

Valutazione del contenuto d'acqua in una trave antica

V. Redaelli, N. Ludwig, S. Caglio, M. Gargano, M. Monzani

Lo scopo dell'esperienza è la valutazione del contenuto d'acqua con metodo termografico non distruttivo. È noto che in un materiale il contenuto d'acqua influenza fortemente il calore specifico (C_s), la conduttività termica (K) e la densità (r) del materiale stesso e il legame tra queste quantità è espresso dalle relazioni:

$$C_s = \frac{C_{sc} + WC_{sw}}{1+W} \quad K = \frac{K_c + WK_w}{1+W} \quad r = r_c(1+W) \quad (1.1)$$

dove con c a pedice si intende riferito al materiale e con w all'acqua; il contenuto d'acqua è invece definito come:

$$W = \frac{m_{umida} - m_{secca}}{m_{secca}}$$

Definendo l'effusività termica, parametro che rappresenta l'inerzia termica di un corpo, come:

$$e = \sqrt{K \cdot C_s \cdot r} \quad (1.2)$$

possiamo scrivere la forma dell'evoluzione temporale della temperatura superficiale

$$T - T_0 = m\sqrt{t} \quad \text{con} \quad m = \frac{2Q}{e\sqrt{p}} \quad (1.3)$$

valida nell'ipotesi considerata che il trasferimento di calore ad una superficie di mezzo seminfinito alla temperatura iniziale T_0 , avvenga a flusso Q costante.

Vista la linearità¹ di (1.3) e la dipendenza di m dal contenuto d'acqua, è del tutto plausibile pensare di determinare tale contenuto da indagini di tipo termografico



Figura I.1.a Fase di acquisizione immagini

I.1.1. Procedura sperimentale

Prima di applicare il metodo termovisivo una trave antica abbiamo verificato la validità del metodo su campioni di legno di pino di forma semplice, che si è provveduto ad imbibire immergendoli completamente in acqua distillata per alcuni giorni, periodo che è stato diversificato allo scopo di far raggiungere ai vari campioni diversi contenuti d'acqua. Abbiamo quindi pesato, tramite bilancia di

¹ Rispetto alla radice del tempo

precisione², ed eseguito i rilievi termografici, rivolgendo verso la termocamera³ il lato più regolare del campione, al fine di ridurre fattori d'errore causati dall'eventuale geometria irregolare della superficie del legno.

Come si vede dalla **Figura I.1.a**, nel campo visivo della termocamera sono stati posti i due campioni imbibiti in analisi, un campione secco e un recipiente contenete dell'acqua (utilizzati come riferimento) tutti riscaldati con una lampada da 250 W.

Tutte le riprese sono state eseguite verticalmente ad una distanza di 71 cm per circa 10 minuti ad intervalli di 30 secondi; per evitare problemi dovuti alla riflessione, la lampada è stata schermata per circa 2 secondi ad ogni acquisizione. Successivamente i campioni sono stati seccati su una piastra alla temperatura di 80°C per diverse ore e nuovamente pesati, così da determinare le percentuali di acqua (*W*) in essi contenute. Data la scarsa evaporazione dei campioni non è stato necessario sigillarli.

In tabella sono riportati i valori per i diversi campioni.

Campioni	Peso Secco (g)	Peso Umido (g)	W (%)
A I	18,073	38,512	113,09
B I	32,682	57,133	74,82
A II	18,073	38,001	110,26
B II	32,682	56,586	73,14
A III	18,073	28,592	58,20
B III	32,682	46,181	41,31
E I	27,482	37,428	36,19
D I	19,251	25,586	32,91
E II	27,482	35,266	28,32
D II	19,251	23,935	24,33

Le lettere (A, B, D, E) si riferiscono ai campioni, mentre i numeri romani alle serie d'acquisizione fatte a distanza di diverse ore l'una dall'altra per ottenere differenti percentuali d'imbibizione.

Condizioni Sperimentali:	Temperatura ambiente: 24.6°C	Umidità relativa: 37%
---------------------------------	------------------------------	-----------------------

I.1.2. Analisi dati

Dalle immagini acquisite si sono estratte le rette di riscaldamento in funzione della radice quadrata del tempo (secondo la (1.3)) così da ricavare, per mezzo di una semplice regressione lineare, i coefficienti angolari *m* associati alle diverse concentrazioni d'acqua.

