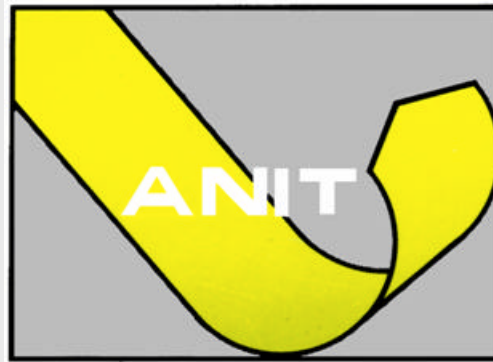




Convegno

SAIE – sala Sinfonia



www.anit.it

LA MISURA DELLA TRASMITTANZA IN OPERA DI PARETI EDILIZIE

Prof. Marco Perino – Dip. di Energetica Politecnico di Torino



PREMESSE - 1

L'acquisizione dei dati per la diagnosi energetica di un edificio esistente o per la verifica di uno di nuova costruzione comporta spesso notevoli difficoltà legate alla non reperibilità del progetto cartaceo e alla non corrispondenza di questo con il costruito.

Nel caso di superfici di involucro opache, quando non sia nota la loro stratigrafia, è necessario avere strumenti di misura in opera delle caratteristiche termofisiche della parete.

PREMESSE - 2

E' dunque auspicabile mettere a punto procedure di misura standardizzate ed ottimizzate, che riducano il più possibile le prevedibili imprecisioni derivanti da metodi non adeguati.

Tra le norme sviluppate presso il CEN il progetto di norma prEn 15203 "*Energy performance of buildings – Assessment of energy use and definition of ratings*" stabilisce nell'allegato A le modalità di acquisizione dati per la strutture opache degli edifici esistenti soggetti alla certificazione energetica.

PREMESSE - 3

Indicazioni simili sono contenute anche nelle raccomandazioni del sottocomitato del CTI 1 e 6 per le “*Prestazioni energetiche degli edifici*” pubblicate nel novembre del 2003.

In particolare ai fini della valutazione della trasmittanza termica delle pareti opache sono possibili quattro scenari.

La prima suddivisione avviene sulla base della conoscenza o meno della stratigrafia della struttura.

PREMESSE - 4

- 1) La stratigrafia della struttura è nota. In tal caso la trasmittanza deve essere calcolata in accordo con la norma prEN ISO 6946:2005.
- 2) La stratigrafia non è nota: si possono scegliere due procedure alternative :
 - a) eseguire un foro di piccole dimensioni per stabilire la stratigrafia della parete mediante un endoscopio, oppure eseguire un carotaggio e stabilire direttamente le caratteristiche del materiale. Una volta nota la stratigrafia della parete la trasmittanza viene calcolata in accordo con la norma prEN ISO 6946:2005.

PREMESSE - 5

- 2) La stratigrafia non è nota: si possono scegliere due procedure alternative :
- b) eseguire una misura in opera della trasmittanza della parete.

Come si vedrà, nella pratica è poi più agevole e affidabile effettuare il rilievo in opera della conduttanza della parete edilizia piuttosto che la misura della trasmittanza, adottando per la determinazione del valore assunto dai coefficienti liminari di scambio interno ed esterno le procedure di calcolo normate (**Rif. UNI ...**)

UN PO' DI TEORIA - 1

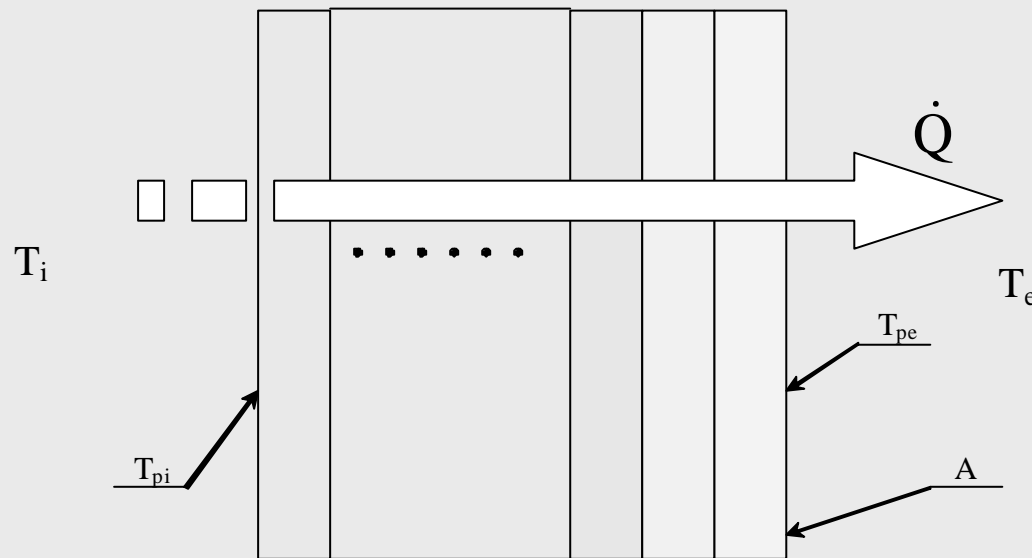
La misura in opera della trasmittanza delle pareti edilizie - scopi:

- *verifica in opera della resistenza termica o della trasmittanza delle pareti*
- *valutazione degli effetti della messa in opera sulle proprietà termofisiche del manufatto*
- *valutazione degli effetti prodotti dall'umidità*
- *certificazione energetica dell'edificio*

In particolare quest'ultimo obiettivo risulta oggi di notevole interesse alla luce della direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia

UN PO' DI TEORIA - 1

In termini generali e qualitativi si può definire la conduttanza come la tendenza di una parete a lasciarsi attraversare da un flusso termico.



Data una generica parete edilizia multistrato, il flusso termico, \dot{Q} , che attraversa la parete in condizioni stazionarie

è proporzionale alla differenza di temperatura fra i due ambienti, ΔT , ed alla superficie della parete stessa, A .

UN PO' DI TEORIA - 2

La costante di proporzionalità che lega il flusso specifico, $\varphi = \frac{\dot{Q}}{A}$, al ΔT sarà funzione delle proprietà termofisiche della parete e prende il nome di trasmittanza, U .

In *regime stazionario* il trasporto di calore attraverso una parete può dunque essere definito attraverso tre parametri fra loro legati:

- *la resistenza termica totale della parete (R)*
- *la trasmittanza termica (U)*
- *la conduttanza termica (C)*

UN PO' DI TEORIA - 3

$$R = \frac{T_i - T_e}{\varphi} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{\varphi}{T_i - T_e} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

$$C = \frac{\varphi}{T_{pi} - T_{pe}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

UN PO' DI TEORIA - 4

Queste grandezze possono essere calcolate in funzione delle caratteristiche geometriche e termofisiche degli strati di cui è composta la parete:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{h_e}}$$

$$C = \frac{1}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

UN PO' DI TEORIA - 5

Se le condizioni termiche alle quali è sottoposta la parete fossero di regime stazionario R, C ed U potrebbero essere ricavati *per via sperimentale* semplicemente attraverso la misura istantanea del flusso specifico, ϕ , e delle temperature interna ed esterna.

Questa condizione è relativamente facile da riprodurre in laboratorio, ma non è mai, praticamente, verificata nel caso di pareti in opera. Infatti, gli edifici nelle condizioni operative reali, sono soggetti a condizioni al contorno fortemente variabili nel tempo.

LA MISURA IN OPERA – I metodi -1

le procedure di misura adottate in campo dovranno quindi prevedere una opportuna elaborazione dei dati sperimentali in modo da gestire correttamente gli effetti transitori (accumulo e rilascio di energia) indotti dal regime termico variabile.

