

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Misure di umidità di materiali tramite termografia

Relatore

Prof. Chiara Maurizio

Correlatore

Dott. Gianluca Cadelano

Laureando

Nicola Stecchetti

Anno Accademico 2022/2023

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 2 | Metodo e modello matematico | 3 |
| 2.1 | Cenni teorici | 5 |
| 2.1.1 | Effusività termica | 5 |
| 2.1.2 | Modello matematico | 5 |
| 3 | Termografia infrarossa | 8 |
| 3.1 | Termocamera e immagini termiche | 8 |
| 3.2 | Preparazione dei campioni | 10 |
| 4 | Tecniche sperimentali | 11 |
| 4.1 | Misura delle proprietà termofisiche | 11 |
| 4.1.1 | Conducibilità termica | 11 |
| 4.1.2 | Densità di massa | 12 |
| 4.1.3 | Calore specifico | 12 |
| 4.1.4 | Effusività | 13 |
| 4.2 | Setup e procedura di misura | 13 |
| 4.2.1 | Setup | 13 |
| 4.2.2 | Procedura di misura | 14 |
| 4.2.3 | Misura della porosità | 15 |
| 5 | Analisi dati | 16 |
| 5.1 | Effusività | 16 |
| 5.2 | Umidità | 20 |
| 5.3 | Diverse tecniche a confronto | 22 |
| 6 | Conclusioni | 23 |
| 6.1 | Prospettive future | 23 |
| | Bibliografia | 24 |

Capitolo 1

Introduzione

La presenza di umidità all'interno delle murature rappresenta una delle maggiori fonti di degrado degli edifici storici, che può compromettere anche la conservazione di opere d'arte murali. Sebbene l'affresco sia una delle più antiche e durature tecniche di pittura, esso è soggetto a stress meccanici oltre che a processi di deterioramento biologici e chimici innescati ed esacerbati dalla presenza di acqua. Per esempio, l'efflorescenza (cristallizzazione di sali) è uno dei principali processi chimici mediati dall'acqua che, unitamente ai processi di gelo e disgelo (stress meccanico), può compromettere seriamente l'opera d'arte [1], [2].

A fini conservativi è quindi fondamentale conoscere il contenuto e la distribuzione dell'acqua presente nelle murature, e come questi parametri evolvano nel tempo in funzione di cicli stagionali o di altre condizioni al contorno. Per tale ragione, negli anni, sono state proposte molte tecniche qualitative per la valutazione del contenuto di umidità e di come essa si distribuisca nella parete; queste però non sempre si sono dimostrate affidabili ed in alcuni casi non consentono un monitoraggio continuativo. È quindi necessario introdurre valutazioni quantitative, le quali presentano anche il vantaggio di fornire informazioni importanti a fini restaurativi. Le tecniche quantitative più comuni ad oggi disponibili, come l'analisi termogravimetrica [3], si sono dimostrate affidabili per la valutazione del contenuto di umidità ma spesso, queste metodologie non sono applicabili ai beni culturali poiché hanno caratteristiche invasive o distruttive, che possono essere in conflitto con la conservazione dell'opera. [4], [5], [6]

Un'alternativa è rappresentata dalla termografia infrarossa (IRT: Infrared Thermography). Tale tecnica permette, per mezzo di una termocamera, di valutare l'intensità della radiazione emessa da un corpo e di correlare tale valore con la temperatura della superficie dello stesso. I dati di output sono matrici bidimensionali di dimensioni pari ai pixel del sensore dello strumento, i cui valori rappresentano l'intensità della radiazione emessa dalle superfici osservate, che può essere convertita tramite opportune calibrazioni in temperatura. Per facilitarne l'interpretazione, spesso queste matrici vengono convertite in immagini in falsi colori (dette immagini termiche o termogrammi), attribuendo ad ogni valore di temperatura una certa gradazione cromatica secondo una palette di colori scelta in maniera arbitraria. L'IRT è una tecnica ottica senza contatto, ragion per cui trova vasto impiego in ambito dei test non distruttivi, anche per applicazioni su beni culturali. [7], [8]

Il processo di evaporazione dell'acqua implica l'assorbimento da parte della stessa di cospicue quantità di calore con un conseguente raffreddamento dell'area del corpo nella quale avviene il passaggio di stato. Si rilevano quindi temperature minori nelle zone in cui la parete risulta quasi satura di acqua. Questo fenomeno è alla base delle più comuni metodologie di indagine termografica per il rilievo dell'umidità delle murature. Tuttavia, questo tipo di valutazione può fornire solo

un'indicazione qualitativa della presenza di umidità ed è inoltre soggetta a falsi positivi legati a fenomeni di radiazione riflessa e disomogeneità della superficie in esame.

Questa tesi si propone di descrivere e testare in laboratorio una metodologia innovativa di termografia infrarossa attiva volta alla valutazione quantitativa e non invasiva del contenuto di umidità nei materiali porosi. La metodologia proposta si basa sulla valutazione dell'effusività termica dei materiali in esame, proprietà termofisica che quantifica la capacità del materiale di scambiare calore. L'effusività si definisce come il prodotto sotto radice quadrata della densità, del calore specifico e della conducibilità termica. Tale proprietà viene direttamente influenzata dal contenuto di umidità. Si mostrerà quindi come, sottoponendo i campioni ad un impulso termico e rilevando la variazione di temperatura della superficie tramite una termocamera sia possibile, sfruttando una tecnica comparativa, ricavare l'effusività del campione in esame. Si fornirà quindi un modello matematico semplificato che descriva la variazione dell'effusività in funzione dell'umidità contenuta nel campione, in modo tale da estrarne una stima numerica.

Capitolo 2

Metodo e modello matematico

Si presenta, nel corso del presente capitolo, la metodologia sperimentale seguita. L'obiettivo del lavoro svolto è ricavare una stima del contenuto di acqua in materiali porosi effettuando misure di effusività. I campioni utilizzati in laboratorio sono due mattoni, uno storico ed uno di recente fabbricazione, oltre alla pietra Serena (roccia arenaria) scelta come materiale di riferimento. Come già accennato esiste una correlazione tra il contenuto di acqua e il valore dell'effusività del materiale. Al fine di valutare quantitativamente tale relazione è necessario conoscere le altre principali proprietà termofisiche del materiale asciutto. In questo capitolo si forniranno dei cenni teorici e si illustreranno i modelli matematici utilizzati. Di seguito una breve descrizione della procedura sperimentale seguita.



In primo luogo si procede con l'asciugatura dei campioni (processo descritto nel paragrafo 3.2). Per la valutazione a mezzo dell'IRT dell'effusività è necessario utilizzare una tecnica comparativa (più ampiamente descritta nella sezione 4.2.2). Tale metodologia prevede di comparare l'incremento di temperatura sulla superficie del campione in esame con un materiale di riferimento il cui valore di effusività è noto a priori. Una volta misurata l'effusività del campione asciutto (alla quale, in

seguito, si farà riferimento come e_{dry}), si immerge il campione in acqua fino a portarlo a completa saturazione. La misura comparativa viene quindi ripetuta. Il campione viene fatto asciugare progressivamente, effettuando misurazioni a livelli intermedi di umidità. La conducibilità termica, il calore specifico e la densità (proprietà dalle quali si ottiene il valore di effusività, cfr. 2.1.1), nel caso di un materiale composito, dipendono in modo complesso da come i vari elementi sono distribuiti, nonché dal tipo e percentuali degli stessi. Occorre fornire un modello matematico che semplifichi tale trattazione e attraverso il quale sia possibile, variando la proporzione di aria/acqua che riempie la porosità aperta del mattone, valutare come varia l'effusività (tale modello sarà discusso nel paragrafo 2.1.2).

Si riportano di seguito i materiali utilizzati per le prove sperimentali:

- come **materiale di riferimento** è stata scelta la pietra Serena, una pietra arenaria naturale con tessitura omogenea e bassa porosità.
- **due mattoni** utilizzati per la valutazione della variazione dell'effusività in relazione al contenuto d'acqua. Sono stati scelti di materiali ed epoche differenti, al fine di avere un'indicazione sulla solidità della procedura messa a punto. Il primo dei due appartiene alle murature dell'Arsenale di Venezia (*S1*), il secondo è invece un mattone di recente fabbricazione (*S2*).



Figura 2.1: A destra è visibile il mattone dell'Arsenale di Venezia *S1* utilizzato per le misurazioni, a sinistra una sezione di un mattone della stessa tipologia utilizzata per la misura di porosità.

2.1 Cenni teorici

2.1.1 Effusività termica

L'effusività termica si definisce, a livello termodinamico, come la radice quadrata del prodotto della conducibilità termica (λ), della densità del materiale (ρ) e del suo calore specifico a pressione costante (c_p):

$$e = \sqrt{\lambda\rho c_p} \quad (2.1)$$

Essa caratterizza la capacità del materiale di scambiare il calore. Poiché le tre grandezze di cui e è il prodotto sono soggette a variazioni anche molto significative conseguentemente all'aumento della concentrazione di acqua nel campione, il suo valore può essere correlato al contenuto di umidità.

È inoltre noto [9] che in approssimazione di materiale semi-infinito, valida qualora il campione sia sufficientemente spesso (alcuni centimetri) e l'impulso termico al quale viene sottoposto sia limitato nel tempo (pochi secondi), l'andamento della temperatura sulla sua superficie in funzione della radice quadrata del tempo è il seguente:

$$T(t) = 2\frac{Q}{e}\sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad (2.2)$$

dove e è l'effusività, definita come sopra, Q è la potenza assorbita dal campione e t il tempo.

