

MISURA DELLA RESISTENZA TERMICA DI PARETI IN MURATURA

*Francesco Asdrubali**, *Cinzia Buratti**, *Stefano Ortica**,
*Andrea de Lieto Vollaro***, *Giorgio Galli***, *Stefano Grignaffini***

(*) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia;
(**) Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

SOMMARIO

Il lavoro presenta i risultati delle misure per la determinazione della resistenza termica di pareti in muratura. Le misure sono state condotte utilizzando due camere di diverso volume, separate dalla parete di cui si è determinata la resistenza termica. È stato instaurato un gradiente termico tra le due camere in modo da realizzare un trasferimento di calore attraverso la parete, dalla camera calda a quella fredda. Il calcolo della resistenza termica è stato effettuato misurando la differenza di temperatura superficiale, tra il lato caldo ed il lato freddo della parete, ed il flusso termico.

Le prove sono state condotte sia in regime stazionario, seguendo le indicazioni della EN 1934, che in regime variabile, in conformità alla prEN 12494, per valutare la possibilità di confrontare i due metodi. I risultati mostrano che i due metodi forniscono valori pressoché uguali della resistenza termica, pertanto si può estendere la seconda metodologia alla misura della resistenza termica di pareti in situ.

1. INTRODUZIONE

Il corretto dimensionamento degli impianti di climatizzazione dipende fortemente dall'accuratezza con la quale sono determinati i carichi termici estivi ed invernali; la loro entità è strettamente legata alle caratteristiche dell'involucro edilizio, ed in particolare alla resistenza termica delle pareti. D'altra parte una valutazione teorica di tali parametri risulta nella maggior parte dei casi difficile, poiché i materiali tradizionalmente usati nelle costruzioni edilizie non presentano le caratteristiche di omogeneità ed isotropia tipiche dei materiali per i quali sono disponibili i valori di conducibilità termica. Inoltre, quand'anche siano disponibili in Letteratura dati sulla resistenza termica di pareti in muratura, essi sono fortemente dipendenti dalle modalità di costruzione delle pareti stesse e dalle caratteristiche dei materiali. Risulta pertanto necessaria la determinazione sperimentale della resistenza termica di pareti; essa può essere agevolmente effettuata mediante prove di laboratorio in condizioni stazionarie, da effettuare in camere climatiche separate dalla parete di cui si vuole determinare la resistenza termica, una a temperatura maggiore ed una a temperatura minore, in cui si possa regolare e controllare rigorosamente la temperatura dell'aria. Ma, per poter estendere i valori ottenuti in laboratorio alle situazioni reali, occorrerebbe simulare le condizioni di temperatura che si hanno in situ; infatti i valori della resistenza termica calcolati in queste due condizioni potrebbero differire sensibilmente.

Nel presente lavoro è stata messa a punto una metodologia di misura che consente di calcolare la resistenza termica di pareti poste tra due camere di circa 60 m³ sia in condizioni stazionarie sia in regime variabile. Per quanto riguarda queste ultime in una camera vengono prodotte variazioni di temperatura; per simulare l'escursione termica giornaliera dell'aria esterna, nell'altra la temperatura viene mantenuta costante, per ricreare le condizioni di temperatura all'interno di locali climatizzati. Il valore della resistenza termica delle pareti è stato determinato attenendosi alla prEN 1934, che fornisce un metodo di calcolo valido in condizioni di regime variabile. Il confronto dei valori ottenuti secondo le due modalità consente di stabilire se la metodologia messa a punto in regime variabile, in laboratorio, possa essere riproposta in situ.

La ricerca, svolta presso il Laboratorio di Termotecnica dell'Università di Perugia, è il frutto di una collaborazione tra le Università di Perugia (Dipartimento di Ingegneria Industriale) e di Roma "La Sapienza" (Dipartimento di Fisica Tecnica); essa è finanziata nell'ambito di una ricerca di interesse nazionale MURST ex 40% sulle proprietà termofisiche dei materiali, il cui coordinatore nazionale è il prof. Bonacina, con Responsabile dell'Unità Operativa locale il prof. de Lieto Vollaro.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La misura della resistenza termica di pareti in muratura in regime stazionario è regolata dalla EN 1934 "Thermal performance of buildings - Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter - masonry", mentre in regime variabile è regolata dalla prEN 1934 "Building component and elements - In situ measurement of the surface to surface thermal resistance". Entrambe stabiliscono gli stessi criteri circa la disposizione e l'impiego della strumentazione di misura, mentre si differenziano nelle modalità del calcolo della resistenza termica.

Il campione di cui si vuole misurare la resistenza termica va posto tra una camera calda ed una camera fredda, nelle quali si stabiliscono delle condizioni termiche che permettono il passaggio di calore attraverso la parete. Sul lato caldo della parete, al centro di un'area quadrata (sezione di misura), viene montato un termoflussimetro con il compito di misurare il flusso termico che attraversa tale area; sulla stessa sezione sono applicate nove termoresistenze per misurarne la temperatura superficiale. Sul lato freddo della parete si individua una seconda sezione di misura, in posizione speculare rispetto a quella del lato caldo, nella quale sono posizionate altrettante termoresistenze. Dalla misura della differenza di temperatura superficiale media delle due sezioni e del flusso termico si determina la resistenza termica R_t , in condizioni stazionarie, secondo la seguente relazione:

$$R_t = (T_{si} - T_{se}) / \Phi \quad (1)$$

In condizione di regime variabile, indicato con j l'istante in cui si rilevano le temperature superficiali ed il flusso termico, il valore della resistenza termica R_t può essere stimato secondo la seguente espressione:

$$R_t = \frac{\sum_j (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_j \Phi_j} \quad (2)$$

Le normative prescrivono che si valuti se il flusso termico Φ risulti ortogonale alla parete; a tal fine, per verificare l'uniformità della temperatura superficiale sulla parete, si individua una seconda area quadrata, concentrica alla sezione di misura, che prende il nome di sezione di guardia. Su questa, una sul lato freddo ed un'altra sul lato caldo della parete, devono essere fissate almeno 12 termoresistenze per misurare la temperatura superficiale. Se le temperature medie delle sezioni di guardia e di misura sono differenti, si instaura un flusso di calore con una componente parallela alla superficie della parete (Φ_2). Affinché la misura sia valida, Φ_2 non deve essere superiore al 4% del flusso che attraversa la parete in direzione ortogonale (Φ).

L'entità di Φ_2 è proporzionale al perimetro della sezione di misura, e diminuisce all'aumentare dell'area della sezione di guardia. In tabella 1 sono elencate le dimensioni consigliate della larghezza (misurata a partire dal bordo della sezione di misura) della sezione di guardia in funzione dello spessore della parete.

