
sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Pisa - Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea in Ingegneria Civile
L'IMPIEGO DELLA TERMOGRAFIA NELLA DIAGNOSTICA DELLE COSTRUZIONI MURARIE
STORICHE: METODOLOGIE ED ESEMPI

Autore: Tiziana SANTINI

Relatori: Prof. Ing. Natale GUCCI - Prof. Ing. Fabio FANTOZZI - Ing. Anna DE FALCO
Ing. Sauro FILIPPESCHI

Data di laurea: 16 Ottobre 2006

Nella diagnostica degli edifici la misura della risposta termica trova ampi campi di impiego riguardanti non soltanto la termofisica della costruzione e gli impianti, ma anche la valutazione della sicurezza statica e la sismoresistenza. Quest'ultimo aspetto appare quello meno coltivato in rapporto alla potenzialità dei moderni strumenti di misura senza contatto delle temperature superficiali.

La conoscenza della tessitura delle murature e la stima dei materiali che le compongono è fondamentale per tutte le valutazioni del comportamento delle strutture murarie sollecitate da forze di massa; la possibilità di indagini a pieno campo, senza contatto e in tempo reale è presa in considerazione in questa tesi con lo scopo di fornire un contributo non privo di originalità.

Anna DE FALCO

INTRODUZIONE

Tra le tecniche di indagine non distruttive, la termografia all'infrarosso presenta indiscutibili vantaggi per la globalità delle informazioni che offre in tempi brevi e con costi contenuti.

Nel campo della diagnostica delle strutture murarie la tecnica è in grado di individuare, oltre alle zone soggette a flussi evaporativi, le disomogeneità di materiale sulla superficie sotto lo strato di intonaco: vuoti, elementi metallici, tipi di muratura e loro discontinuità. Questi dati costituiscono una fonte di preziose informazioni sugli assetti distributivi e strutturali originari e sull'efficacia di quelli attuali.

La non invasività della tecnica la rende poi uno strumento insostituibile nello studio di edifici di interesse storico artistico.

Le potenzialità della termografia appaiono però notevolmente superiori rispetto all'uso che attualmente ne viene fatto. Non esistono peraltro criteri scientifici di previsione della risposta termica di tessiture murarie sotto intonaco.

L'obiettivo finale del lavoro è dunque il miglioramento delle conoscenze in merito alle modalità di applicazione della termografia per la lettura 'sotto pelle' delle pareti con l'individuazione dei fattori relativi al materiale, all'apparecchiatura e alle condizioni ambientali, che ne determinano l'esito.

LA RISPOSTA TERMOGRAFICA DEI MATERIALI

Nelle applicazioni rivolte al riconoscimento della sequenza dei materiali sotto intonaco è spesso indispensabile fornire dall'esterno uno stimolo termico per ottenere un segnale di livello superiore al rumore generato dai numerosi disturbi in fase di ripresa: la tecnica va applicata cioè nella

modalità cosiddetta "attiva" ed ha il vantaggio di una più rapida risposta degli strati interni della struttura in relazione alla maggior quantità di calore in gioco.

In presenza di transitori termici conduttivi, il risultato dell'indagine dipende essenzialmente dalle caratteristiche termiche dei materiali costituenti: la conducibilità λ , la densità ρ e il calore specifico c , riuniti nel parametro termico della diffusività $\alpha=\lambda/(\rho c)$.

La possibilità di distinguere in superficie le diverse impronte termiche dei materiali sotto intonaco, evidenziando la tessitura muraria, dipende fondamentalmente dalla differenza dei valori di diffusività del materiale costituente i blocchi e della malta dei giunti [1] e [2].

Per prevedere l'attitudine dei materiali a differenziarsi tra di loro e dalla malta dei giunti nelle riprese termografiche si è ritenuto utile elaborare una classificazione in base allo scostamento percentuale del valore della diffusività termica da quello di una malta tipo (impasto di calce pozzolana e sabbia $\alpha=5,494 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) preso a riferimento (fig. 1, vedi a pagina seguente).