Sottoponendo dunque due campioni di uguale emissività (ϵ), alla stessa potenza Q , per lo stesso tempo t , è possibile comparare i rispettivi incrementi di temperatura superficiale facendone il rapporto. Nota l'effusività del campione di riferimento (e_{rif}) si può quindi stimare l'effusività del campione ignoto.

$$e_{S_i} = e_{rif} \frac{T_{rif}}{T_{S_i}} \quad (2.3)$$

dove il pedice S_i indica i differenti campioni dei quali si vuole misurare l'effusività.

Dall'equazione 2.2 traspare una relazione lineare fra la temperatura e la radice quadrata del tempo. A livello sperimentale sarà dunque possibile effettuare un fit lineare. La stima dell'effusività si ottiene quindi, equivalentemente, dal rapporto dei coefficienti angolari di seguito indicati con la lettera m :

$$e_{S_i} = e_{rif} \frac{m_{rif}}{m_{S_i}} \quad (2.4)$$

2.1.2 Modello matematico

Si è detto come il valore dell'effusività vari in funzione del contenuto di umidità del materiale e come, a ritroso, grazie a questa caratteristica sia possibile fornire una stima del contenuto di acqua. A tale scopo è necessario fornire un modello matematico che descriva come variano λ , ρ e c_p in funzione della percentuale di acqua contenuta nel mattone. I mattoni sono costituiti da un impasto che ingloba elementi di natura eterogenea; anche per questo motivo fornire un modello preciso per la valutazione della conducibilità termica è estremamente complesso. Tale questione è tutt'ora ampiamente dibattuta e argomento di ricerca. In primo luogo è necessario sottolineare come all'interno del mattone siano presenti diversi tipi di pori. Si distingue tra porosità aperta, ovvero passibile di riempimento da parte di un fluido esterno, e porosità chiusa che non si trova in diretto collegamento con l'esterno e permane, in qualsiasi condizione, colma di aria.

Contenuto di umidità e densità di massa

Il contenuto d'acqua è espresso come un rapporto che può variare da 0 (materiale completamente asciutto) al valore della porosità aperta del materiale alla saturazione. Può essere indicato su base volumetrica o di massa. Il contenuto volumetrico di umidità Φ , è definito come il rapporto fra il volume di acqua assorbito e il volume del mattone:

$$\Phi = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O} V_{S_i}} \quad (2.5)$$

Il contenuto di umidità del campione aumenta in relazione al progressivo riempimento della porosità aperta. Il volume del mattone, in questo processo, rimane chiaramente costante; la variazione di densità è dunque da imputare solamente al volume di acqua ospitato nei pori. Detta ρ_{S_i} la densità del campione asciutto, definiamo la densità ρ_{wet} come:

$$\rho_{wet}(\Phi) = \rho_{S_i} + \Phi \rho_{H_2O} \quad (2.6)$$

dove si considera $\rho_{H_2O} = (1000.00 \pm 0.01) \text{ kg/m}^3$.

Calore specifico

Per valutare la variazione del calore specifico in funzione del livello di saturazione bisogna tenere in considerazione tre differenti componenti: aria, acqua ed il mattone stesso. Se si considera la parte bulk del mattone in modo complessivo, nota la sua porosità aperta (χ , data dal rapporto fra il volume della porosità aperta e il volume totale del mattone) ed il calore specifico $c_p(dry)$, è possibile stimare il valore del calore specifico per la sola parte bulk:

$$c_p(bulk) = \frac{c_p(dry) - c_p(air)\chi}{1 - \chi} \quad (2.7)$$

dove $c_p(air)$ è il calore specifico dell'aria, noto da letteratura.

A questo punto, noto il calore specifico dell'acqua $c_p(water)$, il c_p del mattone con una percentuale Φ di umidità può essere stimato tramite una media dei c_p dei singoli componenti (parte bulk, aria e acqua) pesata sulle rispettive proporzioni.

$$c_p(wet) = c_p(bulk) \cdot (1 - \chi) + c_p(air) \cdot (\chi - \Phi) + c_p(water) \cdot \Phi \quad (2.8)$$

dove $c_p(water) = (4182 \pm 1) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e $c_p(air, 25^\circ\text{C}) = (1006 \pm 1) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Conducibilità termica

La trattazione di quest'ultima proprietà è molto complessa. Come già accennato, un mattone può contenere differenti tipologie di inclusi, alcuni dei quali possono possedere una struttura cristallina e, in alcuni casi, rispondere in modo differente in funzione delle direzioni della sollecitazione termica (ne è un chiaro esempio il quarzo). Inoltre, man mano che l'acqua riempie i pori, essa può mettere a contatto inclusi di diverso tipo, portando ad una variazione considerevole della conducibilità. Una modellazione il più possibile fedele al singolo campione preso in esame può essere effettuata tramite simulazioni agli elementi finiti basate su sezioni di materiale. Tale approccio tuttavia è ben oltre gli scopi di questo studio che si propone di valutare un metodo che sia applicabile sul campo per la stima del contenuto di umidità delle murature.

Vari modelli per la valutazione di λ sono stati e vengono tutt'ora proposti (cfr. [10], [11]). In particolare, per gli scopi di questa tesi, ne sono stati analizzati due: un primo che prevede una netta semplificazione, consiste nell'adottare lo stesso approccio seguito nel caso di c_p effettuando quindi medie pesate sulle proporzioni di acqua, aria e parte bulk del mattone. Un secondo approccio, più articolato, proposto in [10] come evoluzione del lavoro presentato in [11], consiste nel modellare geometricamente, utilizzando come base geometrica un cubo, i vari elementi: parte bulk, acqua ed aria. Distinguendo a seconda del tipo di struttura dei pori e sfruttando un'analogia con le serie e parallelo di resistenze nei circuiti elettrici si riesce a fornire una formula analitica per λ .

Nel caso preso in esame è necessario considerare che i campioni non presentano strutture eccessivamente complesse tali da richiedere modelli elaborati. Inoltre i risultati forniti dal modello più semplice, basato su medie ponderali, risultano sufficientemente accurati per gli scopi di questa tesi, la quale si propone di verificare la fattibilità del metodo sperimentale. Stabilita una procedura, resta sempre possibile, in prospettiva futura, affinare il modello delle proprietà termofisiche per migliorare la precisione.

Si propone la seguente formula per la stima della conducibilità termica:

$$\lambda(bulk) = \frac{\lambda(dry) - \lambda(air)\chi}{1 - \chi} \quad (2.9)$$

dove $\lambda(bulk)$ indica la conducibilità termica del mattone privo della porosità aperta.

$$\lambda(wet) = \lambda(bulk) \cdot (1 - \chi) + \lambda(air) \cdot (\chi - \Phi) + \lambda(water) \cdot \Phi \quad (2.10)$$

con significato dei termini analogo a 2.8 e $\lambda(water) = (0.63 \pm 0.01) \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\lambda(air, 25^\circ\text{C}) = (0.026 \pm 0.001) \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Nel corso di questo capitolo si è definito il concetto di effusività termica, sottolineandone la relazione con l'incremento di temperatura superficiale di un dato materiale. È stata evidenziata la relazione tra il valore di e ed il contenuto di umidità del materiale, proponendo un modello semplificato per la stima di λ , ρ e c_p . Il capitolo seguente si concentrerà su come, sfruttando la termografica infrarossa, sia possibile valutare la temperatura superficiale del campione in esame per stimare, basandosi sull'equazione 5.1, l'effusività e quindi il contenuto di umidità.

Capitolo 3

Termografia infrarossa

Come già accennato, la termografia è un metodo di misura senza contatto che, per mezzo di una termocamera, consente di valutare la quantità di radiazione infrarossa emessa da un corpo e correlare tale valore alla temperatura della superficie dello stesso.

È possibile effettuare una prima distinzione fra termografia attiva e passiva. Nel primo caso l'oggetto viene sollecitato tramite una fonte di calore per poi registrarne la variazione di temperatura nel tempo. Nel secondo caso il corpo viene valutato in condizioni stazionarie o non controllate. [12] Come già anticipato, le procedure sperimentali proposte in questa tesi si servono della termografia attiva.

3.1 Termocamera e immagini termiche

Soffermiamoci ora brevemente su principi fisici e il funzionamento tecnico della termocamera.

Il funzionamento della termocamera è basato sull'irraggiamento termico. Tutti i corpi emettono naturalmente radiazione elettromagnetica come conseguenza della loro agitazione termica. La termocamera, settata per operare in un certo range di lunghezze d'onda (ad esempio 8–14 μm), rileva tale radiazione e ne misura l'intensità. Restituisce quindi una stima della temperatura sfruttando la legge di Stefan-Boltzmann per un corpo radiante reale $W_r = \epsilon\sigma T^4$ dove W_r è l'intensità della radiazione, ϵ è l'emissività, σ la costante di Stefan-Boltzmann e T la temperatura. La stima viene affinata impostando dei parametri ottici e fisici di calibrazione. Il principale è l'emissività (ϵ) della superficie osservata, ovvero un valore adimensionale che rappresenta la frazione di energia irraggiata dal materiale in questione rispetto all'energia che irraggierebbe un corpo nero posto alla stessa temperatura. Un corpo nero possiede dunque ϵ pari a 1, mentre un oggetto reale ha $0 < \epsilon < 1$. Ai fini della



Figura 3.1: Setup sperimentale. Come si nota, la distanza tra termocamera e campione è ridotta e l'asse di vista è inclinato rispetto alla superficie del campione per evitare riflessioni dirette della fonte luminosa.

calibrazione della termocamera, l'emissività viene di norma approssimata ad una costante nel dominio di utilizzo dello strumento, anche se in realtà ϵ dipende da temperatura, lunghezza d'onda e caratteristiche ottiche superficiali.