Sotto l'aspetto strumentale si individuano due famiglie di tecniche di misura:

- metodo del calorimetro portatile
- **metodo del termoflussimetro** (HFM – Heat Flux Meter).

LA MISURA IN OPERA - 1

In entrambi i casi la procedura consiste nel monitorare per periodi sufficientemente lunghi:

- il flusso termico specifico attraverso la parete, φ
- le temperature T_i e T_e (se l'obiettivo è la determinazione della trasmittanza, U . Nel caso si voglia misurare la conduttanza, C , della parete si rileveranno, invece, le temperature superficiali T_{pi} e T_{pe}).

La forte non stazionarietà delle condizioni termiche esterne rende però la misura molto lunga.

LA MISURA IN OPERA – I metodi - 2

Infatti, la determinazione di R, U e C in regime termico variabile richiede la “sostituzione” delle grandezze istantanee con i corrispondenti valori medi, valutati su un periodo sufficientemente lungo:

$$U = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{T}_i - \overline{T}_e} \qquad C = \frac{\overline{\varphi}}{\overline{T}_{si} - \overline{T}_{se}}$$

LA MISURA IN OPERA – I metodi - 3

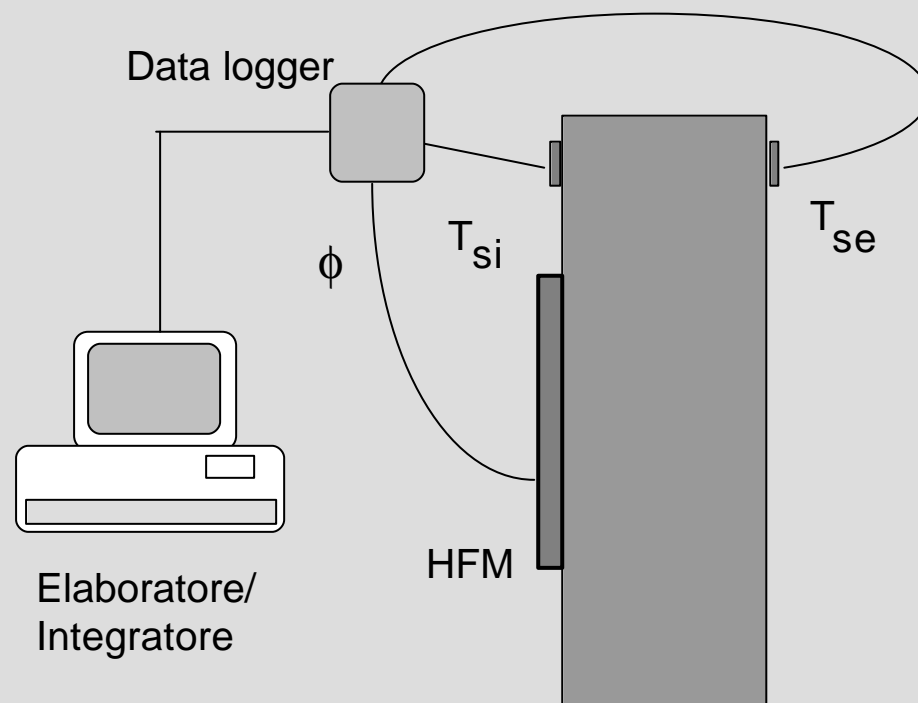
Alternativamente all'uso dei valori medi, è possibile l'adozione dei metodi di identificazione o modelli "black-box" per elaborare i dati misurati.

Queste tecniche di modellazione matematica sono spesso impiegate per caratterizzare il comportamento di sistemi dinamici complessi a partire dalla conoscenza di serie temporali di dati misurati.

I modelli sono detti "black-box" poiché il loro utilizzo non richiede la conoscenza delle caratteristiche e della struttura del sistema fisico al quale il modello viene applicato.

LA MISURA IN OPERA – Il metodo HFM - 1

I risultati ottenibili con l'utilizzo di un termoflussimetro sono in genere buoni, e i dati riportati nella bibliografia collocano il valore degli errori tra l'1% e il 15%, con un valore medio dell'8%.



L'errore di misura è tanto più grande quanto più bassa è la resistenza termica della parete in esame e quanto più elevate sono le resistenze di contatto e quella propria dell'HFM

LA MISURA IN OPERA – Il metodo HFM - 2

Occorre applicare i sensori in una porzione di superficie rappresentativa della “parete corrente” che si desidera caratterizzare. E’ buona norma:

- posizionare il termoflussimetro sul lato interno della parete (per minimizzare gli effetti di disturbo della radiazione solare e per mantenere il sensore in un ambiente meno “aggressivo”),
- rilevare la temperatura superficiale interna ed esterna in almeno due punti diversi ed assumere per l’analisi dei dati la media fra queste due letture (per minimizzare l’effetto di eventuali piccole disomogeneità nella struttura della parete).

LA MISURA IN OPERA – Il metodo HFM - 3

Nella posa di tutti i sensori occorre curare la perfetta adesione del sensore con la parete (dove possibile è raccomandabile l'impiego di "paste termiche" per ridurre la resistenza termica di contatto).

E' necessario evitare che i sensori siano investiti direttamente dalla radiazione solare (Il diverso comportamento ottico rispetto alla superficie della parete, infatti, indurrebbe sensibili errori di misura).

Al fine di minimizzare gli errori di misura è buona norma effettuare la sperimentazione durante una stagione in cui vi siano forti differenze di temperatura fra ambiente interno ed esterno.



LA MISURA IN OPERA – Il metodo HFM - 4

Nel caso si adottino tecniche di analisi dei dati di tipo “black-box”, occorre che le misure siano effettuate quando le variabili monitorate presentano variazioni temporali accentuate (condizioni al contorno fortemente dinamiche).



LA MISURA IN OPERA – Il metodo HFM - cautele

- *Verificare l'assenza di anomalie all'interno della parete nella zona di misura*
- *Assicurare il buon contatto termico fra superfici della parete e sensori*
- *Posizionare il termoflussimetro sulla faccia interna della parete*
- *Usare due sensori collocati in posizioni diverse per la misura delle temperature superficiali (assumere il valor medio)*
- *Evitare l'irraggiamento solare diretto sui sensori*
- *Effettuare la misura in periodi in cui il **DT** sia elevato*
- *Nel caso di analisi dei dati con tecniche "black-box" assicurare condizioni al contorno dinamiche.*

L'ELABORAZIONE DEI DATI MISURATI - Metodi

Si possono utilizzare due tecniche di analisi dei dati sperimentali:

- a) il metodo delle medie progressive
- b) il metodo dell'identificazione "black-box"

La tecnica a) consiste nell'impiegare opportuni valori medi temporali delle grandezze monitorate determinati sulla base di un periodo di monitoraggio sufficientemente lungo:

$$C = \frac{\int_0^t \varphi(t) \cdot dt}{\int_0^t [T_{pi}(t) - T_{pe}(t)] \cdot dt}$$



