
Comparazione di metodi termovisivi per l'identificazione di aree umide su materiali dell'edilizia storica

Mario MILAZZO¹ - Nicola LUDWIG¹ - Veronica REDAELLI¹ - Elisabetta ROSINA²

¹Istituto di Fisica Generale Applicata, Università degli Studi di Milano

²Dipartimento BEST, Politecnico di Milano

Abstract

Water content inside building materials (plaster, brick, stone) is useful to evaluate their decay level.

Passive and active termography are compared, in order to define the most reliable procedure, firstly to map the moisture diffusion and secondary to evaluate the moisture content in the surfaces. Laboratory researches carried out in the last decades and scientific literature permitted to determine that the superficial decay in porous materials is more related to the evaporative speed of the surfaces and the presence of soluble salts than to their absorption capability. Moreover, evaporative fluxes were studied at different environmental conditions and water content in order to find out a correlation between moisture content, evaporation and boundary conditions. The thermal characteristics of timber are highly different from the characteristics of porous materials such as brick and stone and mortar, particularly the thermal capacity of wood is lower. Nevertheless, because of the lower heat capacity of wood, the presence of water greatly affects the wood thermal capacity: the active procedure, guarantees the best results. Lab tests and study case permit to evaluate the sensitivity of the method.

1. Introduzione

Durante la fase preliminare di un progetto di conservazione le strutture lignee non sono solitamente ispezionabili a distanza ravvicinata senza ponteggi né tanto meno si possono applicare strumenti a contatto. Possono essere condotte solo ispezioni a distanza. Inoltre, i risultati dei metodi tradizionali di misura a contatto dell'umidità, per quanto in grado di fornire risultati quantitativi, forniscono dati locali difficilmente utilizzabili per ottenere una descrizione generale delle condizioni di umidità delle strutture in esame, soprattutto nel caso di sistemi ampi o complessi.

Rammentiamo, inoltre, che le esperienze già condotte (Milazzo 2002) sui materiali edili (intonaci, mattoni cotti, pietre sedimentari) hanno permesso di ottimizzare le procedure termografiche per determinare velocemente le zone nelle quali la temperatura è costante. Confermando la necessità di esami a contatto della superficie prima di procedere a qualsiasi valutazione diagnostica sullo stato degli elementi lignei, è incontrovertibile che un metodo telemetrico di individuazione delle aree maggiormente a rischio di degrado, o già compromesse, contribuisca a contenere i costi delle diagnosi preliminari. Un controllo telemetrico permet-

te, infatti, di ridurre le aree di indagine a quelle nelle quali si siano evidenziate anomalie termiche attribuibili a umidità elevata.

Infine, al termine delle operazioni di restauro vere e proprie, una verifica periodica con metodo telemetrico delle condizioni di umidità delle strutture lignee consente di mantenere nel tempo i benefici del risanamento prevenendo il ripetersi di fenomeni di degrado con appropriati programmi di manutenzione. Il vantaggio del monitoraggio telemetrico, in questo caso, consiste nella possibilità di rilevazioni di rapida esecuzione che non richiedano la sospensione delle attività che si svolgono nell'edificio.

Un ulteriore obiettivo della nostra ricerca è stato quello di determinare la sensibilità del metodo termografico: infatti, ai fini di una buona conservazione del legno, bisogna tenere in conto che gli effetti di degrado sono massimi per valori del contenuto di acqua compresi tra il 12% e il 25% e variazioni dell'ordine del 2% possono comportare situazioni di danno apprezzabilmente diverse (Giordano 1993): il 12% di contenuto d'acqua coincide con il valore di umidità ottimale per la conservazione del legno, mentre il 25% è il valore limite superiore per l'umidità di saturazione delle

pareti cellulari del legno che consente la sopravvivenza della gran parte degli aggressori biotici.

Per le caratteristiche tipiche della conformazione delle fibre del legno, si ha che la termografia "attiva" consente di ottenere risultati più facilmente interpretabili. Infatti, l'elevato valore che l'umidità può raggiungere nel legno (oltre al 100% in peso), modifica in maniera sensibile i parametri del materiale coinvolti in questi processo di emissione.

Nonostante esista una copiosa documentazione scientifica sulle applicazioni del metodo termografico (IRT: infrared thermography) agli edifici in muratura, solo un numero limitato di pubblicazioni riguarda l'applicazione IRT al legno come materiale e alle strutture in legno (Ljungberg 1995).

In molti degli edifici con strutture in legno è possibile applicare con successo le procedure sviluppate per l'edilizia perché in molti casi i termogrammi si riferiscono a zone di finitura in intonaco che ricoprono assiti e elementi strutturali, e pertanto, le caratteristiche termiche corrispondono a quelle dei materiali edili già analizzati. Tuttavia, l'acqua migra nel legno in modo molto differente rispetto ai materiali porosi utilizzati in edilizia come l'intonaco, il mattone e le pietre, poiché si propaga attraverso vasi e fibre anziché pori aperti. Pertanto, a seconda del tipo di legno possono cambiare drasticamente i valori di contenuto d'acqua connessi a effetti di degrado da essi dipendenti, nonché i metodi diagnostici da adottare per una valutazione quantitativa dei valori del contenuto stesso.

