

## Elaborazione di misure termoflussimetriche in opera per determinare i parametri termici di un elemento edile

Andrea Rocchetti <sup>1,\*</sup>, Federico Mazzelli <sup>1</sup>, Leone Pierangeli <sup>2</sup> and Fabio Scurpi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale - DIEF - Università degli Studi di Firenze, Via S. Marta 3, 50139 Firenze

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura – DIDA – Università degli Studi di Firenze, via della Mattonaia 14, 50121 Firenze

\* Autore di riferimento: E-Mail: andrea.rocchetti@unifi.it

---

**Abstract:** La misura in opera dei parametri termici di involucro rappresenta un importante strumento per valutarne lo stato di fatto, azione preliminare e fondante di una corretta strategia del processo di riqualificazione di un edificio. Sempre più queste tecniche di misura si stanno diffondendo anche come criterio di collaudo e verifica delle prestazioni raggiunte "post-operam". Lo standard ISO 9869:2014 definisce, appunto, la metodologia di misura ed elaborazione dati, al fine di valutare la conduttanza termica di un elemento in opera. Obiettivo del presente lavoro è quello di presentare i risultati preliminari di un metodo numerico di elaborazione dei dati misurati secondo lo standard ISO9869:2014 per la valutazione delle caratteristiche termiche dinamiche dell'elemento edile come indicato dalla standard UNI EN ISO 13786:2008. Il metodo analizza i dati misurati mediante tecniche di condizionamento del segnale per definirne il necessario regime periodico e procede ad una regressione numerica per ottenere le componenti di trasmittanza ed ammettenza termica del componente in esame. Sono state condotte misure termoflussimetriche e di temperatura superficiale su elementi edili opachi. I dati misurati sono stati elaborati secondo il metodo proposto ed i risultati analizzati per valutare l'applicabilità del metodo.

**Keywords:** misure termoflussimetriche; ISO9869; trasmittanza termica periodica; fattore di attenuazione; sfasamento.

---

### 1. Introduzione

L'elaborazione di una corretta strategia di riqualificazione energetica e strutturale di un edificio esistente si basa sull'analisi preliminare dello stato di fatto, che ne evidenzia le carenze ed i punti di forza, al fine di indirizzare sinergicamente gli interventi progettuali agli obiettivi prefissati del

percorso di riqualificazione. Per la diagnosi energetica, la conoscenza dello stato di fatto dell'involucro edile rappresenta un punto chiave, ma la sua caratterizzazione è sovente ottenuta definendo una schematica stratigrafia degli elementi di involucro desunti dalla documentazione progettuale o da rilievi e sondaggi, e assegnando valori di letteratura ai parametri termo-fisici dei materiali costituenti. Lo scostamento del comportamento energetico del sistema schematizzato rispetto al sistema reale può essere anche molto significativo ed è legato a molteplici cause non facilmente sistematizzabili. A tal proposito, la misura in opera dei parametri termici di involucro può rappresentare un importante aiuto, e sempre più si stanno diffondendo tali tecniche, anche come criterio di collaudo e verifica delle prestazioni raggiunte "post-operam". Lo standard ISO 9869:2014 [1] definisce, appunto, la metodologia di misura ed elaborazione dati, al fine di valutare la conduttanza termica stazionaria di un elemento in opera, basandosi sia su un metodo di media progressiva che su un metodo di identificazione numerica "black box". Ampia è la letteratura a commento del metodo di misura della conduttanza termica stazionaria della ISO9869, fra cui, in maniera non esaustiva, citiamo Ficco et al. [2] che confermano che il metodo della media progressive conduce ad una buona stima della resistenza termica di un elemento edile, se i requisiti imposti dallo standard sono soddisfatti, variando da un errore inferiore ad 8% nel caso di condizioni operative ottimali ed estendendo l'incertezza sino al 50% in caso contrario e Desogus et al. [3] che hanno riscontrato buoni risultati nell'utilizzo del metodo delle medie progressive con errori inferiori al 10% quando la differenza di temperatura sulle superfici dell'elemento in misura siano non inferiori a 10°C. Cesaretto e De Carli [4] hanno analizzato ed elaborato i dati raccolti da una campagna di misure in situ estesa su molti edifici dell'area veneta, riscontrando comunque un buon livello di accuratezza ed evidenziando differenze sostanziali nei risultati ottenuti con diverse tecniche di elaborazione.