Dal confronto dei risultati di indagini in situ si osserva a questo proposito che proprio i materiali aventi scostamenti marcati di tale parametro dal valore relativo alla malta (mediamente superiori al 50%) originano evidenze apprezzabili durante il riscaldamento della parete e 'appaiono' generalmente in tempi più brevi (materiali lapidei, blocchi di cemento cavi, laterizi con alta percentuale di foratura). Al contrario, il laterizio pieno ($\alpha=4,762 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), che presenta una diffusività molto simile a quella della malta (scostamento dell'ordine di $\pm 2\%$), non è facilmente rilevabile in rapporto ai giunti.

1-20%	20-25%	25-40%	40-60%	60-300%	> 300
1,11 (ciotoli $\rho=1500$ $\lambda=0,70$ $c=840$)	20,10 (laterizio $\rho=1600$ $\lambda=0,59$ $c=840$)	29,68 (cls cell. autoocl. $\rho=500$ $\lambda=0,17$ $c=880$)	40,07 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2200$ $\lambda=1,49$ $c=880$)	62,70 (acero $\rho=720$ $\lambda=0,18$ $c=1220$)	437,05 (polistirolo esp. gran. $\rho=15$ $\lambda=0,054$ $c=1220$)
2,5 (laterizio $\rho=2000$ $\lambda=0,90$ $c=840$)	21,41 (cls argilla esp. $\rho=1500$ $\lambda=0,57$ $c=880$)	34,19 (cls argilla esp. $\rho=1100$ $\lambda=0,35$ $c=880$)	48,00 (lat. semipieno $\rho=1000$ $\lambda=0,24$ $c=840$)	64,83 (abete $\rho=450$ $\lambda=0,12$ $c=1380$)	509,71 (acciaio $\rho=7800$ $\lambda=52$ $c=1990$)
9,72 (laterizio $\rho=600$ $\lambda=0,25$ $c=840$)	22,00 (laterizio $\rho=1000$ $\lambda=0,36$ $c=840$)	34,50 (cls cell. autoocl. $\rho=600$ $\lambda=0,19$ $c=880$)	52,09 (int. gesso puro $\rho=1220$ $\lambda=0,35$ $c=1090$)	70,09 (pino $\rho=550$ $\lambda=0,15$ $c=1660$)	520,45 (cls blocchi cavi+isolante $\rho=250$)
9,9 (int.sabbia/gesso $\rho=1400$ $\lambda=0,70$ $c=1010$)	22,36 (laterizio $\rho=1200$ $\lambda=0,43$ $c=840$)	35,36 (cls cell. autoocl. $\rho=800$ $\lambda=0,25$ $c=880$)	52,94 (sabbia grossa $\rho=1700$ $\lambda=1,20$ $c=840$)	75,00 (basalto $\rho=2800$ $\lambda=3,50$ $c=1300$)	561,81 (cls latero cemento $\rho=250$ $\lambda=0,80$ $c=880$)
13,33 (laterizio $\rho=1800$ $\lambda=0,72$ $c=840$)	22,61 (laterizio $\rho=1400$ $\lambda=0,50$ $c=840$)	37,95 (cls argilla esp. $\rho=700$ $\lambda=0,21$ $c=880$)	53,0556 (lat. forato $\rho=600$ $\lambda=0,13$ $c=840$)	81,75 (lava $\rho=2200$ $\lambda=2,9$ $c=1320$)	4726,57 (rame $\rho=8900$ $\lambda=380$ $c=1610$)
18,75 (laterizio $\rho=800$ $\lambda=0,30$ $c=840$)	23,52 (sabbia secca $\rho=1700$ $\lambda=0,60$ $c=840$)		57,43 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2400$ $\lambda=1,91$ $c=920$)	164,72 (granito $\rho=2500$ $\lambda=3,20$ $c=880$)	1163,88 (cls blocchi cavi $\rho=180$ $\lambda=1,10$ $c=880$)
19,95 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2000$ $\lambda=1,16$ $c=880$)				227,82 (tufo $\rho=2300$ $\lambda=2,90$ $c=700$)	15729,37 (alluminio $\rho=2700$ $\lambda=209$ $c=890$)

Fig. 1 - Classificazione dei materiali in funzione della variazione percentuale della loro diffusività rispetto a quella della malta.