Per gli intonaci il problema del degrado è essenzialmente legato alla evaporazione e alla formazione di subflorescenze saline e la diagnostica si basa sulla valutazione del flusso evaporativo, mentre per il legno il degrado di tipo biotico e quello di tipo strutturale sono prevalentemente correlati, oltre che alla durabilità specifica della specie legnosa, al contenuto di umidità del materiale. È noto che le aggressioni biotiche (di carattere micotico e/o entomatico) sono favorite dalla presenza di umidità nel legno (massima esposizione al rischio per valori intorno al 18%). Per ciò che concerne il degrado di tipo strutturale è sperimentalmente provato che per ogni 1% di incremento dell'umidità del legno, al disopra del 12% e fino al 25%, i valori di resistenza meccanica subiscono un decremento medio del 3%. La ricerca è stata sviluppata su cinque varietà di legno: pioppo, quercia, pino, ciliegio, faggio.

2. Termografia passiva: misure di flusso evaporativo

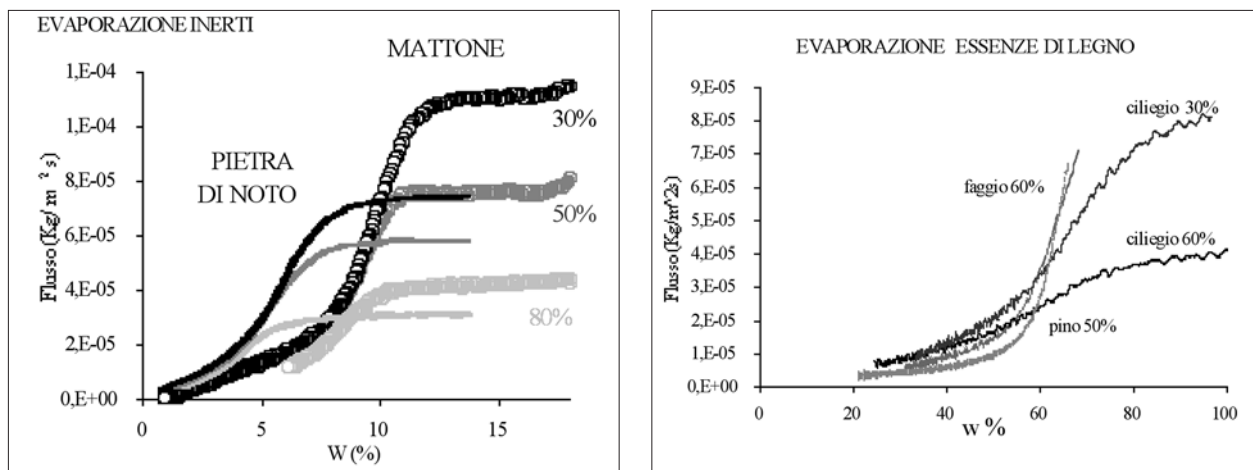
La temperatura di un oggetto durante l'evaporazione dipende in modo diretto dal valore del flusso evaporativo. Sulla superficie dove avviene l'evaporazione la temperatura diminuisce nettamente di alcuni gradi, a causa dell'elevato calore latente di evaporazione dell'acqua, e il raffreddamento corrispondente da circa 100 a 300 W/m² può essere direttamente correlato al tasso di evaporazione. Con la termografia si misurano le variazioni di temperatura causate da un processo evaporativo in atto. Uno dei vantaggi del metodo è la identificazione tempestiva delle zone soggette a maggior rischio di degrado, che sono identificabili per la presenza di un maggior flusso evaporativo. Pertanto il metodo può essere utilmente impiegato per controllare le condizioni delle superfici, sia prima che dopo gli interventi di conservazione. Nel secondo caso come controllo dell'efficacia del programma di manutenzione. (Rosina 2000).

Il degrado dovuto all'umidità può essere direttamente correlato al flusso evaporativo che a sua volta può essere calcolato dalla temperatura della superficie dove ha luogo l'evaporazione, attraverso l'equazione del bilancio energetico totale. Per ottenere in modo chiaro la dipendenza della temperatura dal tasso di evaporazione, la temperatura della superficie viene studiata in condizioni ambientali che rendano massimo il processo di traspirazione (basso valore di UR e alto valore del contenuto d'acqua del campione in misura). Il raffreddamento causato dall'evaporazione viene compensato dall'aumento dell'effetto di convezione dovuto all'aria esterna e da quello di conduzione dall'interno della muratura fino a raggiungere la condizione di equilibrio. Se la perdita di calore causata dall'evaporazione è costante, l'effetto di raffreddamento della superficie può essere ottenuta dalla misura di questa temperatura.