Le curve relative al campione secco e all'acqua sono state utilizzate per una verifica immediata della bontà dei dati sperimentali: se infatti le rette relative ai campioni imbibiti si fossero poste al di sopra di quella del campione secco o al di sotto di quella dell'acqua i dati sarebbero stati rigettati perché incongruenti con le previsioni teoriche; inoltre se la pendenza della curva di riscaldamento dell'acqua il cui comportamento nell'IR si può considerare come quello di un corpo nero ($\epsilon_{H_2O} = 0.96$), fosse risultata troppo accentuata si sarebbero dovute modificare la metodologia d'acquisizione o la disposizione strumentale per ridurre l'errore sistematico.

² Bilancia di precisione, sensibilità: 0.1 mg.

³ Termocamera shortwave (range: 3 - 5 μm)

Poiché la quantità di calore Q effettivamente assorbita dipende drasticamente dalla presenza dell'acqua nei campioni si è resa necessaria la correzione del valore di m in

$$m' = \frac{m}{e(W)} \quad (1.4)$$

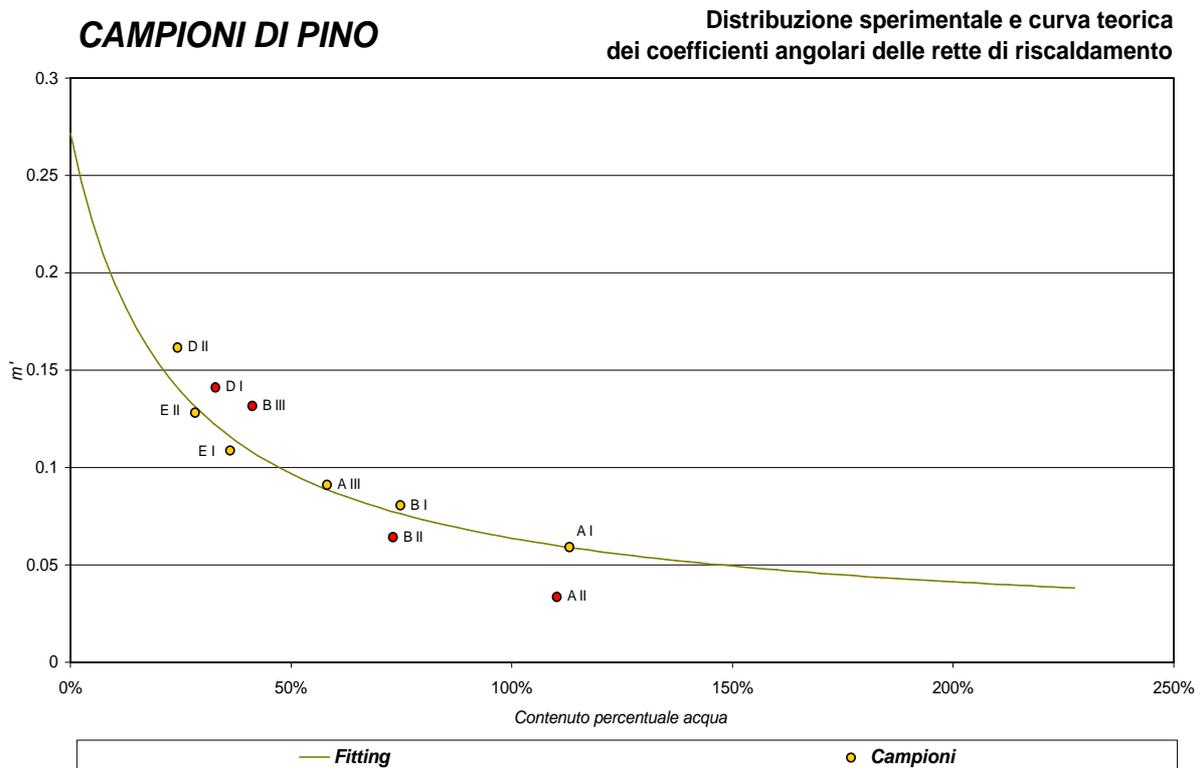
dove con $e(W)$ si è indicato il coefficiente di remissività del campione imbibito. L'andamento di e in funzione di W è di tipo lineare ed è stato ricavato sperimentalmente da analisi precedenti a quelle di questo lavoro di laboratorio.