Altri metodi sono proposti in letteratura, perlopiù votati alla determinazione dei parametri termici stazionari, caratteristici dello scambio termico nel regime invernale, ma anche capaci di valutare il comportamento in condizioni transitorie e non stazionarie. Gori et al [6] presentano un modello per valutare la resistenza termica e la distribuzione di massa termica efficace da misure di temperatura e flusso termico su entrambe le superfici di una parete. Il metodo usa un modello a masse termiche concentrate per descrivere lo scambio termico all'interno dell'elemento ed una analisi statistica come tecnica di ottimizzazione numerica e per la stima delle incertezze.

Le pubblicazioni del EBC Annex 58 [5] "Reliable building energy performance characterization based on full scale dynamic measurement" dell'International Energy Agency, raccolgono il lavoro di un nutrito gruppo di ricercatori afferenti a diversi strutture in tutto il pianeta, sul tema della misura delle proprietà termiche degli involucri degli edifici. Il lavoro si articola su più argomenti, dallo stato dell'arte delle attrezzature più innovative disponibili nei vari centri di ricerca per l'analisi a scala reale del comportamento termico dei manufatti, all'analisi e ottimizzazione delle tecniche di elaborazione e condizionamento dei segnali utili a ridurre i tempi di misura e le relative incertezze mediante l'uso di modelli "grey box", basati quindi sul principio fisico alla base del fenomeno e supportati da strumenti statistici e numerici, per incrementare la rappresentatività della variabili misurate nella caratterizzazione della prestazione energetica dell'edificio.

Se da un lato è possibile supporre che le misure in situ possono rappresentare uno strumento capace di evitare o comunque ridurre l'impatto di incoerenti assunzioni nella stima delle prestazioni energetiche di un elemento edile e che l'adozione di tecniche numeriche di identificazione ed

elaborazione del segnale cercano di caratterizzare il reale comportamento dinamico della massa dell'involucro dell'edificio che le più semplici e tradizionali tecniche stazionarie tendono ad evitare ed eliminare, è anche necessario sottolineare che l'uso di strumentazione e strumenti numerici più complessi rende non banale la stima delle prestazioni termodinamiche dell'involucro di un elemento edile reale e la capacità e competenza dell'operatore diventa uno dei fattori chiave per ottenere un esito positivo.

Obiettivo del presente lavoro è quello di presentare un metodo numerico di elaborazione dei dati misurati secondo lo standard ISO9869:2014 per la valutazione preliminare delle caratteristiche termiche dinamiche dell'elemento edile come indicato dalla standard UNI EN ISO 13786:2008. Il metodo analizza i dati misurati mediante tecniche di condizionamento del segnale per definirne il necessario regime periodico e procede ad una regressione numerica per ottenere le componenti di trasmittanza ed ammettenza termica del componente in esame. Sono state condotte misure termoflussimetriche e di temperatura superficiale su elementi edili opachi secondo lo standard ISO9869:2014. I dati misurati sono stati elaborati secondo il metodo proposto ed i risultati analizzati per valutare l'applicabilità del metodo.