Tabella 1: Dimensioni dell'anello di misura consigliate in funzione dello spessore della parete

Larghezza lato sezione di guardia (mm)	Larghezza lato sezione di misura (mm)	Distanza sezione di misura - sezione di guardia (mm)	Spessore massimo della parete (mm)
800	500	150	115
1000	500	250	175
1250	500	375	245
1500	500	500	315
2000	500	750	450

Il 2% di Φ_2 , indicato con Φ_2' , è dovuto alla differenza di temperatura media dei due anelli, mentre il restante 2%, indicato con Φ_2'' , è dovuto alla disuniformità di temperatura nelle sezioni di guardia e di misura. Il termine Φ_2' , può essere stimato attraverso la seguente relazione:

$$\Phi_2' = (\lambda_f + \lambda_s) p \Delta T_g / 2 \quad (3)$$

Il termine Φ_2'' può essere stimato ancora con l'equazione (3), dove per ΔT_g si assume un quarto della massima differenza di temperatura rilevata nella sezione di guardia o nella sezione di misura.

3. STRUMENTAZIONE DI MISURA

Per la misura della temperatura superficiale dei due lati della parete sono state impiegate 20 termoresistenze: 10 sono state posizionate in camera calda e 10 in camera fredda. In ambedue le camere 5 termoresistenze sono state posizionate nella sezione di misura e 5 nella sezione di guardia (fig.1). Le termoresistenze sono state collegate ad un acquisitore multicanale DATALOGGER di fabbricazione *Delta-T Device*.

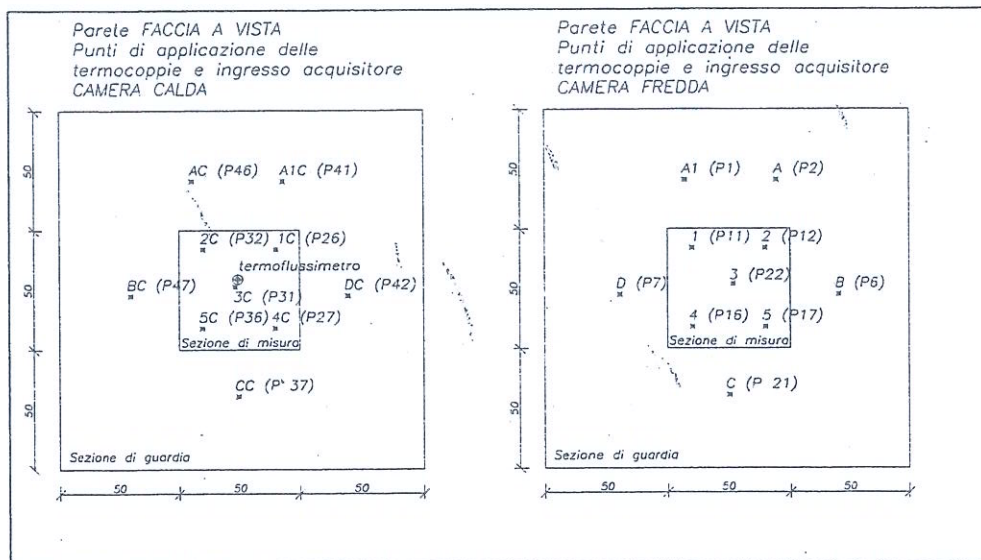


Figura 1: Disposizione e sigla delle termoresistenze in camera calda e fredda

Per il controllo della temperatura nella camera fredda è stato utilizzato un condizionatore mobile mod. SAECO 110/E, dotato di mobiletto condensatore che è stato posto fuori dalla camera. La porta, lasciata aperta per far passare il tubo di collegamento tra il condizionatore ed il mobiletto condensatore, è stata isolata dall'esterno con un pannello in polistirolo di spessore 10 cm. In questo modo sono state limitate al massimo le infiltrazioni di aria calda proveniente dagli ambienti esterni. Il condizionatore è stato schermato rispetto alla parete in muratura con pannelli in plastica, montati su un cavalletto, in modo tale che il flusso d'aria fredda non investisse direttamente le termoresistenze.

Per il controllo della temperatura nella camera calda sono state impiegate tre stufette elettriche di potenza nominale massima pari a 2 kW ciascuna; è possibile parzializzare la potenza erogata da ciascuna stufetta in 0,75 kW o in 1,25 kW. Le tre stufette sono state schermate rispetto alle termoresistenze applicate SULLA parete con un pannello in polistirolo di 3,2 m in larghezza, 2,1 in altezza e 4 cm di spessore. Il pannello è stato messo ad un'altezza da terra di 50 cm, per consentire il passaggio dell'aria calda dal basso e permettere un flusso ascensionale dell'aria tra il pannello e la parete; il movimento dell'aria è assicurato da un ventilatore, appoggiato al pavimento tra le stufette ed il pannello in polistirolo, che preleva l'aria calda uscente dalle stufette e la indirizza verso la parete.

Per la misura del flusso termico è stato impiegato un termoflussimetro di 3 cm di diametro, collegato ad un acquisitore BABUC/M, posto al centro della sezione di misura ed opportunamente posizionato per tener conto della disuniformità delle pareti, dovute ai giunti di collegamento tra i diversi elementi; in particolare, nei due casi qui discussi, il termoflussimetro è stato posizionato al centro della faccia di un blocco termico per la parete n.1 e al centro della faccia di un mattone per la parete n. 2.

I rilievi della temperatura superficiale e del flusso termico sono stati eseguiti ad intervalli di 10 minuti. Uno schema del sistema di misura è disegnato in fig. 2.

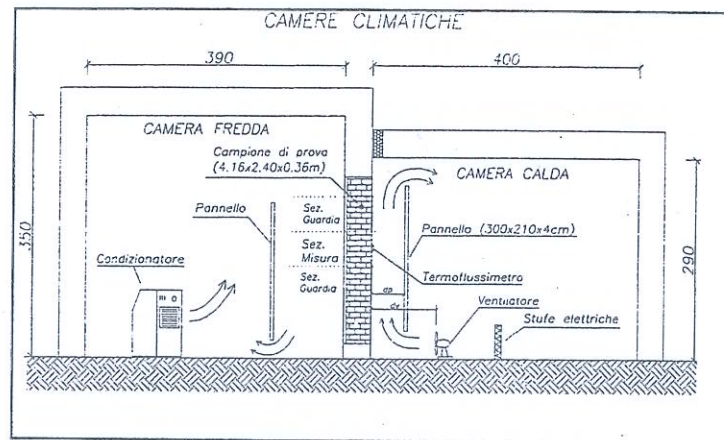


Figura 2: Sistema di misura della resistenza termica di pareti

4. DESCRIZIONE DELLE PARETI

4.1 Parete n. 1

La parete n. 1 è costituita da blocchi termici, di elevata resistenza termica, di dimensioni 15 cm x 60 cm e profondità di 25 cm (densità 550 kg/m³). La parete ha una superficie di 10 m² (4,16 m x 2,4 m) ed uno spessore di 25 cm.

4.2 Parete n. 2

La parete n. 2 è costituita da mattoni pieni faccia a vista estrusi: questi hanno dimensioni di 12 cm x 25 cm x 5 cm. Sono stati messi in opera con malta dello spessore di circa 1 cm, a formare una parete ad una testa e mezzo delle dimensioni di 4,16 m x 2,4 m e dello spessore di 38 cm. La parete è stata inoltre intonacata (spessore dell'intonaco circa 3 mm) sulla faccia in camera calda mentre è stata lasciata con faccia a vista sul lato in camera fredda.