Esplicitando la forma dell'effusività termica in funzione del contenuto d'acqua secondo le (1.1) si ottiene:

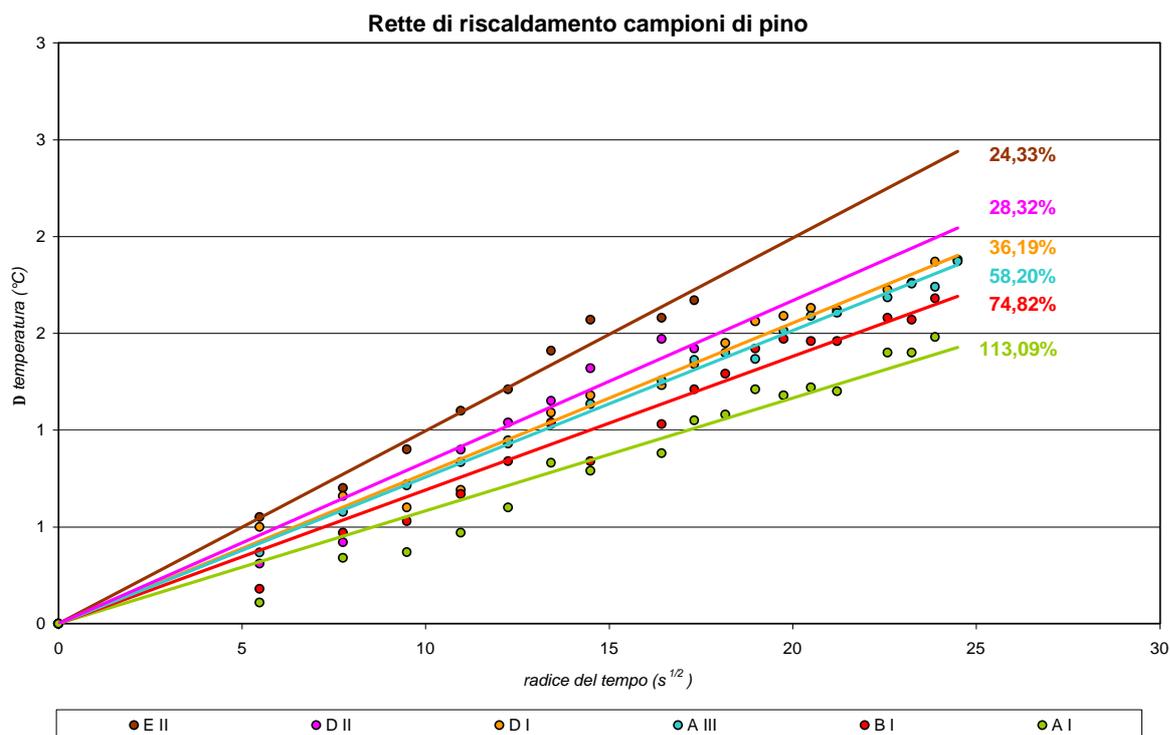
$$e = \frac{1}{1+W} \sqrt{(K_w r_c C_{s_w})W^3 + (2K_w r_c C_{s_c} + K_c r_c C_{s_w})W^2 + (K_w r_c C_{s_c} + K_c r_c C_{s_c} + K_c r_c C_{s_w})W + K_c r_c C_{s_c}} \quad (1.5)$$

che inserito nella seconda delle (1.3) permette un controllo teorico sulla distribuzione sperimentale di tali coefficienti angolari.

Vengono di seguito riportati i grafici della distribuzione sperimentale di m' in funzione di W e le rette di riscaldamento dei campioni distinte per concentrazione percentuale di contenuto d'acqua.



*I punti denotati in rosso corrispondono a valori di m' incongruenti con la curva teorica di fit.
I relativi campioni sono stati pertanto omissi dal grafico delle rette di riscaldamento.
Le lettere (A, B, D, E) si riferiscono ai campioni, mentre i numeri romani alle serie d'acquisizione
fatte a distanza di diverse ore l'una dall'altra per ottenere differenti percentuali d'imbibizione.*



I.1.3. Applicabilità del metodo a reperti di edilizia storica

Visti i risultati positivi ottenuti sui campioni, si è passati all'applicazione del metodo termografico su di una trave recuperata dalla demolizione di una struttura ottocentesca che si può considerare per colore e stato di conservazione reperto di edilizia storica. Come nel caso dei campioni la prima operazione è stata quella di imbibire la trave con acqua; diversamente dal caso precedente è stata immersa per molti giorni solo una parte della trave nell'acqua in modo da ottenere, tramite risalita capillare nelle fibre del legno, imbibizione non omogenea delle parti che poi si sarebbero esaminate.

