



Ann. Mus. civ. Rovereto	Sez.: Arch., St., Sc. nat.	Vol. 23 (2007)	103-125	2008
-------------------------	----------------------------	----------------	---------	------

ROSSANO ALBATICI (\*) & ARNALDO TONELLI (\*\*)

## VERIFICA SPERIMENTALE IN SITU, CON ANALISI TERMOGRAFICHE E ALGORITMI DI CALCOLO, DELLA TRASMITTANZA TERMICA DI UN ELEMENTO COSTRUTTIVO <sup>(1)</sup>

**Abstract** - ROSSANO ALBATICI & ARNALDO TONELLI - On site experimental measurement of a building element thermal transmission by means of thermovision techniques and computational algorithms.

In the framework of a training course on buildings energy saving promoted by Professional Orders and sponsored by the Autonomous Province of Trento in collaboration with the University of Trento, some lectures have been addressed to the acquisition of punctual data and imagery field rendition of outside wall thermal transmittance. The punctual measurements performed using thermal fluxmeters requires at least three days of data acquisitions with the rate of one set every 15 minutes and a series of operational warnings. By means of thermovision techniques, since the value of emissivity is acquired, according to a method presented in the lecture itself, the actual temperature field is achievable. Thus, known the environmental parameters, air speed, room temperature and so on, the value of wall thermal transmittance is individuated. In the lecture the situation of thermal transitory is also analyzed.

**Key words:** Thermal transmission, Thermography, Fluxmeters.

**Riassunto** - ROSSANO ALBATICI & ARNALDO TONELLI - Verifica sperimentale in situ, con analisi termografiche e algoritmi di calcolo, della trasmittanza termica di un elemento costruttivo.

(\*) Ricercatore di Architettura Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Trento | rossano.albatici@unitn.it

(\*\*) Libero professionista, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Trento | arnaldo.tonelli@arnaldotonelli.it

<sup>(1)</sup> Dalle lezioni tenute nell'autunno 2007 all'interno del corso di formazione e aggiornamento in tema di risparmio energetico degli edifici, organizzato dall'Ordine degli Ingegneri di Trento e dal Collegio dei Periti Industriali e dei Periti Industriali Laureati di Trento in collaborazione e con il supporto economico della Provincia Autonoma di Trento.



Nell'ambito di un corso di formazione e aggiornamento in tema di risparmio energetico degli edifici promosso da vari Ordini Professionali e supportato dalla Provincia Autonoma di Trento con la collaborazione dell'Università degli Studi di Trento, alcune lezioni sono state dedicate alle misure puntuali e alle valutazioni di campo della trasmittanza termica. Le misure puntuali attuate con termoflussimetri richiedono almeno tre giorni con l'acquisizione di dati ogni 15 minuti e una serie di precauzioni per una appropriata applicazione della tecnica. Con la termografia, individuato il valore di emissività della superficie rilevata con una metodologia che viene descritta, si ottiene il campo della temperatura di contatto. Con questa, rilevati i valori di temperatura e velocità dell'aria, come viene presentato, si individua il valore di trasmittanza termica. Viene trattata anche la situazione di regime transitorio.

**Parole chiave:** Trasmittanza termica, Termografia, Termoflussimetri.

#### 1. NOTA SUL VALORE DI TRASMITTANZA TERMICA $U$ [ $W/m^2K$ ] DI CALCOLO E QUELLO RILEVATO IN SITO

La verifica in sito del valore di trasmittanza termica  $U$  [ $W/m^2K$ ] di un componente edilizio risente fortemente di alcuni fattori sinteticamente raggruppabili in tre categorie:

- a. condizioni del sito:
  - condizioni climatiche dell'istante in cui si fanno le misurazioni o del periodo temporale immediatamente precedente (con riferimento, in particolare, alla velocità del vento, all'irraggiamento solare, alla pioggia);
  - situazione climatica media del sito, con particolare riferimento all'umidità del luogo, che può modificare il comportamento dei materiali da costruzione utilizzati;
- b. condizioni dell'edificio:
  - invecchiamento dei materiali utilizzati;
  - corretto posizionamento dei materiali in fase di costruzione;
- c. condizioni di utilizzo:
  - gestione/conduzione dell'edificio da parte degli utenti (riscaldamento/raffrescamento e apertura/chiusura serramenti);
  - eventuali interventi di manutenzione effettuati (o no).

Per quanto riguarda la ripresa termografica, vi sono inoltre delle condizioni che possono influire sulla misura effettuata con la termocamera, fra cui si ricorda il posizionamento del componente investigato con riferimento alla sua esposizione (irraggiamento solare diretto), alla morfologia del sito (presenza di specchi d'acqua, emissività delle superfici vicine, presenza di schermature naturali come le alberature, presenza di superfici fortemente irraggianti come pendii a ridosso), al posizionamento rispetto agli altri elementi costruttivi (presenza di ponti termici, di elementi strutturali quali travi o pilastri nelle vicinanze, di correlazioni con altri elementi portanti come pareti interne, di elementi perturbanti esterni come aggetti).



È noto inoltre che il coefficiente  $\lambda$  (conduttività termica) dei materiali da considerare in fase di calcolo non è quello dichiarato dal produttore, ma un valore corretto che tiene conto delle reali condizioni di impiego degli elementi e della loro posa in opera, che può non essere svolta in maniera ottimale. La stessa norma UNI 10351:2004 precisa che gli scostamenti fra i valori misurati in laboratorio su provini e quelli riscontrabili nella produzione corrente variano fra il 5 e il 50%. La norma fornisce quindi un valore di  $\lambda$  corretto che tiene conto del contenuto percentuale di umidità in condizioni medie di esercizio, dell'invecchiamento, del costipamento dei materiali sfusi, della manipolazione, dell'installazione eseguita a regola d'arte e delle tolleranze sugli spessori. Il coefficiente di maggiorazione è molto variabile (dal 10 al 50%, a volte addirittura 100%) e dipende dal tipo di materiale.

È quindi ovvio che la misura del valore di trasmittanza in opera, che dipende fortemente soprattutto dal valore di  $\lambda$  dei vari materiali utilizzati, possa variare nella stessa misura.

Per quanto riguarda la tecnica della termografia all'infrarosso, essa è regolata dalla norma UNI 9252:1988 che recita testualmente: «La presente norma descrive un metodo di prova *qualitativo*, basato sulla termografia all'infrarosso, per rilevare e analizzare le irregolarità termiche nell'involucro dell'edificio... La presente norma non si applica ai fini della determinazione del livello di isolamento termico e di tenuta all'aria di un edificio. Per tali determinazioni sono richieste altre metodologie di indagine». Tuttavia, se la ripresa termografica viene effettuata da un operatore con competenze specifiche di termotecnica e fisica delle costruzioni e in maniera appropriata seguendo le indicazioni fornite di seguito, il risultato dell'indagine può essere significativo e complementare a quello effettuato, per esempio, col metodo dei termoflussimetri che viene discusso nel successivo capitolo 3.

È importante sottolineare che vi è inoltre un progetto di norma Europeo, la prEN15203, che specifica e descrive nel dettaglio i metodi da utilizzarsi per indagini di campo, fra cui è esplicitamente incluso il metodo dei termoflussimetri secondo la ISO 9869: 1994 di seguito citata.