IL METODO DELLE MEDIE PROGRESSIVE

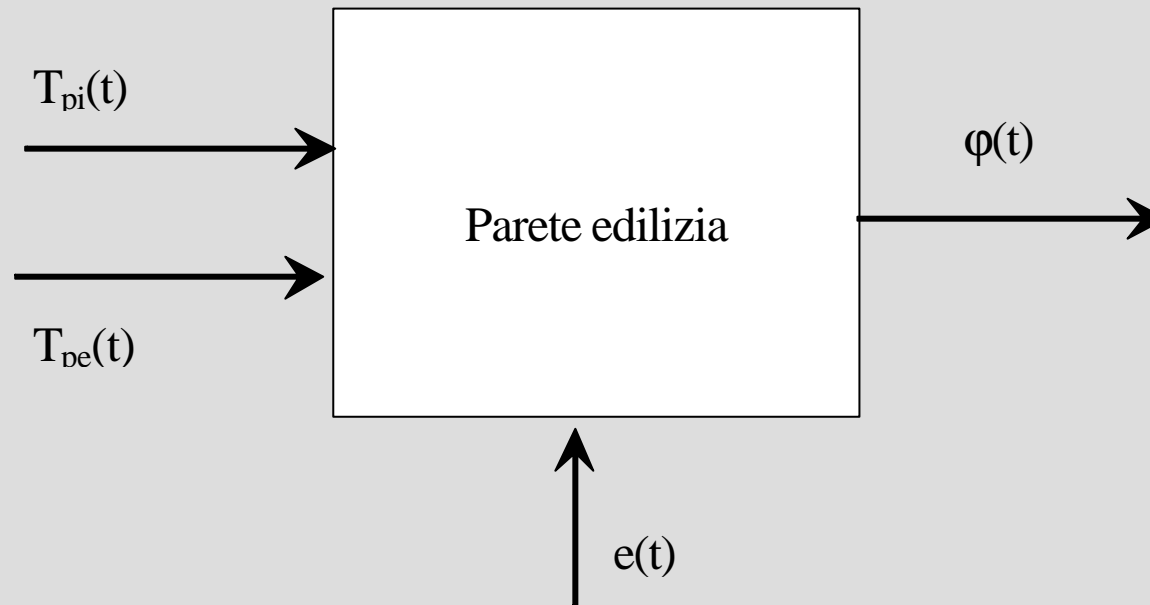
E' una procedura che fornisce prestazioni affidabili, ma presenta il non trascurabile difetto di richiedere periodi di monitoraggio lunghi per garantire l'ottenimento di valori medi significativi (e quindi risultati con precisioni soddisfacenti).

Più è alta l'inerzia termica della parete sotto analisi (pareti "pesanti") più dovrà essere protratta nel tempo l'acquisizione delle grandezze.



IL METODO "BLACK-BOX" - 1

Schema di modello "black-box" di una parete edilizia:



IL METODO “BLACK-BOX” - 2

Il modello più semplice ed efficace per caratterizzare le pareti edilizie è rappresentato da un semplice modello ARX del tipo:

$$y(t) + a_1 \cdot y(t - \tau) + a_2 \cdot y(t - 2\tau) + a_3 \cdot y(t - 3\tau) + \dots + a_{n_a} \cdot y(t - n_a \tau) = \\ b_{11} \cdot u_1(t - \tau) + b_{12} \cdot u_1(t - 2\tau) + b_{13} \cdot u_1(t - 3\tau) + \dots + b_{1,n_1} \cdot u_1(t - n_1 \tau) + \\ b_{21} \cdot u_m(t - \tau) + b_{22} \cdot u_m(t - 2\tau) + b_{23} \cdot u_m(t - 3\tau) + \dots + b_{2,n_m} \cdot u_m(t - n_m \tau)$$

Con $y(t) \equiv \varphi$, $u_1(t) \equiv T_{pi}$ e $u_2(t) \equiv T_{pe}$. Ovvero:

$$\left(1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i \right) \cdot (q^{-1}) \cdot \varphi(t) = \left(\sum_{j=1}^{nb1} b_{1j} \right) \cdot (q^{-1}) \cdot T_{pi}(t) + \left(\sum_{k=1}^{nb2} b_{2k} \right) \cdot (q^{-1}) \cdot T_{pe}(t)$$

IL METODO “BLACK-BOX” - 3

Sulla base della conoscenza di opportune serie temporali di dati sperimentali, per $y(t)$, $u_1(t)$ e $u_2(t)$, è possibile “identificare” i parametri a_i , b_{1j} , b_{2k} del modello in modo tale che esso descriva adeguatamente il comportamento termico dinamico della parete.

Inoltre, poiché le condizioni termiche a regime permanente possono essere viste come un caso particolare del più generale comportamento dinamico del sistema, il modello dovrà sussistere anche in condizioni di regime stazionario.

IL METODO “BLACK-BOX” - 4

Dunque, devono essere soddisfatte le seguenti uguaglianze:

$$\sum_j b_{1j} = -\sum_k b_{2k}$$

ed anche

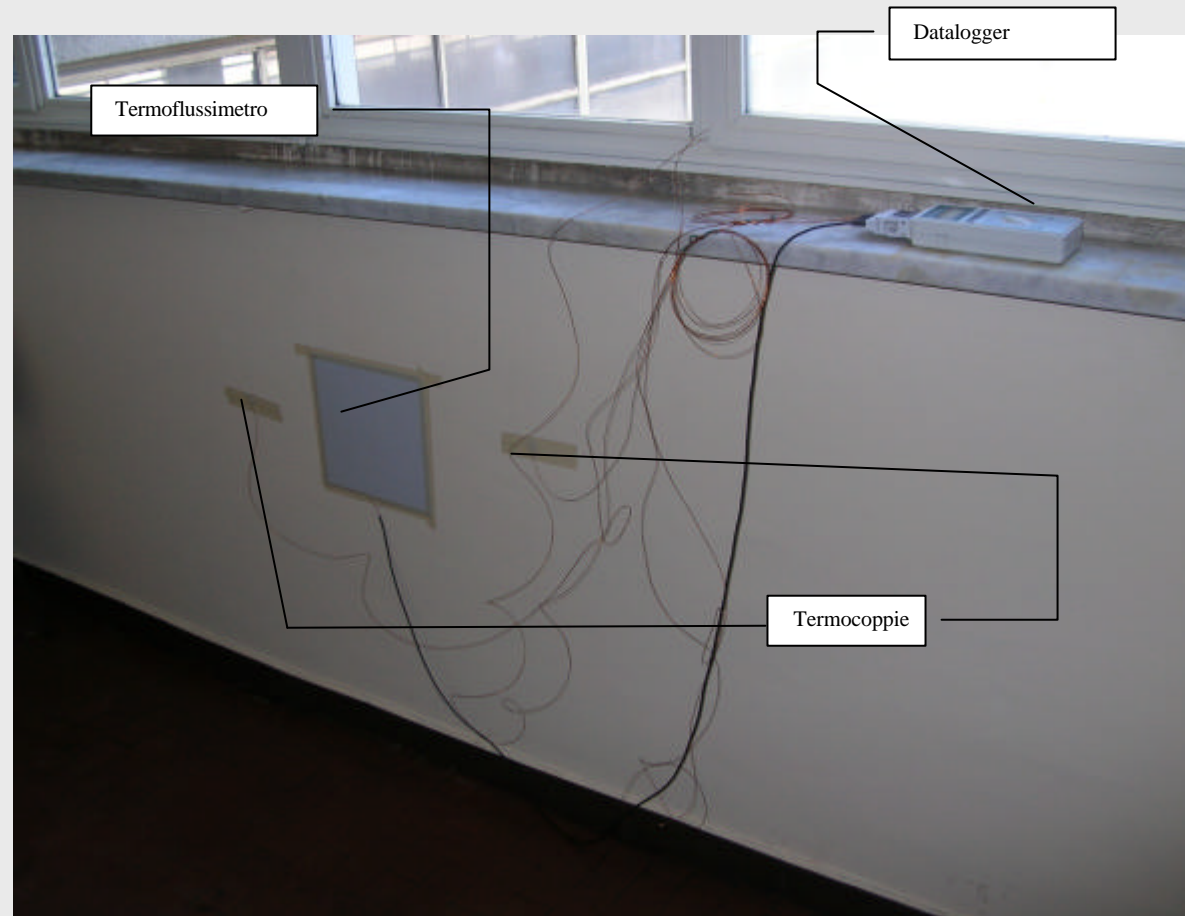
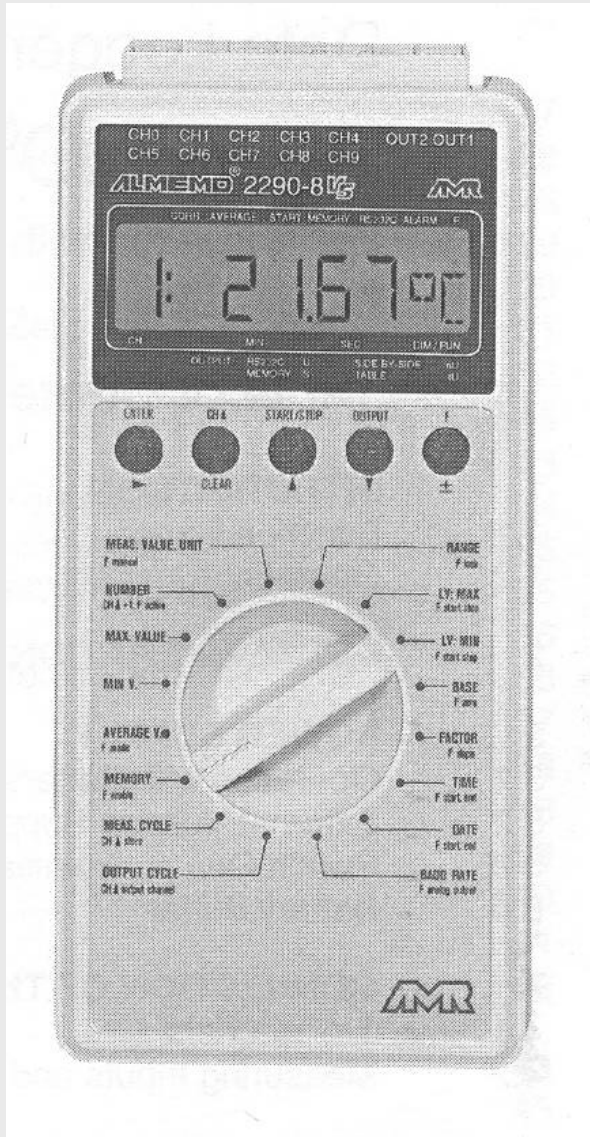
$$C = \frac{\varphi}{T_{pi} - T_{pe}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^{nb1} b_{1j} \right)}{\left(1 + \sum_{i=1}^{na} a_i \right)}$$