La radiazione totale di un corpo osservato (W_{tot}) è, in realtà, somma di tre contributi: W_ϵ radiazione emessa, W_ρ radiazione riflessa e W_τ radiazione trasmessa. È dunque possibile definire la frazione di radiazione emessa, riflessa e trasmessa normalizzando sulla radiazione totale: $\epsilon = W_\epsilon/W_{tot}$, $\rho = W_\rho/W_{tot}$ e $\tau = W_\tau/W_{tot}$. Sussiste la relazione, dove ϵ prende il nome di emissività:

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3.1)$$

Poiché la maggior parte dei solidi, inclusi i materiali oggetto di questo studio, sono opachi cioè non trasmettono l'energia termica che incide su di essi, poniamo $\tau = 0$. In questi casi la componente di radiazione riflessa è complemento a 1 di quella emessa ($\rho = 1 - \epsilon$) e risulta poco influente per materiali cosiddetti "altoemissivi", ovvero con valori di ϵ molto prossimi a 1. Tipicamente i materiali da costruzione come cementi, laterizi in terracotta e intonaci hanno valori di emissività nell'ordine di 0.6-0.8. Per questo motivo le superfici da osservare vengono spesso preparate con l'applicazione di vernici altoemissive, così da rendere meno influente l'apporto dovuto alla radiazione riflessa.

Le rilevazioni termografiche sono inoltre soggette ad effetti di rumore dovuti all'ambiente circostante [13]. L'aria interposta tra la termocamera e l'oggetto può infatti assorbire parte della radiazione emessa da quest'ultimo. Inoltre essa stessa emette radiazione termica che può alterare la misurazione. In generale le termocamere sono settate per operare in un range di lunghezze d'onda nel quale τ_{air} è massimo, in modo da minimizzare l'assorbimento della radiazione. Vengono inoltre apportate, in modo automatico, delle correzioni, tenendo conto della distanza della termocamera dall'oggetto, della temperatura e dell'umidità dell'aria.

Apparato termografico utilizzato

| | | | |
|------------------------|--|---|---|
| Model | FLIR SC640 | Field of View (FOV) / minimum focus distance | 24° x 18° / 0.3 m |
| IR resolution | 640 x 480 pixels | Spatial resolution | 0.65 mrad for 24° lens |
| Spectral range | 7.5 - 13 μm | Thermal sensitivity | 30 mK at 30°C |
| Image frequency | Up to 120Hz by windowing | Accuracy | $\pm 2^\circ\text{C}$ or ± 2 percent of reading |
| Sensor type | Focal Plane Array (FPA) Uncooled microbolometer | Temperature range | -40°C to +1500°C |

Tabella 3.1: Si riportano in tabella le specifiche dell'apparato usato per le rilevazioni termografiche.

Le rilevazioni oggetto di questa tesi sono state effettuate a distanze ravvicinate ed in ambiente indoor (con temperatura ed umidità pressoché costanti nel tempo). Possiamo quindi trascurare anche le correzioni dovute all'aria.

3.2 Preparazione dei campioni

In primo luogo, per effettuare le misure in condizione *dry* è necessario essiccare i mattoni. Tale processo viene svolto ponendo i mattoni, dopo averli pesati ed aver registrato la misura, in un apposito forno, ventilato, ed impostato attorno ai 100 °C. Dopo alcune ore si estraggono i campioni per pesarli nuovamente e poi riposizionarli nel forno. Si procede in questo modo per più volte. Solo quando il peso dei mattoni si assesta attorno ad un preciso valore (con variazioni inferiori al grammo) si assumeranno i mattoni come *asciutti*.

A questo punto, al fine di legittimare le approssimazioni sopra elencate, è necessario uniformare l'emissività (ϵ) del campione in esame (S_i) e del materiale di riferimento. Si vuole inoltre massimizzare l'emissività portandola, in approssimazione, al valore di 1. Pertanto è stata scelta un'opportuna vernice (smalto acrilico spray grafite 3721, della marca Arexons) con la quale è stata dipinta una delle due facce di maggiore estensione, sia per i mattoni in esame (S_i) sia della pietra Serena.

Una volta effettuate tutte le misurazioni in condizione *dry* è necessario bagnare i mattoni $S1$ ed $S2$ al fine di procedere con le rilevazioni del contenuto di umidità. In primo luogo si portano i mattoni a completa saturazione, la metodologia migliore consiste nel porre i campioni in una campana connessa ad una pompa da vuoto che azionata estrae l'aria dalla porosità aperta e consente un completo riempimento d'acqua della stessa.

Una procedura alternativa, qualora non si disponesse di una campana sufficientemente capiente, consiste nell'immergere i mattoni in acqua per una giornata, ruotandoli periodicamente. Infine, per effettuare le misurazioni con la termocamera ed evitare di ottenere risultati falsati, è fondamentale inibire l'evaporazione superficiale. A tale scopo è stata utilizzata una pellicola di plastica trasparente anche alla radiazione infrarossa rilevabile tramite la termocamera. I mattoni sono stati completamente avvolti da un unico strato di tale pellicola. Si è prestata attenzione a far aderire il più possibile la stessa alla faccia del campione utilizzata ai fini della rilevazione, per evitare la formazione di bolle d'aria. Infine si è utilizzata la vernice sopraccitata per dipingere l'esterno della pellicola relativa alla faccia in esame. Per ottenere diversi livelli di umidità si è innanzitutto portato il campione a saturazione, effettuata la misura di emissività, è stata rimossa la pellicola sul retro del campione per permettere a parte dell'acqua di evaporare. Per i livelli più bassi di umidità si è provveduto ad asciugare i campioni in forno a bassa temperatura (circa 50 °C).



Figura 3.2: Immagine dei due mattoni oggetto di analisi ($S1$ e $S2$) e della pietra Serena, subito dopo essere stati dipinti.



Figura 3.3: Si mostra il campione $S2$ dopo essere stato avvolto nella pellicola, successivamente dipinta.

Capitolo 4

Tecniche sperimentali

In questo capitolo saranno presentate le tecniche utilizzate in laboratorio per la stima dell'effusività termica dei vari campioni presi in esame. Si è valutato come tale proprietà sia correlata al contenuto di umidità, pertanto sarà possibile fornire una stima del contenuto d'acqua dei vari mattoni. Saranno inoltre presentate delle metodologie alternative (non basate sulla IRT) per il calcolo della stessa al fine di validare i risultati ottenuti.

4.1 Misura delle proprietà termofisiche

In primo luogo è necessario indagare il valore di conducibilità termica, densità di massa e calore specifico a pressione costante. Ciò è necessario principalmente per due motivi:

- fornire una stima per l'effusività del campione di riferimento necessario per effettuare le misure comparative tramite la termocamera (come già accennato nel paragrafo 2.1.1).
- validare i risultati ottenuti tramite la tecnica comparativa basata sull'IRT.

4.1.1 Conducibilità termica

La misura della conducibilità termica del materiale è stata effettuata secondo la norma ISO 22007-2 (“Transient plane source method”) mediante lo strumento “Hot Disk TPS 2500S”. Il test avviene inserendo tra due campioni di materiale il sensore hot disk, il quale è costituito da una lamella metallica sulla quale è incisa una doppia spirale, a sua volta ricoperta su entrambi i lati da uno strato di materiale elettricamente isolante, nella fattispecie kapton. Il sensore hot disk provvede a fornire uno stimolo termico di potenza e durata definite al campione e a misurare il successivo incremento di temperatura che dipende dalle proprietà termofisiche del materiale analizzato. Registrando la risposta della temperatura rispetto al tempo, è possibile calcolare la conducibilità termica. Si riporta la media e relativa deviazione standard per i vari campioni:

| Conducibilità termica | | |
|-----------------------|---|--|
| Campione | λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) | σ_λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| λ_{S1} | 0.559 | 0.004 |
| λ_{S2} | - | - |
| λ_{Serena} | 2.36 | 0.02 |

Tabella 4.1: In tabella la conducibilità termica per il mattone dell'Arsenale ($S1$) e per la pietra Serena. Le misure sono state effettuate in condizioni di temperatura ambiente variabile in un range compreso tra 25 e 30 °C. Non è stata valutata la conducibilità termica di $S2$.

