

Metodi per la misura dell'umidità nei materiali dell'edilizia storica: legno e intonaci.

E. Rosina*, N. Ludwig**, V. Redaelli***

* DCSA, Politecnico di Milano; ** IFGA, Università Statale di Milano; TERMOLAB Oggiono (LC)

La valutazione economica del progetto di conservazione è frequentemente inficiata dalla sottostima dei danni, che non sempre sono riconoscibili dalla sola analisi a vista. Il contenuto d'acqua all'interno delle strutture, ad esempio, è un'informazione fondamentale per stimare il danno. In particolare il degrado del legno è prevalentemente correlato al contenuto di umidità del materiale e dell'ambiente, ove quest'ultima gioca un ruolo fondamentale nel processo di degrado, perché può incrementare sino ad un terzo il contenuto d'umidità del materiale.

Le ricerche sinora condotte sui materiali dell'edilizia storica (intonaci, cotto, pietre sedimentarie) non hanno ancora permesso di sviluppare le procedure telemetriche di prova dell'umidità che risulterebbero, nel caso delle strutture lignee, di grande utilità per la diagnosi precoce dei fattori di rischio, per la conservazione delle strutture e l'efficace localizzazione delle aree già interessate da degrado. E' da ricordare che nelle fabbriche storiche il legno è spesso utilizzato per gli orizzontamenti e le strutture di copertura e che questi il più delle volte non sono ispezionabili a distanza ravvicinata e ancor meno con strumenti a contatto.

L'intento degli autori è di presentare lo stato dell'arte delle tecniche e procedure termografiche di identificazione del contenuto di umidità critico per la conservazione del legno. La ricerca è stata sviluppata su cinque tipi di legno tra i più diffusi negli edifici storici in Nord Italia, ed i risultati ottenuti in laboratorio sono stati verificati nei casi di studio, al fine di ottimizzare le procedure e testarne la validità anche nei casi in cui il colore e la tessitura non omogenea del materiale alterano e filtrano il segnale termico.

Elisabetta Rosina, DCSA, Politecnico di Milano

V. Durando 38/A

20158 Milano, tel 02 23995807; fax 02 23995808, elisabetta.rosina@polimi.it

Nicola Ludwig, IFGA, Università Statale di Milano

V. Celoria, 16, 20133 Milano

tel 02 58357473; fax 02 2665717, nicola.ludwig@unimi.it

Veronica Redaelli, TERMOLAB

V. Trescano 16

23848 Oggiono (LC), tel/fax 0341575463, Info@termolab.it

1. Introduzione

Durante la fase preliminare al progetto di conservazione, le strutture storiche lignee non sono solitamente ispezionabili a distanza ravvicinata senza un ponteggio, e ancor meno si possono applicare strumenti a contatto proprio laddove l'analisi a vista può essere condotta solo a distanza. Inoltre, i risultati dei tradizionali metodi di misura a contatto sono quantitativi, e consistono in dati puntuali difficilmente estendibili alla generalità delle situazioni, soprattutto in presenza di sistemi strutturali ampi e complessi. Pur non volendo mettere in dubbio la necessità di un esame ravvicinato della superficie prima di procedere a qualsiasi valutazione degli elementi lignei, in questa sede si vuole avanzare l'ipotesi che un metodo telemetrico di individuazione delle aree maggiormente a rischio di degrado, o già compromesse, può contribuire efficacemente a contenere i costi di una diagnosi più avanzata, necessariamente a contatto, poiché permette di ridurre le aree di indagine a quelle in cui si siano evidenziate le anomalie termiche rappresentative di anomali contenuti di umidità. Ciò sarebbe oltremodo utile al fine della definizione oggettiva e scientifica della classe di rischio biologico di determinate strutture lignee. Infine, al termine del cantiere di restauro, la verifica periodica delle condizioni di umidità delle strutture consente di mantenere nel tempo i benefici del risanamento delle strutture, prevenendo ogni forma di degrado con specifici programmi di manutenzione. Ma, anche questo programma, un monitoraggio periodico deve affidarsi a sistemi telemetrici, di rapida esecuzione, che non richiedano la sospensione delle attività che si svolgono nell'edificio. Le esperienze già condotte sui materiali dell'edilizia storica (intonaci, cotto, pietre sedimentarie) [1, 2] hanno permesso di ottimizzare le procedure termografiche per determinare velocemente le zone in cui la temperatura (e conseguentemente il contenuto di umidità) è costante. Misurando il contenuto d'acqua in un solo punto della zona risultata omogenea per temperatura, la misura è valida per tutta l'area, entro i limiti dell'analisi (ovviamente a parità di materiale, stato di conservazione e condizioni al contorno)¹. L'intento degli autori è di presentare lo stato dell'arte delle tecniche e delle procedure termografiche di identificazione del contenuto di umidità critico per la conservazione del legno. Un ulteriore obiettivo della ricerca è stabilire la sensibilità dei metodi termografici: poiché i fattori di degrado per la conservazione del legno sono maggiori tra il 12 e il 25%, anche incrementi del 2% possono comportare situazioni di rischio diverse [3, 4]². Date le caratteristiche del legno, l'ipotesi di partenza è che la termografia attiva consenta di ottenere risultati più facilmente leggibili, poiché l'elevato contenuto che l'umidità può raggiungere nel legno (oltre al 100% in peso), modifica in maniera sensibile i parametri termofisici del materiale.