## 2. La parete in misura

Nelle attività didattiche e di tesi proposte agli studenti della Scuola di Ingegneria ed Architettura di Firenze sono state allestite in passato stazioni di misura e strumentazioni orientate alla valutazione delle proprietà termo-fisiche di elementi edili [7, 8]. Attualmente è stata allestita la misura in opera di una parete verticale, denominata *W1*, a piano terra della Scuola di Ingegneria, nel plesso di Santa Marta, in via di Santa Marta 3 a Firenze. La parete è stata scelta perché si affaccia su una corte ed è orientata a ovest, ma completamente schermata dalla radiazione solare diretta dagli edifici adiacenti, in ogni ora di tutti i giorni dell'anno. La parete delimita lo spazio riscaldato di un ufficio del personale della Scuola di Ingegneria dall'esterno. E' di costruzione relativamente recente (intorno agli anni '90) rispetto agli edifici del complesso (anni 50) ed è stata realizzata secondo la stratigrafia proposta in Tabella 1, dove sono anche indicate le presunte caratteristiche termo-fisiche dei materiali costituenti.

**Tabella 1:** stratigrafia della parete *W1*

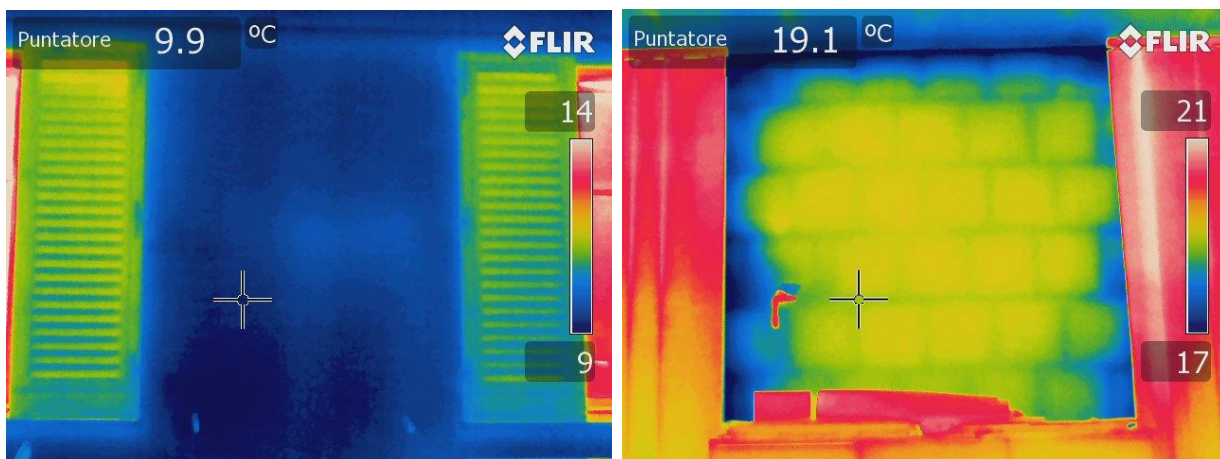
	$\lambda$	$\rho$	$c$	$d$	$R$
	(W/mK)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kgK)	(m)	(m <sup>2</sup> K/W)
Strato liminare interno					0.13
Intonaco	0.9	1800	910	0.015	0.017
blocco forato in laterizio		600	1000	0.08	0.320
polistirene espanso	0.041	20	1300	0.03	0.732
blocco forato in laterizio		700	1000	0.2	0.571
Intonaco	0.9	1800	910	0.015	0.017
Strato liminare esterno					0.04

Dove  $\lambda$  rappresenta la conducibilità termica del materiale,  $\rho$  la sua densità,  $c$  il calore specifico,  $d$  il suo spessore reale,  $R$  la resistenza termica offerta. E' possibile dunque stimare una resistenza termica

totale della parete pari a  $1.83\text{m}^2\text{K/W}$ , quindi una trasmittanza di  $0.55\text{W/m}^2\text{K}$  ed una conduttanza di  $0.60\text{W/m}^2\text{K}$ . Sono inoltre valutate una massa frontale di circa  $240\text{kg/m}^2$  ed una capacità termica per unità di area pari a circa  $250\text{kJ/m}^2\text{K}$ .