## 2. L'ANEMOMETRO A FILO CALDO

Come viene descritto in seguito (capitolo 4), ai fini della determinazione della trasmittanza termica in sito di un elemento edilizio col metodo della termografia all'infrarosso, è importante conoscere con precisione la velocità dell'aria ambiente.

Le modalità per la misura della velocità dell'aria in ambienti confinati sono definite dalla norma UNI EN ISO 7726:2002. In particolare, la norma dice che



Fig. 1 - Anemometro a filo caldo.



Fig. 2 - Particolare del sensore di misura dell'anemometro.

è difficile misurare la velocità dell'aria in maniera accurata, in quanto tipicamente il flusso è turbolento, ossia la velocità dell'aria varia in maniera casuale e così la sua direzione.

Esistono tuttavia dei sensori appositamente progettati per la misura puntuale della velocità dell'aria in ambienti interni detti «anemometri a filo caldo». Il cuore del sensore è un filo, tipicamente di tungsteno o platino, lungo non più di 5 mm (la lunghezza ha una certa influenza sulla misura puntuale della velocità) e con un diametro di 5  $\mu\text{m}$ . Il sensore è ancorato fra due supporti a forma di uncino tramite una saldatura elettrica. Il filo caldo è percorso da una corrente elettrica  $I$  dovuta a una differenza di potenziale  $\Delta V$ , e quindi ha una certa resistenza  $R$  (dipendente anche dalla resistività del materiale e dalle sue caratteristiche geometriche, lunghezza e sezione). Il funzionamento della sonda si basa sul fatto che quando il fluido lambisce il sensore, esso lo raffredda per convezione modificando la resistenza del filamento e quindi, a parità di differenza di potenziale  $\Delta V$ , la corrente elettrica percorsa. Tale variazione viene analizzata dal sistema di misura che risale alla velocità del fluido che ha causato quella variazione di corrente.

L'anemometro può essere utilizzato anche nei pressi di strutture murarie per rilevare istantaneamente la velocità dell'aria vicino alla superficie. Ovviamente, essendo la velocità e la direzione dell'aria esterna ancora più variabile di quella dell'ambiente confinato, la lettura deve essere il più possibile istantanea o



quanto meno mediata fra due letture successive (dipendenti dal tempo di risposta dello strumento, generalmente di 3 secondi).

### 3. IL METODO DEI TERMOFLUSSIMETRI

#### 3.1 *Precisazioni e limiti*

La rilevazione in opera del flusso termico che attraversa l'involucro dell'edificio e quindi la trasmittanza termica  $U$  degli elementi di frontiera è un'operazione complessa il cui scopo è quello di fornire con buona approssimazione il valore cercato, anche in base alle reali condizioni di impiego della struttura.

Prima di descrivere il metodo di prova, è importante ricordare che:

1. il flusso termico all'interno di un elemento strutturale non è monodirezionale ma ha componenti diverse nelle tre direzioni dello spazio;
2. generalmente, l'elemento considerato, ossia una chiusura verticale o una chiusura orizzontale, non è piano e isolato, ma è dotato di una forma tridimensionale anche complessa, è composito e pertanto ha delle specifiche interazioni con gli elementi adiacenti (sia a contatto sia no);
3. le condizioni al contorno non sono stazionarie ma variano in continuazione (rilevazioni nel transitorio); in particolare hanno influenza le disomogeneità e le variazioni di temperatura, umidità, velocità dell'aria;
4. le condizioni al contorno non sono imposte e controllate, ma indipendenti dal misuratore (condizioni meteorologiche e utilizzo dell'edificio da parte dell'utente);
5. l'elemento non è secco e isolato ma vi possono essere condizioni anomale quali fenomeni di evaporazione o di condensa (dovuti sia all'alternarsi giorno/notte sia a cambiamenti improvvisi della situazione meteorologica come piogge) oppure condizioni anomale di irraggiamento;
6. dato che i fenomeni avvengono in regime transitorio, la rilevazione del valore di  $U$  a cui si tende è una rilevazione «media» e pertanto abbisogna di un opportuno periodo di osservazione (rilevazione non istantanea).

In particolare, nel caso di un elemento di un involucro edilizio questo vuol dire che:

1. la rilevazione deve essere effettuata su una porzione di parete il più possibile «media», ossia equidistante da altri elementi costruttivi (quali porte, finestre, nodi d'angolo, nodi a tre vie ecc.) e rappresentativa di tutta la parete nel suo complesso; un rilievo termografico preventivo è utile per individuare eventuali anomalie e disomogeneità (esempio Fig. 8);
2. la rilevazione deve essere effettuata evitando la corrispondenza con ponti termici e le loro zone di influenza;

3. la rilevazione deve essere protratta per un intervallo di tempo ragionevole (minimo 72h) e in condizioni di presenza di flusso termico (la differenza di temperatura fra la superficie interna ed esterna non dovrebbe mai scendere sotto i 10-15°C);
4. la parete da prendere in considerazione non dovrebbe essere soggetta a irraggiamento solare diretto, pioggia o neve durante il periodo di rilevazione (in questo senso è indicata la parete nord o il posizionamento di schermi protettivi).

### 3.2 Le basi teoriche

Il metodo di rilevazione della trasmittanza termica di un elemento opaco con i termoflussimetri si basa sulla relazione di Fourier per cui considerando la sola conduzione termica, si ha che:

$$dQ/dA = -\lambda \delta T/\delta x$$

- dove:
- Q = flusso termico nell'unità di tempo [W]
  - A = area attraversata dal flusso termico [m<sup>2</sup>]
  - $\lambda$  = coefficiente di conducibilità termica [W/mK]
  - T = temperatura [K]
  - x = direzione del flusso termico [m]

In regime stazionario, per flusso termico monodirezionale e materiale omogeneo si ha che:

$$Q = -\lambda A (T_2 - T_1)/L$$

- dove:
- Q = flusso termico passante nell'elemento durante l'unità di tempo [W]
  - $\lambda$  = coefficiente di conducibilità termica [W/mK]
  - A = area dell'elemento perpendicolare al flusso termico [m<sup>2</sup>]
  - T<sub>2</sub> = temperatura della superficie «fredda» [K]
  - T<sub>1</sub> = temperatura della superficie «calda» [K]
  - L = spessore dell'elemento

Generalmente, gli elementi dell'involucro edilizio non sono omogenei ma composti (corpo multiplo), quindi la relazione precedente può essere riscritta come:

$$\Delta T_i = Q/A s_i/\lambda_i$$

- dove:
- $\Delta T_i$  = differenza di temperatura fra le superfici dell'i-esimo strato [K]
  - s<sub>i</sub> = spessore dell'i-esimo strato
  - $\lambda_i$  = conducibilità termica dell'i-esimo strato

La differenza di temperatura fra la superficie «fredda» (esterna) e quella «calda» (interna) è pertanto la somma delle varie differenze parziali:

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = \Sigma \Delta T_i = Q/A \Sigma s_i/\lambda_i$$

da cui

$$Q = 1/(\Sigma s_i/\lambda_i) A (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$$

con  $C = 1/(\Sigma s_i/\lambda_i) =$  conduttanza termica [W/m<sup>2</sup>K]

La trasmittanza termica è sostanzialmente la conduttanza termica quando si tengono in considerazione anche gli scambi termici superficiali fra parete e aria ambiente, definiti dai coefficienti di resistenza termica superficiale  $R_{\text{si}}$  (interna) e  $R_{\text{se}}$  (esterna) dipendenti dalla direzione di flusso termico <sup>(2)</sup>:

$$U = 1/R_t = 1/(R_{\text{se}} + R + R_{\text{si}})$$

dove:  $U =$  trasmittanza termica [W/m<sup>2</sup>K]

$R_t =$  resistenza termica totale dell'elemento [m<sup>2</sup>K/W]

$R =$  resistenza termica dell'elemento [m<sup>2</sup>K/W]

con  $R = 1/C$  [m<sup>2</sup>K/W]

### 3.3 Il metodo di prova

La rilevazione in opera della trasmittanza termica di un elemento di involucro edilizio (sia orizzontale sia verticale) con il metodo dei termoflussimetri è riferibile alla norma UNI EN 1934:2000 e alla norma ISO 9869:1994.