Si è successivamente passati all'acquisizione delle immagini termografiche: data l'estensione della trave si sono suddivise le acquisizioni in 3 serie (definite successivamente *trave 1*, *trave 2* e *trave 3*) con l'accorgimento di mantenere le medesime condizioni sperimentali; poiché anche la superficie curva determina una variazione dell'assorbimento della radiazione da parte della trave, sono state identificate zone confrontabili perché poste alla medesima distanza dall'obiettivo e dalla fonte di riscaldamento.

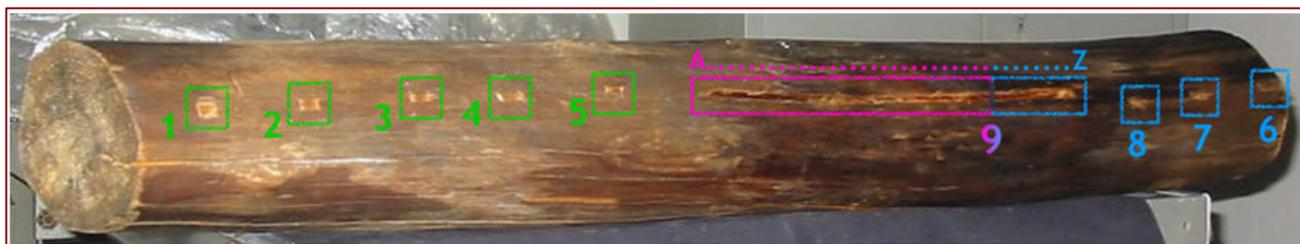


Figura I.1.b Fotografia della trave antica esaminata.
Sono messe in evidenza le zone campionate nelle tre serie d'acquisizione

Si è utilizzata la termocamera shortwave⁴ posta alla distanza di 1.25 m e le immagini sono state prese ogni 30 secondi per un totale di circa 15 minuti di riscaldamento. La lampada distava dalla trave di 1.37 m.

Per determinare le concentrazioni percentuali dei contenuti d'acqua, si sono prelevate sezioni della parte superficiale della trave, subito dopo il termine delle operazioni d'acquisizione, ed immediatamente pesati così da avere il "peso umido"; si sono quindi seccate e nuovamente pesate le parti campionate per avere quello "secco".

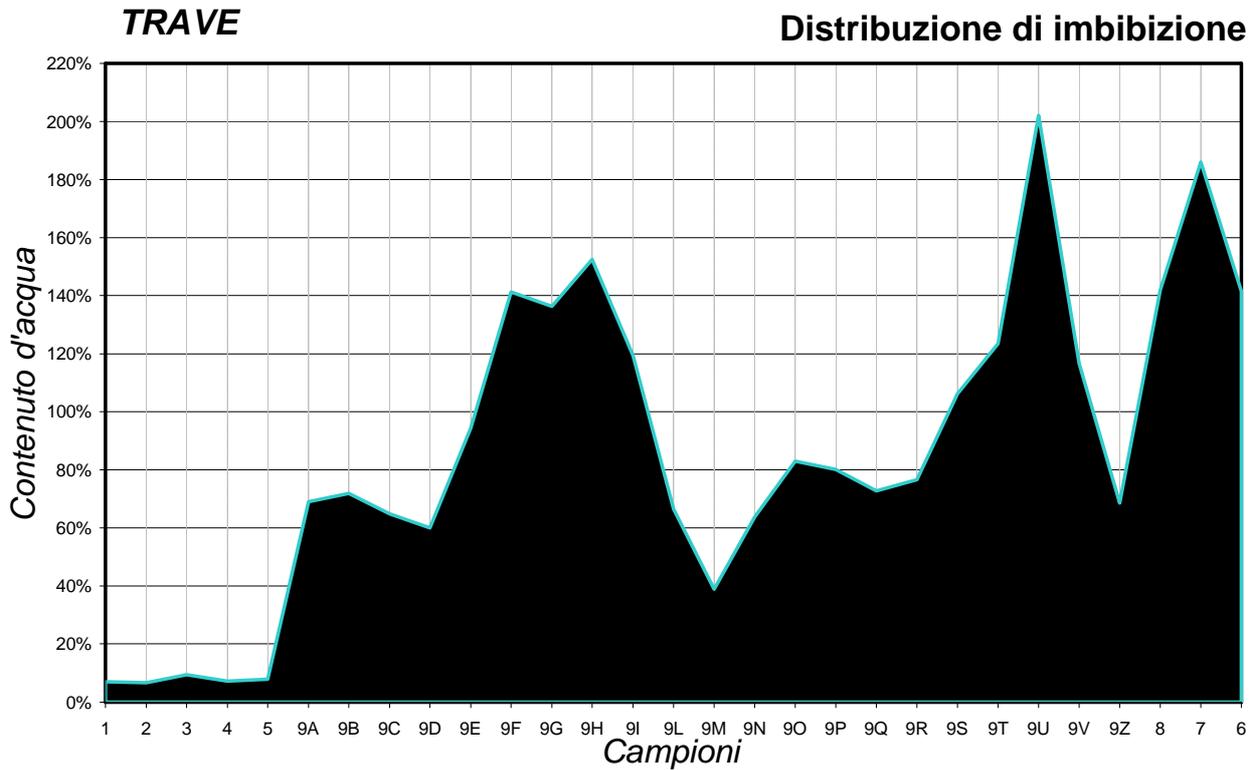
In tabella sono riportati i valori ottenuti.