ESEMPI DI APPLICAZIONE – La strumentazione

E' costituita da un kit comprendente:

- un datalogger autonomo AMR – AMELMO 2290-8 con la possibilità di connettere sino a 5 sensori diversi,
- un termoflussimetro a piastra quadrata ($l = 25 \text{ cm}$, $s = 1.5 \text{ mm}$. $R_t \approx 0,05 - 0,075 \text{ m}^2\text{K/W} \Rightarrow \varepsilon_{\max}$ del 10% per $C_{\min} \approx 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- 4 termoresistenze di tipo T per il rilievo delle temperature superficiali della parete (da utilizzarsi a coppie. Due sensori posati sulla superficie interna e due sulla superficie esterna)

ESEMPI DI APPLICAZIONE – La strumentazione

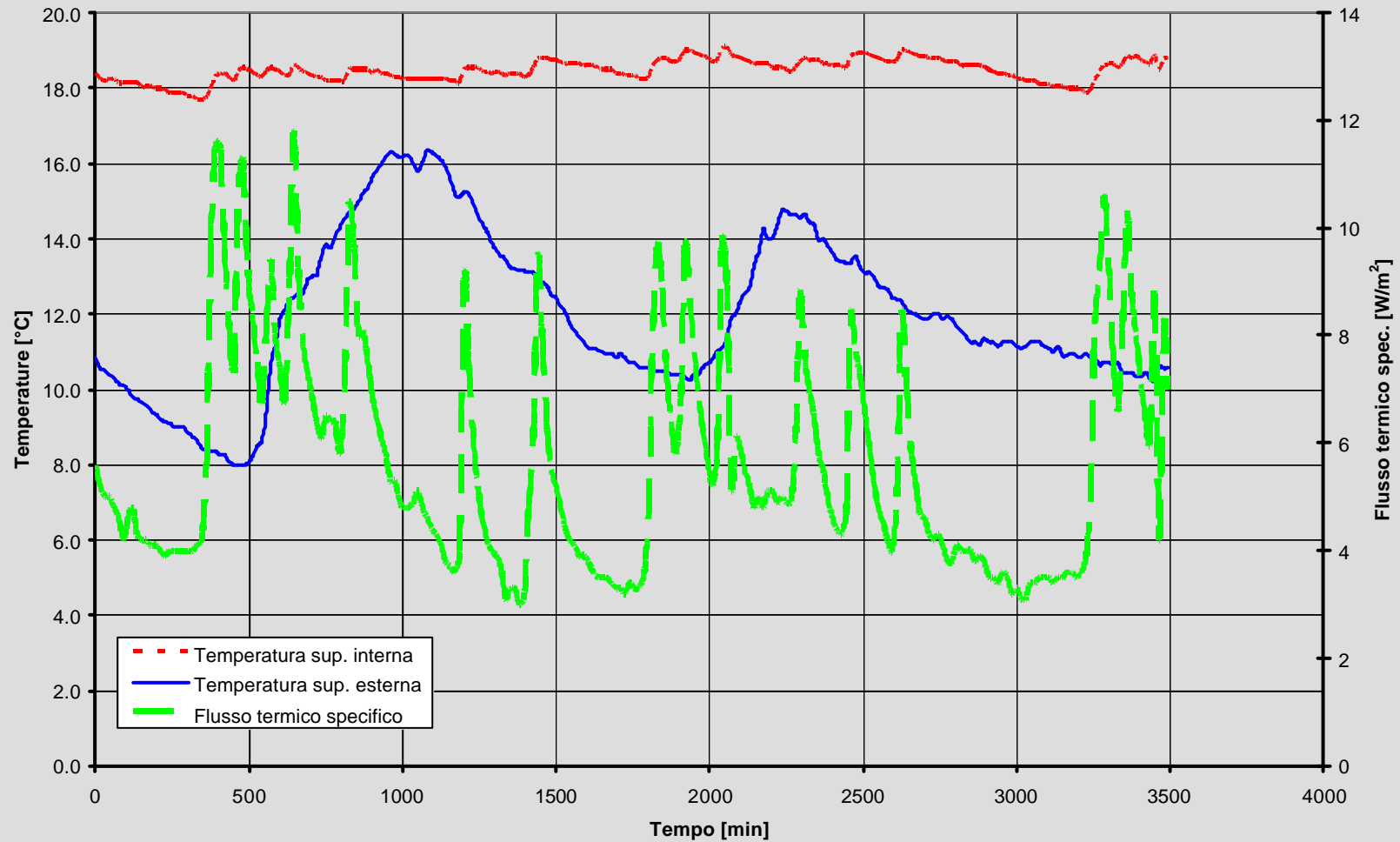