Sostanzialmente, si considerano valide le ipotesi espresse in precedenza, ossia provino piano, omogeneo, flusso monodirezionale, trasmissione di calore nell'elemento per conduzione. La trasmissione del calore per convezione (dovuta alla temperatura e alla velocità dell'aria ambiente) e la trasmissione per irraggiamento (dipendente dalla temperatura delle superfici poste attorno all'elemento di prova) produce effetti che sono convenzionalmente combinati nel concetto di «temperatura ambiente» (che va quindi adeguatamente misurata) e in un coefficiente superficiale di scambio.

<sup>(2)</sup> I valori sono dati dalla norma UNI EN ISO 6946:2007 *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.*



Gli strumenti di prova sono:

1. Termoflussimetro

Si tratta sostanzialmente di una termopila che viene posizionata sulla faccia della parete dove la fluttuazione termica è minore e dove non c'è irraggiamento solare diretto, in genere la superficie interna (calda) dell'elemento da investigare. Per garantire una perfetta aderenza fra superficie del termoflussimetro e superficie dell'elemento, viene steso uno strato di pasta conduttiva fra i due in maniera omogenea. La termopila, inserita nel flusso termico, determina una tensione proporzionale alla differenza di temperatura che si crea fra le sue due facce a causa della resistenza termica della piastra (che deve essere la minore possibile per minimizzare la perturbazione del flusso termico) e fornisce in uscita una tensione proporzionale al flusso di calore trasmesso (assumendo il flusso di calore costante nell'unità di tempo, la conducibilità termica del corpo costante e il sensore con influenza termica trascurabile sul flusso di calore).

Esistono due tipi di termoflussimetri:

- a. termoflussimetri con sensori distribuiti su tutta la loro superficie
- b. termoflussimetri con area sensibile centrale piccola e «custodia» esterna

2. Sensori di temperatura superficiale

Un sensore di temperatura superficiale di parete va posizionato dalla stessa parte del flussimetro nelle sue immediate vicinanze, mentre un sensore va posizionato allo stesso livello però sulla superficie opposta dell'elemento. Per una misura più accurata, si possono posizionare due sensori per parete ad una distanza tale da poter indicare una temperatura superficiale media significativa della parete.

Il sensore è generalmente costituito da una piccola termocoppia montata su una placca di metallo buon conduttore e collegata alla superficie del provino tramite una pasta adesiva conduttiva ben stesa in modo tale da evitare sacche di aria fra sensore ed elemento. Per minimizzare l'influenza della temperatura dell'aria sulla misura di temperatura superficiale, il sensore può essere isolato verso l'esterno per mezzo di piccoli elementi di materiale isolante (per esempio polistirolo). L'influenza del sensore e degli elementi di polistirolo sulla differenza fra l'effettiva temperatura superficiale e quella misurata è trascurabile.

3. Sensori di temperatura dell'aria

Per misurare la temperatura dell'aria ambiente alle due facce opposte dell'elemento, si utilizzano sensori di temperatura opportunamente schermati da radiazione diretta ma dove venga garantita comunque la circolazione turbolenta dell'aria per misurare la temperatura della massa d'aria. I sensori vanno posizionati alla stessa altezza e nei pressi degli altri sensori di misura prima descritti (e comunque ad almeno 1.50 m dal pavimento).



Fig. 3 - La strumentazione di prova nell'ambiente interno prodotta dalla LSA Laboratori di Strumentazione Industriale SpA di Milano.

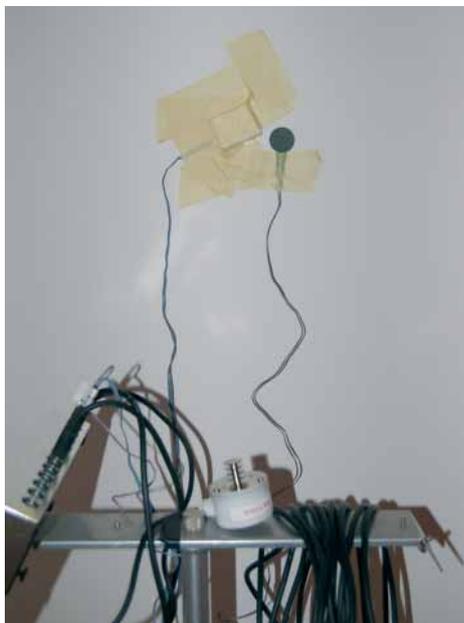


Fig. 4 - Sensore temperatura aria, temperatura superficiale di parete e flussimetro.

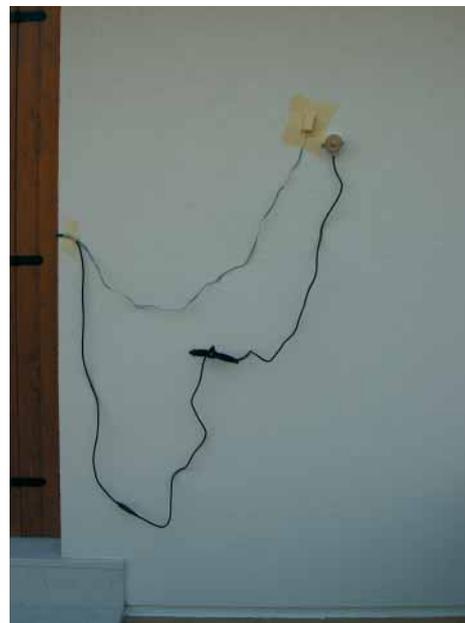


Fig. 5 - Disposizione della strumentazione sulla superficie esterna.



I sensori di temperatura più accurati sono i cosiddetti Pt100, ossia sensori a resistenza metallica costituiti da un elemento al platino (che può essere prodotto con un estremo grado di purezza a differenza dei sensori al nichel o al rame) con una resistenza pari a 100 ohm a 0°C e una resistività a temperature prossime a quelle ambiente dipendente linearmente (con buona approssimazione) a un coefficiente di temperatura  $\alpha$  con andamento noto ( sostanzialmente costante fra 100 e 800 K):

$$r(T) = r_0 \cdot (1 + \alpha T)$$

Misurando la variazione di resistività si riesce quindi a risalire alla temperatura ambiente.