Campioni	Peso Secco (g)	Peso Umido (g)	W (%)
1	0.0439	0.0470	7.06%
2	0.0470	0.0501	6.60%
3	0.0330	0.0361	9.39%
4	0.0304	0.0326	7.24%
5	0.0241	0.0260	7.88%
9A	0.0997	0.1685	69.01%
9B	0.0572	0.0983	71.85%
9C	0.0435	0.0717	64.83%
9D	0.0523	0.0837	60.04%
9E	0.0449	0.0873	94.43%
9F	0.0400	0.0965	141.25%
9G	0.0323	0.0763	136.22%
9H	0.0436	0.1101	152.52%
9I	0.0886	0.1944	119.41%
9L	0.1134	0.1888	66.49%
9M	0.1405	0.1952	38.93%
9N	0.1317	0.2157	63.78%
9O	0.0997	0.1825	83.05%
9P	0.0893	0.1608	80.07%
9Q	0.0345	0.0596	72.75%
9R	0.0368	0.0650	76.63%
9S	0.0389	0.0802	106.17%
9T	0.0507	0.1133	123.47%
9U	0.0140	0.0423	202.14%
9V	0.0211	0.0457	116.59%
9Z	0.0150	0.0253	68.67%
8	0.0401	0.0970	141.90%
7	0.0186	0.0532	186.02%
6	0.0480	0.1159	141.46%

Sono stati evidenziati in colore diverso i campionamenti relativi alle 3 serie di acquisizione; *trave 1*, *trave 2*, *trave 3*.

Si noti la completa disomogeneità nell'assorbimento da parte delle fibre del legno (messa in particolare evidenza nel grafico successivo); le zone che sono state immerse (**Figura I.1.b** parte destra; campioni 6, 7, 8, 9Z, 9V) risultano talvolta con una concentrazione d'acqua inferiore o simile a zone centrali della trave (es. 9F, 9G, 9H, 9I).

⁴ Termocamera shortwave (range: 3 - 5 μm)