4.1.2 Densità di massa

Ci si propone di misurare la densità dei vari campioni in assenza di umidità. Essiccati i campioni, si pesa ripetutamente ciascun mattone, al fine di ottenere un valor medio per la sua massa e una relativa incertezza (m, σ_m). Poiché la forma del mattone è in buona approssimazione parallelepipeda, per calcolarne il volume si misurano i lati, a mezzo di un calibro. Si fornisce una stima del volume con relativa incertezza (V, σ_V). Il valore della densità segue immediatamente da $\rho = m/V$, si effettua opportuna propagazione dell'errore per il calcolo dell'incertezza.

| Densità | | |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Campione | ρ (g/cm ³) | σ_ρ (g/cm ³) |
| ρ_{S1} | 1.470 | 0.013 |
| ρ_{S2} | 1.680 | 0.014 |
| ρ_{Serena} | 2.480 | 0.010 |

Tabella 4.2: In tabella le densità misurate per ciascun mattone ($S1$ mattone arsenale, $S2$ mattone moderno) e per la pietra Serena.

Si sottolinea come il valore di incertezza ottenuto sia da imputare principalmente alla misura di volume. Essa infatti per la metodologia con la quale è stata effettuata non può essere particolarmente precisa. D'altro canto, misure migliori di volume effettuabili immergendo l'oggetto in un fluido non sono in questo caso praticabili, essendo il materiale poroso.

4.1.3 Calore specifico

Per la misura del calore specifico a pressione costante viene utilizzato un calorimetro *DSC* (Differential Scanning Calorimetry) prodotto dall'azienda *KEP technologies*. Tale strumento è in grado di valutare la differenza di calore che è necessario fornire al campione in esame ed ad uno di riferimento noto per portarli alla stessa temperatura. Per poter procedere alla rilevazione di c_p è necessario produrre della polvere da inserire nella camera di misurazione. Per tale motivo, a mezzo di una lima, parte di ciascun campione è stata frantumata. È stato effettuato uno scan in temperatura in un range tra 25 e 35 °C con un passo di 0.001 °C. Di seguito si forniscono i risultati. Al valor medio si è scelto di associare la semi-dispersione massima, portata ad incertezza statistica tramite una distribuzione uniforme. Se su un singolo campione vengono svolte più prove, si fornisce una stima finale data dalla media dei c_p ottenuti in ciascuna prova.

| Calore specifico | | |
|------------------|---|--|
| Campione | c_p (Jg ⁻¹ K ⁻¹) | σ_{c_p} (Jg ⁻¹ K ⁻¹) |
| $c_{p,S1}$ | 0.797 | 0.006 |
| $c_{p,S2}$ | 0.796 | 0.002 |
| $c_{p,Serena}$ | 0.818 | 0.002 |

Tabella 4.3: In tabella i calori specifici a pressione costante misurati per ciascun mattone ($S1$ mattone arsenale, $S2$ mattone moderno) e per la pietra Serena.

Per quanto riguarda i mattoni ($S1$ e $S2$), essendo essi costituiti da una struttura porosa, è lecito interrogarsi su quanto la misura appena presentata sia rappresentativa del campione iniziale (la misurazione viene infatti eseguita sul campione frantumato). Si può distinguere tra due approcci differenti: in un primo caso si associa il c_p misurato dal calorimetro ($c_p(cal)$ in seguito) al valore

di $c_p(dry)$. Risulta però altrettanto coerente associare tale valore alla sola parte bulk del mattone $c_p(bulk)$. In quest'ultimo caso è possibile ricondursi a $c_p(dry)$ invertendo la relazione 2.7 (essendo χ la porosità aperta valutata in 4.6). Entrambi gli approcci risultano validi e fondati. Si è dunque scelto di utilizzare nel corso del lavoro qui presentato il valore di $c_p(dry)$ dato dalla media dei due sopracitati a cui è stata associata, come valore di incertezza, la dispersione massima normalizzata con distribuzione uniforme. Di seguito i valori numerici:

| Calore specifico | | |
|------------------|---|--|
| Campione | c_p ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$) | σ_{c_p} ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| $c_{p,S1}$ | 0.830 | 0.02 |
| $c_{p,S2}$ | 0.830 | 0.02 |

Tabella 4.4: Si presentano i valori di $c_p(dry)$ per i mattoni $S1$ e $S2$ ottenuti come media tra le due metodologie sopra descritte.

4.1.4 Effusività

Noti i valori di conducibilità, densità e calore specifico, in accordo con la relazione 2.1, in condizione *dry*, si può fornire una stima dell'effusività per ciascun materiale:

| Effusività <i>dry</i> | | |
|-----------------------|--|---|
| Campione | e ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$) | σ_e ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$) |
| e_{S1} | 830 | 11 |
| e_{S2} | - | - |
| e_{Serena} | 2190 | 11 |

Tabella 4.5: In tabella le stime di effusività per il mattone dell'arsenale ($S1$) e per la pietra Serena.

4.2 Setup e procedura di misura

In laboratorio sono state effettuate le seguenti operazioni al fine di valutare il valore dell'effusività termica dei vari mattoni tramite la termografia infrarossa.

4.2.1 Setup

In primo luogo è necessario stabilire un setup standard da mantenere nel corso di tutte le misurazioni. Come detto è possibile ricavare una stima di e per comparazione con un campione di effusività nota (cfr. 2.1.1), per svolgere tale operazione si devono sottoporre i campioni (quello ignoto ed il riferimento) alla stessa intensità di radiazione. L'impulso termico che in questo caso viene ottenuto mediante un faro proiettore, deve quindi essere uniforme su tutta la superficie dei campioni. Si è scelto di utilizzare un singolo proiettore di potenza nominale pari a 1 kW, chiaramente questo tipo di sorgente non può generare una distribuzione perfettamente uniforme sul campione essendo essa localizzata in uno specifico punto e posta ad una distanza limitata dalla superficie in esame. Per ridurre il più possibile tale disomogeneità si posiziona la lampada perpendicolarmente alla superficie dei mattoni e, tramite le apposite alette, si focalizza la radiazione su di essi. La disomogeneità sarà inoltre trattata in modo più specifico nel corso dell'analisi dati.

I mattoni sono stati posizionati su di un banco da lavoro, sopra il quale è presente (come visibile nell'immagine 3.1) una struttura di ferro alla quale fissare la lampada. La termocamera viene posizionata in modo tale da ottenere un punto di vista ottimale, ovvero con un'angolazione rispetto alla verticale tale da evitare effetti di riflessione significativi, in quanto si assume che la superficie in esame abbia emissività pari ad 1 (sono pertanto valide le approssimazioni presentate nella sezione 3.1). La distanza tra la termocamera e i campioni è stata determinata in maniera tale da sfruttare la risoluzione dell'immagine termica (640x480 pixel) rispetto al campo di vista inquadrato.

Infine si deve prestare attenzione a ridurre il più possibile gli effetti termici di bordo. Le equazioni utilizzate per il calcolo dell'effusività sono infatti valide solo nel caso di corpo semi-infinito. Chiaramente ciò non è realizzabile in laboratorio, è allora necessario scegliere accuratamente i campioni, affinché siano sufficientemente spessi (qualche centimetro) e posizionare il mattone di effusività ignota ed il riferimento alla stessa altezza, centrati sotto al fascio di luce. Ciò dovrebbe impedire ai raggi di colpire i lati dei mattoni, cosa che potrebbe alterare i dati rilevati facendoli discostare dal modello teorico.

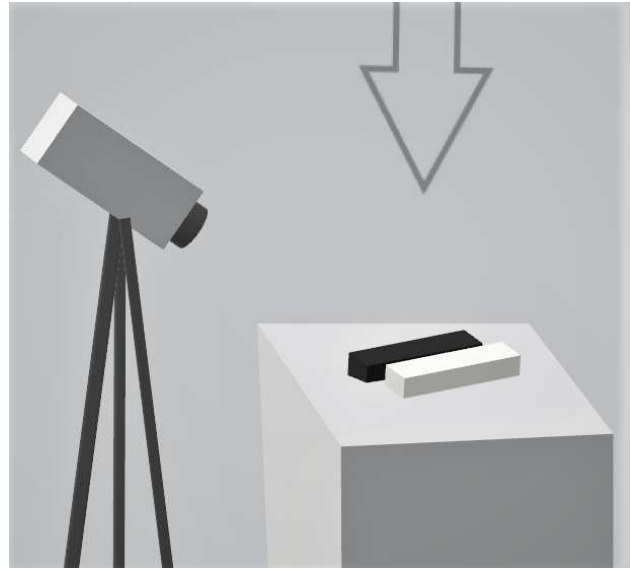


Figura 4.1: Si mostra, in modo schematico, il setup predisposto in laboratorio. La freccia indica la posizione del proiettore.

4.2.2 Procedura di misura

Una volta individuato e preparato il campione ignoto del quale si vuole valutare l'effusività, predisposto il setup, si può procedere con la misurazione.

Dopo aver acceso la termocamera è necessario accedere alle sue impostazioni di ripresa. Si vuole impostare lo strumento affinché rilevi una sequenza di 180 immagini con una frequenza di scatto f stabilita ($f = 5$ Hz). Per individuare questo valore sono state effettuate diverse prove tenendo in considerazione i seguenti fattori: in primo luogo è necessario che la durata totale della ripresa non sia eccessiva, ciò infatti comporterebbe un maggiore influsso degli effetti di bordo nella misura, eventualità da evitare per mantenersi nell'ambito di una rilevazione in condizioni ideali. D'altro canto un tempo troppo breve non consentirebbe una rilevazione precisa del flusso di calore.