L'acquisizione dei dati dovrebbe essere fatta in continuo o a intervalli regolari durante un certo numero di giorni. La durata della prova dipende da:

- tipo di elemento in oggetto (pesante, leggero, stratificato, ecc.);
- andamento della temperatura ambiente interna ed esterna (media e fluttuazioni prima e durante la prova);
- metodo utilizzato per analizzare i dati (metodo dinamico o delle medie progressive).

La durata della prova è tipicamente compresa fra 72 h e 7 giorni. La rata di acquisizione dei dati non deve essere generalmente superiore a 10 minuti. Per tutta la durata della prova, la differenza di temperatura fra superficie interna ed esterna non deve essere minore di 10°C.

### 3.4 Analisi dei dati

Il metodo più utilizzato e più semplice per l'analisi dei dati è il metodo delle medie progressive, per il quale la stima della conduttanza dell'elemento è data da:

$$C = \Sigma Q_j / \Sigma (T_{si,j} - T_{se,j})$$

dove:  $Q$  = flusso termico passante nell'elemento [W]  
 $T_{si}$  = temperatura superficiale interna [K]  
 $T_{se}$  = temperatura superficiale esterna [K]  
 $j$  = j-esima misura effettuata

Calcolando  $C$  in successione per ogni misura effettuata partendo dalla prima, il valore converge asintoticamente. Il valore asintotico ottenuto può essere ritenuto significativo del valore reale se:

1. il contenuto di calore nell'elemento è lo stesso all'inizio e alla fine della prova (stesse temperature e stesso andamento di umidità);
2. il termoflussimetro non è esposto a radiazione solare diretta;



3. la conduttanza termica dell'elemento è costante durante la prova.

Negli elementi costruttivi usuali per l'edilizia, ossia quelli per i quali la capacità termica specifica è maggiore di 20 kJ/m<sup>2</sup>K, l'analisi deve essere svolta per un periodo di tempo comunque multiplo di 24 h e può essere considerata conclusa qualora:

1. la durata del test supera le 72 h;
2. il valore di resistenza R ottenuto alla fine dell'analisi non si discosta per più del 5% dal valore ottenuto nelle 24 h precedenti;
3. il valore di resistenza R ottenuto durante un periodo pari a

$$\text{INT}(2 \times D_T/3)$$

con  $D_T$  durata della prova in giorni  
 INT sua parte intera (espressa in giorni).

considerato nella prima parte della prova non si discosta per più del 5% dal valore ottenuto nello stesso periodo considerato nell'ultima parte della prova.

Esperienze svolte e riportate in letteratura indicano la precisione del metodo con valori di errore variabili fra 1% e 15%, con un valore medio dell'8%.

Si ricorda ancora una volta che il valore stimato col metodo dei termoflussimetri non è quello calcolato in fase di progetto noti gli spessori e la conducibilità termica dei materiali, ma quello realmente espresso dalla struttura in opera in un determinato contesto e in un determinato periodo.

### 3.5 Un esempio applicativo

Si riporta di seguito una prova effettuata in due diversi periodi dell'inverno 2006-'07 sulla parete nord di un edificio con la seguente stratigrafia:

Materiale	Spessore [m]	Calore specifico [kJ/kgK]	Conduttività [W/mK]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]
Intonaco	0.02	0.84	0.3	1300
Fibra di legno	0.08	2.1	0.045	200
Parete di legno piena	0.124	2.1	0.13	470
Fibra di legno	0.04	2.1	0.04	200
Intercapedine aria	0.05	1.004	0.2381	1
Cartongesso	0.026	0.92	0.837	1540

Spessore totale: 0.341 m

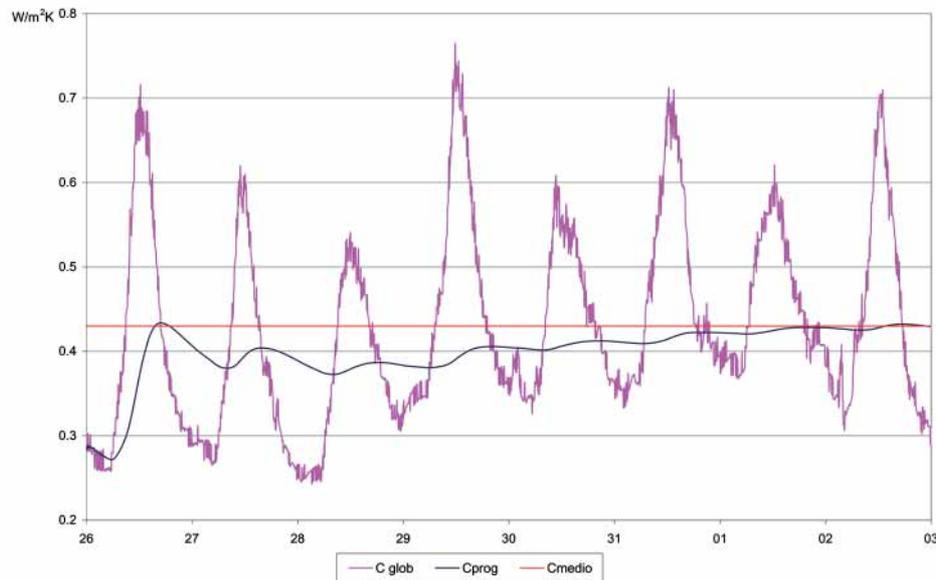
Massa: 152.54 kg/m<sup>2</sup>

C di calcolo = 0.2407 W/m<sup>2</sup>K

U di calcolo = 0.2312 W/m<sup>2</sup>K

Capacità termica frontale: 252.877 kJ/m<sup>2</sup>K

Le prove sono state effettuate in due sessioni successive:



Graf. 1 - Applicazione del metodo delle medie progressive (caso studio - dicembre 2006/gennaio 2007)

a. dal 26.12.2006 al 3.1.2007 (Graf. 1)

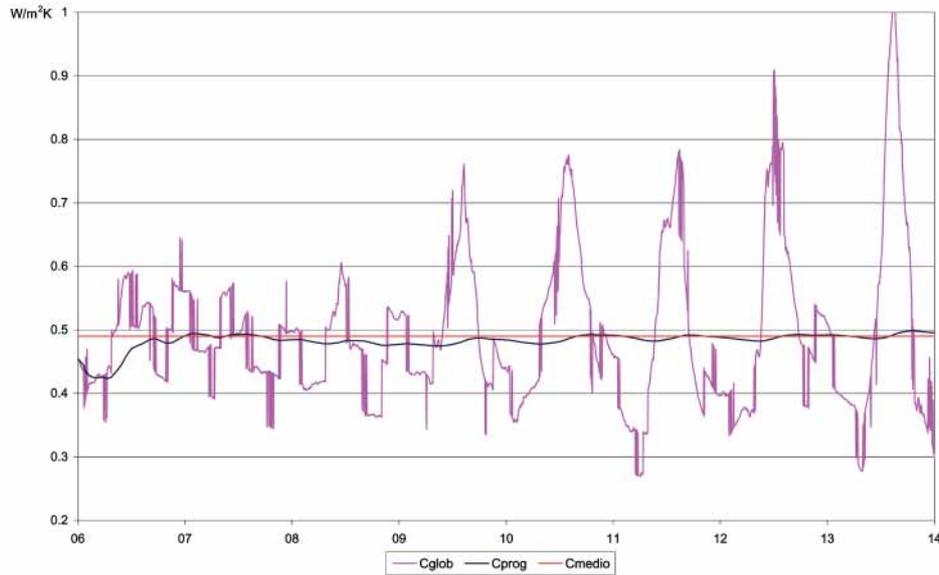
Valore asintotico di  $C = 0.43 \text{ W/m}^2\text{K}$