ESEMPI DI APPLICAZIONE – Le pareti analizzate

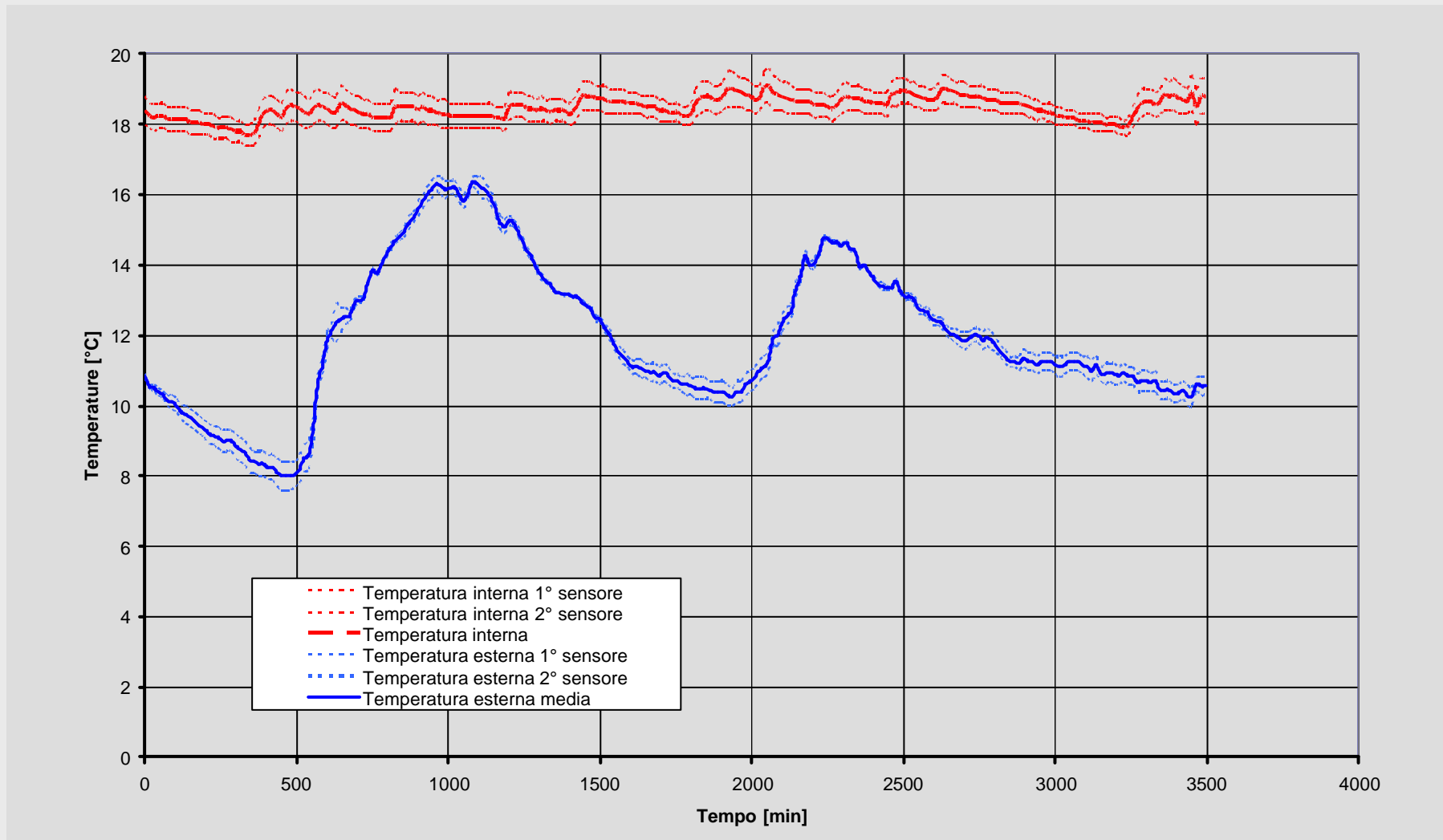
Caso A) – Parete edilizia a stratigrafia interna non nota, relativa ad un edificio degli anni 50 (atteso un basso livello di isolamento). la misura si è protratta per circa 124 ore.

Caso B) – Parete in cassa vuota costituita da stucco plastico esterno, mattone forato da 12 cm, pannello di isolante da 3.5 cm, camera d'aria da 7 cm circa, mattone forato da 6 cm e intonaco di malta interno (conduttanza teorica di progetto pari a $0.60 \text{ W/m}^2\text{K}$). Il monitoraggio si è protratto per 58 ore.

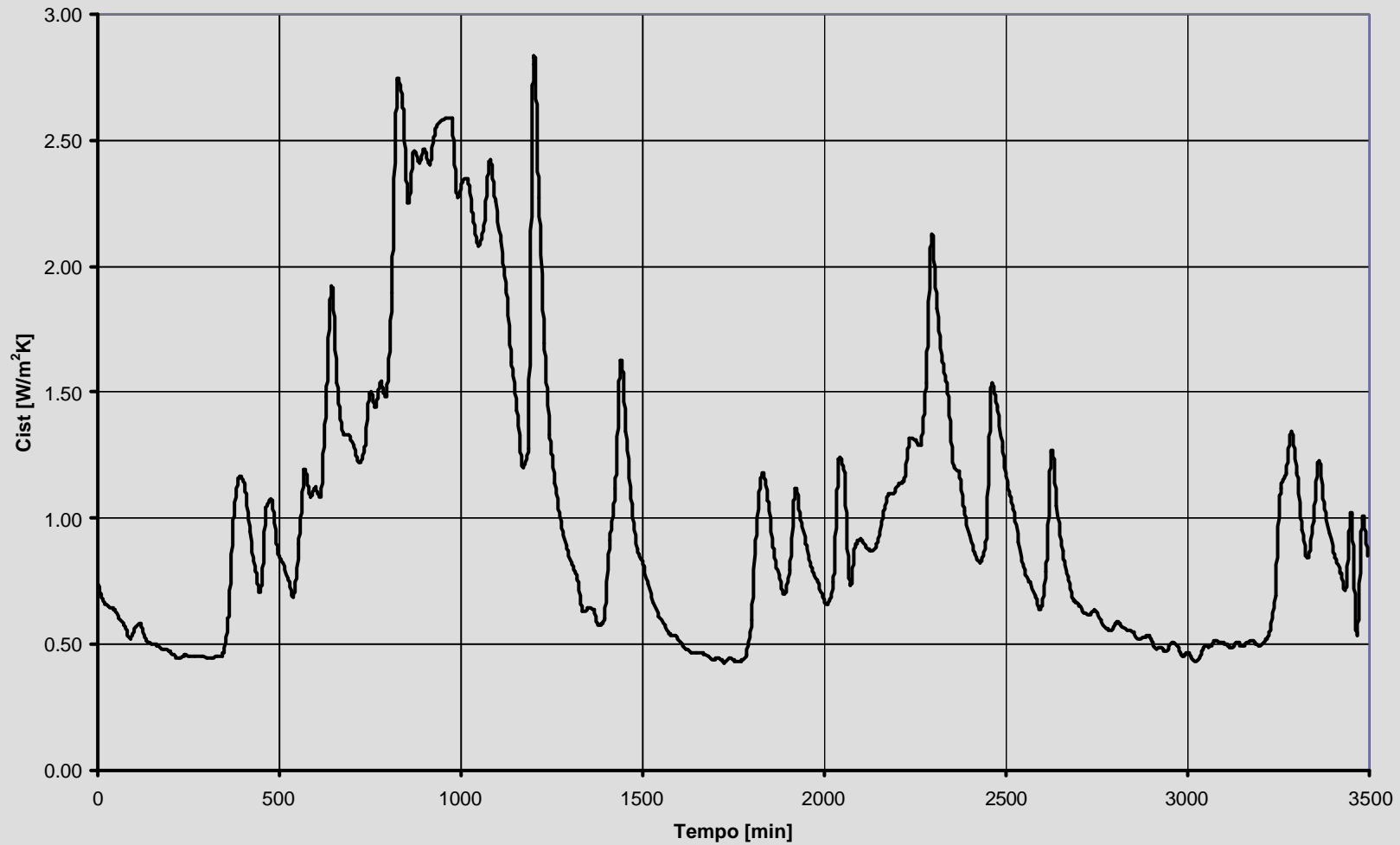
ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso B - j , T_{pi} e T_{pe}