Si predispose uno schermo che permetta di ricreare un impulso luminoso a gradino (θ di Heaviside). Il proiettore necessita infatti di alcuni secondi, dopo la sua accensione, per raggiungere una potenza costante, in questo transiente è necessario schermare i campioni. Si procede quindi come di seguito. I campioni vengono coperti utilizzando uno schermo di polistirolo che, in quanto isolante, inibisce il passaggio di calore, e la lampada viene accesa. Si attende circa mezzo minuto, una volta raggiunta la messa a regime della lampada ad una potenza emessa costante si avvia la sequenza di immagini rilevate dalla termocamera. Successivamente si rimuove molto rapidamente lo schermo per simulare il più possibile l'impulso a $\theta(t)$. Quindi ci si allontana per non interferire

con la rilevazione della termocamera. Terminata la sequenza di immagini, si spegne la lampada e si esportano i dati acquisiti su computer per procedere con la stima di effusività.

4.2.3 Misura della porosità

La porosità aperta (χ) è una ulteriore proprietà del materiale di cui è necessario fornire una stima per poter applicare il modello matematico descritto nella sezione 2.1.2. L'aggettivo aperta fa riferimento al fatto che la stima proposta è relativa solamente al volume dei pori che possono essere riempiti da un liquido esterno al mattone. In altre parole si definisce porosità aperta l'insieme di pori in diretta comunicazione con l'ambiente circostante il mattone. Si può fornire una sua stima immergendo il mattone asciutto (dopo averne valutato il peso) in una campana a vuoto colma di acqua demineralizzata. Aumentando progressivamente il grado di vuoto, l'aria contenuta nei pori "aperti" viene sostituita dall'acqua. Dopo alcuni minuti, quando non sono più visibili bolle sulla superficie del mattone, si estrae il campione e lo si pesa. La differenza in massa fra il peso *wet* e *dry* sarà data dall'acqua che ha occupato i pori. Dividendo per la densità si ottiene il volume dei pori. La percentuale di porosità aperta si ricava dividendo tale volume per quello del mattone.

Nel nostro caso, la campana a vuoto a disposizione non era delle dimensioni adatte all'intero mattone, ragion per cui, utilizzando un mattone della stessa tipologia, ne è stata prelevata una porzione di spessore 1.5 cm circa, alla quale è stata applicata la procedura appena descritta.

Alternativamente è possibile immergere l'intero mattone in acqua per diverse ore, ruotandolo più volte per favorire la completa saturazione. Con le due metodologie si ottengono risultati confrontabili entro il 10%. Utilizzando tale valore come errore massimo (si applica una distribuzione uniforme per la conversione in incertezza statistica) vengono fornite le seguenti stime:

| Porosità | | |
|-------------|------------|-------------------|
| Campione | χ (%) | σ_χ (%) |
| χ_{S1} | 34 | 1 |
| χ_{S2} | 32 | 1 |

Tabella 4.6: Si riportano le porosità per i due mattoni oggetto d'analisi. I valori misurati sono in accordo con i tipici valori di porosità riportati in letteratura.

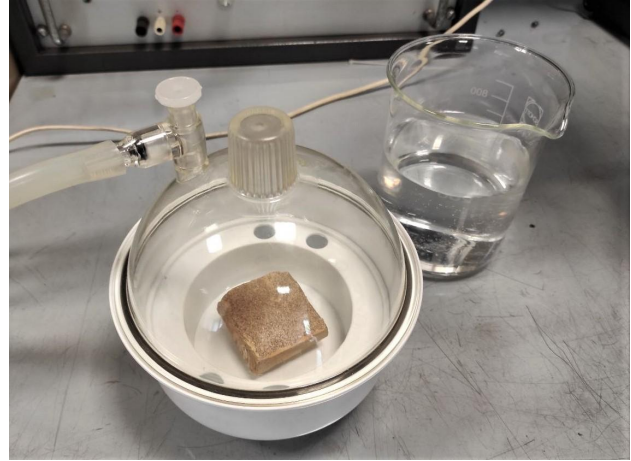


Figura 4.2: Immagine del campione immerso in acqua nella campana a vuoto.

Capitolo 5

Analisi dati

In questo capitolo saranno illustrati ed analizzati i dati raccolti in laboratorio. In primo luogo verrà fornita una stima dell'effusività per ciascun campione, tramite il metodo termografico-comparativo già illustrato. In un secondo momento, sfruttando il modello matematico descritto nella sezione 2.1.2 sarà valutato il contenuto di umidità di ciascun campione.

5.1 Effusività

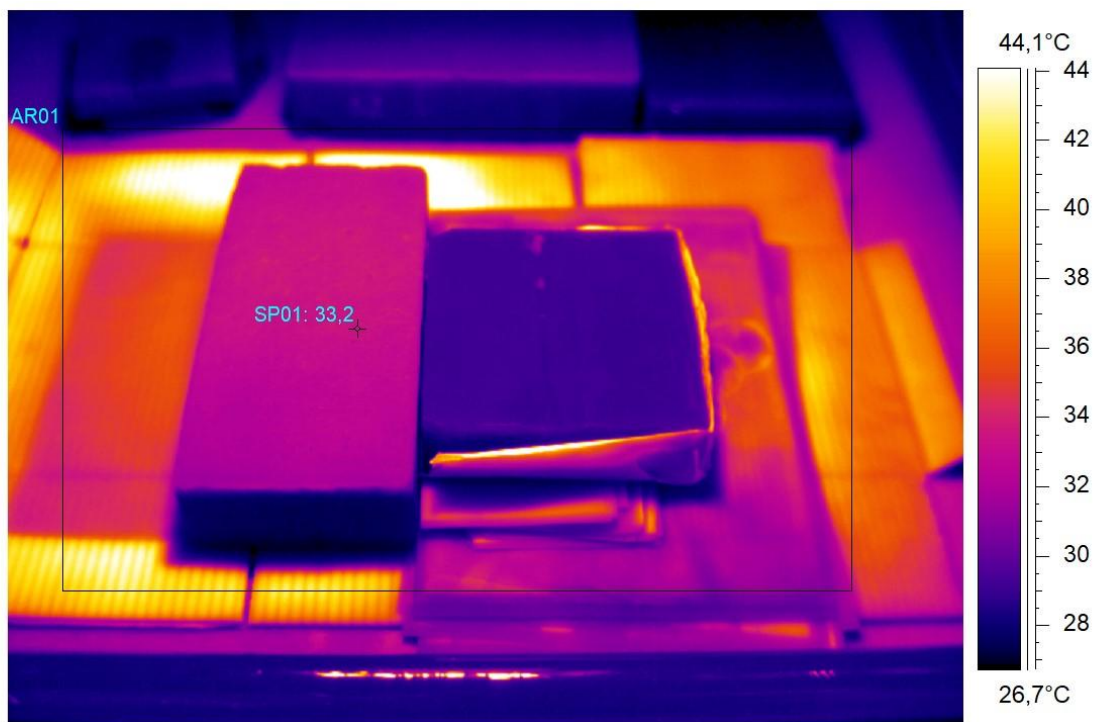


Figura 5.1: Viene visualizzato un frame della sequenza relativa al mattone *S1* in condizione *dry*. A destra il blocco di pietra Serena utilizzato come riferimento, a sinistra il mattone in esame. Il supporto su cui poggiano è un cartone che presenta aree a diverso grado di emissività. Per tale ragione nell'immagine termica si evidenziano zone di colori differenti.

Allestito il setup ed effettuata la misura si ottiene un filmato contenente una sequenza di 180 immagini (acquisite con una frequenza di 5 Hz). Grazie a “ThermaCAM Researcher Pro 2.10”, un apposito programma in grado di leggere i dati forniti dalla termocamera, è possibile visualizzare la sequenza ed effettuare una serie di azioni tra le quali, ad esempio, modificare la scala di colori con la quale vengono visualizzate le diverse temperature. Si procede ora ad esportare i singoli frame in formato Matlab per proseguire con l’analisi.

Il dato di output del test è quindi una sequenza di termogrammi, ovvero una matrice tridimensionale $a \cdot b \cdot n$ (immagine a lato 5.2) dove a e b rappresentano la dimensione in pixel del sensore (640x480), mentre n è il numero di immagini (180) acquisite a frequenza costante. Il profilo di temperatura nel tempo dell’ i -esimo pixel, situato nelle coordinate x,y , è il valore del pixel lungo le n immagini. Tale matrice viene costruita utilizzando un programma in linguaggio Matlab a partire dai singoli termogrammi. Si mostra, a lato, uno schema intuitivo.

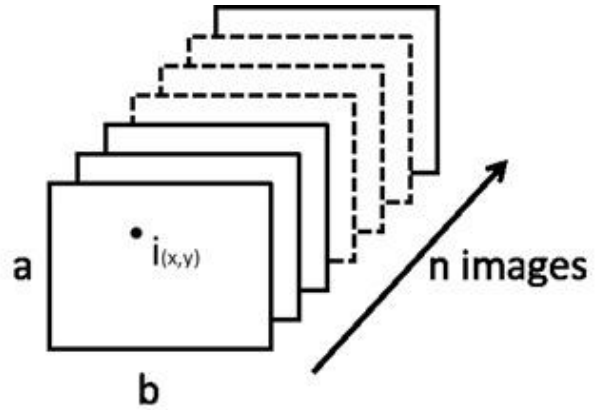


Figura 5.2: Schema dell’output fornito dal programma in Matlab.