Se Q è la potenza scambiata, cioè l'energia scambiata per unità di tempo e superficie fra parete e ambiente, questo valore può essere espresso come somma di tutti i contributi di energia corrispondenti ai processi di scambio (radiazione, convezione, conduzione e evaporazione):

$$-\varepsilon\sigma T^4 + \alpha\varepsilon_a\sigma T_a^4 + h(T_a - T) + k^*(T_{mt} - T) - \lambda_{ev}\phi_{mev} = Q \quad (1)$$

dove: α è il coefficiente di assorbanza della parete, ε e ε_a i coefficiente di emissività della super-



1.-2. - Flusso evaporativo misurato su due materiali edilizi e su alcune varietà di legno I valori indicati per ciascuna curva rappresentano l'umidità relativa ambientale in cui sono state effettuate le misure (30%, 50%, 60%, 80%).

ficie del campione e dell'ambiente; T_a la temperatura dell'ambiente; T_{int} la temperatura interna del muro; σ la costante di Stefan-Boltzmann; h il coefficiente di scambio convettivo; k^* il coefficiente di scambio conduttivo; λ il calore latente di evaporazione dell'acqua; Φ_{ev} il flusso evaporativo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$].

In laboratorio si è misurata la diminuzione della temperatura superficiale dovuta all'effetto di raffreddamento per evaporazione (Ludwig 1999). Il flusso evaporativo può essere determinato, note tutte le variabili, quando si è raggiunto l'equilibrio fra tutti i processi di scambio di energia ($Q = 0$) e la temperatura ha il valore di equilibrio, T_α . Il valore del flusso evaporativo può infatti essere allora calcolato:

$$\phi_{mev} = \frac{-\varepsilon\sigma T_\alpha^4 + \alpha\varepsilon_a\sigma T_a^4 + h(T_a - T_\alpha) + k^*(T_{int} - T_\alpha)}{\lambda_{ev}} \quad (2)$$

Abbiamo già dimostrato [Milazzo 2002] con calcoli che omettiamo che la (2) può essere riscritta:

$$\Delta T_\alpha \cdot \frac{\Phi}{[(h+k^*)+p]} \quad (3)$$

dove p assume valori compresi tra 3,5 e 5,5 al variare delle condizioni ambientali e la temperatura ambientale è misurata come temperatura superficiale di un oggetto identico a quello in esame ma a contenuto di acqua nullo. Il valore T_α si raggiunge in tempi dell'ordine di alcuni minuti nei campioni di mattone di piccole dimensioni (20 cm^2) che sono stati analizzati.

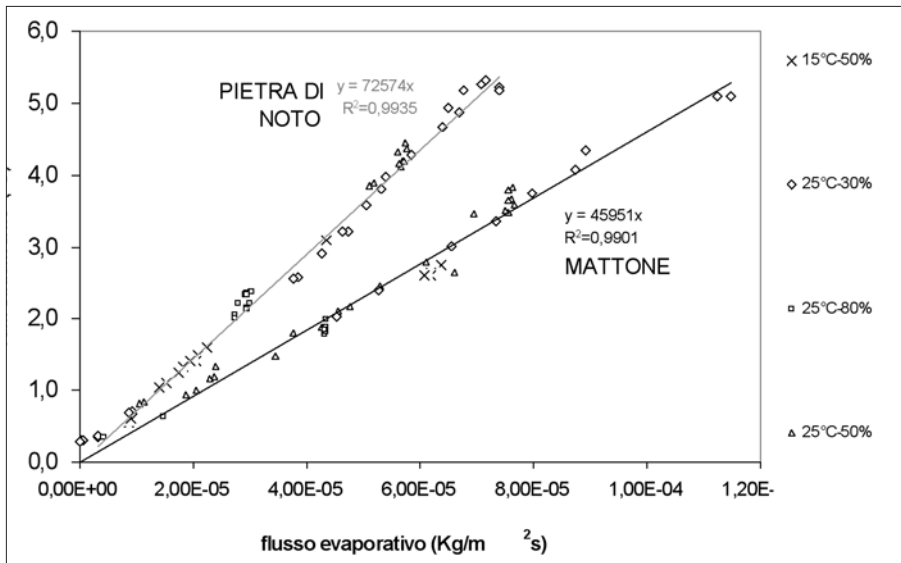
Nelle fig.1 e 2 sono illustrati rispettivamente gli andamenti caratteristici del flusso evaporativo per alcuni materiali edilizi (mattone, pietra di Noto) e

per alcune varietà di legno (faggio, ciliegio, pino) in funzione del contenuto d'acqua (W) definito come rapporto fra la massa dell'acqua contenuta nel campione e la massa secca.