La ricerca è stata sviluppata su cinque tipi di legno: pioppo, quercia, pino, ciliegio, faggio. Nonostante la nutrita letteratura scientifica sulle applicazioni di IRT agli edifici, è possibile rinvenire solo un numero limitato di pubblicazioni riguardo l'applicazione dell'IRT al materiale legno [5-9] e alle strutture in legno [10].

¹ Il metodo permette di ridurre drasticamente le misure da effettuare, e pertanto è possibile ripetere l'indagine in diverse condizioni e osservare la dipendenza del contenuto d'umidità dall'ambiente, dalle condizioni meteorologiche, e dagli interventi di risanamento messi in campo.

² Infatti il primo valore coincide con l'umidità standard per la conservazione ottimale del legno e il secondo è con il valore limite, al disotto dell'umidità di saturazione delle pareti cellulari del legno e per la sopravvivenza della gran parte degli aggressori biotici.

In molti degli edifici con struttura in legno oggetto delle ricerche condotte dagli autori nel 2001-2002 [11] nell'area dei Grandi Laghi, USA, è stato possibile applicare con successo le procedure sviluppate in precedenza in Italia [1, 2, 12, 13, 14, 15] perché in molti casi i termogrammi venivano scattati sulle finiture in intonaco che ricoprivano assiti e elementi strutturali, e pertanto le caratteristiche termiche e il comportamento all'evaporazione della superficie corrispondeva a quello dei materiali già studiati. Tuttavia, l'acqua migra in modo molto differente nel legno rispetto agli altri materiali porosi utilizzati in edilizia come intonaco, mattone e pietra, poiché percorre vasi e fibre anziché pori aperti (anche se la diffusione dell'acqua dal legno all'intonaco, permette di applicare con efficacia addirittura lo stesso approccio passivo). Pertanto, al variare del tipo di materiale possono cambiare drasticamente le caratteristiche dell'acqua contenuta, dei danni che essa può causare e conseguentemente del metodo diagnostico da adottare per una sua valutazione quantitativa³.

2. L'approccio passivo: misure del flusso evaporativo

La temperatura di un oggetto durante l'evaporazione dipende in modo rilevante dal tasso di evaporazione. Sulle superfici ove avviene l'evaporazione la temperatura diminuisce bruscamente di diversi gradi, causa l'elevato calore latente di evaporazione, e il raffreddamento (circa 100-300 W/m²) può essere direttamente correlato al tasso di evaporazione. Il metodo termografico misura le variazioni di temperatura causate dal processo evaporativo in atto [2, 16]. Uno dei vantaggi del metodo è la diagnosi precoce delle zone soggette a maggior rischio di degrado, che sono identificabili per la presenza di un elevato flusso evaporativo. Pertanto il metodo viene utilmente impiegato per monitorare le condizioni delle superfici sia prima dell'intervento di conservazione, sia dopo, come controllo della manutenzione programmata [17].