Sulla parete è stata effettuata una preliminare indagine conoscitiva con una termocamera agli infrarossi che ha permesso di rilevare ed evitare eventuali ponti termici geometrici nella zona prevista per l'installazione dei termoflussimetri. La presenza di mattoni in laterizio a diretto ridosso dell'intonaco introduce una disomogeneità nella zona di separazione fra i mattoni a causa della presenza della malta di posa che è stato, per quanto possibile, evitata. Si riportano in Figura 1 due immagini all'infrarosso della zona di installazione dei sensori, realizzate con termocamera FLIR T620b.

**Figura 1:** Immagini all'infrarosso delle superfici interne (dx) ed esterne (sx) della parete da monitorare



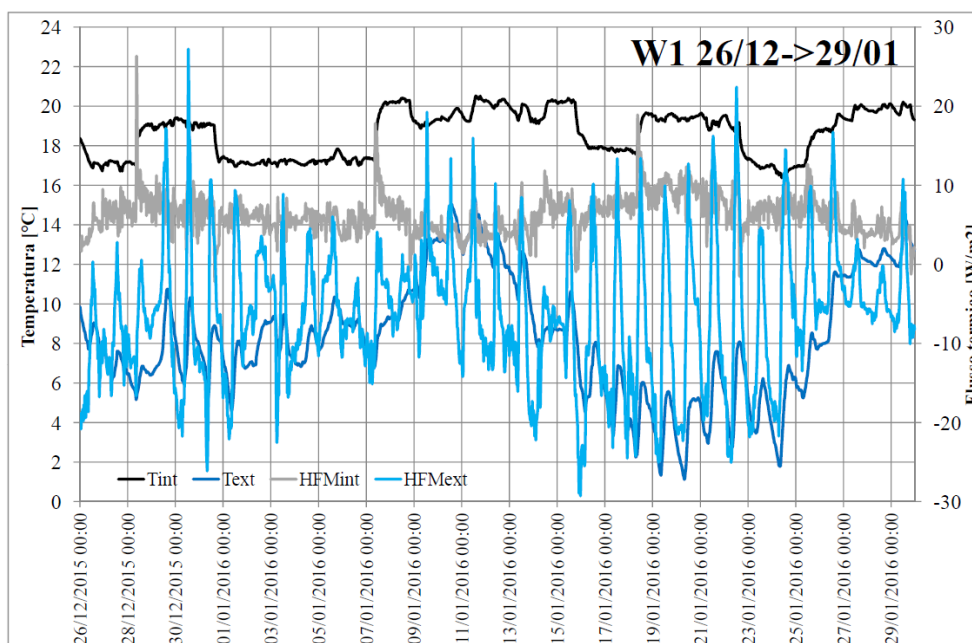
Su entrambi i lati della parete ed in asse fra loro sono stati collocati un termoflussimetro ed una termoresistenza a piastra per la valutazione del flusso termico e temperatura superficiale su le due facce della parete. La strumentazione è quindi composta da una catena di acquisizione LSI-Lastem, con data-logger ELR510S, termoflussimetri (HFM) BSR240, termoresistenze (TR) EST124. I termoflussimetri sono del tipo a disco, diametro esterno 80mm spessore 5, campo di misura  $0-50\text{W/m}^2$ , campo di temperatura ammesso da  $-30$  a  $70^\circ\text{C}$ , accuratezza pari al 5% del valor letto, sensibilità nominale  $0.05(\text{mV m}^2)/\text{W}$  e resistenza termica pari a  $0.00625\text{ m}^2\text{K/W}$ . Le termoresistenze hanno incertezza nominale  $0.15^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$  e campo di misura da  $-50$  a  $80^\circ\text{C}$ . Per prevenire la creazione di ulteriori resistenze termiche di contatto i termoflussimetri e le termoresistenze sono stati collocati a parete con frapposto un sottile strato di pasta conduttiva (conducibilità  $10.3\text{W/mK}$ ) e fissate con nastro adesivo telato. In Figura 2 sono riportate due fotografie della installazione.