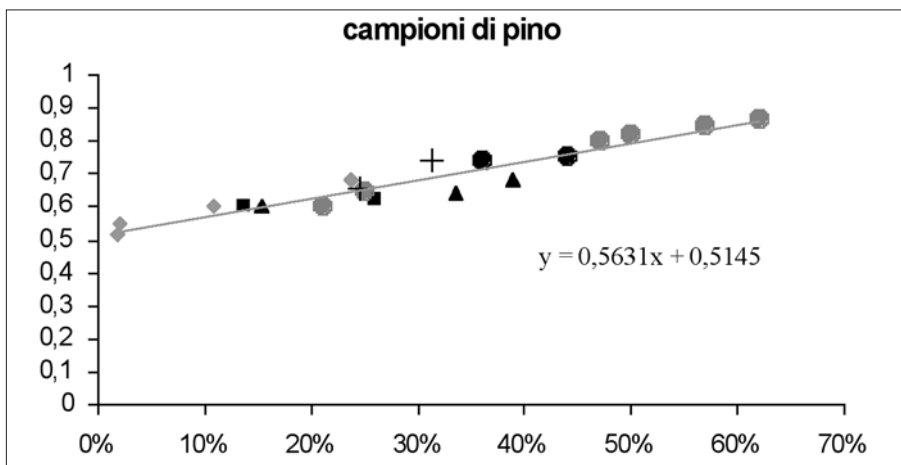
Si noti che il valore del flusso evaporativo ha una dipendenza inversa dall'umidità relativa ambientale, come del resto era da aspettarsi.

I risultati illustrati rispecchiano l'andamento atteso: al diminuire dell'umidità relativa aumenta il flusso evaporativo.

Le curve per il flusso evaporativo illustrate nelle figure 1 e 2 mettono in luce, in maniera più evidente per i materiali edilizi, l'andamento peculiare del valore del flusso in funzione del contenuto di acqua: il flusso evaporativo si mantiene costante al decrescere di W fino a un valore critico per il quale si ha una brusca diminuzione fino al contenuto d'acqua minimo in equilibrio con l'umidità relativa ambientale. L'andamento iniziale costante si spiega facilmente supponendo che per valori di W sufficientemente alti la superficie evaporante sia continuamente rifornita d'acqua dall'interno per capillarità in modo che i pori, per ciò che concerne l'evaporazione, siano assimilabili a una superficie piana. Quando la quantità d'acqua trasferita alla superficie è sufficiente solo a un riempimento parziale dei pori, per i quali si assume una sezione sferica, si manifesta progressivamente il fenomeno della riduzione della tensione di vapore all'equilibrio alla superficie liquida, dipendente dal valore del raggio del menisco, come previsto dalla legge di Kelvin. Il valore finale per il flusso evaporativo corrisponde alla condizione nella quale i pori si possono considerare vuoti e l'acqua si propaga solo per diffusione gassosa all'interno del materiale.



3. - Andamento lineare del raffreddamento in funzione del flusso evaporativo come previsto dalla (3).



4. - Risultati sperimentali ottenuti per il coefficiente di emissività nel caso dei campioni di pino.

I campioni di legno sottoposti agli stessi processi di asciugamento in laboratorio si comportano in modo analogo ai materiali edilizi ma, per contenuti d'acqua molto più elevati. I valori critici di contenuto d'acqua per i quali si ha la diminuzione di flusso evaporativo oscillano tra il 50% e il 60%, valori difficilmente ipotizzabili nelle strutture lignee degli edifici, se non in casi di eventi atmosferici estremi, come per esempio alluvioni.

Dalle misure effettuate sperimentalmente è possibile valutare che un raffreddamento superficiale dell'ordine di 1-2 gradi corrisponde a un tasso di evaporazione dell'ordine di 2×10^{-5} Kg/m²s, in dipendenza della capacità termica del materiale. Pertanto, a partire da questi valori, il

fenomeno dell'evaporazione risulta chiaramente discriminabile da altri possibili fenomeni che inducono un apparente raffreddamento (variazioni dell'emissività, microdelaminazioni, presenza di sali o di parassiti), poiché in genere questi effetti sono di entità nettamente inferiore. Viceversa, rammentando che il valore di contenuto d'acqua, per esempio di una trave in opera, in condizioni normali è dell'ordine del 20%, dalla fig.2 si ottiene che il flusso evaporativo è dell'ordine o inferiore a 10^{-5} kg/m²s.

Ne consegue che la procedura di termografia passiva non è in generale adatta per le analisi di umidità nelle strutture di legno poiché i valori di flusso responsabili di raffreddamenti attribuibili senza incertezze all'evaporazione, corrispondono a contenuti d'acqua così elevati da attendersi in generale già evidenti i segni del degrado o che essi siano identificabili all'osservazione diretta.