Il degrado dovuto all'umidità può essere direttamente correlato al flusso evaporativo che a sua volta può essere direttamente calcolato dalla temperatura dell'oggetto, attraverso il bilancio energetico complessivo della superficie dove avviene l'evaporazione. Per ottenere una chiara ed univoca dipendenza tra la temperatura misurata e il tasso di evaporazione, la superficie viene studiata alle condizioni ambientali che facilitino i processi traspirativi [14] (bassa UR e alto contenuto d'acqua). Il raffreddamento di alcuni gradi causato dall'evaporazione viene parzialmente compensato dall'aumento della convezione e conduzione dalle parti più interne della muratura. Se la perdita di calore causata dall'evaporazione è costante, l'effetto di raffreddamento della superficie può essere ottenuta dalla misura della temperatura d'equilibrio della superficie raffreddata.

³ Per gli intonaci il problema del degrado è essenzialmente legato alla evaporazione e alla formazione di subflorescenze saline e la diagnostica si centra sulla valutazione del flusso evaporativo, mentre per il legno il degrado diretto, di tipo biotico, e quello indiretto di tipo strutturale, sono prevalentemente correlati, oltre che alla durabilità precipua della specie legnosa, al contenuto di umidità del materiale. E' infatti noto che le aggressioni biotiche (di carattere micotico e/o entomatico) sono favorite, entro certi limiti, dalla presenza di umidità nel legno (massima esposizione al rischio per valori prossimi 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%.

Se Q è la potenza scambiata, la si può esprimere come somma di tutte le diverse forme di energia (radiazione, convezione, conduzione e cambio dello stato fisico):

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

con α assorbanza del muro, ε e ε_a emissività media del campione emissività efficace dell'ambiente; T_a temperatura ambiente; T_{int} temperatura interna del muro; σ costante di Stefan-Boltzmann; h coefficiente di scambio convettivo; k^* coefficiente di conduttività; λ calore di evaporazione dell'acqua; Φ_{ev} flusso evaporativo [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$].

In laboratorio si è verificata la variazione della temperatura superficiale dovuta all'effetto di raffreddamento dell'evaporazione [13, 16]. E' da sottolineare che l'energia associata al trasporto di massa all'interno del muro è quasi due ordini di grandezza inferiore della perdita di energia per evaporazione di pari masse. Il flusso evaporativo può essere determinato, conoscendo tutte le variabili, quando tutti gli scambi energetici raggiungono l'equilibrio ($Q = 0$). Al tempo in cui la temperatura assume il valore di equilibrio T_α , il valore del flusso può essere espresso da:

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

dove i termini dovuti agli scambi di radiazione possono essere stimati con buona approssimazione considerando le zone senza evaporazione, ma alle stesse condizioni di irraggiamento. La temperatura raggiunge T_α in tempi dell'ordine di 10^2 - 10^3 sec nei campioni di mattone di piccole dimensioni (20 cm^2) che sono stati analizzati.

In Fig.1-2 è illustrato l'andamento caratteristico del flusso evaporativo per alcuni materiali edilizi e per alcuni tipi di legno in funzione del contenuto assoluto d'acqua (W) definito come rapporto fra massa umida e massa secca.

Per dimostrare la dipendenza del flusso evaporativo dall'umidità relativa esterna, sono stati ripetuti sugli stessi campioni cicli di asciugamento per evaporazione in differenti condizioni ambientali. I risultati illustrati rispecchiano l'andamento atteso: al diminuire dell'umidità relativa aumenta linearmente il flusso evaporativo