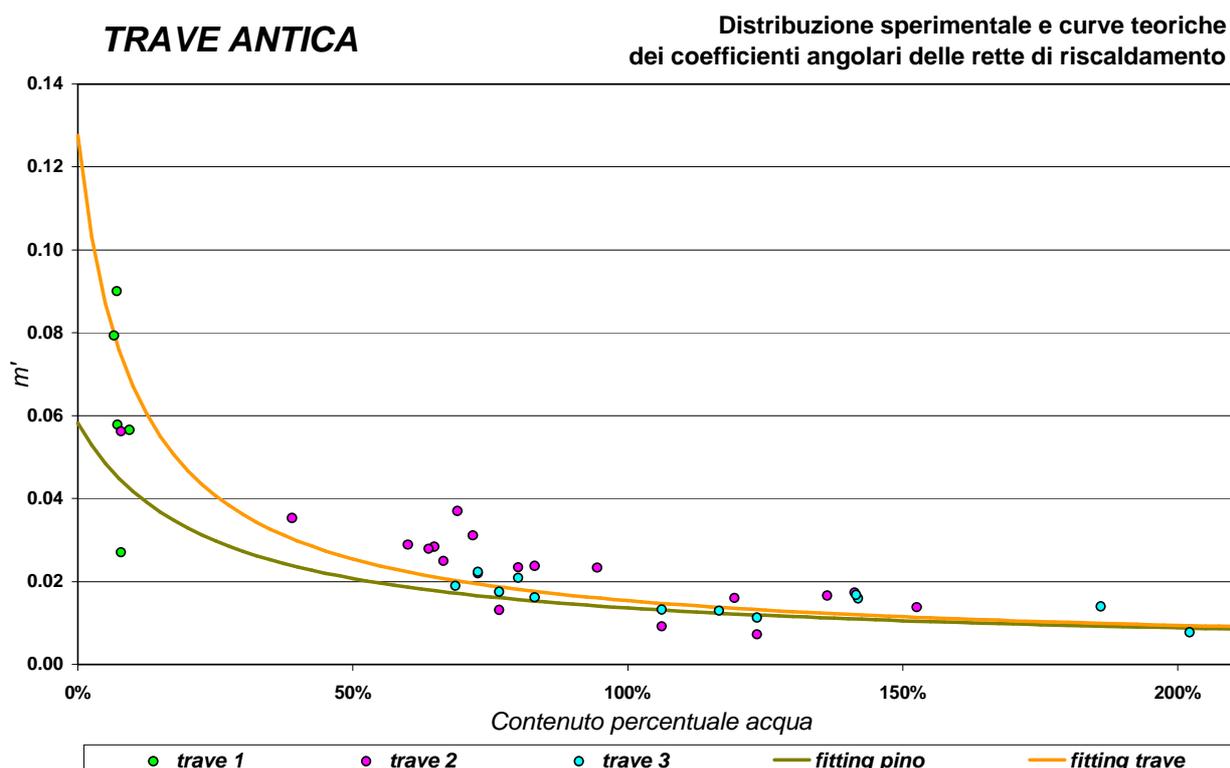


Condizioni Sperimentali:	Temperatura ambiente: 22.4°C	Umidità relativa: 26.8%
---------------------------------	------------------------------	-------------------------

Come nel caso dei campioni di pino si sono ricavate dalle immagini termografiche le rette di riscaldamento in funzione della radice del tempo e quindi i valori di m secondo le (1.3). Tali valori, corretti rispetto all'emissività termica $\epsilon(W)$, sono stati confrontati con la curva teorica (fitting) prevista dalla (1.5) per valori di r , C_s e K riferiti sia ad essenza di pino che alla trave.

In tabella sono riportati tali valori utilizzati, estratti dalla letteratura.

	K W/(mK)	r Kg/m ³	C_s J/(KgK)
Trave	0.04	400	1100
Pino	0.12	510	1380



Si noti come la distribuzione sperimentale, pur mantenendo un andamento simile alla curva teorica, non risulti essere ad essa omogenea in particolare per valori di W tra 50% e 100%.

I.1.4. Conclusioni

Dalle precedenti analisi e considerazioni si può concludere che il metodo termografico per la valutazione della concentrazione di acqua contenuta in materiali lignei possa essere applicato con successo solo sotto particolari condizioni; infatti la coerenza dei risultati, ottenuti per i campioni di pino, è da attribuire in larga misura alla semplicità della geometria (campioni squadri e con superfici piane rivolte alla termocamera), all'omogeneità del materiale e dell'imbibizione (tutto il campione aveva il medesimo contenuto d'acqua). Invece per quello che concerne la trave, ed in generale campioni di edilizia storica (§ 1.2), queste condizioni non sono soddisfatte: lo stato di degrado determina una grande disomogeneità nelle fibre del legno, e quindi dell'assorbimento dell'acqua, che influenza considerevolmente la quantità di calore assorbita anche tra zone prossime, zone che si influenzano a loro volta falsando notevolmente i dati sulle temperature rilevate dalla termocamera e, di conseguenza, la valutazione dei coefficienti angolari delle rette di riscaldamento risulta di scarsa utilità pratica nella valutazione dello stato di degrado causata dalla presenza di acqua.