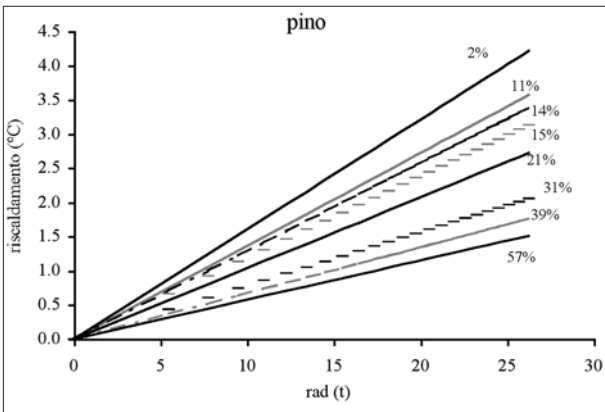
A dimostrazione, in tabella 1 si riportano i valori di flusso evaporativo calcolati a 25°C di temperatura ambiente per gli stessi tipi di legno analizzati e riportati in fig.2, al 25% del contenuto d'acqua. Per questi valori di contenuto d'acqua il flusso evaporativo causa un raffreddamento di da 0.3 °C a 0.5 °C che, come già commentato, non è attribuibile con certezza all'evaporazione ma può essere provocato da altri fenomeni concomitanti.

3. Termografia attiva

Come è stato già commentato, nel caso del legno l'aumento di temperatura conseguente il riscaldamento dipende dal contenuto d'acqua e possiamo

Tabella 1

	Φ Kg/m ² s (W=25%)	ΔT	UR ambientale
Ciliegio	8.00E-06	0.5 °C	60%
	8.00E-06	0.5 °C	30%
Faggio	< 4E-6	< 0.5 °C	30%
Pino	1.00E-06	0.3 °C	50%



5. - Riscaldamento su campioni di legno di pino a differenti contenuti d'acqua.

considerare trascurabile l'effetto di raffreddamento dovuto all'evaporazione.

Il metodo di misura del contenuto d'acqua consiste nel confrontare per le diverse aree i valori di temperatura a parità di riscaldamento. La capacità termica del materiale è, infatti, fortemente influenzata dal contenuto d'acqua (Maldague 2001). L'acqua, nel diffondersi nelle fibre del legno, provoca un sensibile aumento del calore specifico del materiale (il calore specifico dell'acqua pura è 4-5 volte maggiore di quello degli usuali materiali da costruzione), della conduttività termica (circa 25 volte più di quella dell'aria) e della densità.

La dipendenza di questi tre parametri dal contenuto d'acqua può essere espressa nelle forme seguenti:

$$C_p = \frac{C_{p_d} + WC_{p_w}}{1+W} \quad K = \frac{K_d + WK_w}{1+W} \quad \rho = \rho_d(1+W) \quad (4 \text{ a,b,c})$$

L'inerzia termica di un corpo è rappresentata da un parametro, definito effusività termica, che è la combinazione di questo tre fattori:

$$e = \sqrt{k\rho c_p} \quad (5)$$

Supponendo di applicare al trasferimento di calore un modello di riscaldamento a flusso costante (Q) applicato alla superficie di separazione di un

mezzo semi-infinito, l'espressione dell'evoluzione della temperatura superficiale T a partire dalla temperatura iniziale T_0 è:

$$T = T_0 + \frac{Q\sqrt{t}}{e\sqrt{\pi}} = T_0 + \frac{Q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k\rho c_p}} \quad (6)$$

cioè:

$$T - T_0 = m\sqrt{t} \quad \text{con} \quad m = \frac{2Q}{e\sqrt{\pi}} \quad (7, 8)$$

L'andamento riscontrato sperimentalmente della temperatura in funzione del tempo dall'inizio del processo di riscaldamento è in effetti del tipo indicato (fig.5). Da esso può ricavarsi numericamente il valore di m e, sostituendo ai tre parametri k , ρ e c_p che figurano nella sua espressione le equazioni (4), che danno rispettivamente la dipendenza dal contenuto d'acqua, si ottiene:

$$e = \frac{1}{1+W} \sqrt{(k_w\rho C_{p_w})W^3 + (2k_w\rho C_p + k\rho C_{p_w})W^2 + (k_w\rho C_p + k\rho C_p + k\rho C_w)W + k\rho C_p} \quad (9)$$

dalla quale è immediato ricavare numericamente il valore del contenuto di acqua, W .

