

---

*Il lavoro di tesi da me svolto, dal titolo "Misure di umidità di materiali tramite termografia", è incentrato sulla messa a punto di una nuova metodologia per la quantificazione del contenuto di acqua nelle murature, con un particolare riguardo per la tutela delle opere d'arte murarie e in generale degli edifici storici. La rilevanza della nuova tecnica è però trasversale, in quanto essa può essere efficacemente applicata in ogni contesto in cui sia necessario valutare il contenuto di umidità di materiali porosi. Per tale ragione il lavoro proposto ben si inquadra nella sezione "gestione del territorio".*

*Come riassunto del più ampio lavoro svolto propongo, di seguito, l'articolo scientifico redatto sulla base della mia tesi in collaborazione con il gruppo di ricerca che mi ha seguito nelle operazioni sperimentali, ed in via di pubblicazione sulla rivista scientifica "Engineering proceedings".*

---

## **Metodo per la Valutazione Quantitativa del Contenuto di Umidità nei Materiali da Costruzione Porosi Basato sulla Misurazione dell'Inerzia Termica con Termografia Infrarossa Attiva<sup>†</sup>**

Gianluca Cadelano <sup>1,\*</sup>, Nicola Stecchetti <sup>3</sup>, Paolo Bison <sup>2</sup>, Alessandro Bortolin <sup>1</sup>, Marina Facci <sup>4</sup>, Giovanni Ferrarini <sup>2</sup>, Antonio Galgaro <sup>4</sup>, Stefano Rossi <sup>2</sup> and Eloisa Di Sipio <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council of Italy;

<sup>2</sup> Construction Technologies Institute, National Research Council of Italy;

<sup>3</sup> Department of Physics and Astronomy "Galileo Galilei", University of Padua, Italy

<sup>4</sup> Department of Geosciences, University of Padua, Italy

**Abstract:** La presenza di umidità nelle murature è cruciale poiché causa ed aggrava vari meccanismi di deterioramento tra i quali, ad esempio: cristallizzazione di sali, sforzi meccanici dovuti ai cicli di gelo e disgelo, degradazione biologica, ecc. La valutazione del contenuto di acqua è fondamentale per la conservazione del patrimonio culturale, pertanto nel tempo, sono stati proposti metodi di misura non invasivi in loco. Viene proposta e testata in laboratorio una procedura termografica attiva innovativa per valutare la quantità di umidità attraverso un approccio non distruttivo. La metodologia si basa sul riscaldamento di un campione di mattone insieme a un campione di riferimento avente proprietà termofisiche note. L'evaporazione è inibita da una pellicola impermeabile applicata ai campioni. Il trend della temperatura superficiale di entrambi i materiali viene registrato tramite termografia infrarossa, si procede dunque ad un confronto: il calcolo dell'inerzia termica del materiale bagnato è ottenuto dalla comparazione del trend della temperatura dei due campioni. Il valore del contenuto di acqua è quindi determinato dall'inerzia termica del campione.

**Keywords:** thermophysical properties; active infrared thermography; water content of porous materials

### **1. Introduzione**

Le strutture in muratura, in particolare gli edifici del patrimonio culturale, sono soggette al deterioramento dovuto all'umidità. La presenza di umidità può portare a vari effetti negativi come: cristallizzazione di sali, sforzi meccanici dovuti ai cicli di gelo e disgelo e degradazione biologica [1]. La conservazione degli edifici storici richiede un'analisi approfondita della dinamica dell'umidità all'interno della muratura. Tuttavia, i metodi tradizionali invasivi di valutazione del contenuto di acqua, come le misurazioni gravimetriche [2], non sono sempre applicabili, soprattutto negli edifici di valore storico. Un approccio alternativo basato sulla termografia infrarossa (IRT) consente di osservare l'effetto termico dell'umidità misurando le temperature superficiali. La IRT è una tecnica non invasiva e senza contatto che visualizza le temperature superficiali sfruttando la radiazione infrarossa emessa da qualsiasi oggetto [3]. La IRT tradizionale fornisce solo informazioni qualitative sulla presenza di umidità senza dettagli quantitativi. La moderna IRT attiva rileva la temperatura di una superficie stimolata da una fonte termica controllata per indurre l'evaporazione [4]. La risposta termica nel tempo, insieme all'implementazione di algoritmi matematici, consente di valutare le proprietà termofisiche influenzate dall'umidità. Tuttavia, fornisce solo indicazioni qualitative sulla presenza di umidità. Questa tesi introduce una procedura termografica attiva innovativa per misurare il contenuto d'acqua di un materiale. L'inerzia termica di un materiale poroso da costruzione è influenzata dal contenuto d'acqua. I test di laboratorio su campioni di mattoni dimostrano che il contenuto d'acqua dei materiali porosi può essere valutato con un alto grado di precisione dalla determinazione dell'inerzia termica. Questa procedura apre la strada alla valutazione del contenuto di umidità negli edifici del patrimonio culturale.