Considerando  $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  e  $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$   
 si ottiene  $U_1 = 0.4007 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nota:

- numero giorni di rilievo: 8
- valore di R ottenuto nelle 24h precedenti il termine della prova  $R_{24} = 2.3549 \text{ m}^2\text{K/W}$   
 valore di R alla fine della prova  $R_1 = 2.3256 \text{ m}^2\text{K/W}$   
 $R_1 + 0.05 \times R_1 = 2.4419 > R_{24}$
- $\text{INT}(2 \times D_T/3) = \text{INT}(2 \times 8/3) = 5$   
 R primi 5 giorni = 2.4057  
 R ultimi 5 giorni = 2.4569  
 Differenza = 2.08%

b. dal 6.2.2007 al 14.2.2007 (Graf. 2)



Graf. 2 - Applicazione del metodo delle medie progressive (caso studio - febbraio 2007)

Valore asintotico di  $C = 0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$

Considerando  $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  e  $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$

si ottiene  $U_2 = 0.4523 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nota:

- numero giorni di rilievo: 8
- valore di R ottenuto nelle 24h precedenti il termine della prova  $R_{24} = 2.0489 \text{ m}^2\text{K/W}$
- valore di R alla fine della prova  $R_1 = 2.0408 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $R_1 + 0.05 \times R_1 = 2.1428 > R_{24}$
- $\text{INT}(2 \times D_T / 3) = \text{INT}(2 \times 8 / 3) = 5$
- R primi 5 giorni = 2.0497
- R ultimi 5 giorni = 1.9929
- Differenze = 2.85%

(R.A.)

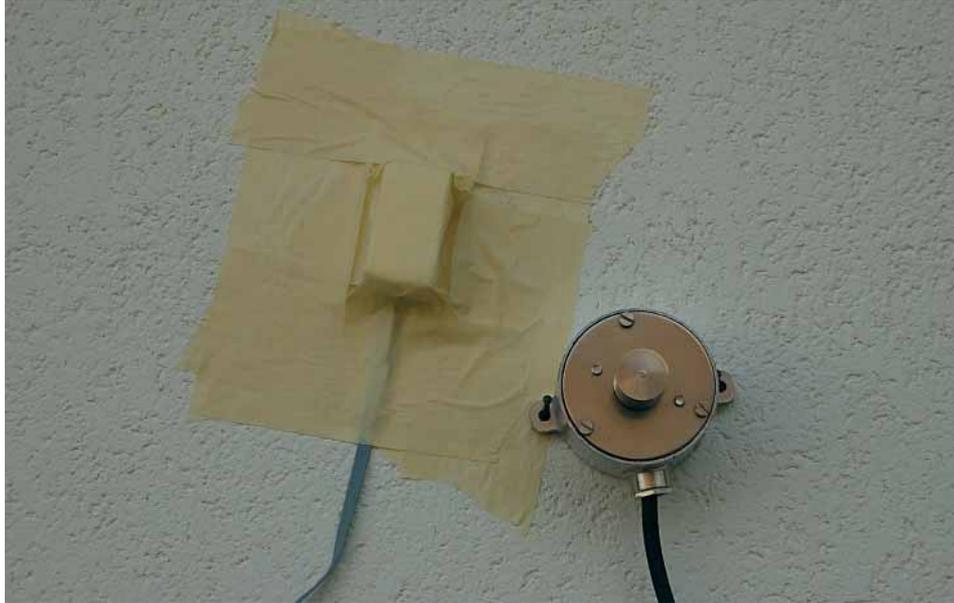


Fig. 6 - Sensore temperatura aria e temperatura superficiale di parete all'esterno.

#### 4. VERIFICA DEL VALORE REALE DI TRASMITTANZA TERMICA. GENERALITÀ

La trasmittanza termica in una parete è espressa dal rapporto fra il calore  $Q$  che la attraversa nell'unità di tempo  $t$  (quindi una potenza termica  $P$ ) e la differenza di temperatura alle estremità  $T_{int}-T_{amb}$ . Si ha

$$\begin{aligned} &\text{potenza termica } P \\ &P = Q/t \text{ [W/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{trasmittanza termica } U \\ &U = P/(T_{int}-T_{amb}) \text{ [W/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

La potenza termica  $P$ , associata all'attraversamento del calore  $Q$  nella parete, viene dissipata dalla superficie nell'ambiente «esterno» per conduzione, irraggiamento e convezione. Il contributo della conduzione è trascurabile per cui, praticamente, i fenomeni dei quali tenere conto sono sostanzialmente irraggiamento e convezione. Vale la relazione:

$$P = 5.7674 \epsilon_{tot} ((T_i/100)^4 - (T_{amb}/100)^4) + 3.8054 v (T_i - T_{amb}) \text{ [W/m}^2\text{]}$$



da cui la trasmittanza termica  $U$  espressa da:

$$U = (5.7674 \epsilon_{\text{tot}} ((T_i/100)^4 - (T_{\text{amb}}/100)^4) + 3.8054 v (T_i - T_{\text{amb}})) / (T_{\text{int}} - T_{\text{amb}}) \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

dove è

$P$	potenza termica dissipata [W/m <sup>2</sup> ]
$\epsilon_{\text{tot}}$	emissività sull'intero spettro (emissività integrale)
$T_i$	temperatura della superficie da indagare [K]
$T_{\text{amb}}$	temperatura dell'ambiente esterno [K]
$v$	velocità di convezione dell'aria [m/s]
$T_{\text{int}}$	temperatura dell'ambiente interno [K]

Il valore di  $U$  [W/m<sup>2</sup>K] può essere individuato, con importanti vantaggi operativi, impiegando rilievi termografici, indirizzati alla descrizione del campo termico sull'intera parete in esame.

I rilievi termografici devono seguire disposizioni tecniche che rendano minimi gli errori di misura «sistematici». Occorre valutare:

- l'emissività  $\epsilon_\lambda$  della superficie della parete in esame nell'intervallo spettrale in cui opera il termografo che si impiega;
- usare il medesimo termografo per la misura della temperatura;
  - della superficie in esame  $T_i$
  - della temperatura ambiente  $T_{\text{amb}}$
  - della temperatura interna  $T_{\text{int}}$

Per quanto riguarda la misura dell'emissività  $\epsilon_\lambda$  del materiale reale, si può procedere secondo due modalità: per paragone con un materiale di riferimento (appositi nastri adesivi) di emissività nota, oppure misurando la radianza riflessa dal materiale in studio. Infatti, se  $N_\lambda$  è la potenza della sorgente nell'intervallo  $\lambda$  in cui funziona il termografo impiegato, per la legge di Kirchhoff è

$$N_\lambda = \epsilon_\lambda N_\lambda + \rho_\lambda N_\lambda + \tau_\lambda N_\lambda$$

La relazione esprime la conservazione dell'energia per cui della potenza radiante  $N_\lambda$  una parte viene assorbita ( $\epsilon_\lambda N_\lambda$ ) una parte riflessa ( $\rho_\lambda N_\lambda$ ) e una parte trasmessa ( $\tau_\lambda N_\lambda$ ). Se la superficie è opaca rimane

$$N_\lambda = \epsilon_\lambda N_\lambda + \rho_\lambda N_\lambda$$

da cui

$$\rho_\lambda N_\lambda / N_\lambda = 1 - \epsilon_\lambda$$

e quindi

$$\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

Nell'esecuzione di questa misura si può usare come sorgente un saldatore elettrico a stagno (temperatura intorno 400 K). La misura della temperatura sulla superficie in esame  $T_i$  viene ottenuta dalla ripresa termografica corretta del valore di emissività  $\epsilon_\lambda$ .