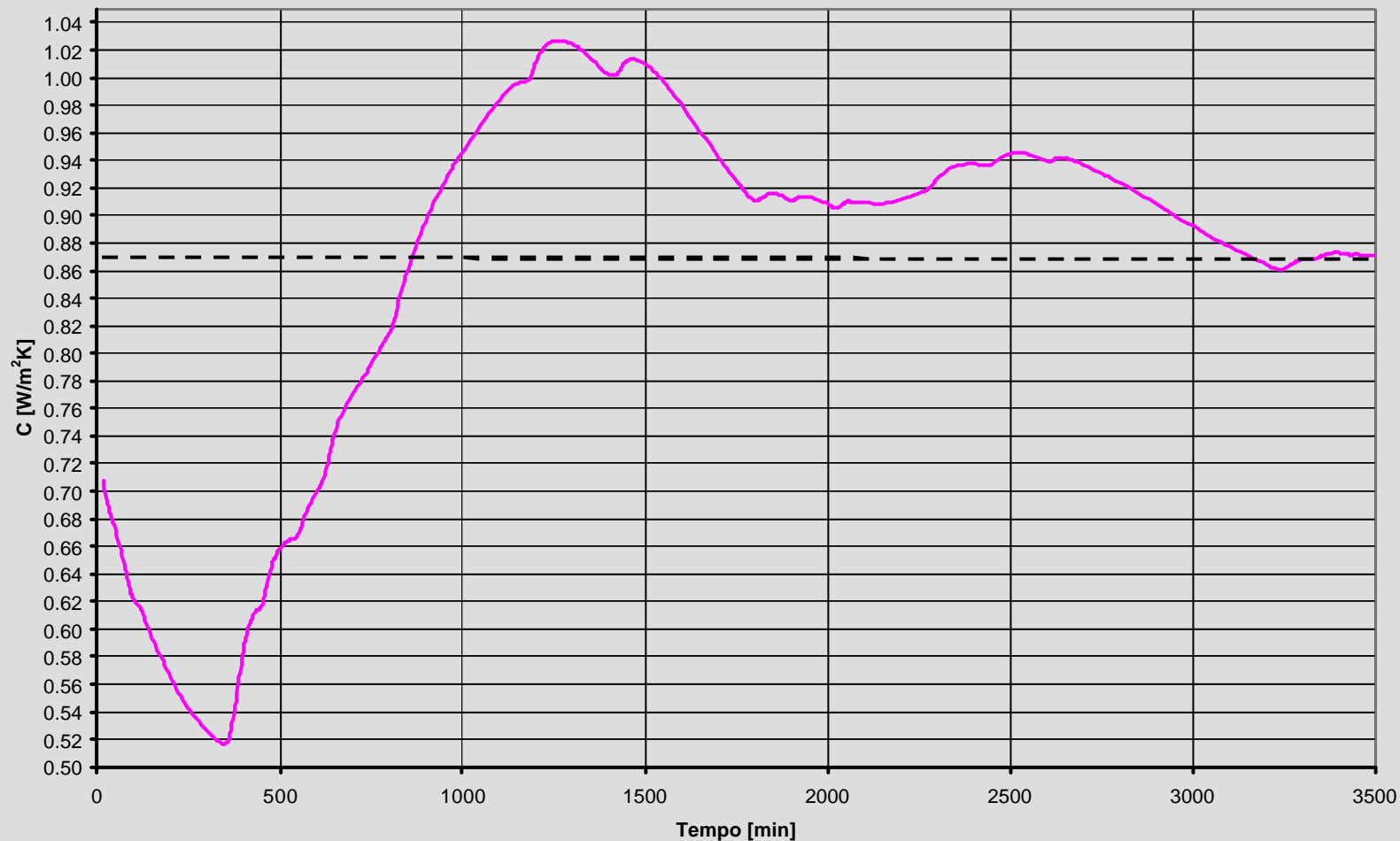
ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso B - T_{pi} e T_{pe}



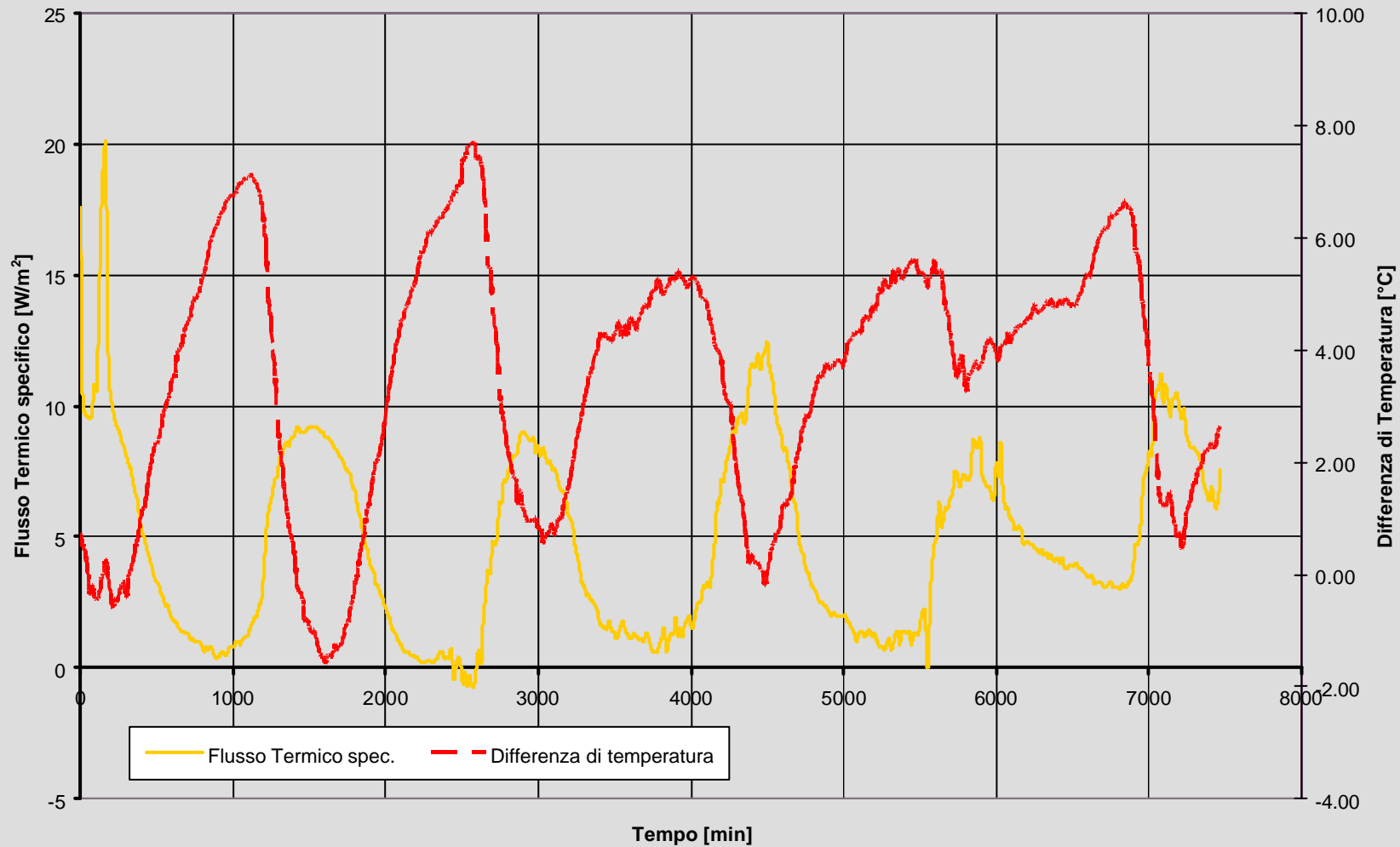
ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso B - $C_{istantanea}$