## 2. Materiali e Metodologia

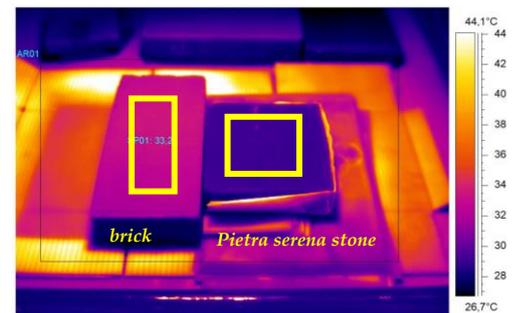
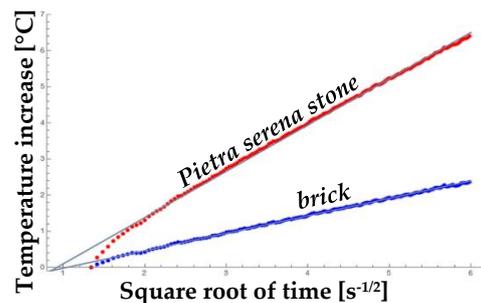
L'inerzia termica è valutata mediante la misurazione dell'effusività termica, che viene eseguita tramite IRT attraverso un metodo comparativo [5,6]. Il campione bagnato (mattoni) e un materiale di riferimento (pietra serena) vengono riscaldati attivando una lampada da 1 kW per un breve periodo, solitamente intorno ai 30 secondi. Per campioni spessi, in approssimazione di materiale semi-infinito, la tendenza della temperatura superficiale nel tempo (Figura 1) può essere valutata mediante l'equazione seguente:

$$T(t) = 2 \frac{Q}{\varepsilon} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \quad \varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad (1)$$

dove:

$Q$  è la potenza specifica,  $t$  il tempo,  $\varepsilon$  l'effusività termica,  $\lambda$  la conducibilità termica,  $\rho$  la densità e  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante.

Entrambi i campioni sono verniciati con una vernice ad alta emissività in modo che assorbano la stessa quantità di energia. La telecamera IRT registra la tendenza della temperatura superficiale a un tasso di campionamento di 5 Hz. L'immagine termica (Figura 2) raccoglie la variazione della temperatura media superficiale durante l'applicazione dello stimolo termico su entrambi i materiali: il materiale con effusività termica sconosciuta (mattoni, a sinistra) e il materiale di riferimento (pietra serena, a destra).



**Figure 1.** Tendenza della temperatura dei materiali testati. Le pendenze degli aumenti lineari della temperatura dipendono dalle diverse effusività termiche.

**Figure 2.** Immagine termica dei materiali testati. Le caselle gialle sono le regioni di interesse in cui sono state raccolte le temperature medie per ogni fotogramma.

Dall'effusività termica del materiale di riferimento viene determinata l'effusività termica del materiale sconosciuto, mediante l'equazione seguente:

$$\varepsilon_{unknown} = \varepsilon_{reference} \frac{T_{reference}}{T_{unknown}} \quad (2)$$

In questo modello semplificato, lo scambio di calore con l'ambiente e l'evaporazione sulla superficie del materiale bagnato non sono considerati. In particolare, quest'ultima è impedita dall'applicazione di un sottile film plastico facilmente removibile dalla superficie senza causare danni ed abbastanza sottile da garantire una trascurabile resistenza termica. Sono stati misurati due mattoni di dimensioni standard, di 12x25x5 cm: uno proveniente dall'Arsenale di Venezia (Mattone A) e un mattone contemporaneo (Mattone B). I campioni sono stati misurati utilizzando la metodologia sopra menzionata a diversi livelli di contenuto di acqua; di conseguenza, è stata stabilita una correlazione tra il valore di effusività termica misurato e il contenuto d'acqua. Allo stesso tempo, l'effusività termica è calcolata anche secondo la seguente relazione:

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad [\text{J K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1/2}] \quad (3)$$

dove  $\lambda$  è la conduttività termica,  $\rho$  è la densità,  $c_p$  è il calore specifico. Le proprietà termofisiche di entrambi i mattoni sono state misurate in laboratorio in condizioni asciutte. Le misurazioni della conduttività termica sono state effettuate mediante il metodo della sorgente piana transitoria, secondo la norma ISO 22007-2 [7].  $c_p$  è stato determinato mediante calorimetria differenziale a scansione [8].  $\rho$  è stata misurata utilizzando il metodo gravimetrico. Sebbene modelli complessi per il calcolo delle proprietà termofisiche di materiali compositi siano stati proposti in letteratura [9], per questo studio è stato utilizzato un modello termofisico semplificato, che considera i mattoni come materiali composti da tre componenti. Il modello si basa su medie ponderate tra le componenti bulk, aria e acqua, modellizzando queste proprietà ( $\lambda$ ,  $\rho$  e  $c_p$ ) in funzione del contenuto d'acqua.