**Figura 2:** foto dei sensori di misura installati sulla superficie esterna (sinistra), interna (centro), e dettaglio di collocazione (destra) della parete W1

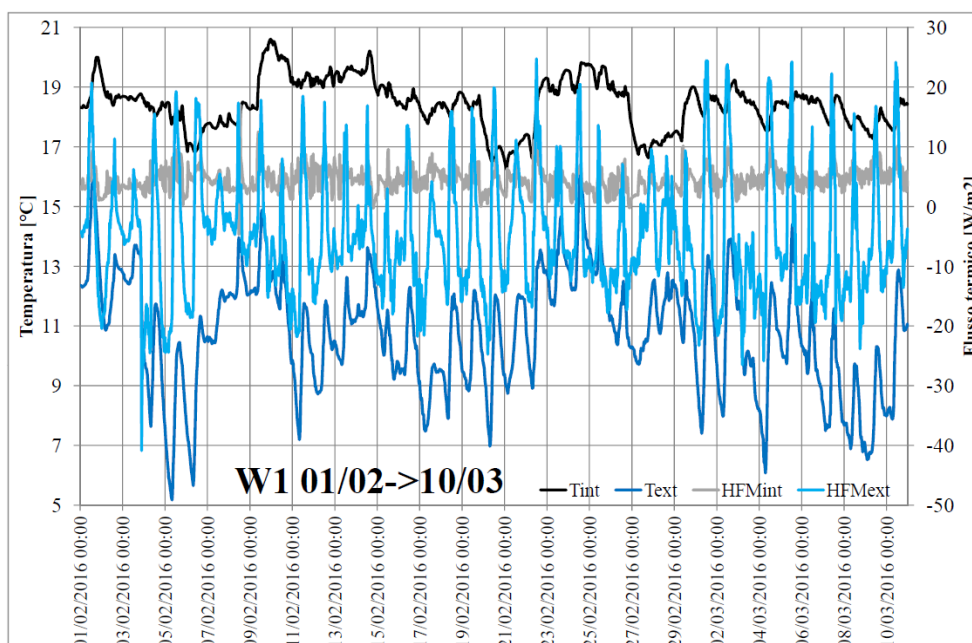


La campagna di misura, iniziata a dicembre 2015 si è prolungata nei mesi successivi. Sono state effettuate due sessioni distinte, la prima, denominata “W1 26/12->29/01” di 35 giorni nel mese di dicembre e gennaio e la seconda denominata “W1 01/02->10/03” di 39 giorni nel mese di febbraio e marzo. Si riportano i diagrammi dei dati misurati dagli strumenti in Figura 3 e Figura 4. Le misure sono state impostate con un tempo di campionamento di 1 minuto, mediate e registrate dal data logger con frequenza di 30 minuti.

**Figura 3:** Dati misurati nel periodo dal 26/12 al 29/01 sulla parete W1



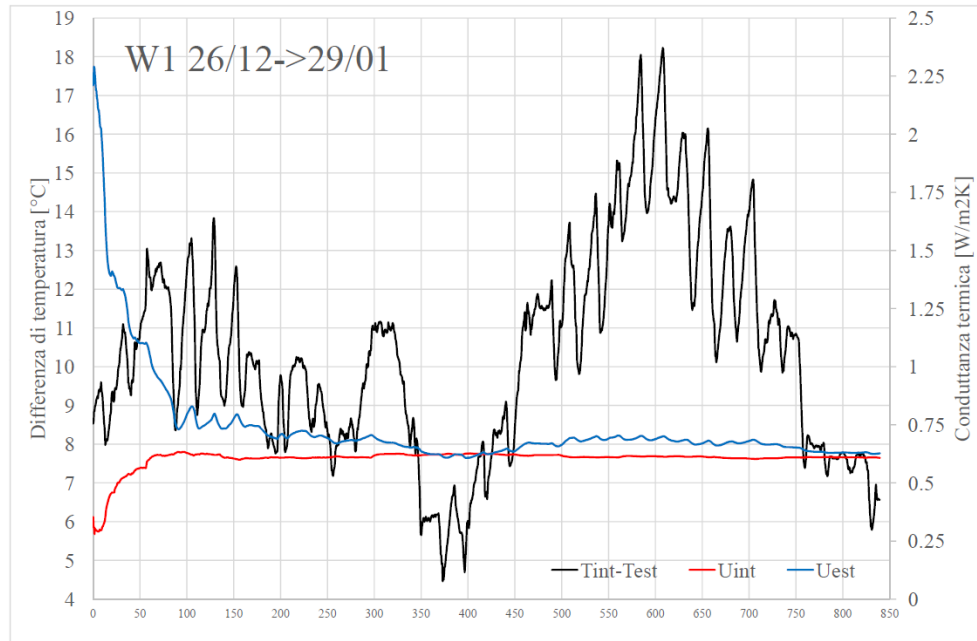
**Figura 4:** Dati misurati nel periodo dal 01/02 al 10/03 sulla parete W1