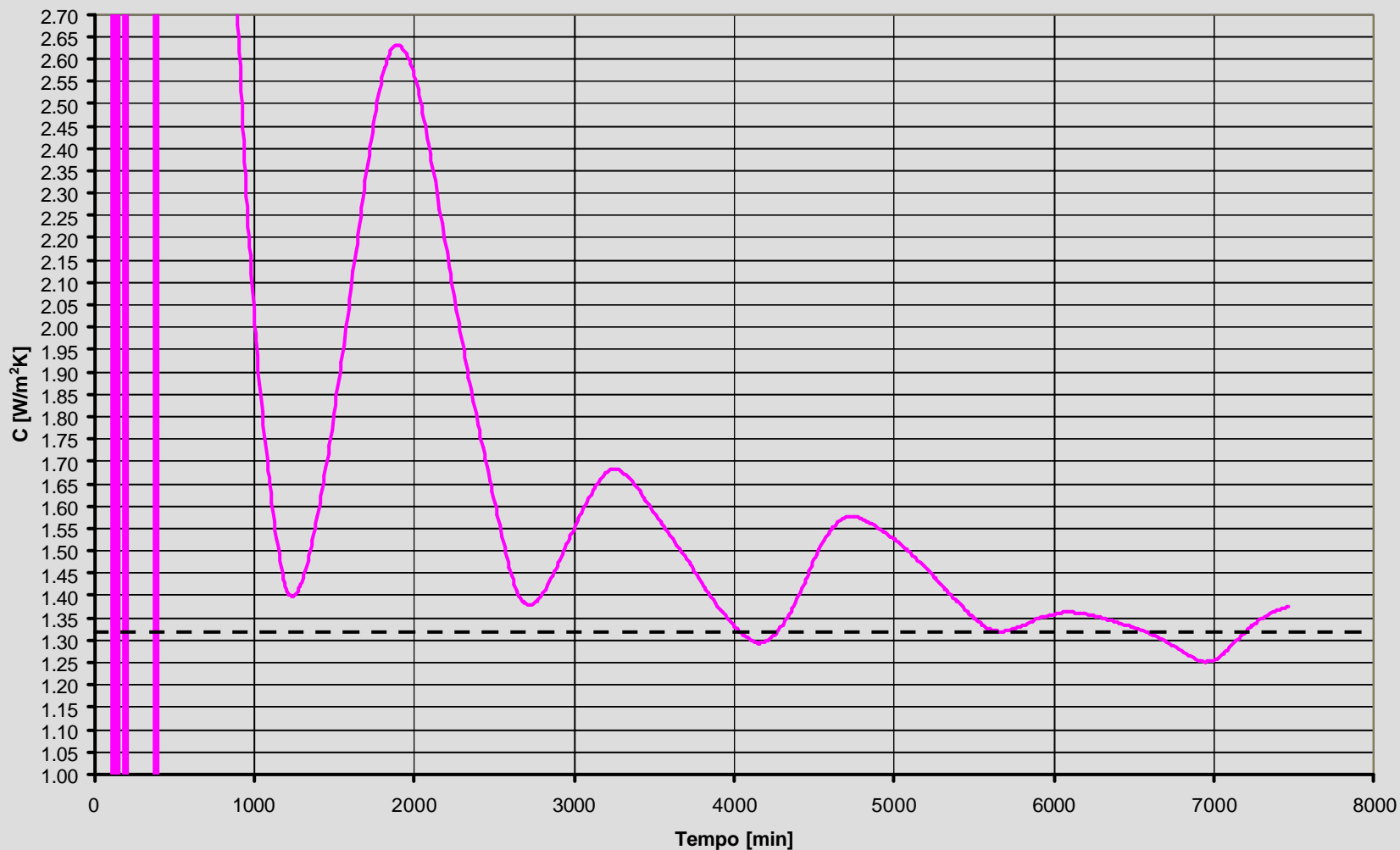
ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso B – $C_{\text{medie progr.}}$



ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso A - j e DT



ESEMPI DI APPLICAZIONE – Caso A – $C_{\text{medie progr.}}$



ESEMPI DI APPLICAZIONE – Commenti

Per entrambe le pareti analizzate, il metodo delle medie progressive fornisce un andamento della conduttanza oscillante smorzato nel tempo che già dopo circa una sessantina di ore consente una stima sufficientemente attendibile di C:

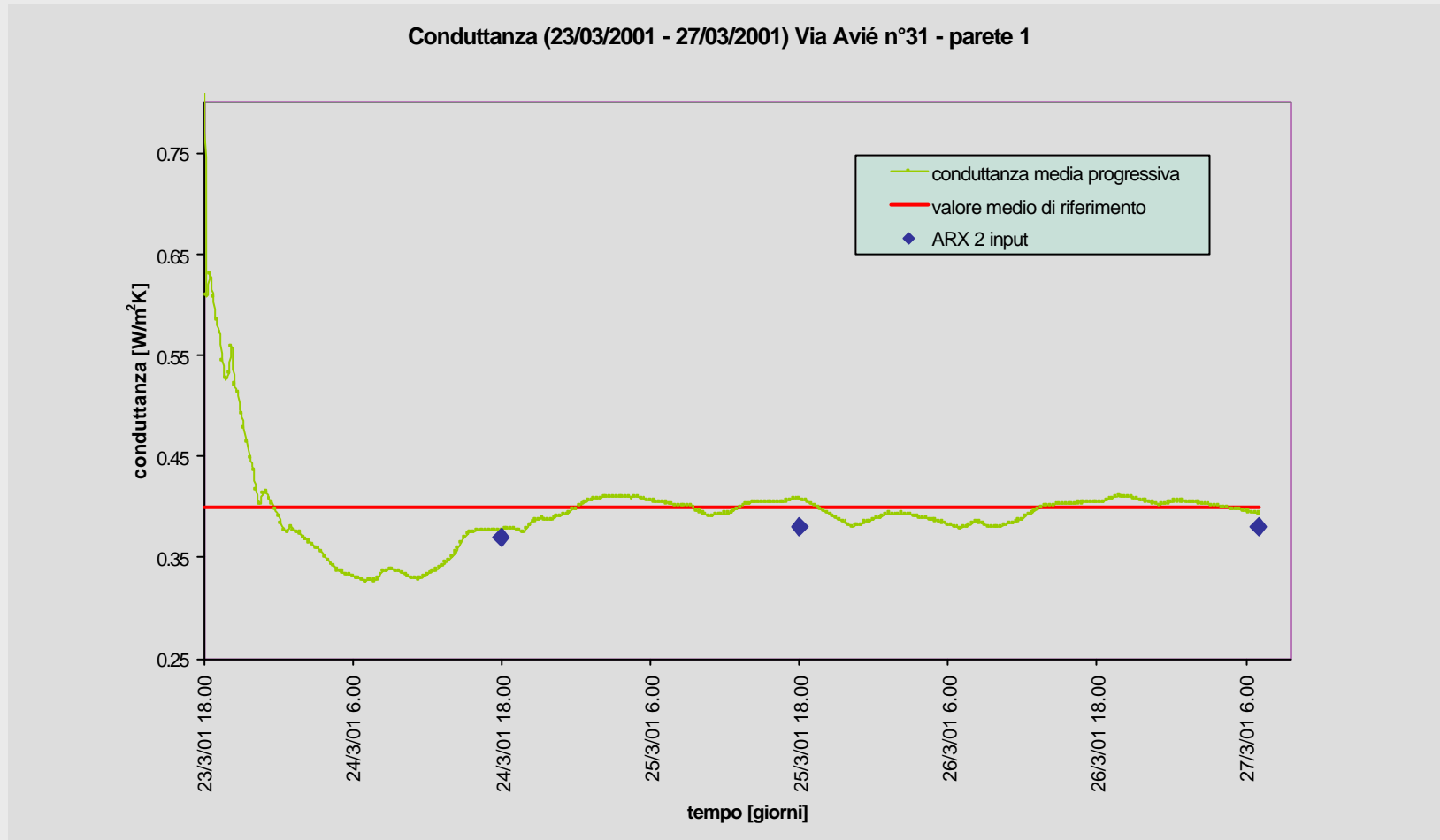
Caso	Conduttanza misurata [W/(m²K)]
A	1.3
B	0.9