Per determinare la porosità aperta, che rappresenta il volume che può essere riempito dall'acqua assorbita e corrisponde al contenuto volumetrico d'acqua in condizioni di saturazione, è stata eseguita un'analisi gravimetrica. Ciò ha coinvolto il confronto del peso del materiale essiccato in forno con quello del materiale in condizioni di saturazione. Valutando queste diverse proprietà termofisiche, è stato possibile ottenere una comprensione completa del comportamento dei mattoni in diverse condizioni di umidità, come riassunto nella Tabella 1.

**Table 1.** Thermophysical properties of the specimens <sup>1</sup>.

Material	Specific Heat [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Density [kg·m <sup>-3</sup> ]	Thermal Conductivity [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Open porosity [%]
Brick A (dry)	797±6	1470±13	0.559±0.004	34±1
Brick B (dry)	796±2	1680±14	0.64	32±1
Serena Stone	818±2	2480±10	2.36±0.02	-
Water	4182	1000	0.6	-
Air (at 25°C)	1006	1.185	0.02	-

<sup>1</sup> Uncertainty is given as standard deviation for laboratory measured values only.

Utilizzando le relazioni stabilite e le proprietà termofisiche misurate, diventa possibile correlare il valore dell'effusività misurato da IRT sul materiale bagnato con il contenuto di acqua.

### 3. Risultati

La metodologia proposta è stata applicata ai "mattoni A" e "mattoni B", coprendo vari livelli di contenuto d'acqua che vanno dalla saturazione a circa il 15-20% del volume dei campioni. Tuttavia, è stato osservato che a livelli di umidità ancora più bassi, una preparazione accurata del campione che assicuri una distribuzione omogenea dell'acqua all'interno dello stesso è di difficile realizzazione a causa del gradiente di umidità tra il nucleo e la superficie esterna dei mattoni. Per valutare l'efficacia della metodologia proposta, la Tabella 2 presenta un confronto tra il contenuto effettivo d'acqua misurato tramite analisi gravimetrica e i risultati ottenuti utilizzando l'approccio basato sulla termografia attiva.

**Table 2.** Evaluation of water content of brick samples by IRT and standard method (gravimetric).

	Brick A				Brick B			
<b>Water content (IRT method) [%]</b>	33.9±0.3	29.8±0.3	26.4±0.3	20.7±0.2	35.6±0.4	29.2±0.3	22.5±0.3	13.4±0.2
<b>Water content (gravimetric method) [%]</b>	36.1±0.3	27.9±0.2	23.0±0.2	15.8±0.1	32.2±0.3	26.4±0.2	19.3±0.2	13.3±0.1

### 3. Conclusions

È stato proposto un nuovo approccio per la valutazione del contenuto d'acqua di materiali porosi tramite IRT. Questa metodologia è stata testata e valutata in laboratorio confrontando i risultati con un metodo standard. La base di questo approccio risiede nella modellazione delle proprietà termofisiche dei materiali in funzione del contenuto d'acqua. Da un lato, si sono ottenuti risultati incoraggianti attraverso modelli semplificati; d'altra parte, una modellazione accurata delle caratteristiche mineropetrografiche dei mattoni sarebbe utile per determinare la conducibilità termica. I mattoni possono contenere diversi tipi di inclusioni, alcuni dei quali hanno una struttura cristallina e possono rispondere in modo diverso a seconda della direzione del flusso termico (ad esempio, il quarzo). Inoltre, l'acqua nel riempire i pori porta in contatto vari inclusi; questo aspetto porta a variazioni significative nella conducibilità termica. Al fine di migliorare il metodo IRT proposto per future applicazioni, la conducibilità termica potrebbe essere ottenuta mediante la modellazione a elementi finiti, impiegando una geometria bidimensionale derivata dall'osservazione di sezioni sottili di mattoni o da tomografia a raggi X. Tuttavia, l'approssimazione attualmente utilizzata consente comunque un'immediata applicazione della tecnica sul campo e su larga scala, come complemento o supporto ad altri metodi standard.

---

## References

1. Camuffo, D. *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*, Elsevier, New York, 2013.
2. UNI 11085:2003 Beni culturali–Materiali lapidei naturali ed artificiali–Determinazione del contenuto d’acqua: Metodo ponderale.
3. Maldague, X. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, Wiley, Hoboken, 2001
4. Grinzato, E.; Rosina, E. Infrared and thermal testing for conservation of historic buildings, in *Nondestructive Testing Handbook*, vol. 3, *Infrared and Thermal Testing*, X. Maldague ed., ASNT, 2001
5. Grinzato, E., Bison, P. Building material characterization by using IR thermography for efficient heating systems 2008 Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6939
6. P. Bison and E. Grinzato. Building material characterization by using IR thermography for efficient heating systems. In V. P. Vavilov and D. D. Burleigh, editors, *Thermosense XXX*, volume 6939, pages 69390Y–1–9. SPIE, 2008.
7. ISO 22007-2:2015. Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity — Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method
8. ISO 11357-4:2014. Differential Scanning Calorimetry (DSC) - Part 4: Determination of specific heat capacity
9. Torquato, S. *Random Heterogeneous Materials - Microstructure and Macroscopic Properties*, Springer–Verlag, New York, 2002.