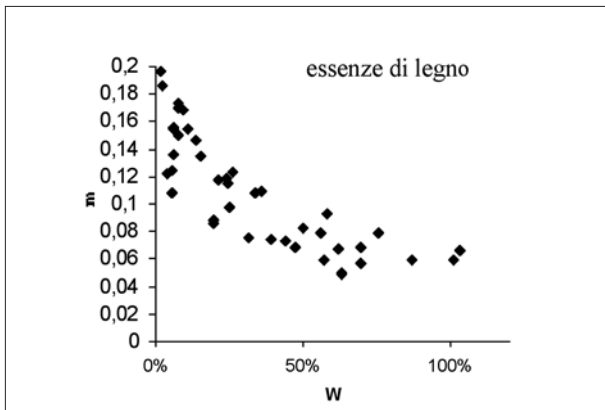
Questo metodo, tuttavia, dipende criticamente dalla valutazione della quantità di calore Q effettivamente assorbito che dipende dalla presenza dell'acqua, la quale modifica le proprietà di assorbimento del calore, che, in effetti, variano notevolmente dalle condizioni di materiale imbibito a quelle di materiale secco.

Per valutare l'effetto dell'acqua sull'assorbimento della radiazione, in contemporanea alle misure di termografia attiva sono state effettuate delle riprese in riflettanza nella banda spettrale da 3 μm a 5 μm e le proprietà ottiche della superficie del campione in esame sono state ricavate per confronto con standard di riflettanza.

Ricordando che si può definire il coefficiente di emissività (ϵ) come coincidente con quello di assorbanza, cioè come complemento a 1 del coefficiente di riflettanza, si può ottenere l'andamento sperimentale dell'emissività di un campione di legno al variare del contenuto d'acqua. In fig. 4

Tabella 2

	k W/(mK)	ρ Kg/m ³	c J/(KgK)
H ₂ O	0.613	1002	4181
OAK (duri)	0.16	720	1255
PINE (morbidi)	0.12	510	1380
TRAVE	0.04	400	1100



6. - Correlazione tra il coefficiente angolare m (8) e il contenuto d'acqua in tutti i campioni di legno analizzati.

questo andamento è riportato, per esempio, per un campione di legno di pino.

Il valore di m trovato dalla formula (8) va quindi corretto in m' dividendo per il valore del coefficiente di emissività del legno per ciascun valore del contenuto d'acqua: $m' = m / \epsilon$.

4. Prove sperimentali

Le prove sperimentali, condotte nei laboratori di Archeometria dell'Istituto di Fisica Generale Applicata dell'Università di Milano e del Dipartimento Conservazione e Storia dell'Architettura del Politecnico di Milano, hanno riguardato, per i materiali edilizi, alcuni campioni di mattone e tre campioni di pietra di Noto (tutti di circa 20 cm² di superficie). Inoltre, si è operato su 14 campioni di varie essenze di legno (pino, faggio, ciliegio), le superfici indagate sono comprese tra 20 cm² e 80 cm². I campioni sono di legno non trattato, di forma parallelepipedica, la superficie indagata è in alcuni casi parallela agli anelli di accrescimento, in altri casi ortogonale.

Le prove di termografia passiva, svolte su i campioni di tipo edilizio, sono state condotte in camera climatica, in assenza di illuminazione, velocità di ventilazione minima (0.1 m/s), tempe-

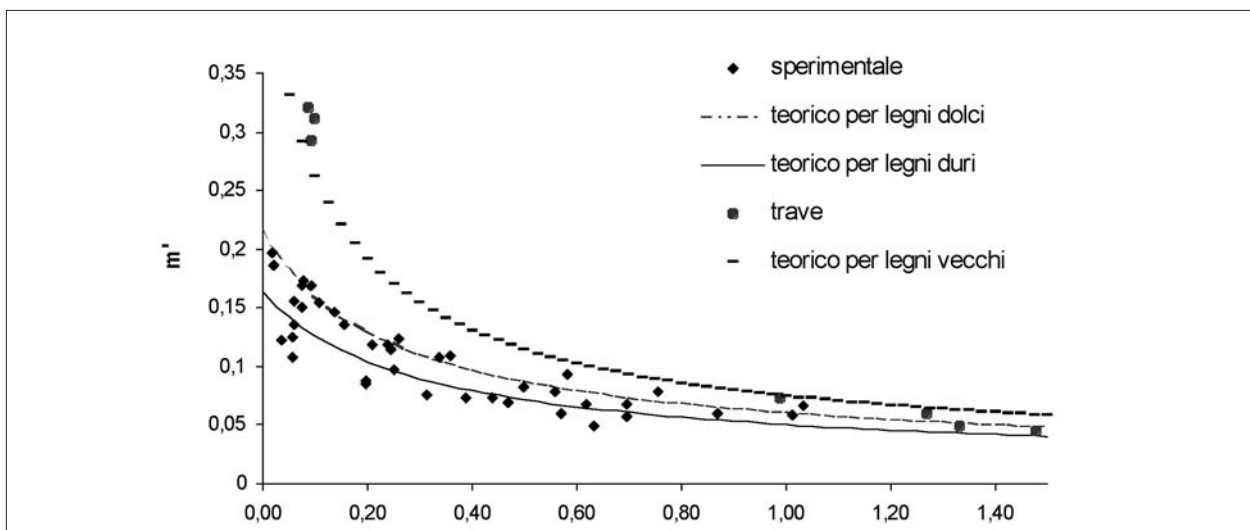
ratura esterna 24°C e umidità relativa 50%. I campioni sono stati sigillati con un membrana impermeabile su tutte le superfici tranne che su quella sottoposta alla misurazione termografica e sottoposti al controllo del peso mediante bilancia (precisione 10⁻⁴ g). Alcuni campioni secchi della stessa composizione di quelli umidi in esame sono stati utilizzati per ottenere il dato relativo alla differenza di temperatura che compare nella formula (3).