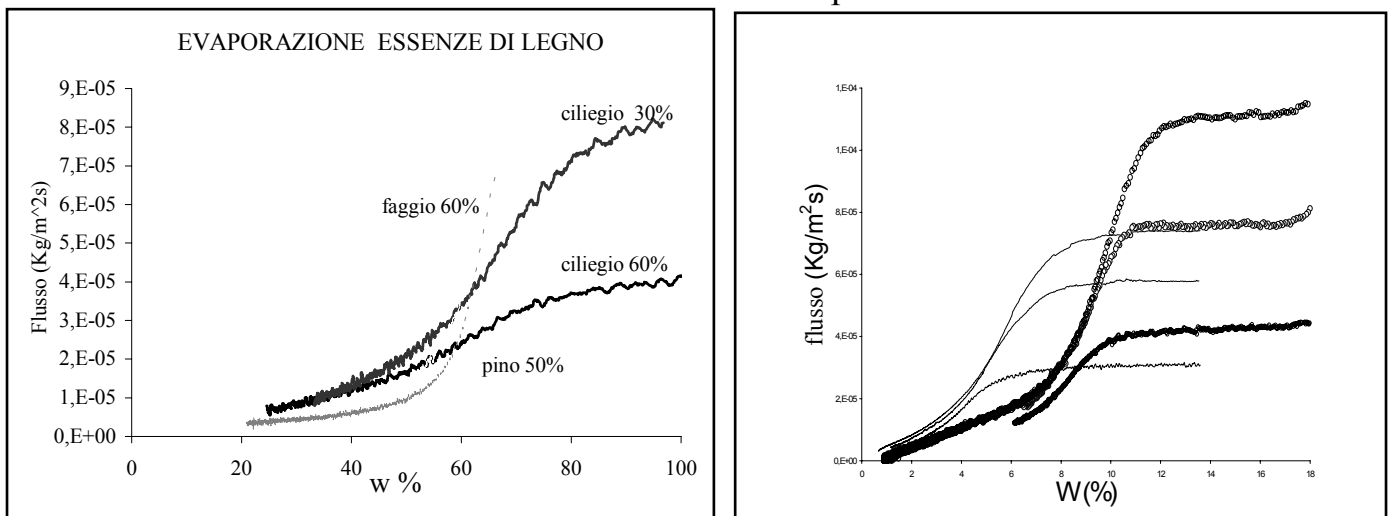


Fig.1 e 2: Φ per legno e materiali lapidei misurati a 25°C per UR= 80, 50, 30%.

Una prima analisi dell'andamento del flusso evaporativo illustrato, caratteristico per tutti i materiali, evidenzia la non linearità rispetto al contenuto di acqua: con valori di flusso pressoché costante per alti valori di W e bruscamente decrescenti al di sotto di un valore di W proprio di ogni materiale. La spiegazione di tale fenomeno è da ricercarsi nei meccanismi di trasporto e di evaporazione all'interno dei pori del materiale. Si osservano due fenomeni concomitanti: il primo è legato al variare dei metodi di trasporto dell'acqua all'interno del materiale che passa da un regime di trasporto in fase liquida per capillarità a uno, più lento, per diffusione di vapore. Entrambi dipendono dal variare delle dimensioni dei pori: al progressivo asciugarsi del materiale l'acqua si ritira all'interno delle cavità più piccole, assimilabili a pori cilindrici con raggio inferiore al micron e si fa quindi sentire l'effetto del menisco sul valore della tensione di vapore. In particolare per menischi convessi l'umidità relativa all'equilibrio liquido-vapore si abbassa sotto il 100%, ne segue che il gradiente con l'umidità relativa ambientale, costante, diminuisce e si ha un abbassamento del flusso evaporativo secondo la legge Kelvin [13].

Una muratura umida presenta un andamento continuo di W_c dai valori di saturazione sino alla condizione di contenuto d'acqua fisiologico per i materiali costituenti: l'analisi termografica mette in evidenza le aree omogenee caratterizzate da elevati valori di flusso evaporativo. La termografia in campo [1] ha consentito di verificare l'andamento e di confermare come sia facile localizzare le aree interessate dai flussi più elevati, anche se gli effetti del degrado non sono ancora visibili. I campioni di legno esaminati in laboratorio mostrano una situazione completamente differente. Non si registrano valori elevati di flusso se non per livelli di umidità del tutto eccezionali e al di fuori del range di imbibizione che si può osservare per materiali di questo genere in posa. I valori più elevati ($>5 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$) paragonabili a quelli dei materiali lapidei, diminuiscono molto rapidamente. Nell'intervallo di umidità definita come maggiormente rischiosa per la conservazione del materiale, il flusso raggiunge valori molto bassi (inferiori a $10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$), che corrispondono ad un gradiente termico di pochi decimi di grado. E' possibile distinguere in modo attendibile le aree interessate da flusso evaporativo quando esso raggiunge valori superiori a $2 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$. Per questo tasso si ha un raffreddamento della superficie di 2 o 3 gradi, in dipendenza della capacità termica del materiale, pertanto il fenomeno dell'evaporazione risulta distinguibile da altri fenomeni termici che concorrono a determinare la distribuzione della temperatura, quali ad esempio disomogeneità ottiche, microdelaminazioni, presenza di sali o parassiti, etc. Nel caso del legno, in particolare, valori superiori al 25% rispetto alla umidità di saturazione non vanno presi in considerazione perché indicano uno stato di degrado già evidente nell'esame a vista. In tabella si riportano indicativamente i valori di flusso evaporativo calcolati a 25° T per i tipi di legno analizzati rispettivamente al 12% e al 25% dell'umidità di saturazione. In questo intervallo il flusso evaporativo causa un raffreddamento di 0.3/0,5 °C che, come detto sopra, può essere provocato anche da altri fenomeni termici concomitanti.