5. METODOLOGIA DI MISURA

5.1 Misure in regime stazionario

Nelle misure in regime stazionario la differenza di temperatura dell'aria tra le due camere deve mantenersi costante nel tempo e dell'ordine di 20 °C (EN 1934); parallelamente l'andamento del flusso termico e delle temperature superficiali nel tempo deve essere costante, con oscillazioni contenute entro i limiti prescritti dalla EN 1934.

In camera fredda il condizionatore è stato impostato sulla temperatura minima, che ha permesso di raggiungere 18 °C circa. In camera calda sono state accese in continuo due stufette, per una potenza complessiva erogata pari a 3,25 kW. La terza stufetta è stata impiegata per effettuare la regolazione fine, azionata da un regolatore di temperatura, CAL 3200, che a seconda della temperatura dell'aria, rilevata da una termocoppia ad esso collegata, consente di fornire potenze termiche variabili tra 0 e 2 kW. Tale regolazione, realizzata con un relè, agisce per tempi dell'ordine di ms. La temperatura limite è stata impostata su 40 °C e la termocoppia è stata posta immediatamente a monte del ventilatore, tra questo e le stufette.

5.2 Misure in regime variabile

Le misure in regime variabile sono state condotte tenendo a temperatura costante la camera fredda e facendo compiere delle oscillazioni di temperatura nella camera calda.

In camera fredda si è lasciato in funzione il condizionatore, impostato sulla temperatura minima di circa 18 °C.

In camera calda sono stati impostati dei cicli di riscaldamento e raffreddamento della durata di 12 ore ciascuno. La prova ha avuto inizio con un ciclo di riscaldamento ottenuto mediante accensione delle tre stufette, con erogazione di una potenza complessiva pari a 5,25 kW. Dopo 12 ore sono state spente

tutte le stufette; la riduzione della temperatura dell'aria è stata superiore a quella della temperatura superficiale della parete, pertanto in questa circostanza è stato misurato un flusso termico negativo. Nei cicli successivi, in fase di raffreddamento della camera calda, si è mantenuta accesa una stufetta, con potenza erogata pari a 2 kW.

6. RISULTATI

6.1 Parete n. 1

6.1.1 Misure in regime stazionario

Nei grafici delle figure 3 e 4 si riporta l'andamento temporale della temperatura dell'aria in camera fredda e calda; da essi si può individuare il momento in cui si stabiliscono le condizioni stazionarie necessarie alla determinazione della differenza di temperatura superficiale delle due sezioni di misura e del flusso termico, per il calcolo della resistenza termica della parete.

Il raggiungimento delle condizioni stazionarie in camera fredda si ottiene dopo meno di due giorni, mentre per ottenere le stesse condizioni in camera calda si devono attendere periodi superiori a 4 giorni.

Nelle figure 5, 6, 7 e 8 si riporta l'andamento delle temperature superficiali rilevate dalle termocoppie della sezione di misura e della sezione di guardia nelle camera fredda e calda, dalle quali si può riscontrare che l'entità della massima differenza di temperatura all'interno di ciascuna sezione è di 0,2 °C e l'ordine di grandezza della differenza di temperatura media tra sezione di guardia e di misura è di 0,05 °C. Sulla base di questi dati si verifica, attraverso la (3), che il flusso di calore trasmesso trasversalmente alla parete è minore del 4% di quello trasmesso perpendicolarmente.

L'andamento del flusso termico è riportato in figura 9; esso è dell'ordine di 10 W/m², con oscillazioni di ± 3 W/m² intorno al valor medio.

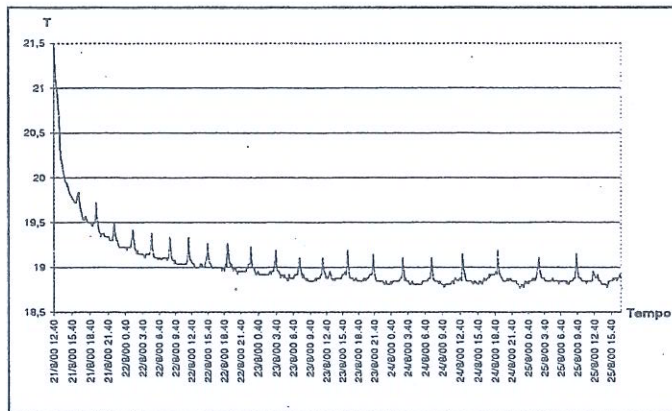


Figura 3: Temperatura dell'aria in camera fredda (parete n.1)

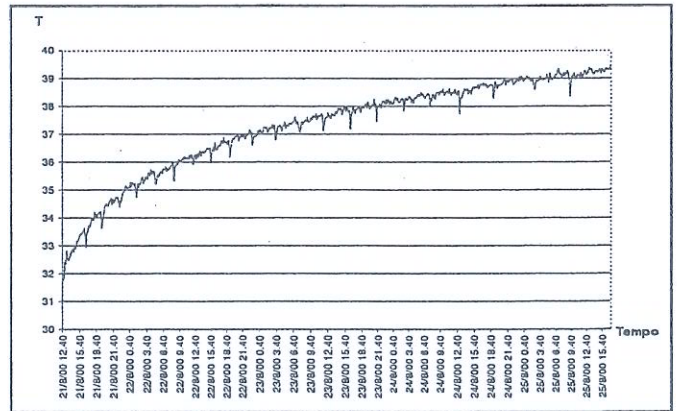


Figura 4: Temperatura dell'aria in camera calda (parete n.1)

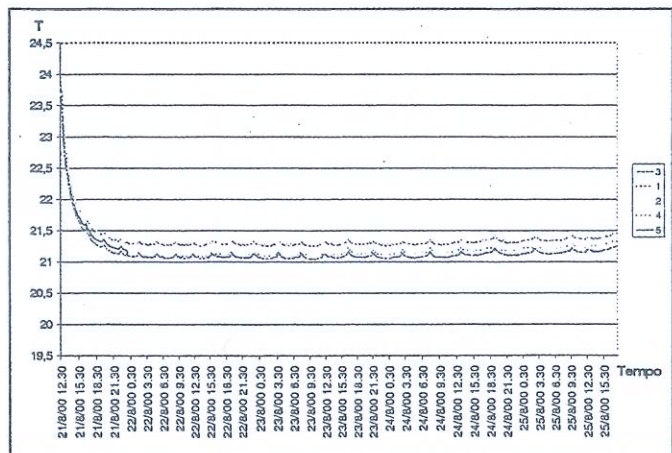


Figura 5: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera fredda (parete n.1)