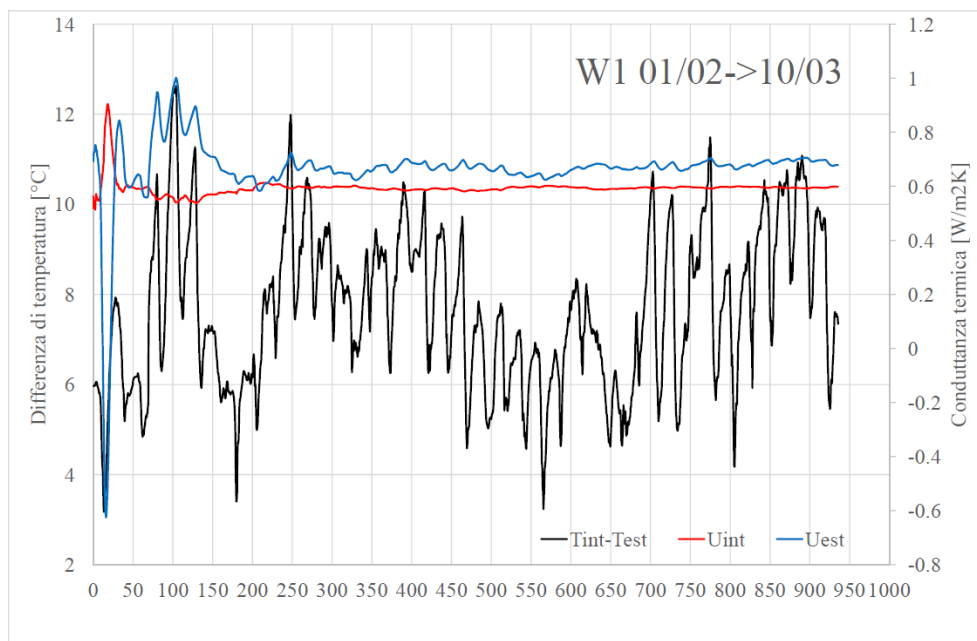
L'andamento della temperatura della superficie interna della parete indica il funzionamento di un impianto di riscaldamento capace di mantenere valori prossimi a 20°C e in attenuazione durante la notte ad una temperatura prossima ai 18°C. La variabilità della temperatura esterna causa importanti variazioni del flusso termico esterno che inverte quindi la direzione rispetto alla parete.

Dai dati misurati è stata valutata la conduttanza termica tramite il metodo delle medie progressive secondo ISO9869:2014 ottenendo i risultati proposti in Figura 5 e Figura 6

**Figura 5:** Valori di conduttanza termica della parete W1 da media progressiva ISO9869 per i dati misurati nel periodo dal 26/12 al 29/01



**Figura 6:** Valori di conduttanza termica della parete W1 da media progressiva ISO9869 per i dati misurati nel periodo dal 01/02 al 10/03