	UR ambientale	W saturazione	Φ al 25% di W _{sat}	Φ al 12% di W _{sat}	Raffreddamento al 25% di W _{sat}
ciliegio1	60	110%	8.00E-06	< 5E-6	0.5 °C
ciliegio2	30	110	8.00E-06	< 5E-6	0.5 °C
faggio	30	70%	< 4E-6	< 4E-6	< 0.5 °C
pino	50	68%	1.00E-06	<1E-6	0.3 °C

Per ottenere la valutazione del flusso evaporativo da misure di temperatura occorre fare riferimento a curve di taratura per i specifici materiali in oggetto, non essendo facilmente valutabili i coefficienti di conduzione e convezione [13].

Valutando in condizioni controllate di laboratorio il flusso evaporativo con metodo ponderale e, simultaneamente, la differenza di temperatura con termocamera, si ottiene l'andamento sperimentale riportato in fig. 3. Il miglior fit delle misure sperimentali consente in tale modo di costruire le rette di taratura da utilizzare in seguito sul campo; l'espressione della retta interpolante riportata sul grafico consente di ottenere una buona stima del termine $h+k^*+p$.

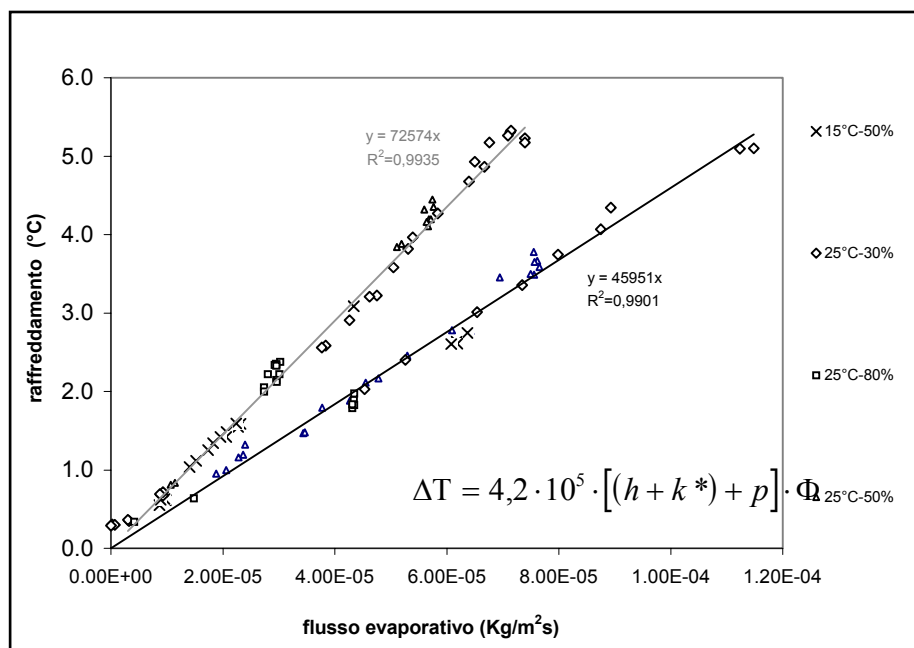


Fig. 3 andamento lineare del raffreddamento in funzione del flusso evaporativo

3. L'approccio attivo

Nell'indagine sulle murature l'approccio attivo permette di ottenere una mappatura attendibile della distribuzione dell'umidità. Infatti la capacità termica di un materiale è fortemente influenzata dal contenuto d'acqua [8]. Il metodo proposto consiste nel paragone tra le curve di riscaldamento in aree a diverso W , sottoposte a un flusso costante di calore. L'approccio attivo è frequentemente utilizzato nelle stagioni fredde e in condizioni ambientali che non favoriscano i processi evaporativi [7,8].