Un frame è visibile nell’immagine 5.1. Si può notare come, al fine di minimizzare gli effetti di bordo i due campioni siano posti con un lato in contatto, al centro del cono di luce ed alla stessa altezza (è questo lo scopo degli spessori in carta visibili sotto il campione di pietra Serena).

La matrice ottenuta deve ora essere processata al fine di fornire una stima dell’aumento di temperatura in funzione del tempo per ciascun campione. In primo luogo è necessario individuare il frame al quale lo schermo viene rimosso. La procedura di misura prevede infatti che prima si azioni la sequenza e solo in seguito si rimuova lo schermo di polistirolo. Tale operazione viene svolta sfogliando i vari frame ed individuando quello desiderato.

Tramite un programma in Matlab viene letta la matrice di dati, a partire dal frame corretto. A questo punto il programma sottopone all’utente un generico frame successivo a quello iniziale. L’utente deve individuare un’area dell’immagine nella quale il programma calcolerà la temperatura media e la deviazione standard per tutti gli elementi della successione. Si presenta di fianco un esempio.

Nel selezionare manualmente l’area di calcolo è necessario mantenersi distanti dai bordi e valutare eventuali disomogeneità dell’immagine termica per evitare distorsioni. La selezione deve essere fatta due volte: una per ciascun campione. A questo punto per ciascuna immagine viene calcolata la temperatura media (T) all’interno dell’area individuata, inoltre, nota la frequenza di acquisizione ($f = 5$ Hz), si associa a ciascuna di esse un valore temporale, ponendo

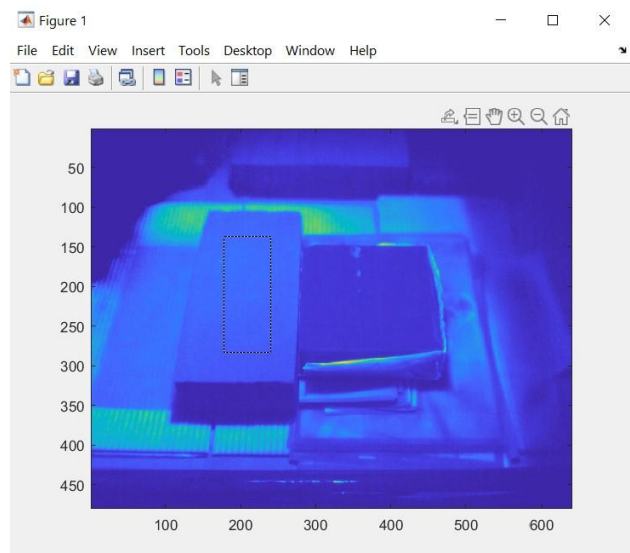


Figura 5.3: Singolo termogramma della sequenza relativa al mattone $S1$ in condizione *dry*. Risulta apprezzabile l’area selezionata al fine del calcolo della temperatura media.

la prima immagine a $t = 0$ s.

Si sottolinea che per le misurazioni in condizione *wet* i campioni sono stati avvolti in una pellicola di materiale plastico per impedire l'evaporazione (come descritto nel paragrafo dedicato alla preparazione dei campioni). Nei punti in cui la pellicola non si trova a perfetto contatto con la superficie del mattone sottostante e permangono tra questo e la plastica delle sacche d'aria, si notano delle anomalie nell'immagine termica. Si riporta un esempio a lato.

Questa anomalia termica rappresentata dalle zone in giallo è legata alle proprietà termofisiche dell'aria, molto diverse rispetto al mattone. La pellicola si scalda quindi più rapidamente nei punti in cui sono presenti queste bolle.

È fondamentale, per effettuare una stima affidabile, cercare di non includere tali regioni all'interno della superficie utilizzata per il calcolo della temperatura media.

Si è inoltre notato che, proseguendo con l'asciugatura del mattone per effettuare misure a diversi valori di Φ , la pellicola, per percentuali di umidità contenute tende a staccarsi più facilmente dalla superficie del mattone. Pertanto, per le misure a bassi valori di Φ , si è provveduto a rimuoverla. Lo scopo principale della plastica è evitare l'evaporazione dell'acqua che, raffreddando la superficie del mattone, altererebbe la lettura termografica. A valori di Φ contenuti però tale rischio è limitato.

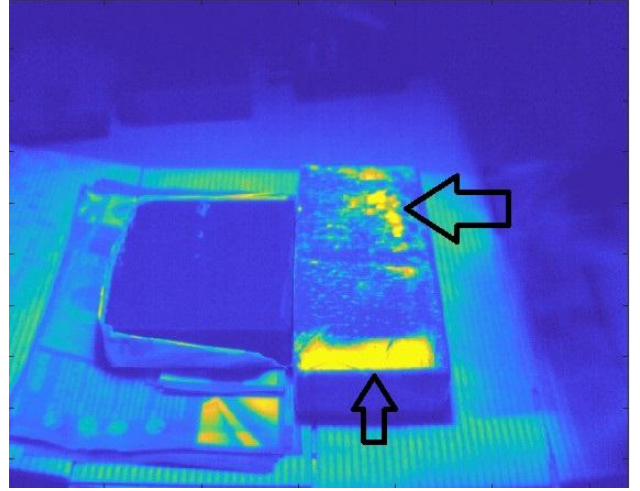


Figura 5.4: Si possono notare, sul campione *S1* delle zone gialle (che nell'immagine a falsi colori sono associate a temperature apparenti più alte rispetto a quelle blu circostanti), indicate con delle frecce, corrispondenti a sacche d'aria.

Effettuando un plot della temperatura media (sulle ordinate) in funzione della radice quadrata del tempo (ascisse), si attende una linea retta (cfr. 2.2). Si può dunque effettuare una regressione lineare al fine di stimare la pendenza della retta. Si mostra di seguito, a titolo di esempio, il plot dei valori sperimentali ottenuti per il campione *S1* in condizione *dry* e della pietra Serena. Vengono sovrapposte anche le rette interpolanti.

Dalle slope delle rette, nota l'effusività della pietra Serena, è possibile stimare l'effusività del mattone:

$$e_i = e_{rif} \frac{m_{rif}}{m_i} \quad (5.1)$$

dove m_{rif} è la slope della retta relativa alla pietra Serena, mentre m_i quella della retta legata al campione in esame.

Come illustrato nel paragrafo relativo al setup (rif. 4.2.1) si è utilizzato un unico proiettore allo scopo di uniformare il più possibile la radiazione assorbita dai due campioni. Per ridurre ulteriormente le disomogeneità, per ogni test sono state eseguite due misure scambiando la posizione reciproca del mattone e del riferimento. Si sono così ottenute due stime di effusività per ciascun test (e_i , $e_{i,sc.}$) con le quali è stata prodotta una stima finale tramite media geometrica. Schematicamente per il campione i – *esimo*:

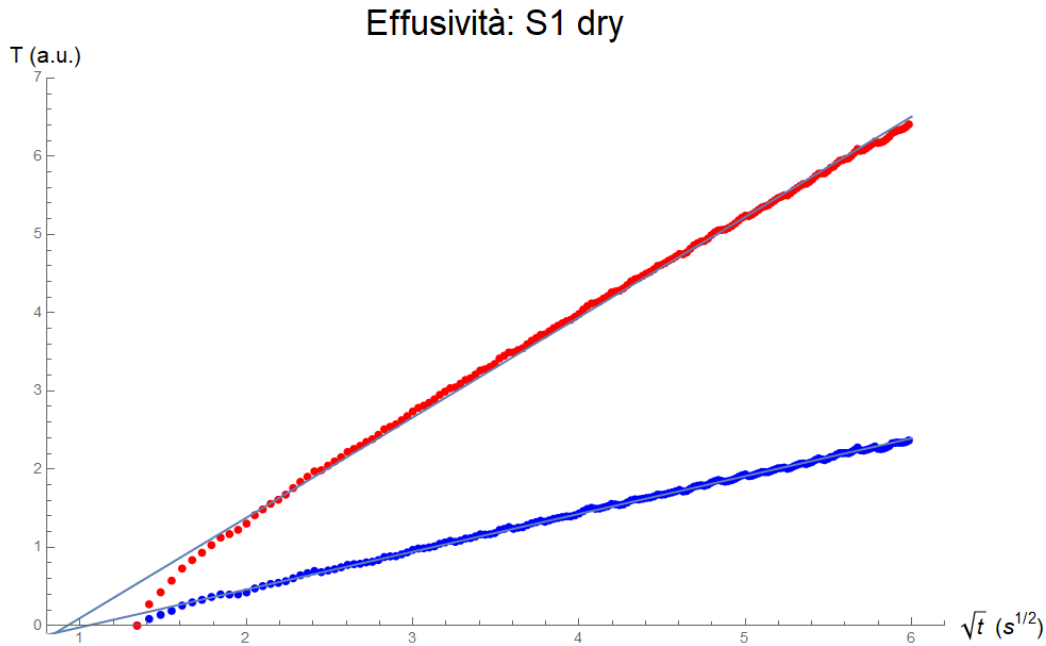


Figura 5.5: Nel grafico si mostrano in blu i punti sperimentali relativi alla pietra Serena mentre in rosso quelli relativi al campione *S1* in condizione *dry*. Sono state sovrapposte le rette interpolanti. Le barre di errore non risultano apprezzabili.