Per quanto riguarda gli inerti, i campioni sono stati imbibiti per immersione in acqua distillata per 48 ore; per quanto riguarda il legno, i campioni sono stati immersi in acqua per una durata di tempo variabile tra 2 e 20 giorni.

Negli esperimenti di termografia attiva i campioni di legno, preventivamente imbibiti, sono stati posizionati perpendicolarmente alla direzione di irraggiamento (lampada alogena da 250 W con riflettore collocata a 1 m dalle superficie) e, analogamente che per quelli di materiale edile, si è rilevato l'aumento di temperatura con la termocamera.

La sequenza di riprese termografiche è stata effettuata con frequenza di acquisizione di un'immagine ogni 30 secondi, per una durata totale di 10 minuti. Temperatura e umidità relativa dell'ambiente sono state mantenute tra 19°C e 21°C e tra 28% e 35%, rispettivamente.

Inoltre, ai fini di verificare l'applicabilità del metodo su strutture in opera, sono state condotte prove su una trave di pino non squadrata, di 12 cm di diametro e 100 cm di lunghezza. Essa è stata ricavata dalla demolizione di una struttura ottocentesca e si può considerare come reperto tipico da cantieri dell'edilizia storica, sia per il colore, sia per lo stato di conservazione. Poiché nel caso delle procedure attive la superficie curva influenza l'assorbimento di radiazione, e quindi inficia la misura della temperatura, sono state delimitate sulla trave alcune zone comparabili, poiché poste alla stessa distanza dall'obiettivo della termocamera.



7. - Confronto tra i dati sperimentali ottenuti e l'andamento teorico previsto dalla (9).

5. Risultati

I risultati ottenuti per l'aumento di temperatura verificatosi, in circa 10 minuti di riscaldamento, su campioni di pino con contenuti d'acqua dal 2% al 57% sono mostrati in fig. 5 in funzione della radice quadrata del tempo. È evidente la variazione del coefficiente angolare, m . Tali valori ottenuti per tutte le diverse varietà di legno sulle quali si sono eseguite misure sono riportate in Fig.6 in funzione del rispettivo contenuto d'acqua.

I risultati ottenuti per la trave di legno ottocentesca sono stati aggiunti in fig. 7.

Per procedere a una verifica del modello impiegato, i dati sperimentali sono stati confrontati con i valori teorici previsti dall'equazione (9), che esprime la dipendenza dell'effusività termica, e quindi del coefficiente angolare m , dai parametri k , ρ , c_p . I valori di questi parametri, riportati in Tab.2, sono stati ricavati da lavori pubblicati (Skaar 1988) nel caso dei campioni. Nel caso della trave, essi sono stati ottenuti a partire dall'aumento della porosità che si verifica in un materiale all'avanzare dello stato di degrado. Ne consegue una diminuzione della densità, che può essere espressa dalla formula seguente in funzione della variazione della concentrazione di saturazione in acqua (ΔW).

$$\rho' = \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_w} \Delta W \right) \quad (10)$$

essendo ρ e ρ_w rispettivamente la densità per il materiale in buono stato e quella dell'acqua.

Come si può notare dalla fig. 7, il valore ΔW nel nostro caso corrisponde a $140\% - 100\% = 40\%$, in tale modo si ottiene un valore per ρ' pari a 400 (tab. 2).

6. Conclusioni

Il lavoro ha consentito di mettere a punto le procedure termografiche meglio adatte rispettivamente alla rilevazione di aree umide di superfici in muratura e di strutture in legno. Come già illustrato in un precedente lavoro, il metodo passivo, basato sulla misura del raffreddamento, si presta alla diagnostica di zone umide, di intonaco, laterizio, materiale lapideo, a rischio di degrado a causa di tassi di evaporazione rilevanti. Il metodo attivo, specificamente adatto al caso del legno, è correlato con l'aumento dell'effusività termica del legno umido e diventa particolarmente sensibile quando la concentrazione di acqua raggiunge valori rilevanti rispetto al peso del campione secco.