L'acqua che si diffonde nei materiali porosi ne provoca un sensibile cambiamento delle proprietà termiche a causa dell'elevato calore specifico (4-5 volte più alto dei normali materiali da costruzione), dell'elevata conduttività termica (25 volte più dell'aria contenuta nei pori) e ne modifica inoltre la densità. L'inerzia termica di un corpo, dipendente da questi tre fattori è rappresentata da un parametro fisico detto effusività termica:

$$e = \sqrt{k\rho c_p} \quad (6)$$

le cui variazioni possono essere misurate con tecniche di termografia attiva in particolari condizioni. Nell'ipotesi che il modello di trasferimento del calore applicabile possa considerarsi quello del riscaldamento con flusso costante (Q) in un mezzo adiabatico semi-infinito, l'espressione dell'evoluzione della temperatura superficiale T dalla temperatura iniziale T_0 è:

$$T = T_0 + \frac{Q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k\rho c_p}} \quad (7)$$

Dove l'effusività termica come espressa nella (6) rappresenta il coefficiente angolare della radice quadrata del tempo in funzione dell'incremento di temperatura (ΔT).

In questo modo è possibile ottenere valutazioni dell'effusività termica, non tuttavia W che incide in maniera piuttosto complessa sui valori dell'effusività stessa. I valori di W si possono ottenere direttamente solo dalle misure della capacità termica, come dimostrato in letteratura [16, 18, 19].

Il metodo è sensibile alla quantità di calore assorbita e questo può variare a causa della presenza di acqua che altera il coefficiente di assorbimento del materiale imbibito rispetto a quello secco.

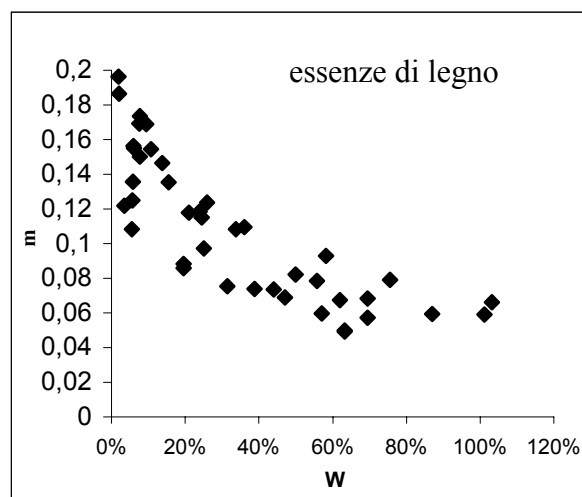
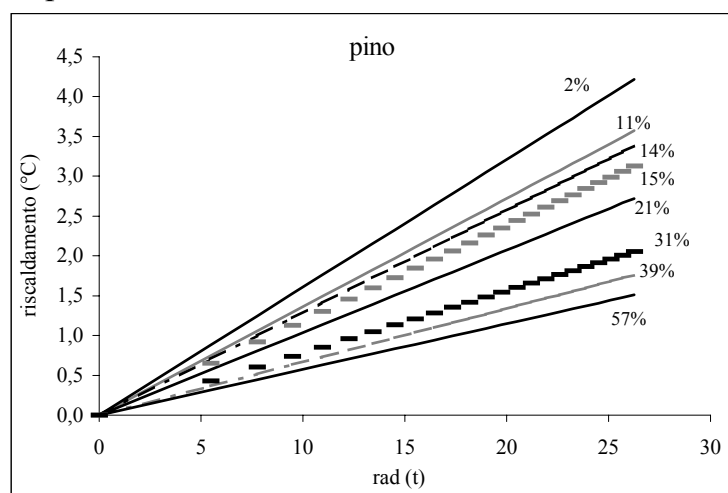