$$\text{dati sperimentali} \rightarrow (e_i, \sigma_{e_i}) \xrightarrow{\text{scambio}} (e_{i,sc.}, \sigma_{e_{i,sc.}}) \xrightarrow[\text{geometrica}]{\text{media}} (e_{tot}, \sigma_{e_{tot}}) \quad (5.2)$$

Tramite questa procedura sono stati ottenuti i valori di effusività per i mattoni *S1* e *S2* in condizione *dry* e in diverse condizioni *wet*. I valori ricavati sono riportati in tabella:

| Effusività IRT <i>S1</i> | | Effusività IRT <i>S2</i> | |
|--------------------------|---|--------------------------|---|
| Campione | $e \pm \sigma_e$ ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$) | Campione | $e \pm \sigma_e$ ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$) |
| e^{dry} | 853 ± 2 | e^{dry} | 926 ± 4 |
| e_1^{wet} | 1630 ± 30 | e_1^{wet} | 1834 ± 9 |
| e_2^{wet} | 1540 ± 20 | e_2^{wet} | 1670 ± 10 |
| e_3^{wet} | 1450 ± 20 | e_3^{wet} | 1498 ± 7 |
| e_4^{wet} | 1330 ± 20 | e_4^{wet} | 1396 ± 5 |
| e_5^{wet} | 1320 ± 20 | $e_4^{wet,back}$ | 1270 ± 5 |
| e_6^{wet} | 1307 ± 5 | | |

Tabella 5.1: Nella prima tabella si presentano i valori di effusività per il campione *S1*, nella seconda per il campione *S2*.

Per ciascun campione è stata valutata l'effusività in condizione asciutta. Il campione è stato poi portato a saturazione (*wet*, 1) e progressivamente asciugato valutando di volta in volta l'effusività. Si può notare che gli errori relativi per il campione *S1* sono maggiori rispetto al campione *S2* ciò è da ricondurre ad una peggiore adesione della pellicola alla superficie del mattone, e dunque alla necessità di selezionare una regione in cui valutare la temperatura media di dimensione inferiore. Il valore $e_4^{wet,back}$ si riferisce ad una misura effettuata sulla faccia posteriore del campione *S2* a

circa la stessa concentrazione d'acqua della misura e_4^{wet} . Tali dati saranno utilizzati in seguito per mostrare l'esistenza di un gradiente di umidità.

Nella sezione 4.1 si è discussa la misura delle proprietà termofisiche e, partendo da queste, si è fornita una stima di e_{S1} in condizione *dry*. Tale valore si presta dunque ad un confronto con quello ricavato, in modo indipendente, con il metodo termografico.

$$e_{S1}^{TF} = (830 \pm 11) \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{Ks}^{1/2}} \quad e_{S1}^{IRT} = (853 \pm 2) \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{Ks}^{1/2}} \quad (5.3)$$

il primo valore è inerente alla stima fornita nel paragrafo 4.5, il secondo si riferisce al metodo termografico.

I valori si discostano di circa il 3%, risultato che risulta soddisfacente in relazione agli obiettivi prefissati, ovvero valutare la fattibilità di un approccio non invasivo ed innovativo incentrato sulla variazione delle proprietà termofisiche legata alla presenza di acqua, superando quindi il comune approccio qualitativo basato sulla sola valutazione del fenomeno evaporativo.

5.2 Umidità

A partire dai valori di effusività ricavati nella sezione precedente è possibile stimare il contenuto di acqua dei mattoni sfruttando i modelli per λ , ρ e c_p descritti nella sezione 2.1.2. Per tale scopo è stato predisposto un programma in Matlab. Viene prodotto un vettore di valori di e variando progressivamente la percentuale di umidità Φ contenuta nel mattone in esame (il passo della variazione è impostato a 0.01%), il programma effettua quindi un confronto tra il valore di e ottenuto tramite il metodo termografico e la stringa di dati prodotta. Individuati i valori più simili restituisce, a ritroso, la relativa percentuale Φ . Si ottiene così una stima del contenuto di acqua. Poiché la stima di Φ segue dal calcolo di e variando le percentuali di aria e acqua, è stato calcolato l'errore relativo sull'effusività (a partire dalla deviazione standard ottenuta per propagazione dell'errore su λ , ρ e c_p calcolati come da modello presentato). Si è poi provveduto ad associare lo stesso errore relativo anche alla stima di umidità.

Per poter verificare la validità del metodo messo a punto, i mattoni sono stati pesati immediatamente prima dell'esecuzione della rilevazione termografica. In questo modo, conoscendo il peso *dry* ed il peso della pellicola è possibile ricavare la massa di acqua effettivamente contenuta e quindi la percentuale di umidità $\Phi_{grav} = m_{H_2O}/(\rho_{H_2O}V_{S_i})$ (metodo gravimetrico). È dunque possibile un confronto tra tale valore e quello calcolato con il metodo termografico.

| Confronto umidità S1 | | | Confronto umidità S2 | | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|
| Campione | %IRT | %grav | Campione | %IRT | %grav |
| e_1^{wet} | 33.9 ± 0.3 | 36.1 ± 0.3 | e_1^{wet} | 35.6 ± 0.4 | 32.2 ± 0.3 |
| e_2^{wet} | 29.8 ± 0.3 | 27.9 ± 0.2 | e_2^{wet} | 29.2 ± 0.3 | 26.4 ± 0.2 |
| e_3^{wet} | 26.4 ± 0.3 | 23.0 ± 0.2 | e_3^{wet} | 22.5 ± 0.3 | 19.3 ± 0.2 |
| e_4^{wet} | 20.9 ± 0.2 | 19.0 ± 0.2 | e_4^{wet} | 18.4 ± 0.2 | 12.6 ± 0.1 |
| e_5^{wet} | 20.7 ± 0.2 | 15.8 ± 0.1 | $e_4^{wet,back}$ | 13.4 ± 0.2 | 13.3 ± 0.1 |
| e_6^{wet} | 20.0 ± 0.2 | 15.6 ± 0.1 | | | |

Tabella 5.2: Nella prima tabella si presentano i valori di umidità per il campione S1, nella seconda per il campione S2. Sono riportati i risultati ottenuti con il metodo termografico (*IRT*) e gravimetrico (*grav*).

Le misurazioni sono state fatte in un range di umidità che va dalla completa saturazione, circa 30/35 %, fino al 15/20 %. Scendere al di sotto di tali valori si è rivelato complesso, soprattutto a

causa del consistente gradiente di umidità che si genera tra varie zone, che rende il campione non omogeneo. Tale fenomeno si può apprezzare osservando i valori di e_4^{wet} e $e_4^{wet,back}$ riportati nella tabella di cui sopra relativa al campione *S2*. Considerando invariato il contenuto di acqua misurato a mezzo della tecnica gravimetrica, la percentuale di umidità restituita dal metodo termografico differisce significativamente a seconda che la valutazione venga fatta sulla faccia anteriore o posteriore. Pertanto si evidenzia l'esistenza di un gradiente di umidità. Tale fenomeno si spiega ricordando che, per favorire la progressiva asciugatura del mattone, viene aperta la pellicola nella parte posteriore dello stesso. Pertanto si assiste ad una maggiore evaporazione sulla faccia posteriore rispetto a quella anteriore. Alla luce dell'esistenza di tale gradiente è possibile interpretare i valori e_4^{wet} , e_5^{wet} , e_6^{wet} per il mattone *S1*: il metodo termografico restituisce, per tutte e tre le concentrazioni valori di Φ simili, mentre la misura gravimetrica mostra una variazione di circa 5 punti percentuali (in termini assoluti). La misura termografica è stata effettuata in tutti e tre i casi sulla faccia anteriore che, per quanto detto, si suppone presentare una concentrazione di acqua superiore. Pertanto è plausibile che tali misurazioni siano state viziate dalla presenza di un gradiente di umidità.

Nel complesso i risultati soddisfano gli scopi di questa tesi. Le misure effettuate mostrano come, la rilevazione tramite tecnica *IRT* sia in grado di stimare quantitativamente il reale contenuto di umidità, nonostante il modello matematico utilizzato per la descrizione delle grandezze termofisiche in gioco sia molto semplificato. Inoltre, come già evidenziato, è necessario tenere in considerazione l'esistenza di gradienti di umidità che possono in parte giustificare il disaccordo fra il metodo termografico e gravimetrico.

5.3 Diverse tecniche a confronto

La misurazione del contenuto di umidità tramite termografia risulta particolarmente vantaggiosa rispetto ad altre tecniche quantitative attualmente in uso. Di seguito, con riferimento a [6], si accenna ad un confronto tra le metodologie non distruttive più comuni per l'analisi dell'umidità superficiale.