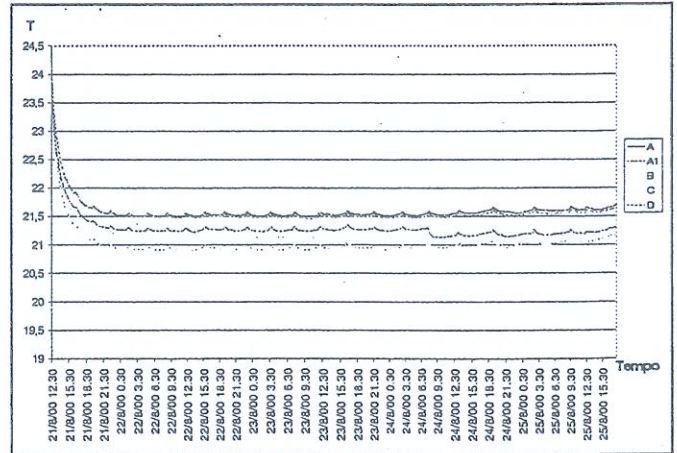


Figura 6: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera fredda (parete n.1)

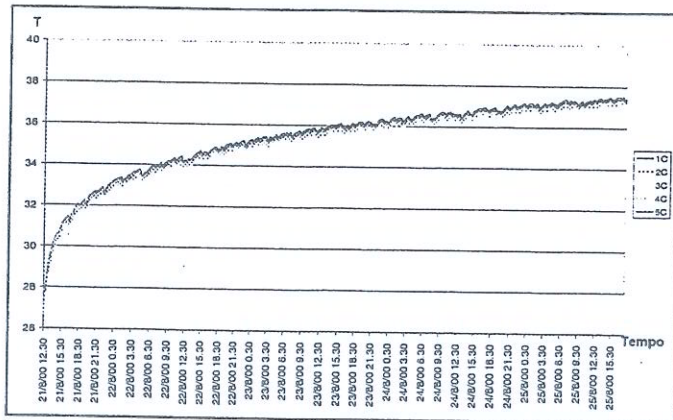


Figura 7: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera calda (parete n.1)

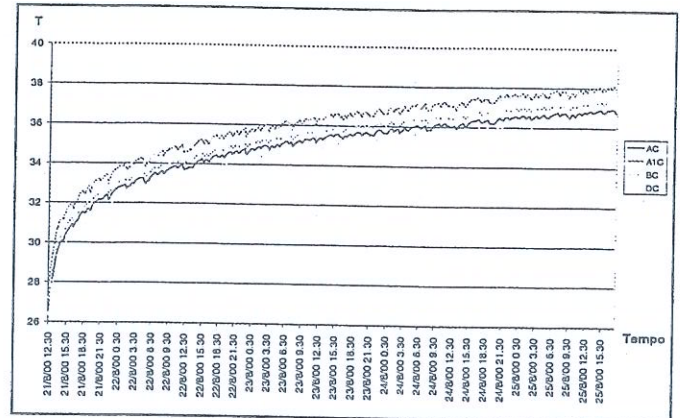


Figura 8: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera calda (parete n.1)

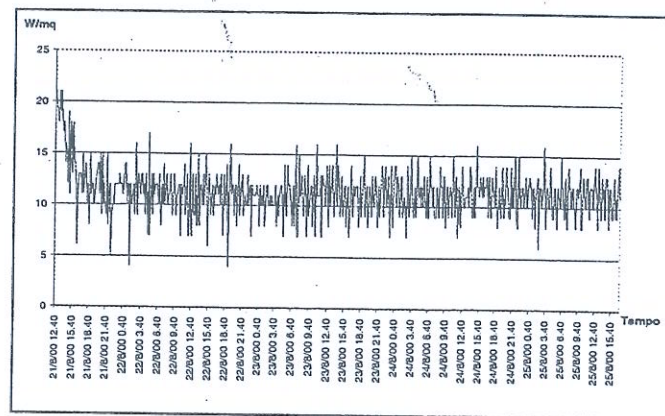


Figura 9: Flusso termico attraverso la parete n.1 in condizioni stazionarie

Il calcolo della resistenza termica R_t della parete è stato effettuato attraverso la (1), considerando il valore medio del flusso termico (Φ_m) durante il regime stazionario e i valori di differenza di temperatura media superficiale delle sezioni di misura misurati ogni 10 minuti. Si è ottenuto un valore della resistenza termica pari a $1,15 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

6.1.2 Misure in regime variabile

La prova ha avuto una durata di 2 giorni, per un totale di due cicli di temperatura. Gli andamenti della temperatura dell'aria in camera fredda ed in camera calda sono rappresentati nelle figure 10 e 11. Nelle figure 12 e 13 è riportato l'andamento della temperatura superficiale rispettivamente della sezione di misura e di guardia in camera fredda, mentre le figure 14 e 15 sono relative alle stesse grandezze in camera calda.

Con i valori di temperatura superficiale misurati dalle 5 termocoppie posizionate nelle sezioni di guardia sui due lati della parete, si è calcolata la relativa temperatura media, ad intervalli regolari di 10 minuti.

Avendo a disposizione i valori di flusso termico Φ (fig.16) e le temperature medie delle sezioni di guardia del lato caldo e freddo, si è potuto applicare il metodo della media progressiva proposto dalla prEN 12494, per il quale la resistenza termica si ottiene secondo la (2).

Il valore ottenuto dalla (2) è ancora pari a $1,15 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, uguale al valore misurato in condizioni stazionarie.

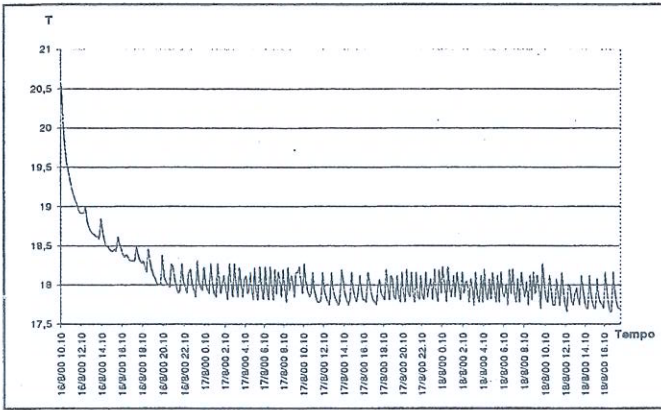


Figura 10: Temperatura dell'aria in camera fredda (parete n. 1)

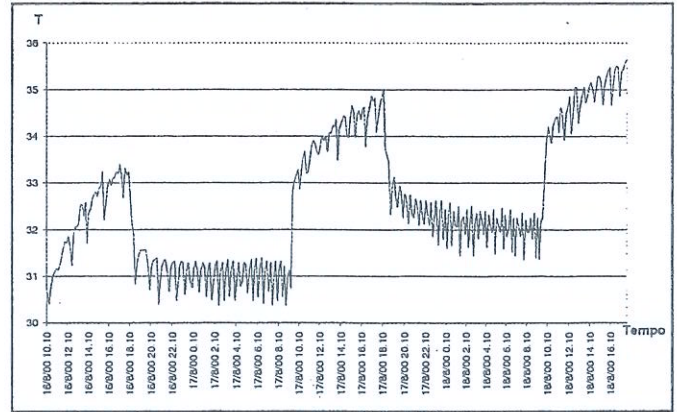


Figura 11: Temperatura dell'aria in camera calda (parete n. 1)