Fig. 4 Riscaldamento su campioni di legno di pino a differenti W (%)

Fig. 5 correlazione tra il coefficiente angolare delle rette e W nei campioni di legno

4. Materiali e metodi

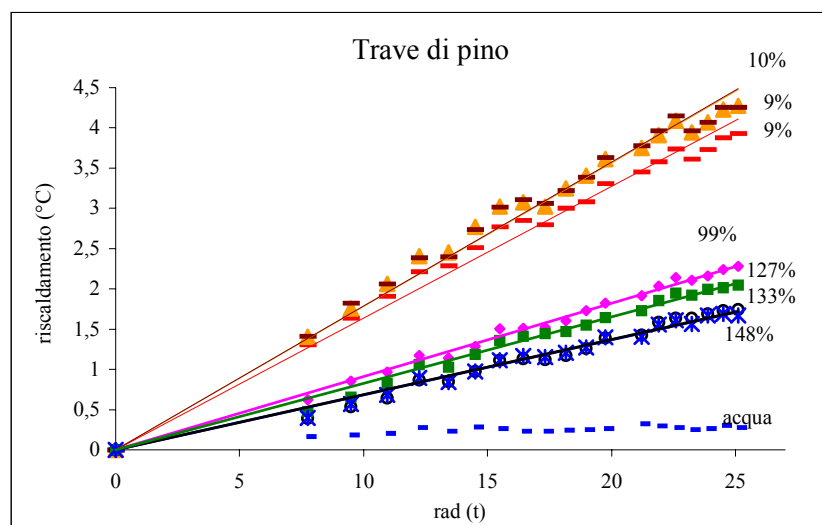
Nei laboratori di Archeometria e del DCSA sono state condotte le prove su carote di mattone (circa 20 cm^2 di superficie) e su 14 campioni di varie essenze di legno: pino, faggio e ciliegio, di dimensioni comprese tra i 50 cm^3 e i 120 cm^3 , di forma parallelepipedica, non trattati, con superfici segate e tagliate a spacco.

Negli esperimenti attivi i campioni sono stati disposti entro un portacampioni posizionato perpendicolarmente ad una lampada (potenza di 250 W), collocata a 1 m dalle superficie, Le prove di approccio passivo⁴ sono state condotte in camera climatica, con 0 lux, velocità dell'aria 0.1 m/s, temperatura dell'aria 24°C ($\pm 0.5^\circ$) e UR 50% ($\pm 5\%$). I provini sono stati isolati con un membrana impermeabile sui tutti i lati tranne quello ispezionato in termografia e simultaneamente pesati con bilancia (precisione 10^{-4} g). Alcuni provini secchi delle stesse dimensioni ed emissività sono stati aggiunti per tarare lo scambio di calore all'interno della camera climatica. I valori di umidità contenuta desiderati sono stati ottenuti, per i campioni di materiali edili, con imbibizione in acqua distillata per 48 ore, per i campioni di legno per immersione in acqua per un periodo variabile tra i 2 ai 20 giorni.

Al fine di verificare l'applicabilità del metodo su strutture in opera, sono state condotte prove su due travi di pino non squadrate, di 12 cm di diametro e 100 cm di lunghezza, e di 20 cm di diametro per 21 cm di lunghezza. Si tratta di parti di strutture ottocentesche e quindi sono assimilabili al materiale che si può frequentemente rinvenire nei cantieri dell'edilizia storica sia per colore che per stato di conservazione. Il riscaldamento di 250 W per irraggiamento. La sequenza termografica è stata ripresa con frequenza di

⁴ L'esperimento è stato effettuato nel laboratorio di Archeometria, IFGA, Università degli studi di Milano

acquisizione di 30 secondi, per 10 minuti. La temperatura e l'UR dell'ambiente sono state mantenute tra i 19-21°C e 28-35%.



Poichè nella fase di applicazione delle procedure attive la superficie curva influenza la misura della temperatura, si sono delimitate sul campione strisce equidistanti comparabili, poichè selezionate alla stessa distanza dall'obiettivo della termocamera.