Nonostante la sensibilità dell'analisi termografica sia in generale inferiore a quella delle tecniche normative (prove gravimetriche e conduttività elettrica), la termografia consente comunque di distinguere con procedura veloce e non invasiva aree con differente contenuto di umidità.

Sono attualmente in corso valutazioni quantitative della sensibilità del metodo di termografia attiva nell'intervallo di contenuto di acqua compreso tra 12% e 25%, già indicato come quello particolarmente critico per causare il degrado del legno. Inoltre saranno presi in considerazione gli

effetti dipendenti dalla varietà del legno in esame, nonché dalla posizione della zona campionata nella sezione del tronco in funzione della distanza radiale (diverso comportamento tra alburno e durame).

Bibliografia

Si veda in particolare per quanto riguarda le misure su materiali inerti e le procedure di termografia passiva:

Binda 1998: L. Binda, A. Saisi, N. Ludwig, C. Marienhofer, S. Leipold and D. Schaurich - *Combination of Non-destructive Testing Methods for the Characterisation of Moisture Content and Distribution in a Historic Brick Wall*, Second International RILEM, CSIRO, ACRA Conference, Melbourne, 1998.

Ludwig 1997: N. Ludwig, E. Rosina - *Moisture Detection Through Thermographic Measurements Of Transpiration*, Thermosense XIX SPIE, Proc. 3056, Orlando 1997.

Ludwig 1997: N. Ludwig, M. Milazzo, G. Poldi - *Misura di umidità superficiale nelle murature mediante termografia*, Proc. of the National Conference on non-destructive test, Padova, 1997.

Milazzo 2002: M. Milazzo, N. Ludwig, V. Redaelli - *Studio di flussi evaporativi nelle dinamiche del degrado di materiali umidi mediante tecniche di termografica*, II Congresso Associazione Italiana di Archeometria, Bologna, Giugno 2002.

Rosina 1998: E. Rosina, N. Ludwig, L. Rosi - *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*, Thermosense XX SPIE Proc. 3361, Orlando, 1998.

Rosina 2000: E. Rosina, G. Roche - *Measures Planning To Prevent Moisture Damages On Historical Buildings*, Quarry-Laboratory-Monument International Congress, Pavia, 2000.

Per le procedure di termografia attiva:

Grinzato 1994: E. Grinzato, P. Bison, S. Marinetti and V. Vavilov - *Thermal Infrared Non-destructive Evaluation of Moisture Content in Building: Theory and Experiment*, Proc. of CNR Conference, Varenna, Settembre 1994.

Ludwig 1999: N. Ludwig, E. Rosina - *Active and Passive Thermography to detect Moisture in Building Materials*, in *Proceedings of V AITA*, Venezia, CNR-IROE, Settembre, 1999.

Rosina 2001: E. Rosina, E. Grinzato - *Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Buildings*, in *Material Evaluation*, ASNT Journal, Columbus (OH) USA, Agosto 2001.

Rosina 2002: E. Rosina, E. Robison - *Applying Infrared Thermography to Historic Wood-Framed Buildings in North America*, in *APT Bulletin*, volume 33 n 4, Albany (NY), Mount Ida Press, 2002.

Per quanto riguarda il legno e le applicazioni termografiche:

Giordano 1993: G. Giordano - *Tecnica delle costruzioni in legno*, Milano, Hoepli, 1993

Ljungberg 1995: S.A. Ljungberg - *Infrared survey of fifty buildings constructed during 100 years-thermal performances and damage conditions*, Thermosense XVII, Orlando, 1995.

Maldague 2001a: X. Maldague, A. Wyckhuysse - *A study of wood inspection by infrared thermography, part I: Wood pole inspection by infrared thermography*, in *Research in Non-destructive Evaluation*, n 13, 2001.

Maldague 2001b: X. Maldague, A. Wyckhuysse - *A study of wood inspection by infrared thermography, part II: Wood pole inspection by infrared thermography*, in *Research in Non-destructive Evaluation*, n 14, 2001.

Murata 1994: K. Murata, T. Sadoh - *Heat Absorption And Transfer In Softwoods And Their Knot Surfaces*, in *Mokuzai Gakkaishi*, volume 40, n 11, Kyoto University, 1994.

Quin 1998: F. Quin, P. H. Steele, R. Shmulsky - *Locating knots in wood with an infrared detector system*, in *Forest Products Journal*, volume 48, n 10, Madison (WI), 1998.

Skaar 1988: C. Skaar - *Wood-Water Relations*, New York (NY), Springer-Verlag, 1988.

Tanaka 1994: T. Tanaka - *Preparatory Investigation for Thermographic Detection of Biodeteriorated Location in Wood*, Pacific Timber Engineering Conference, 1994.

Xu 1993: Y. Xu, S. Okumura, M. Noguchi - *Thermographic Detection Of Starved [sic] Joints Of Wood*, in *Mokuzai Gakkaishi*, volume 39 n 1, Kyoto University 1993.