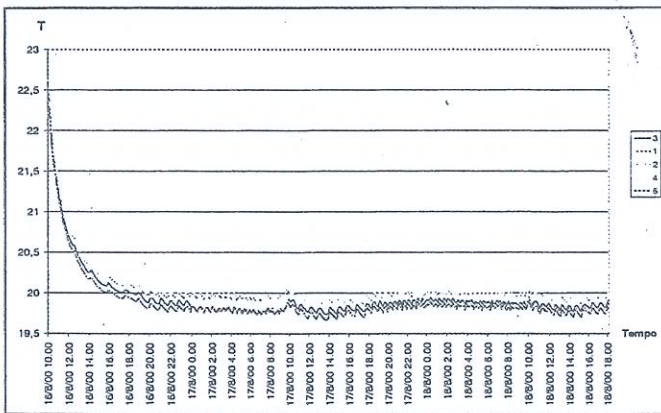


Figura 12: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera fredda (parete n.1)

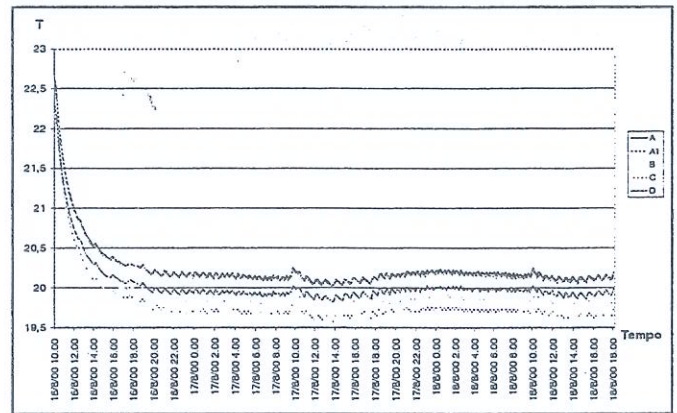


Figura 13: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera fredda (parete n.1)

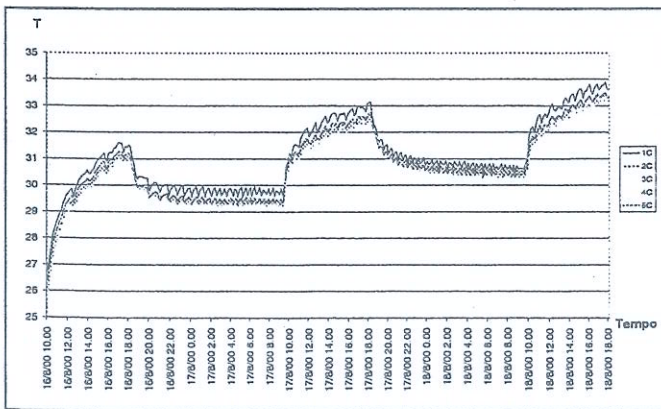


Figura 14: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera calda (parete n.1)

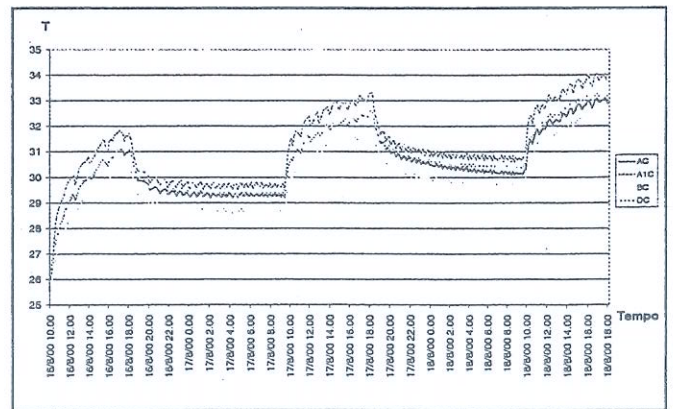


Figura 15: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera calda (parete n.1)

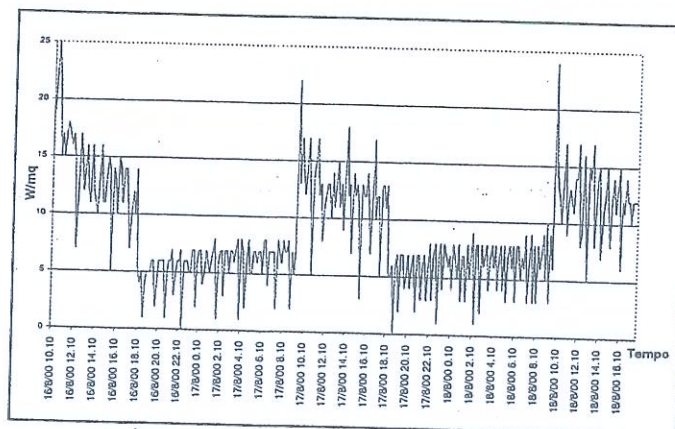


Figura 16: Flusso termico attraverso la parete n. 1 in regime variabile

6.2 Parete n.2

6.2.1 Misure in regime stazionario

In fig. 17 e 18 sono riportati l'andamento della temperatura dell'aria rispettivamente in camera fredda ed in camera calda. L'andamento della temperatura dell'aria in camera fredda presenta un brusco innalzamento dovuto allo spegnimento del condizionatore a seguito dell'interruzione accidentale dell'erogazione dell'energia elettrica. Nonostante lo spegnimento del condizionatore sia durato per circa 20 ore, le condizioni di equilibrio analoghe a quelle che si avevano prima dell'interruzione si sono raggiunte appena due ore dopo il ripristino dell'energia elettrica.

In fig. 19 e 20 sono riportati i grafici relativi alla temperatura superficiale della sezione di misura e di guardia del lato freddo della parete. Dall'analisi della fig. 19 si evince che la massima differenza di temperatura misurata è di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (termoresistenze 5 e 1).

Nella sezione di guardia la differenza massima di temperatura tra le termoresistenze è di $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In fig. 21 e in fig. 22 sono riportati rispettivamente i grafici della temperatura superficiale della sezione di misura e di guardia nella camera calda. Anche in questo caso si nota una disuniformità di temperatura pari a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nella sezione di misura e di $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ nella sezione di guardia.

Dal grafico di fig. 22 si evince infine che le condizioni stazionarie si raggiungono dopo un tempo di 5 giorni, quando le temperature si stabilizzano su valori attorno a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'andamento del flusso termico è riportato in fig. 23; le oscillazioni attorno al valore medio sono di modesta entità (3% circa). Infatti nel periodo di regime stazionario è stato calcolato un valore medio di $29,5\text{ W/m}^2$ ed una deviazione standard di $1,2\text{ W/m}^2$. Il flusso di calore trasmesso trasversalmente alla parete e valutato secondo la (3) è inferiore al 4% di quello trasmesso ortogonalmente, osservato che la massima differenza di temperatura all'interno della sezione di misura è inferiore a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e la differenza di temperatura media tra le due sezioni è inferiore a $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Il calcolo della resistenza termica è stato condotto con le stesse modalità descritte per la parete n. 1; il valore ottenuto è pari a $0,42\text{ m}^2\text{ K/W}$.