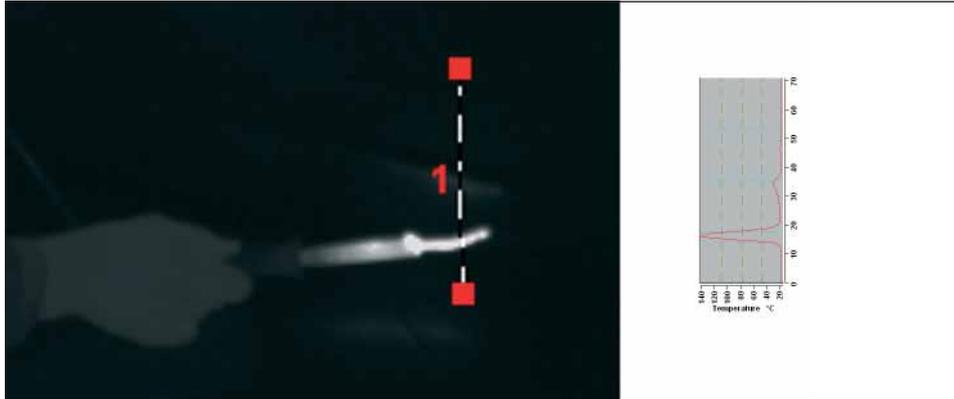


Fig. 7 - Esempio di procedura per la determinazione del valore di emissività della superficie di una parete. Dal profilo termico si rilevano i valori:

temperatura della sorgente (saldatore)	140 °C >>> 413.14 K
temperatura rilevata riflessa dalla parete	30 °C >>> 303.14 K
temperatura ambiente	20 °C >>> 293.14 K

da cui essendo  $N_\lambda \equiv (413.14^4 - 293.14^4)$

e  $\rho_\lambda N_\lambda \equiv (303.14^4 - 293.14^4)$

dalla relazione  $N_\lambda = \epsilon_\lambda N_\lambda + \rho_\lambda N_\lambda$  si ha

$$\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda N_\lambda / N_\lambda$$

e, in numeri,  $\epsilon_\lambda = 1 - (303.14^4 - 293.14^4) / (413.14^4 - 293.14^4) = 0.9512$

La temperatura dell'ambiente esterno  $T_{amb}$  e quella all'interno della struttura in esame  $T_{int}$  viene rilevata dal medesimo termografo in modo da consentire la massima precisione nella misura. A questo scopo occorre ricorrere a corpi neri di riferimento, uno per l'acquisizione della temperatura ambiente (esterna), l'altro per quella interna al volume abitativo. Per l'acquisizione del valore di temperatura dell'ambiente esterno  $T_{amb}$  si può usare come approssimazione del corpo nero teorico un tubo curvo, anche parzialmente avvolto, di lunghezza di un ordine di grandezza superiore al diametro dell'imboccatura. Per l'acquisizione della temperatura ambiente interna  $T_{int}$  si è utilizzato con successo un serramento aperto rapidamente per una piccola porzione in modo che il termografo possa rilevare l'interno. In questo caso il corpo nero è costituito dalla apertura parziale della finestra, apertura di dimensioni limitate rispetto a quelle della stanza

del cui interno si vuole misurare la temperatura. La Fig. 8 che segue mostra mezza finestra spalancata, mentre per l'acquisizione della misura, un attimo prima si era rapidamente aperta solo una fessura. In basso, verso il centro, si intravede il corpo nero usato per la misura della temperatura esterna.

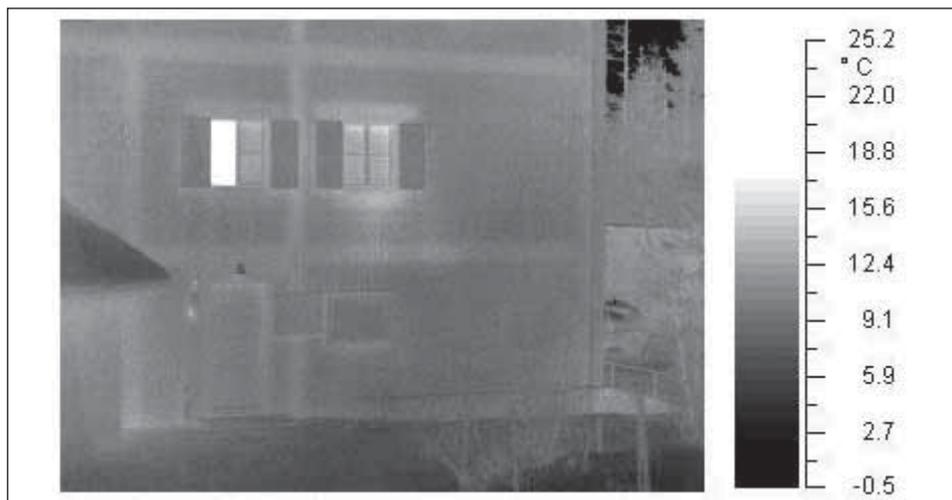


Fig. 8 - Esempio di procedura per il rilievo simultaneo della temperatura esterna  $T_{amb}$ , della parete  $T_p$ , e dell'ambiente interno  $T_{int}$ .

A titolo di esempio, dal rilievo termografico riportato in Fig. 8, con i dati

$\epsilon_\lambda$	(in banda $8\div 12 \mu$ )	0.95
$\epsilon_{tot}$	(sull'intero spettro)	0.55
$T_i$		278.00 [K]
$T_{amb}$		273.80 [K]
$v$		0.50 [m/s]
$T_{int}$		294.14 [K]

si ottiene  $U = 0.94$  [W/m<sup>2</sup>K]

Con la termografia si acquisiscono dati sulla temperatura di irraggiamento. Individuato per le singole superfici il valore di emissività spettrale  $\epsilon_\lambda$  i dati vengono riportati al valore della temperatura reale  $T_i$  della superficie in analisi. Per i valori di  $T_{amb}$  e di  $T_{int}$ , trattandosi di emissione assimilata a quella di corpo nero, i valori rilevati coincidono con i valori della temperatura reale. La velocità di convezione dell'aria viene rilevata al momento della ripresa come media dei valori acquisiti con un anemometro a filo caldo. Per una stima ragionevolmente



valida nella maggioranza dei casi si usa correntemente anche il lancio di frammenti di materiale leggero.