IRT, EFD e NMR a confronto

| | IRT | EFD | NMR |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Fattibilità | Portatile, senza contatto, non invasiva | Portatile, misurazione a contatto, non invasiva | Portatile, misurazione a contatto, non invasiva |
| Tipologia di superficie | Ogni tipo di superficie, trattata come descritto e impermeabilizzata | Superfici piatte | Superfici piatte (area di indagine 20x50 mm ²) |
| Grandezze fisiche risultanti | Contenuto percentuale di acqua tramite valutazione comparativa dell'effusività | Contenuto percentuale di acqua e sali tramite la misura della costante dielettrica del mezzo | Misura diretta del contenuto di acqua, tramite la rilevazione puntuale del segnale NMR |
| Estensione e risoluzione | Superficie di estensione generica. La risoluzione geometrica, legata ai pixel presenti nel sensore, è inferiore ai 10 mm ² | Misura locale. Semisfera interessata dalla misura con volume di circa 20 mm ³ | Punti discreti. Superfici locali di rilevazione di 100 mm ² |
| Tempistiche | Pochi secondi per una misura globale | Pochi secondi per una misura locale | Circa 600 s per ogni punto |

Tabella 5.3: Si presenta un confronto tra 3 differenti tecniche per la rilevazione dell'umidità nelle murature. Oltre alla metodologia innovativa presentata in questa tesi (qui denominata IRT) si fa riferimento a due metodologie tradizionali: **EFD** (Evanescent Field Dielectrometry) che correla alla costante dielettrica del mezzo il contenuto di acqua e **NMR** portatile (Nuclear Magnetic Resonance).

Dal confronto emerge come la tecnica qui presentata poiché applicabile ad ampie superfici, istantanea e adatta ad ogni tipo di materiale comunemente utilizzato in edilizia storica, purché opportunamente preparato, sia particolarmente interessante e promettente. La misura del contenuto di umidità tramite termografia consente con un'unica sessione di acquisizioni una valutazione globale della parete oggetto di indagine e, allo stesso tempo, anche un'analisi di possibili gradienti o distribuzioni di umidità che possono essere riconducibili a pattern tipici legati all'origine dell'acqua presente, come risalita capillare, condensa superficiale o perdite da condotte. La ripetibilità della misura nel tempo permette di confrontare la situazione in diverse condizioni, ad esempio per apprezzare variazioni stagionali o altre ciclicità legate all'evoluzione temporale del contenuto di umidità, spesso causa primaria di degrado per effetto, ad esempio, di cicli di saturazione-asciugatura che determinano stress meccanici dovuti alla ripetuta cristallizzazione-soluzione di sali o a fenomeni di gelo-disgelo.

Capitolo 6

Conclusioni

Nel corso di questa tesi è stata proposta una metodologia innovativa per la valutazione del contenuto di umidità delle murature con un particolare riguardo per l'edilizia storica e la conservazione dei beni culturali. Il modello teorico approntato è stato validato sperimentalmente in laboratorio attraverso le procedure illustrate nella seconda parte della presente trattazione. È stato innanzitutto proposto un metodo comparativo e non distruttivo per misurare l'effusività termica dei materiali a mezzo di una termocamera a infrarossi. Si è poi provato che, a partire dalla correlazione tra effusività e umidità, è possibile fornire una stima di quest'ultima. Le basi di questo approccio affondano nella modellizzazione matematica delle proprietà termofisiche in gioco ed in particolar modo della conducibilità termica λ . Questo lavoro si è basato su un modello semplificato in cui si considera il mattone come somma di tre componenti: parte bulk, aria e acqua. Le proprietà termofisiche sono state dunque ricavate a mezzo di medie pesate di tali componenti. Nonostante il modello sia piuttosto elementare è stato possibile ottenere risultati incoraggianti ed in accordo con le metodologie tradizionali.

La nuova tecnica qui proposta risulta un interessante avanzamento rispetto allo stato dell'arte, considerando che si tratta di un metodo rapido e non distruttivo, che può essere facilmente adattato per un'implementazione su casi reali e capace di esaminare la parete nel suo insieme fornendo risultati quantitativi nel giro di pochi secondi. Quest'ultima caratteristica risulta particolarmente significativa in quanto la dinamica delle condizioni al contorno, nei contesti indoor di edifici storici non climatizzati, avviene generalmente su scale temporali di molto maggiori delle tempistiche di rilevazione. Ciò consente di poter considerare, anche per superfici ampie rilevate attraverso la ripetizione della misura per più campi di vista, l'acquisizione di intere pareti come istantanea nel suo complesso e le condizioni al contorno come costanti.

6.1 Prospettive future

Di seguito si analizzano alcune delle criticità riscontrate e si forniscono alcuni spunti volti a migliorare le procedure sperimentali e la modellizzazione teorica.

- **Proprietà termofisiche:** affinare la modellizzazione delle proprietà termofisiche rimane uno dei punti cruciali per migliorare accuratezza e precisione della metodologia proposta. Modellizzare la conducibilità termica per un materiale composito è estremamente complesso e odierno argomento di ricerca. Un'accurata descrizione degli inclusi presenti nel mattone potrebbe essere effettuata tramite sezioni sottili o tecniche di tomografia a raggi X, per poi implementare simulazioni agli elementi finiti.

- **Impermeabilizzazione:** il film di plastica utilizzato per impedire l'evaporazione risulta pratico ed efficace ad elevate percentuali di acqua. In queste condizioni l'umidità superficiale favorisce l'adesione dello stesso alla parete del mattone. Procedendo con l'asciugatura però si assiste, soprattutto nei casi ove la superficie ricoperta risulta poco regolare, al distacco della pellicola dal campione. Ciò inficia la misura di effusività tramite termografia, la termocamera, infatti, evidenzia un'anomalia determinata dalla presenza di aria tra la pellicola e il mattone. Individuare nuove procedure per impermeabilizzare i materiali, compatibili con i criteri di reversibilità e conservazione dei beni culturali, è necessario per ottenere risultati più precisi.
- **Gradiente di umidità:** l'asciugatura del mattone avviene in modo disomogeneo, come evidenziato dai risultati forniti nell'ultimo paragrafo dell'analisi dati. Ciò avviene principalmente per due ragioni: in primo luogo, al fine di non alterare la pellicola posta sulla faccia oggetto d'esame, la procedura sperimentale seguita in questa tesi, prevede di liberare dal film di plastica solo la faccia posteriore. In questo modo, si favorisce però, una maggiore asciugatura del lato in questione mantenendo la faccia frontale più umida. In secondo luogo, ipotizzando di asciugare progressivamente il campione eliminando del tutto la pellicola, le superfici laterali del mattone risulterebbero più secche della parte centrale, alterando, anche in questo caso, il confronto con il metodo gravimetrico di riferimento.

Gli esperimenti condotti in laboratorio e presentati in questa tesi hanno fornito risultati incoraggianti. L'approccio corrente risulta già adatto a test preliminari sul campo a supporto di metodologie tradizionali.

La conoscenza del contenuto di acqua delle murature risulta inoltre interessante anche per la valutazione delle proprietà dinamiche dell'involucro di edifici storici con finalità di ottimizzazione energetica. I modelli energetici degli edifici si basano infatti sulla conoscenza accurata delle proprietà termofisiche dei materiali dell'involucro edilizio, che possono variare significativamente in base al contenuto di acqua delle murature. In tal senso, il metodo proposto, trova un'ulteriore possibile applicazione.

Bibliografia

- [1] Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E.. "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern", *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, 1999, pp. 191-209.
- [2] Camuffo, D.. "Microclimate for Cultural Heritage - Conservation, Restoration and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments - Second Edition", Elsevier, New York, 2013. ISBN : 9780444632968
- [3] UNI 11085:2003 "Beni culturali-Materiali lapidei naturali ed artificiali-Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale", 2003.
- [4] Dario, C.. "Standardization activity in the evaluation of moisture content" *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 31, 2018, pp. S10-S14. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.021>
- [5] Nilsson, L.. "Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 248-MMB" Springer International Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74231-1>
- [6] Bison, P., Cadelano, G., Capineri, L., Capitani, D., Casellato, U., Faroldi, P., Grinzato, E., Ludwig, N., Olmi, R., Priori, S., Proietti, N., Rosina, E., Ruggeri, R., Sansonetti, A., Soroldoni, L., Valentini, M.. "Limits and advantages of different methods and techniques for moisture content evaluation in masonry" *Materials evaluation*, vol. 69, no. 1, 2011, pp. 111-116.
- [7] Cadelano, G., Bison, P., Bortolin, A., Ferrarini, G., Peron, F., Giroto, M. and Volinia, M.. "Monitoring of historical frescoes by timed infrared imaging analysis" *Opto-Electronics Review*, vol. 23, no. 1, 2015, pp. 102-108. <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0012>
- [8] Xavier, P., Maldague, V.. "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing." Wiley, 2001. ISBN: 978-0-471-18190-3
- [9] Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Ferrarini, G., Grinzato, E.. "Comparison of some thermographic techniques applied to thermal properties characterization of porous materials" 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2012), 2012. <https://www.ndt.net/?id=13513>
- [10] Alsabry, A., Backiel-Brzozowska, B., Nikitsin, V.I.. "Dependencies for Determining the Thermal Conductivity of Moist Capillary-Porous Materials" *Energies*, vol. 13, 2020, 3211. <https://doi.org/10.3390/en13123211>

- [11] Dul'nev, G.N., Volkov, D.P., Utkin, A.B.. "Effective thermal conductivity of moistened porous bodies" *Journal of Engineering Physics* vol. 52, 1987, pp. 213–217. <https://doi.org/10.1007/BF00870768>
- [12] Manuale del corso per operatori di livello 1, secondo ISO 9712 Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel. Infrared Training Center, FLIR Systems AB, Stockholm. Pubbl. n. 1 560 157A, ITA 2003-09-29
- [13] Grinzato, E., Cadelano, G., Bison, P.. "Moisture map by IR thermography" *Journal of Modern Optics*, vol. 57., 2010, pp. 1770-1778. <https://doi.org/10.1080/09500341003731597>