LA SIMULAZIONE NUMERICA

La tecnica termografica riesce ad individuare la presenza sotto l'intonaco di zone costituite da materiali diversi quando queste 'appaiono' in superficie manifestando un contrasto termico in teoria almeno pari alla risoluzione termica della camera. Ciò avviene in funzione del tipo di riscaldamento della parete, della potenza termica della sorgente riscaldante, del tempo di esposizione al calore, del tipo di apparato di misura, oltre che, naturalmente, delle proprietà termiche dei materiali e delle caratteristiche geometriche della parete, fatti salvi gli effetti di disturbo procurati dall'ambiente circostante.

Il problema affrontato in questa tesi riguarda il transitorio termico di una parete intonacata con geometria e caratteristiche termiche note: l'obiettivo consiste nella previsione del tempo di somministrazione del calore necessario a generare, sulla superficie esterna, il giusto contrasto termico tra le impronte dei giunti e quelle dei blocchi.

Si tratta di un primo approccio analitico e numerico di un problema termofisico molto articolato. I modelli utilizzati vanno da quello del solido semi-infinito a quello della parete studiata alle differenze finite: le soluzioni numeriche permettono di trattare geometrie irregolari e condizioni al contorno variabili nel tempo, mentre i modelli analitici consentono il miglior controllo dei risultati e costituiscono un utile mezzo di confronto.

Trascurando lo scambio termico nel piano della parete tra la malta dei giunti e i blocchi e l'effetto diffusivo dell'intonaco, che nella realtà modifica le modalità di propagazione dell'onda termica e ne attenua il segnale, il flusso di calore è stato schematizzato unidirezionale e passante, nello spessore della parete, attraverso uno solo dei due materiali, malta o blocco.

Grazie a questa drastica semplificazione, il contrasto termico è stato calcolato per differenza tra le temperature superficiali dell'intonaco valutate allo stesso istante in diversi modelli, ciascuno riprodotto la parete interna costituita da uno solo dei materiali presi in esame: il tufo

($\alpha=1,801 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), il basalto ($\alpha=9,615 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), il laterizio ($\alpha=4,762 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e la malta ($\alpha=5,494 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

I MODELLI

Nella forma più generale, il processo di scambio termico in regime variabile è espresso dal bilancio energetico su un volume di controllo, che si traduce in un'equazione differenziale lineare alle derivate parziali, del secondo ordine rispetto alla coordinata spaziale e del primo rispetto al tempo, la cui soluzione fornisce la distribuzione della temperatura in ogni istante e in ciascun punto all'interno del corpo.

Nelle simulazioni la fonte di calore è stata sempre schematizzata come sorgente radiante piana e il materiale è stato assimilato ad un corpo grigio.

Il caso analitico di cui si conosce la soluzione esplicita e che più si avvicina al problema studiato è quello del solido semi-infinito soggetto sulla superficie ad un flusso di calore costante [3]. L'impossibilità di tener conto della presenza dello strato di intonaco non limita però l'utilizzo al solo confronto con gli altri modelli, al tendere a zero dello spessore dell'intonaco.

Più realisticamente il problema è stato affrontato con il metodo delle differenze finite nella versione esplicita, schematizzando la parete coperta da due strati di intonaco di cui uno ha la superficie soggetta ad irraggiamento e l'altro ha la superficie in contatto con l'ambiente lambita da aria in convezione naturale. Lo schema utilizzato nel calcolo è mostrato in fig. 2.

Tre diversi tipi di equazioni sono state utilizzate rispettivamente per i nodi interni, per quelli superficiali e per quelli di interfaccia tra parete e intonaco.

Il metodo, molto attinente ai casi reali, presenta però un notevole onere computazionale.

Un originale modello 'ibrido' schematizza invece la parete come un solido semi-infinito con lastra di intonaco adiacente (Fig. 3).

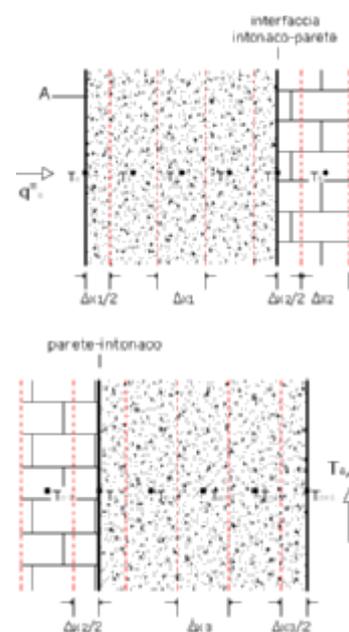


Fig. 2 - Modellazione D.F.E.