Mentre per le pareti la determinazione del valore di emissività spettrale  $\epsilon_\lambda$  è facilmente ottenibile con la procedura sopra esposta e per il valore di emissività sull'intero spettro  $\epsilon_{tot}$  ci si avvale dei valori tabulati sui prontuari specializzati, per i serramenti il problema si presenta complicato.

Le superfici vetrate, completamente opache alla radiazione termica per lunghezze d'onda superiori a 3 micron, esibiscono solitamente bassi valori di emissività spettrale  $\epsilon_\lambda$  e quindi alta riflettività nello stesso intervallo, con la conseguenza di consegnare allo strumento di acquisizione anche una buona percentuale di radianza proveniente dall'ambiente. Per quanto possibile andrebbero applicati degli adesivi ad alto valore di emissività spettrale per rilevare l'effettivo valore della temperatura di contatto.

## 5. VERIFICA DEL VALORE DI TRASMITTANZA TERMICA IN REGIME NON STAZIONARIO

Quanto sopra esposto si riferisce alla condizione di regime stazionario, dove  $T_{int} - T_{amb}$ , differenza di temperatura fra interno ed esterno della parete in analisi, sia costante e l'andamento della temperatura nello spessore della parete sia rappresentabile con un segmento di retta.

Nelle situazioni correnti sovente queste premesse non valgono e occorre tenere conto del regime non stazionario in cui l'andamento della temperatura nello spessore della parete non è lineare. È una situazione ricorrente nelle stagioni intermedie, quando non può essere assicurato un flusso di calore unidirezionale per un tempo sufficientemente lungo. In queste circostanze può essere utile l'impiego di rilievi multitemporali della temperatura. Ricostruendo sinteticamente il profilo della temperatura all'interno dello spessore della parete si perviene all'individuazione del gradiente termico ragionevolmente probabile che sostiene la trasmissione di calore. Il gradiente termico viene individuato, con questo schema, dalla pendenza del profilo di temperatura in corrispondenza di metà spessore della parete e non, come in regime stazionario, dalla cadente  $T_{int} - T_{amb}$ .

Il profilo di temperatura nello spessore della parete può essere individuato con il grafico di una funzione desumibile dalla relazione di Fourier che accosta la variazione della temperatura nel dominio del tempo, a pari caratteristiche del mezzo (diffusività termica), alla variazione seconda della temperatura nel senso dello spessore. Nei casi che stiamo esaminando assumiamo le condizioni:

- che la temperatura non abbia variazioni in direzione orizzontale (x);
- che le variazioni della temperatura in direzione verticale (y) siano trascurabili;
- che la variazione della temperatura avvenga, quindi, solo in direzione dello spessore (s).

Il profilo di temperatura nello spessore della parete viene individuato dalla relazione di Fourier

$$\delta T / \delta t = \lambda / c\rho (d^2T/dx^2 + d^2T/dy^2 + d^2T/ds^2)$$

dove è

T	temperatura
t	tempo
$\lambda$	conduttività termica
c	calore specifico
$\rho$	densità di massa

che nel caso di propagazione del calore nello spessore s della parete, senza scambi laterali, diventa

$$\delta T / \delta t = \lambda / c\rho (d^2T/ds^2) = \lambda / c\rho T''(s)$$

Assumendo costante in ogni punto della facciata della parete il valore di  $\lambda/c\rho$ , che rappresenta la diffusività termica (velocità di propagazione dell'area della superficie isoterma all'interno dello spessore della parete), si ha che la variazione nel tempo della temperatura sulla superficie della parete,  $\delta T/\delta t$ , è legata alla curvatura del profilo della temperatura nello spessore della parete stessa  $T''(s)$  dalla relazione

$$\delta T / \delta t \equiv T''(s)$$

Premesso questo, si propone un modello dove il profilo della temperatura  $T(s)$  abbia curvatura proporzionale alla posizione s nello spessore attraversato L (Figura 9). Si ha

$$\delta T / \delta t \equiv T''(s) = A s (T_{\text{ext1}} - T_{\text{ext2}}) / L$$

con

A	costante
s	coordinata corrente nella direzione dello spessore
$T_{\text{ext1}}$	temperatura della parete esterna al tempo iniziale $t_1$
$T_{\text{ext2}}$	temperatura della parete esterna al tempo finale $t_2$
L	spessore della parete

Integrando  $T''(s)$  si ottiene

$$T'(s) = A s^2 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{ext1}}) / 2L + B$$

con B costante.

Assumendo che il profilo termico in  $s=0$  abbia pendenza pari a metà della cadente  $T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}$  (con  $T_{\text{int}}$  temperatura lato interno parete) si ha

$$T'(0) = (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L = B$$

quindi

$$T'(s) = A s^2 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{ext1}}) / 2L + (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L$$

Integrando nuovamente si ottiene

$$T(s) = s^3 A (T_{\text{ext2}} - T_{\text{ext1}}) / 6L + s (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L + C$$

Imponendo le condizioni al contorno  $T(0) = T_{\text{int}}$  e  $T(L) = T_{\text{ext2}}$  risulta

$$\begin{aligned} A &= 3 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / L^2 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{ext1}}) \\ C &= T_{\text{int}} \end{aligned}$$

Quindi, in definitiva, il profilo della temperatura nello spessore della parete viene reso con il modello di una curva del terzo ordine espressa da

$$T(s) = s^3 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L^3 + s (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L + T_{\text{int}}$$

La pendenza in corrispondenza di metà spessore ( $s = L/2$ ) vale

$$\begin{aligned} T'(s) &= s^2 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{ext1}}) / 2L + (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L \\ T'(L/2) &= L^2 3(T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 8L^3 + (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) / 2L = (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}) 7/8L \end{aligned}$$

da cui il salto termico da associare alla dissipazione

$$\Delta T = T'(L/2) L = 7/8 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}})$$

per cui in definitiva si ottiene

$$U [\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}] = P_{\text{diss}} / (7/8 (T_{\text{ext2}} - T_{\text{int}}))$$

Nelle esemplificazioni assunte, la variazione nel tempo della temperatura della parete interna  $T_{\text{int}}$  è stata considerata trascurabile rispetto alla variazione sulla parete esterna che, nel modello, condiziona la curvatura del profilo di temperatura.

Esempio applicativo: in Figura 10 è mostrata una ripresa termografica multitemporale su una parete e il risultato del calcolo della trasmittanza termica  $U$

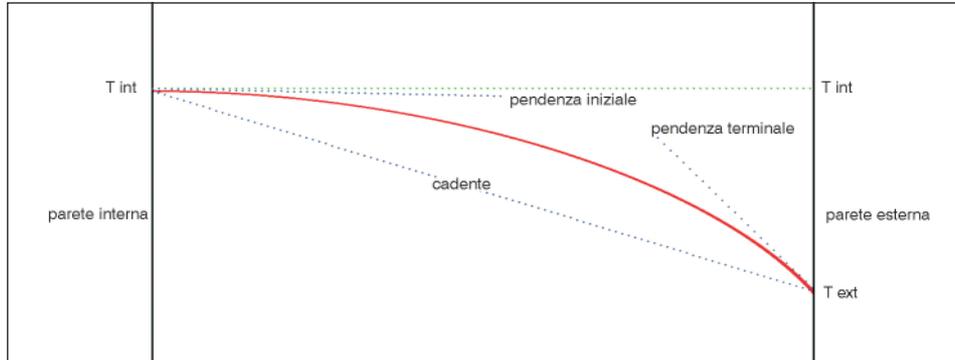


Fig. 9 - Schema di andamento della temperatura nello spessore di una parete (tratto rosso) dal valore di temperatura sulla superficie interna  $T_{int}$  a quello sulla superficie esterna  $T_{ext}$  in regime non stazionario. Il gradiente termico preso in considerazione non è quello corrispondente alla cadente, come nella situazione di stazionarietà, ma quello proporzionale alla tangente in un punto significativo lungo la curva della temperatura. Come standard si può proporre la tangente calcolata a metà spessore.