ESEMPI DI APPLICAZIONE – Confronto “Black-Box” e medie progressive

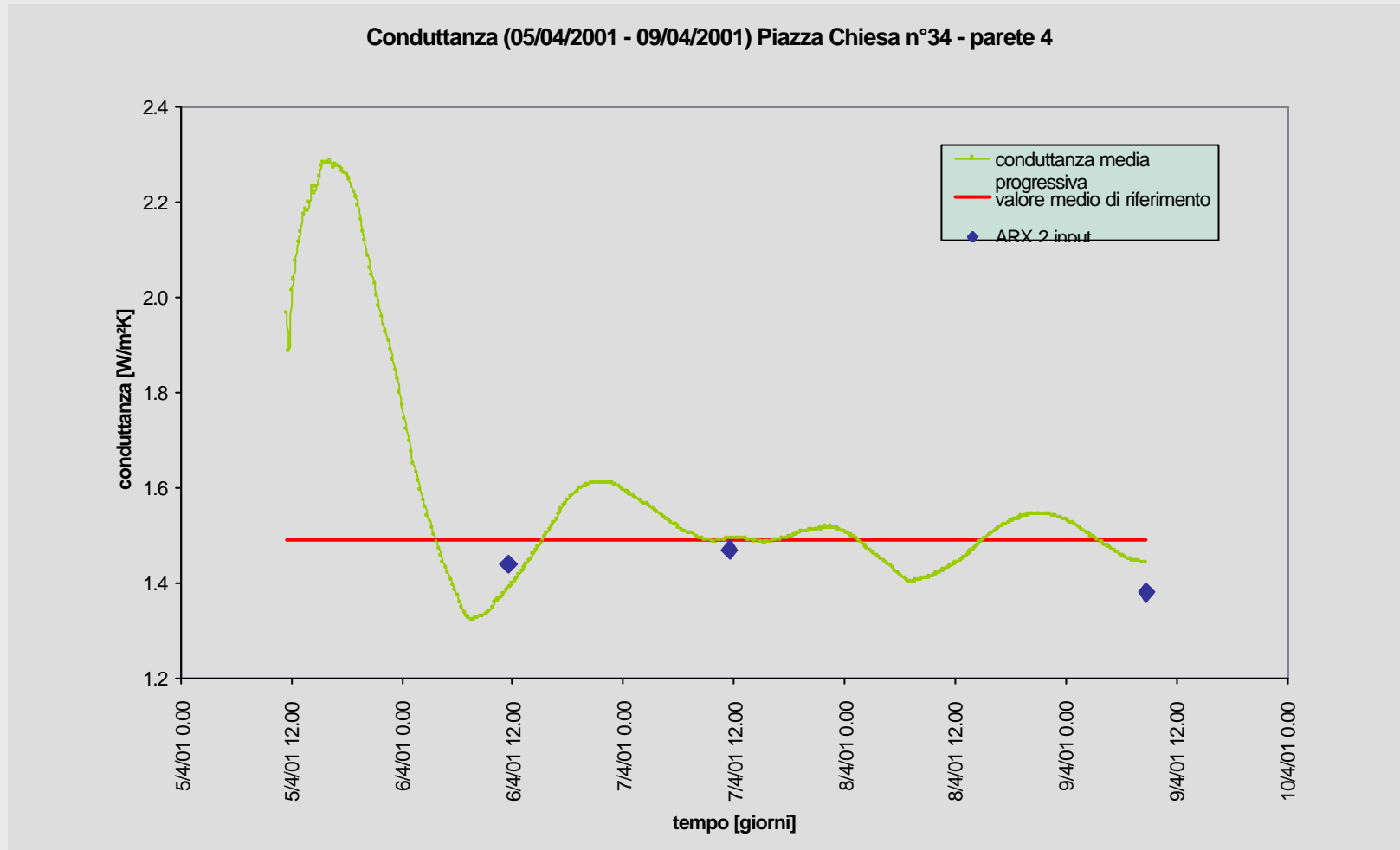
Sono state effettuate varie misure in opera su pareti diverse aventi conduttanze comprese nel campo fra circa 0.4 e 2 W/m²K, elaborando i dati sperimentali sia con il metodo delle medie progressive che con il metodo “black-box”.

La curva continua sui grafici si riferisce al metodo delle medie progressive, i simboli si riferiscono al metodo Black-box applicato su intervalli temporali man mano più lunghi.

ESEMPI DI APPLICAZIONE – Confronto “Black-Box” e medie progressive



ESEMPI DI APPLICAZIONE – Confronto “Black-Box” e medie progressive



ESEMPI DI APPLICAZIONE – Confronto “Black-Box” e medie progressive

I risultati delle due diverse procedure risultano sempre in ottimo accordo; lo scostamento massimo è poco oltre il 10% e mediamente si colloca sul 6%.

parete	Valore medie progressive [W/(m ² K)]	valore ARX [W/(m ² K)]	D [%]
# 1	0.40	0.38	5.0
# 2	0.67	0.67	0.0
# 3	1.22	1.07	11.9
# 4	1.49	1.38	7.4
# 5	1.93	1.76	8.6
# 6	0.80	0.83	4.4

COMMENTI CONCLUSIVI - 1

- La misura della trasmittanza in opera con i termoflussimetri appare affidabile, relativamente economica e facile da sviluppare in pratica,
- la strumentazione necessaria è poco ingombrante e robusta (si possono lasciare in campo i sistemi di misura per i periodi necessari allo svolgimento dei monitoraggi),
- l'elaborazione dei dati con la procedura delle medie mobili è affidabile e facile da sviluppare. Fornisce buone garanzie sull'ottenimento di risultati significativi, ma presenta lo svantaggio di richiedere tempi di misura relativamente lunghi, specie nel caso di pareti molto pesanti.

COMMENTI CONCLUSIVI - 2

- l'elaborazione dei dati mediante l'approccio black-box presenta il vantaggio di richiedere, generalmente, monitoraggi più brevi (se confrontati con il metodo delle medie mobili). Tuttavia, trattandosi di una tecnica puramente numerica, vi sono maggiori rischi di una non convergenza della soluzione del problema. Inoltre, in alcuni casi, può accadere che i risultati della procedura siano affetti da forti errori e/o non siano significativi dal punto di vista fisico.

LA PROCEDURA SUGGERITA - 1

1. rilevare i profili delle grandezze di interesse per almeno 72 – 96 ore,
2. elaborare i dati sperimentali mediante la tecnica delle medie mobili,
3. se le oscillazioni del profilo temporale della conduttanza ricavata al punto precedente sono sufficientemente smorzate e consentono una stima affidabile del valore “vero”, fermare la misura ed assumere quest’ultimo come misura della conduttanza in opera della parete,

LA PROCEDURA SUGGERITA - 2

4. in caso di pareti particolarmente pesanti, per cui il profilo determinato mediante la procedura delle medie mobili risulti fortemente oscillante (e dunque non è possibile stimare il valore “vero”), applicare la tecnica black-box,
5. se la stima di C effettuata con la tecnica Black-box è affidabile fermare la misura ed assumere quest'ultimo valore di C come misura della conduttanza in opera della parete, in caso contrario prolungare i monitoraggi delle temperature e dei flussi e ripetere i punti dal 2 al 4.