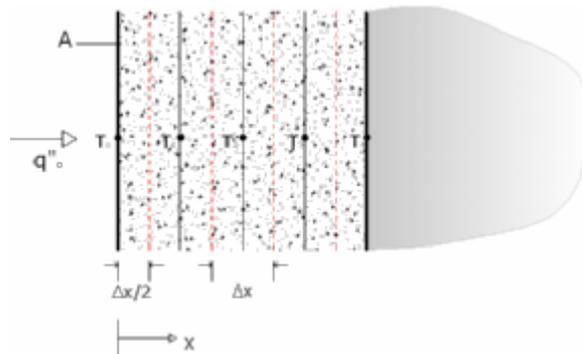


Fig. 3 - Modellazione "ibrida".

La risoluzione dell'equazione del transitorio all'interno dello strato di intonaco è stata affrontata per via numerica con il metodo delle differenze finite esplicito, mentre all'interno della parete è stata utilizzata la soluzione analitica relativa al solido semi-infinito con condizione al bordo di temperatura.

Il vantaggio di questo approccio risiede nell'estrema semplicità di implementazione, ma fornisce una stima del contrasto termico suscettibile di errore. Questa schematizzazione può comunque essere efficacemente utilizzata in fase di indagine preliminare per poi effettuare la successiva correzione mediante una stima basata sul confronto con il metodo alle differenze finite esplicito.

Tra i numerosi casi studiati con le diverse schematizzazioni, si riportano i risultati per una parete di 30 cm di spessore, coperta da due strati di intonaco di 2 cm ciascuno, costituiti da malta di caratteristiche simili a quella di riferimento, soggetta da un lato ad irraggiamento e dall'altro a convezione naturale.

Da un lato una sorgente di calore diffonde per irraggiamento 293 W/mq, rendendo trascurabile l'effetto della convezione, mentre dal lato opposto è presente un flusso convettivo (coefficiente di convezione pari a 7,7 W/(mq·K)) e una temperatura esterna di 16,9°C.

Il tempo di riscaldamento è stato valutato a fronte di un contrasto termico di circa 1,5°C, valore minimo che, per effetto del rumore inevitabilmente coinvolto nella misura, si è rivelato necessario nelle applicazioni con apparecchiature aventi risoluzione termica dichiarata di 0,15°.

In figura 4 è riportato l'andamento nel tempo del contrasto termico superficiale relativo ai tre materiali rispetto alla malta: nel caso esaminato è sufficiente un riscaldamento artificiale di circa tre ore per rendere possibile la lettura dell'orditura sia dei blocchi di pietra, sia di quelli di laterizio.

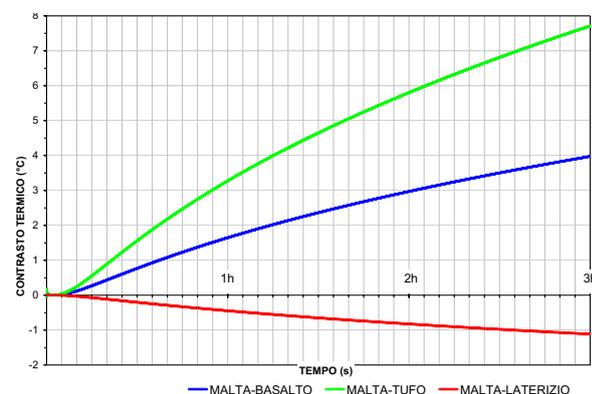


Fig. 4

In figura 5 è presentato il profilo di temperatura all'interno del solo strato di intonaco nei quattro casi in cui la parete interna è costituita da tufo, basalto, laterizio o malta, a seguito di tre ore di riscaldamento. Si osserva la vicinanza dei profili di temperatura relativi alle pareti di laterizio e di malta e una maggiore distanza rispetto a questi di quelli relativi alle pareti costituite dai due tipi di pietra.