[W/m<sup>2</sup>K]. La parete ha spessore  $L$  di 0.223 [m] e una trasmittanza  $U$  di calcolo pari a  $U=0.2956$  [W/m<sup>2</sup>K]. Con i dati:

- 1) ore 21.30
 

$T_{ext1}$	= 20.70 [°C]
$T_{int}$	= 25.00 [°C]
- 2) ore 23.00
 

$T_{ext2}$	= 19.30 [°C]
$T_{int}$	= 25.00 [°C]
$T_i$ (media)	= 19.90 [°C]
$v_{aria}$	= 0.24 [m/s]

determinata la potenza termica dissipata in corrispondenza delle ore 23.00, su una zona significativa della parete (temperatura media di 19.90 [°C] pari a  $P_{diss} = 1.9689$  [W/m<sup>2</sup>]) e individuato, con la metodologia esposta, il salto termico che la sostiene

$$\Delta T = 7/8 (T_{ext2} - T_{int}) = 7/8 (19.30 - 25.00) = 7/8 \cdot 5.7 = 4.9875 \text{ [K]}$$

si ottiene

$$U = P_{diss} / \Delta T = 1.9689 \text{ [W/m}^2\text{]} / 4.9875 \text{ [K]} = 0.3947 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

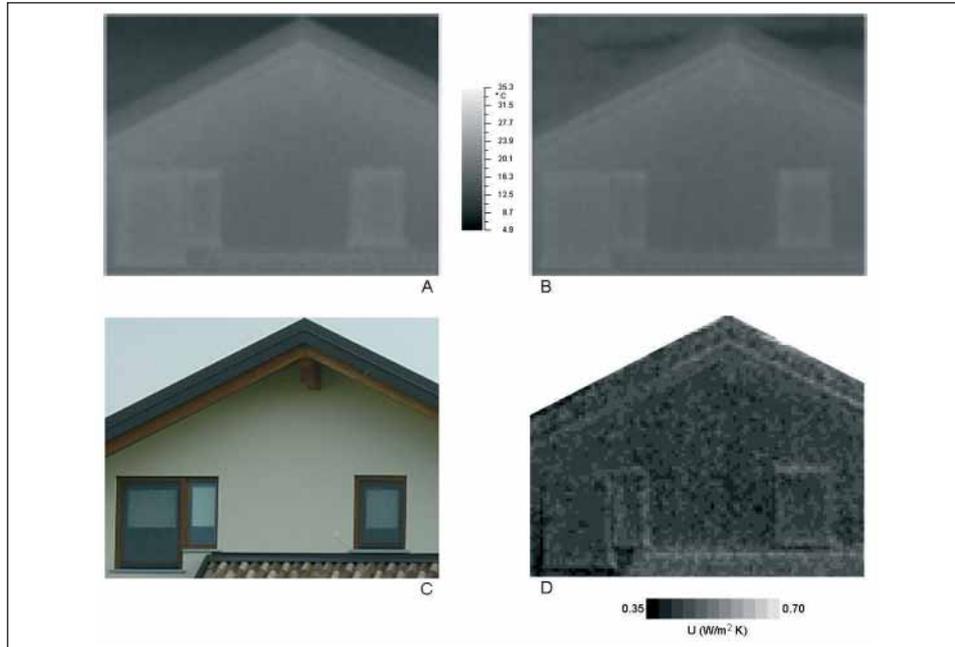


Fig. 10 - Esempio di rilievi termografici multitemporali.

- A - rilievo termografico delle ore 21.30
- B - rilievo termografico delle ore 23.00
- C - fotografia della zona in studio
- D - risultato: andamento dei valori di  $U$  [ $W/m^2K$ ]

*Osservazione generale:* mentre il calcolo sulla base delle caratteristiche termiche dichiarate dal fornitore dei materiali costituisce la fase di previsione progettuale della trasmittanza termica, con l'impiego della termografia, opportunamente applicata, si raccolgono dati sul comportamento termico effettivo della struttura realizzata.

(A.T.)

## 6. RIFERIMENTI

ALBATICI R., GAROFOLO I., 2000 - *Strumenti per la valutazione dello stato del costruito finalizzati al progetto di conservazione, recupero e manutenzione degli edifici*, Trento: Università di Trento. Dipartimento di ingegneria civile e ambientale. p. 70. Quaderni del Dipartimento, vol. EDI3/2000.

ALBATICI R., 2003 - «Definizione e rilevazione di parametri ambientali. Indagine e misu-



razione oggettiva delle perturbazioni artificiali. Inquinamento indoor». In: *Per una progettazione sostenibile. Contributi alla formazione di una nuova sensibilità progettuale per un'edilizia bio-eco compatibile*. Garofolo I. (a cura di), Monfalcone: Edicom Edizioni, p. 87-103.

ALBATICI R., 2006 - «Human Comfort Conditions inside Wooden Passive and Bioclimatic Houses». In: *Towards Sustainable Building Design*, a cura di Feist W., Darmstadt: Passivhaus Institut. p. 331-336. Atti del convegno: «10<sup>th</sup> International Passive House Conference 2006», Hanover (Germania), 19-20 maggio 2006.

BARALE V., PIZZAFERRI G., TONELLI A. M., VERGANI C., 1979 - «Looking for a proper data processing for monitoring heat losses from buildings». Atti del convegno: «13<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment», Ann Arbor, Michigan (U.S.A.).

TONELLI A.M., 1981 - *L'impiego dei rilievi termici da aereo per rilevare le perdite di calore dagli edifici e per la loro valutazione quantitativa*, Rivista PIXEL, anno 2 n°1.

Tonelli A. M., 1998 - *Complementi di Telerilevamento*, Luni Editrice, Milano.

UNI 9252:1988 *Isolamento termico - Rilievo e analisi qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri degli edifici - Metodo della termografia all'infrarosso*.

ISO 9869:1994 *Thermal insulation - Building Elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*.

UNI EN 1934:2000 *Prestazione termica degli edifici - Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro - Muratura*

UNI EN ISO 7726:2002 *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche - Allegato E*.

UNI 10351:2004 *Materiali da costruzione - Conduttività termica e permeabilità al vapore*.

UNI EN ISO 6946:2007 *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*.

prEN15203 *Energy performance of buildings - Assessment of energy use and definition ratings*.

---

Indirizzo degli autori:

Rossano Albatici - Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, via Mesiano 77, I-38100 Povo (TN)  
rossano.albatici@unitn.it

Arnaldo Tonelli - Studio: via Miramonti, 4 - I-38068 Rovereto (TN)  
arnaldo.tonelli@arnaldotonelli.it

---