6.2.2 Misure in regime variabile

La prova ha avuto la durata di 5 giorni, per un totale di 5 cicli di temperatura. In figura 24 e 25 sono riportati rispettivamente gli andamenti della temperatura dell'aria in camera fredda ed in camera calda. Dal grafico di fig. 24 si evince che la temperatura dell'aria in camera fredda si è mantenuta pressoché costante, attorno a $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, per tutto il periodo di misura; le oscillazioni che ha subito sono state inferiori a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In camera calda, a seguito dei cicli di accensione e spegnimento delle stufette, la temperatura ha subito delle oscillazioni tra un minimo di circa $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed un massimo di circa $42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nelle figure 26 e 27 sono riportate rispettivamente le temperature superficiali della sezione di misura e di guardia della camera fredda. Si evince un andamento periodico regolare delle temperature, con valori minimi rilevati intorno alle ore 16 e massimi intorno alle ore 4; infatti, a differenza di quanto avviene per la parete n. 1, a più elevata resistenza termica, con la parete n. 2 la temperatura superficiale in camera fredda risente dei cicli impostati in camera calda.

In figura 28 e 29 sono riportati rispettivamente gli andamenti della temperatura superficiale della sezione di guardia e di misura della camera calda. La temperatura superficiale (fig. 29) segue la temperatura dell'aria, con valori massimi e minimi contemporanei.

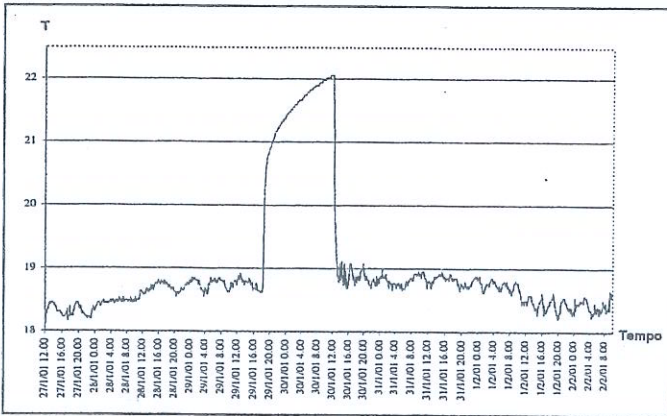


Figura 17: Temperatura dell'aria in camera fredda (parete n. 2)

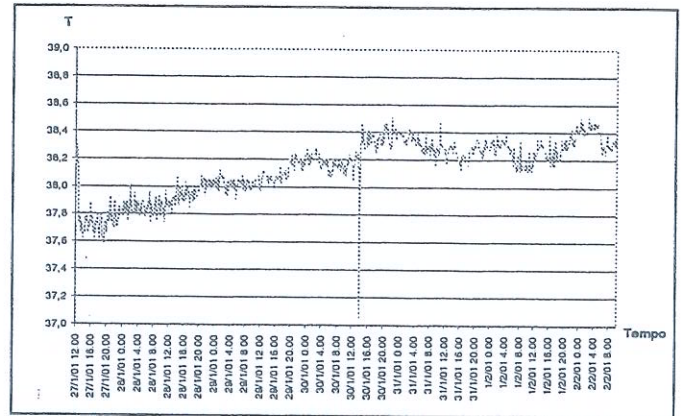


Figura 18: Temperatura dell'aria in camera calda (parete n.2)

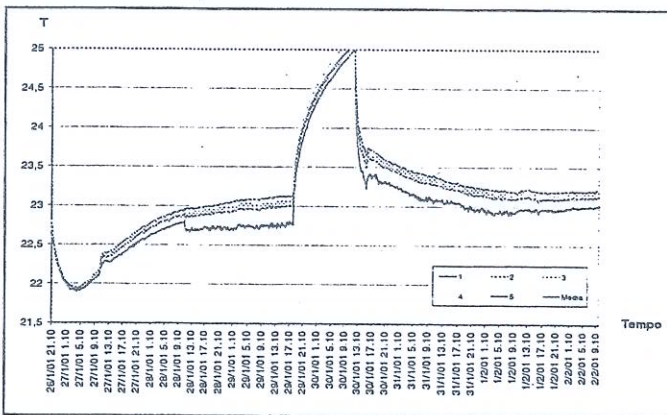


Figura 19: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera fredda (parete n.2)

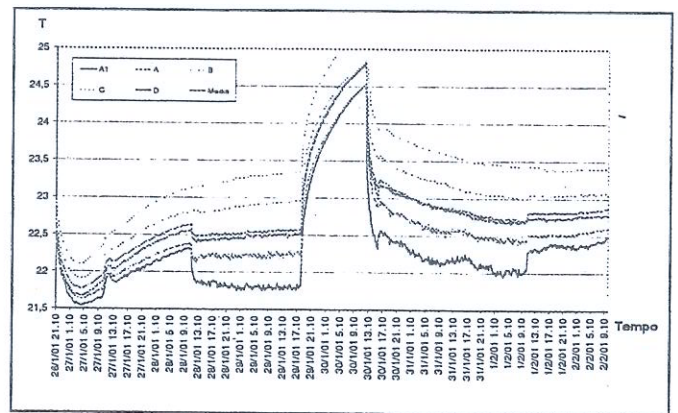


Figura 20: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera fredda (parete n.2)

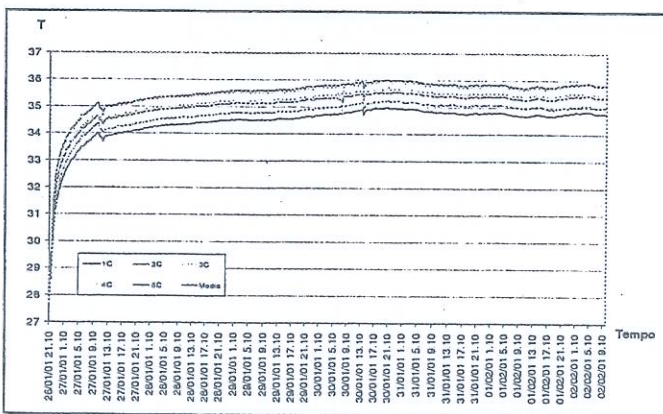


Figura 21: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera calda (parete n.2)