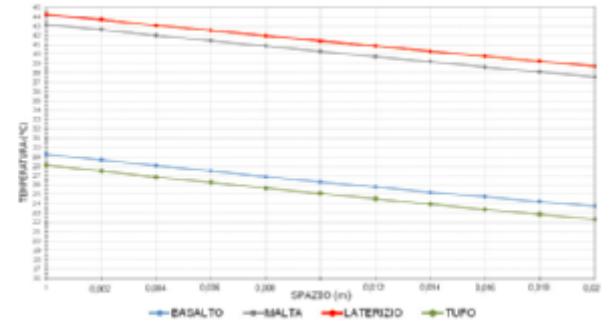


Fig. 5

Alla luce di un gran numero di simulazioni, si osserva che, nella modalità termografica attiva, il valore di temperatura superficiale raggiunto dai diversi materiali è in stretta relazione con il valore della diffusività: a valori di tale parametro superiori a quello della malta, si associano sempre temperature inferiori. In particolare le pietre risultano ad ogni istante più fredde della malta, mentre il laterizio appare sempre più caldo.

Il risultato è confermato da numerose campagne di indagine. In figura 6 è mostrata una ripresa effettuata su una parete esterna di un fabbricato settecentesco esposta all'irraggiamento solare estivo durante tutta la mattina: sulla superficie interna del sopra finestra si evidenziano numerosi elementi lapidei (29°C) in una matrice di malta e il sottostante arco di scarico di laterizio (32°C).

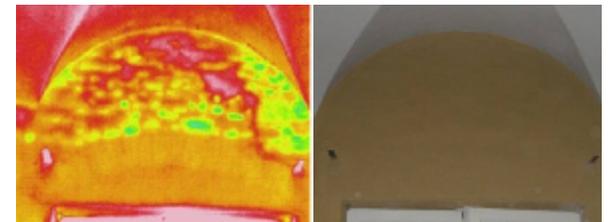


Fig. 6

In figura 7 è presentata la mappa delle temperature sulla superficie di una parete interna esposta per circa 3 ore ad un flusso di calore di 293 W/mq. L'immagine, ottenuta dalla mosaicatura di 6 figure elementari, evidenzia l'antico assetto strutturale con tre aperture, di cui quella centrale delimitata lateralmente da due stipiti in muratura di pietra (27°C) e superiormente da un arco ribassato di laterizio a doppia ghiera (32°C).

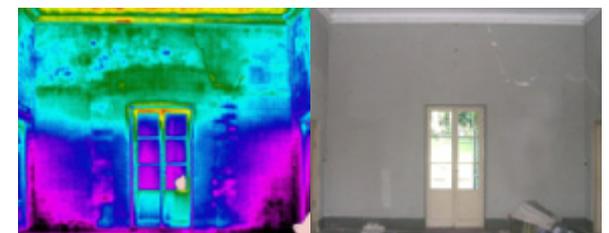


Fig. 7

CONCLUSIONI

Lo studio, che affronta le problematiche legate all'impiego della tecnica termografica nella diagnosi di antiche murature, fornisce alcuni utili strumenti di previsione dell'esito dell'indagine: una classificazione dei materiali da costruzione in base ai parametri termici che li caratterizzano nei transitori e alcune simulazioni numeriche volte alla valutazione dei tempi minimi di riscaldamento necessari per evidenziare la tessitura sotto intonaco.

La possibilità di rapportare le previsioni ottenute con la modellazione ai tempi realmente necessari alla "comparsa" dei diversi materiali è comunque legata ad una taratura che può essere condotta solo su campioni di muratura.

Una estesa campagna sperimentale permetterà inoltre di associare le diverse tipologie di materiali alla loro risposta termica superficiale durante la fase di riscaldamento di una parete: si

può infatti pensare di identificare il tipo di materiale sotto intonaco in base al suo tempo di comparsa sul termogramma.

Lo sviluppo e l'utilizzo dei metodi esposti in questo lavoro potrà consentire la valutazione quantitativa dell'influenza di alcuni parametri come lo spessore e la tipologia dell'intonaco e della parete, il salto termico tra le due facce e la potenza del riscaldatore. Le informazioni ottenute garantiranno un migliore utilizzo delle potenzialità della tecnica termografica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. CNR, Repertorio delle caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi opachi e trasparenti. Roma, 1982.
2. UNI 10351:1994 Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.
3. INCROPERA F. P., DE WITT D. P., Fundamental of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons inc., N. Y., 1990.