I dati misurati dal termoflussimetro interno soddisfano i requisiti di convergenza richiesti da ISO9869 per il metodo delle medie progressive (numero minimo di ore di campionamento, variazione fra risultato calcolato sui primi 2/3 del campione e gli ultimi 2/3 e variazione fra il risultato ottenuto e quello delle 24 ore precedenti) entro le 100 ore dal primo dato acquisito in entrambe i periodi di monitoraggio, mentre per il termoflussimetro esterno occorrono dei tempi circa doppi nel caso del periodo del 26/12, mentre per la sessione di misura del 01/02 occorrono oltre 10 giorni di

campionamento. Anche i risultati ottenuti dalle misure con i due termoflussimetri non sono propriamente coincidenti: mentre nella sessione di misura del 26/12 il termoflussimetro interno raggiunge asintoticamente un valore di conduttanza termica pari a  $0.61\text{W/m}^2\text{K}$  e quello esterno di  $0.63\text{W/m}^2\text{K}$ , nel periodo del 01/02 i valori sono rispettivamente  $0.60$  e  $0.68\text{W/m}^2\text{K}$ , registrando una differenza sostanziale. Il termoflussimetro esterno risente della non stazionarietà del flusso termico su quella superficie e registra inoltre una variazione nel risultato della misura al variare delle condizioni climatiche esterne.

### 3. Stima dei parametri termici dinamici della parete

La norma UNI EN ISO 13786:2008 [9] permette di calcolare i parametri termici dinamici di una parete, in particolare trasmittanza termica periodica e variazione temporale da cui calcolare il fattore di attenuazione (o decremento) ed il tempo di sfasamento, utilizzati come parametri di controllo delle prestazioni energetiche estive di un elemento edile dall'attuale legislazione energetica italiana. Le caratteristiche termiche in regime dinamico descrivono infatti il comportamento di un elemento edilizio soggetto a flusso termico o temperatura variabili sinusoidalmente su uno o entrambe i lati. La norma si basa sulla trattazione analitica per flusso monodimensionale in solido confinato fra due superfici [10] e nell'ipotesi semplificativa di forzanti sinusoidali al contorno e materiali omogenei, riduce la complessa soluzione analitica ad un calcolo matriciale in cui l'elemento caratterizzante è rappresentato dalla profondità di penetrazione  $\delta$  di ogni singolo strato (omogeneo) dell'elemento edile piano composto, che rapportato al suo effettivo spessore  $d$  individua il parametro adimensionale  $\xi$  definito in equazione (1).

$$\xi = \frac{d}{\delta} = \frac{d}{\frac{\sqrt{\lambda T}}{\sqrt{\pi \rho c}}} = d \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (1)$$

dove  $T$  rappresenta il periodo (in secondi) delle grandezze sinusoidali e  $\omega (=2\pi/T)$  la sua frequenza angolare,  $\alpha$  la diffusività termica del materiale. Note le caratteristiche termo-fisiche dei singoli materiali componenti la stratigrafia della parete, la norma finalizza il calcolo della "matrice di trasferimento"  $Z$  dalla quale è possibile derivare le proprietà dinamiche prima citate. Riferendosi alle proprietà dei materiali costituenti la parete in esame riportate in Tabella 1 e ipotizzando (semplificando) il comportamento dei mattoni in laterizio forato come materiale omogeneo a conducibilità e diffusività termica equivalente, è possibile calcolare tutti i parametri termici dinamici della parete, come riportato in Tabella 2. La variazione temporale è considerata variabile in un campo  $\pm 12$  ore.

**Tabella 2:** proprietà dinamiche calcolate secondo UNI EN ISO 13786

Proprietà		Modulo	variazione temporale
		$\text{W/m}^2\text{K}$	h
Ammetenza termica periodica interna	$Y_{II}$	4.464	4.51
Trasmittanza termica periodica	$Y_{IE}$	0.292	-7.64
Ammetenza termica periodica esterna	$Y_{EE}$	5.298	3.74
Fattore di decremento	$f$	0.48	
Tempo di sfasamento	$\tau$	-7.64	