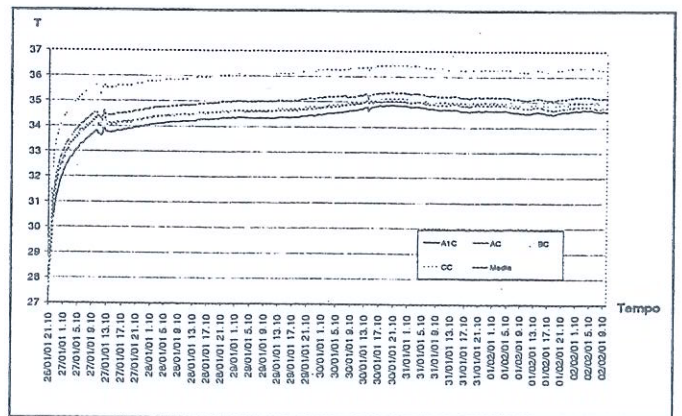


Figura 22: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera calda (parete n.2)

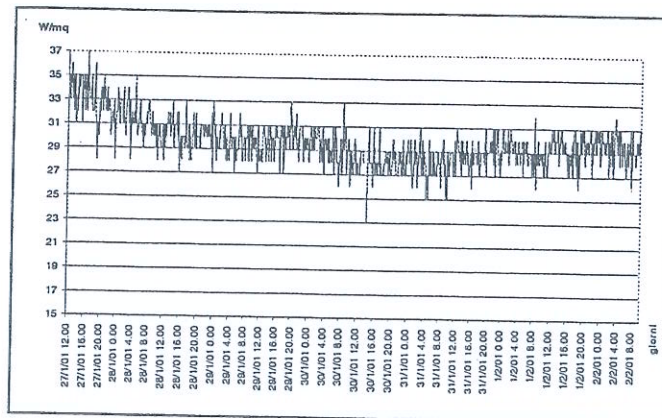


Figura 23: Flusso termico attraverso la parete n. 2 in condizioni stazionarie

Nel grafico di fig. 30 è riportato infine l'andamento del flusso termico attraverso la parete. Esso presenta dei salti bruschi al momento dell'accensione e dello spegnimento delle stufette, allorchè si realizza la massima variazione della differenza tra temperatura dell'aria e superficiale, alla quale il termoflussimetro è sensibile. Esso indica flussi positivi quando la temperatura dell'aria che lambisce una delle sue superfici sensibili è superiore alla temperatura superficiale della parete, viceversa misura flussi negativi. Infatti dopo lo spegnimento delle stufette (ore 21 del 02/02/01), la temperatura dell'aria è diminuita più rapidamente di quella superficiale, provocando un flusso termico negativo, ovvero dalla parete all'aria (fig. 30).

Il calcolo della resistenza termica in regime variabile è stato calcolato con lo stesso procedimento visto per la parete n.1; il valore ottenuto è pari a $0,42 \text{ m}^2\text{K/W}$, coincidente con quello misurato in condizioni stazionarie.

7. VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI MISURA

La valutazione dell'incertezza di misura è stata effettuata seguendo le indicazioni della UNI CEI ENV 13005 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura". L'incertezza nella misura della resistenza termica dipende dalle singole incertezze che si hanno nella misura della differenza di temperatura superficiale e del flusso termico. L'incertezza nella misura della differenza di temperatura, $u(\Delta T)$, dovuta alla risoluzione del dispositivo di acquisizione ($0,01 \text{ }^\circ\text{C}$), è pari a $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$. La risoluzione del dispositivo di acquisizione del flusso termico ($0,1 \text{ W/m}^2$) comporta un'incertezza $u(\Phi)$ di $0,029 \text{ W/m}^2$. Applicando la legge di propagazione dell'incertezza, contenuta nella UNI CEI ENV 13005, per l'incertezza della misura della resistenza termica si ottiene un valore di $0,09 \text{ m}^2/(\text{K W})$, relativamente ad un ΔT di $20 \text{ }^\circ\text{C}$, ed un flusso termico dell'ordine di 12 W/m^2 , valori che si riferiscono alla prova in condizioni stazionarie della parete n.1. Per la parete n.2, in cui si ha la stessa differenza di temperatura tra le due camere, ma un flusso termico dell'ordine di 30 W/m^2 , l'incertezza nella misura della resistenza termica è di $0,02 \text{ m}^2/(\text{K W})$. L'incertezza è pertanto compresa tra il 5 e il 8 % del valore misurato.

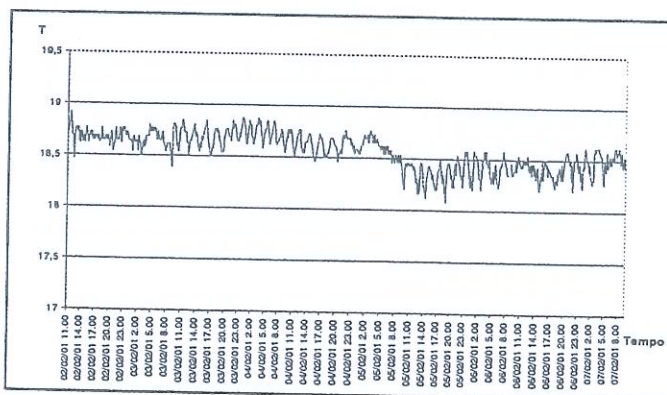


Figura 24: Temperatura dell'aria in camera fredda (parete n. 2)

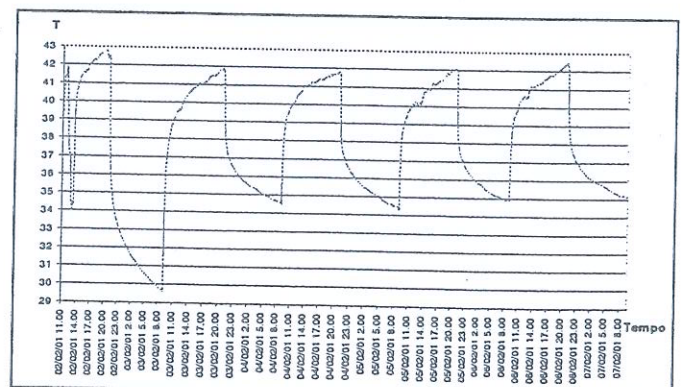


Figura 25: Temperatura dell'aria in camera calda (parete n. 2)

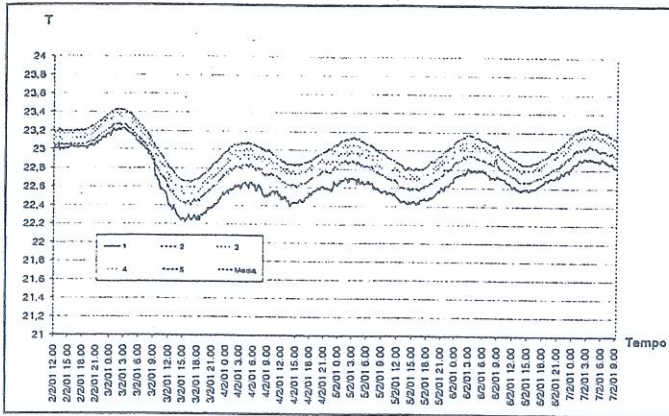


Figura 26: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera fredda (parete n. 2)

