, J. Łęcka, and Z. Morze, “Short-term effect of the temperature on the bending strength of wood-based panels,” *Holz Als Roh- Werkst.*, vol. 61, no. 6, pp. 423–424, Dec. 2003.
- [46] M. Ciatti, C. Castelli, and A. Santacesaria, *Dipinti su tavola: la tecnica e la conservazione dei supporti*. Edifir, 2007.
- [47] L. Uzielli, L. Cocchi, P. Mazzanti, M. Togni, D. Jullien, and P. Dionisi-Vici, “The Deformometric Kit: A method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels,” *J. Cult. Herit.*, vol. 13, no. 3, Supplement, pp. S94–S101, Sep. 2012.
- [48] Paolo Dionisi Vici, “Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei dipinti su tavola da variazioni

- climatiche: la traversa struentata,” Università degli Studi di Firenze, Firenze.
- [49] G. Giordano, *Tecnologia del legno*, 2nd ed., vol. 1. UTET, 1981.
- [50] Flir Systems – manuale per l’utente -30 giugno 2008.
- [51] Di Tuccio M.C., Ludwig N., Becherini F., Bison P., Gargano M., Bernardi A. Experimental evaluation of the influence of surface roughness on emissivity – in preparazione.
- [52] Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography – Part 1: general procedures, 2011.
- [53] Measuring and compensating for reflected apparent temperature using infrared imaging radiometers, 1998.
- [54] Becherini F., Di tuccio M., Vivarelli A., Bernardi A. Microclimatic monitoring of the Santa Croce museum in Florence: environmental risk assessment and preventive conservation strategy – in preparazione.
- [55] Becherini F., Bernardi A., Di Tuccio M.C., Vivarelli A., Pochelè L., De Grandi S., Quendolo A., Microclimatic monitoring for the assessment of the conservation conditions of the studdo statues in the UNESCO site of the Longobard Temple in Cividale del Friuli – Udine (Italy) – in preparazione.
- [56] Di Tuccio M.C., Ludwig N., Gargano N., Bernardi A.: Thermographic inspection of cracks in the mixed materials statue: Ratto delle Sabine. – sottomesso a Heritage Science Journal.
- [57] Aghemo C., Filippi M., Prato E., Condizioni ambientali per la conservazione dei beni di interesse storico e artistico. Ricerca bibliografica comparata. Comitato Giorgio Rota, 1997.
- [58] Simpson, William T. 1998. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the United States and worldwide. Forest Products Laboratory Research Note. FPL- RN 0286. L.
- [59] Fioravanti M., Goli G., Mazzanti P., Preservatech PMCG-2-m-HD unit testing in different conditions Test performed by DEISTAF – Università di Firenze.