Fig. 6 Risultati delle misure effettuate su una trave di pino ottocentesca

Conclusioni

Il metodo attivo diventa significativo quando il contenuto di acqua raggiunge concentrazioni rilevanti rispetto al peso del campione secco. Il metodo funziona particolarmente bene sul legno, e spiccatamente per alti contenuti di umidità. Per valori superiori al 30% l'incremento di umidità è strettamente correlato con l'aumento di effusività termica (vedi grafico fig. 5). Tuttavia, rimanendo nei limiti dell'analisi, imposti dal corrente uso nella diagnostica, il metodo consente comunque di distinguere le aree con differenti contenuti di umidità. Ciò nonostante la sensibilità del metodo rimane inferiore a quello delle tecniche normalizzate (prove gravimetriche e conduttività elettrica). Sono attualmente in studio le valutazioni quantitative della sensibilità del metodo nel range di interesse per gli esperti del settore, e le variazioni che dipendono dal tipo di specie legnosa esaminata e dalla sezione anatomica del tronco che espone la superficie da indagare e che determina un diverso comportamento tra alburno e durame.

Il metodo passivo si è confermato come particolarmente idoneo all'identificazione di aree umide in materiali edilizi, quali mattoni ed intonaci, caratterizzati da forti flussi evaporativi.

Bibliografia

- [1] N. Ludwig and E. Rosina - *Moisture Detection Through Thermographic Measurements Of Transpiration*, Thermosense XIX SPIE, Proc. 3056, Orlando 1997
- [2] N. Ludwig, M. Milazzo and G. Poldi, *Misura di umidità superficiale nelle murature mediante termografia*, Proc. Of The National Conference on Non destructive test, Padova 1997
- [3] G. Giordano, *Tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano 1993
- [4] C. Skaar, *Wood-Water Relations*, Springer-Verlag, New York (NY) 1988
- [5] A. Wyckhuyse, X. Maldague, *A study of wood inspection by infrared thermography, part I: Wood pole inspection by infrared thermography*, in *Research in Nondestructive*

- Evaluation*, n 13 2001, e degli stessi autori *A study of wood inspection by infrared thermography, part II: Wood pole inspection by infrared thermography*, in *Research in NonDestructive Evaluation*, n 14 2001
- [6] 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
- [7] K. Murata, T.Sadoh, *Heat Absorption And Transfer In Softwoods And Their Knot Surfaces*, in *Mokuzai Gakkaishi* volume 40, n 11, Kyoto University 1994
- [8] Y. Xu, S. Okumura, M. Noguchi, *Thermographic Detection Of Starved [sic] Joints Of Wood*, in *Mokuzai Gakkaishi* volume 39 n 1, Kyoto University 1993
- [9] T. Tanaka, *Preparatory Investigation for Thermographic Detection of Biodeteriorated Location in Wood*, Pacific Timber Engineering Conference, 1994
- [10] S.A. Ljungberg, *Infrared survey of fifty buildings constructed during 100 years-thermal performances and damage conditions*, Thermosense XVII-An International Conference in thermal sensing and imaging, Orlando 1995
- [11] E. Rosina, E. Robison, *Applying Infrared Thermography to Historic Wood-Framed Buildings in North America*, APT Bulletin, volume 33 n 4, Mount Ida Press, Albany (NY) 2002
- [12] E.Rosina, E.Grinzato *Infrared and Thermal Testing for Conservation of Historic Buildings*, in *Materials Evaluation, ASNT Journal*, Agosto 2001 Columbus (OH) USA
- [13] 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
- [14] E. Rosina, N. Ludwig and L. Rosi, *Optimal Conditions to Detect Moisture in Ancient Buildings. Study Cases from Northern Italy*, Thermosense XX SPIE Proc.3361, Orlando 1998
- [15] 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
- [16] N. Ludwig, E. Rosina, *Active and Passive Thermography to detect Moisture in Building Materials*, in *Proceedings of V AITA, CNR-IROE*, Venezia Settembre 1999
- [17] E. Rosina, G. Roche, *Measures Planning To Prevent Moisture Damages On Historical Buildings*, Quarry-Laboratory-Monument International Congress, Pavia 2000
- [18] 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
- [19] X. Maldague, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer-Verlag, London 1993