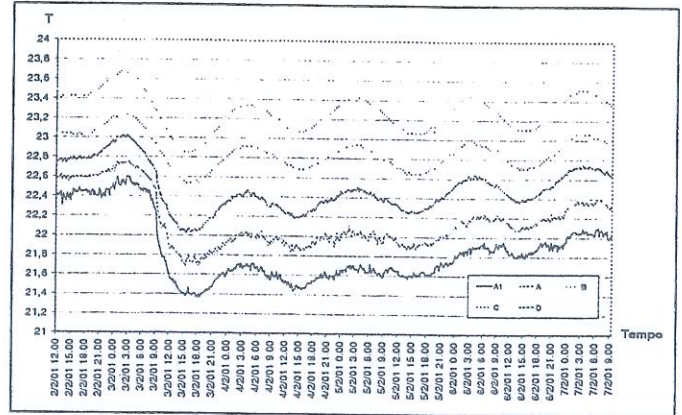


Figura 27: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera fredda (parete n. 2)

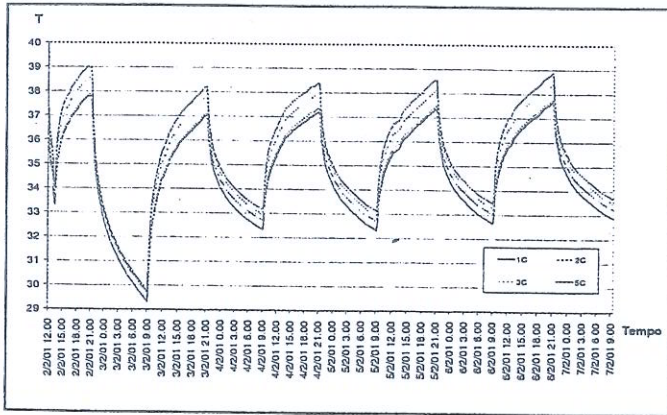


Figura 28: Temperatura superficiale della sezione di misura della camera calda (parete n. 2)

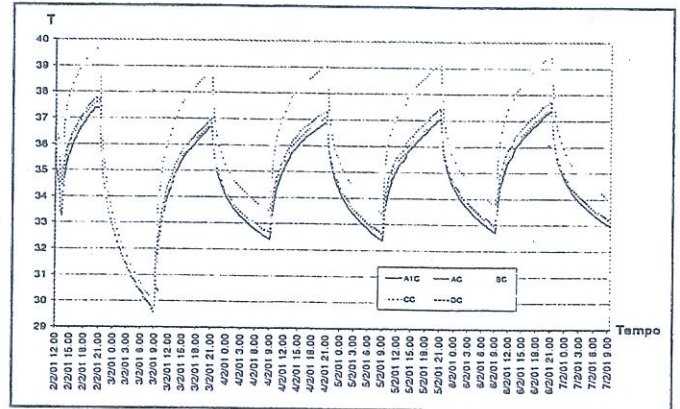


Figura 29: Temperatura superficiale della sezione di guardia della camera calda (parete n. 2)

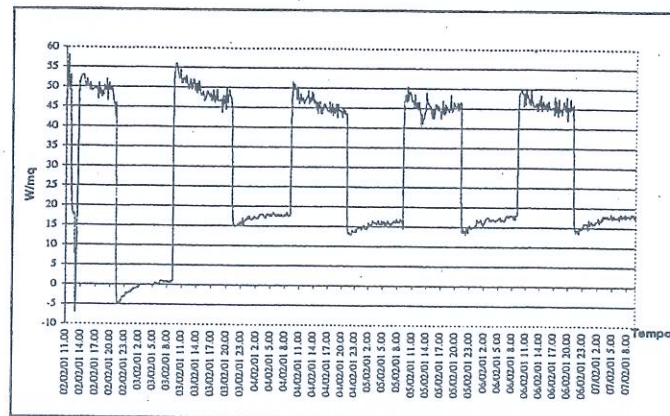


Fig. 29: Flusso termico attraverso la parete n. 2 in regime variabile

8. CONCLUSIONI

La determinazione della resistenza termica di pareti in muratura è di primaria importanza nel calcolo dei carichi termici degli edifici e nel corretto dimensionamento degli impianti di climatizzazione. I valori misurati in laboratorio non sempre coincidono con quelli misurati in situ, soprattutto perché le condizioni di temperatura ai due lati delle pareti possono essere controllate rigorosamente nel primo caso, mentre variano con le condizioni climatiche nel secondo. A tal fine si è messa a punto una metodologia di misura della resistenza termica che possa essere estesa anche alle situazioni reali; si è così individuata in laboratorio la resistenza termica di due pareti in muratura di differenti caratteristiche sia in condizioni di regime stazionario che variabile, ai sensi delle raccomandazioni tecniche EN 1934 e prEN 12494. Le pareti sono state costruite tra due camere a temperature diverse; in regime stazionario la differenza di temperatura è stata mantenuta costante e dell'ordine di 20 °C, in regime variabile si sono impostate oscillazioni di temperatura regolari nella camera calda, mantenendo costante la temperatura nella camera fredda. La determinazione della resistenza termica secondo le due metodologie ha fornito valori pressoché uguali. Questo risultato conferma che sono congruenti e che, anziché simulare in laboratorio condizioni reali, con questa metodologia si potrebbe misurare direttamente la resistenza termica di pareti in situ.

9. ELENCO DEI SIMBOLI

- R_t = resistenza termica [$m^2 \text{ °C} / W$]
 T_{si} = temperatura superficiale in camera calda [$^{\circ}C$]
 T_{se} = temperatura superficiale in camera fredda [$^{\circ}C$]
 Φ = flusso termico [W]
 λ_f = conducibilità termica del termoflussimetro [$W/m \text{ °C}$]
 λ_s = conducibilità termica della parete [$W/m \text{ °C}$]
 p = perimetro della sezione di misura [m]
 ΔT_g = differenza di temperatura media superficiale della sezione di misura e di guardia [$^{\circ}C$]
 $u(\Delta T)$ = incertezza di misura della differenza di temperatura superficiale [$^{\circ}C$]
 $u(\Phi)$ = incertezza di misura del flusso termico [W/m^2]
 $u(R_t)$ = incertezza di misura della resistenza termica [$m^2/(K W)$]

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 1934 "Thermal performance of buildings – Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter – Masonry", 1998.
 [2] prEN 12494 "Building components and elements – In situ measurement of the surface to surface thermal resistance", 1996.
 [3] Aureli C., Grignaffini S., "Determinazione della resistenza termica di componenti edilizi in opera: misure sperimentali e metodi numerici", 54° Congresso Nazionale ATI, L'Aquila 1999.
 [4] UNI CEI ENV 13005 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura", 2000.
 [5] Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Young I. Cho, "Handbook of Heat Transfer", Third Edition, Mc Graw Hill, 1998.
 [6] J.P. Holman, "Heat transfer", S I metric edition, Mc Graw Hill, 1989.
 [7] M. Necati Özisik, "Heat Transfer", Mc Graw Hill, 1985.