In generale, le proprietà termiche dinamiche di un componente piano collegano i flussi termici con le temperature in regime periodico (sinusoidale per la UNI EN ISO 13786) sulle due superfici di una parete composta, in particolare, le ammettenze termiche mettono in relazione il flusso termico su una parete con le variazioni di temperatura sullo stesso lato, mentre le trasmittanze termiche correlano i valori di flusso termico su una parete con la variazione di temperatura sulla superficie dal lato opposto. In generale, è possibile comporre la combinazione dei diversi fattori nelle seguenti relazioni di equazioni (2) e (3)

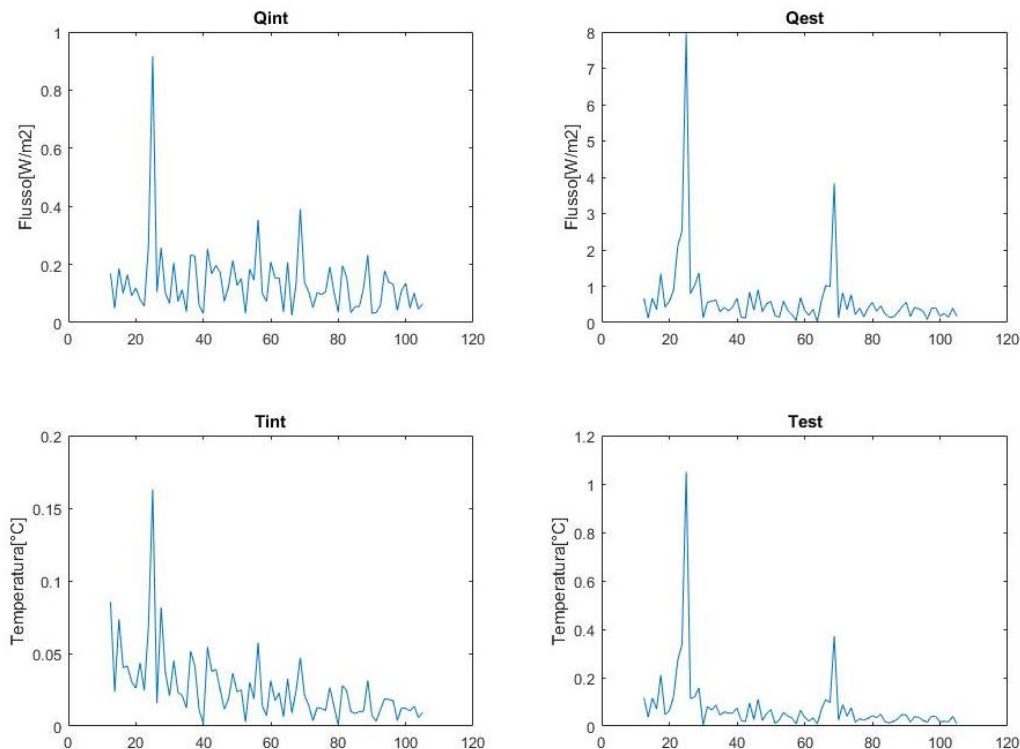
$$\hat{q}_I = Y_{II}\hat{T}_I - Y_{IE}\hat{T}_E \quad (2)$$

$$\hat{q}_E = Y_{EE}\hat{T}_E - Y_{EI}\hat{T}_I \quad (3)$$

dove i sovrascritti ai flussi termici ed alle temperature vogliono indicare il regime periodico della variabile, mentre i pedici "I" ed "E" riferiscono alla superficie interna ed esterna del componente.

In generale l'andamento dei flussi termici e delle temperature misurate nelle campagne di misura precedentemente illustrate non hanno andamento sinusoidale. Una analisi nel dominio delle frequenze evidenzia come sia leggibile una frequenza dominante con periodo pari alle 24 ore per tutti i segnali presenti, essendo stato escluso dalla Figura 7 il valor medio per dare evidenza al valore dell'ampiezza di variazione per la frequenza relativa al periodo (in ore) riportato in ascissa.

**Figura 7:** Spettro dei segnali misurati (in ascissa la durata del periodo in ore)

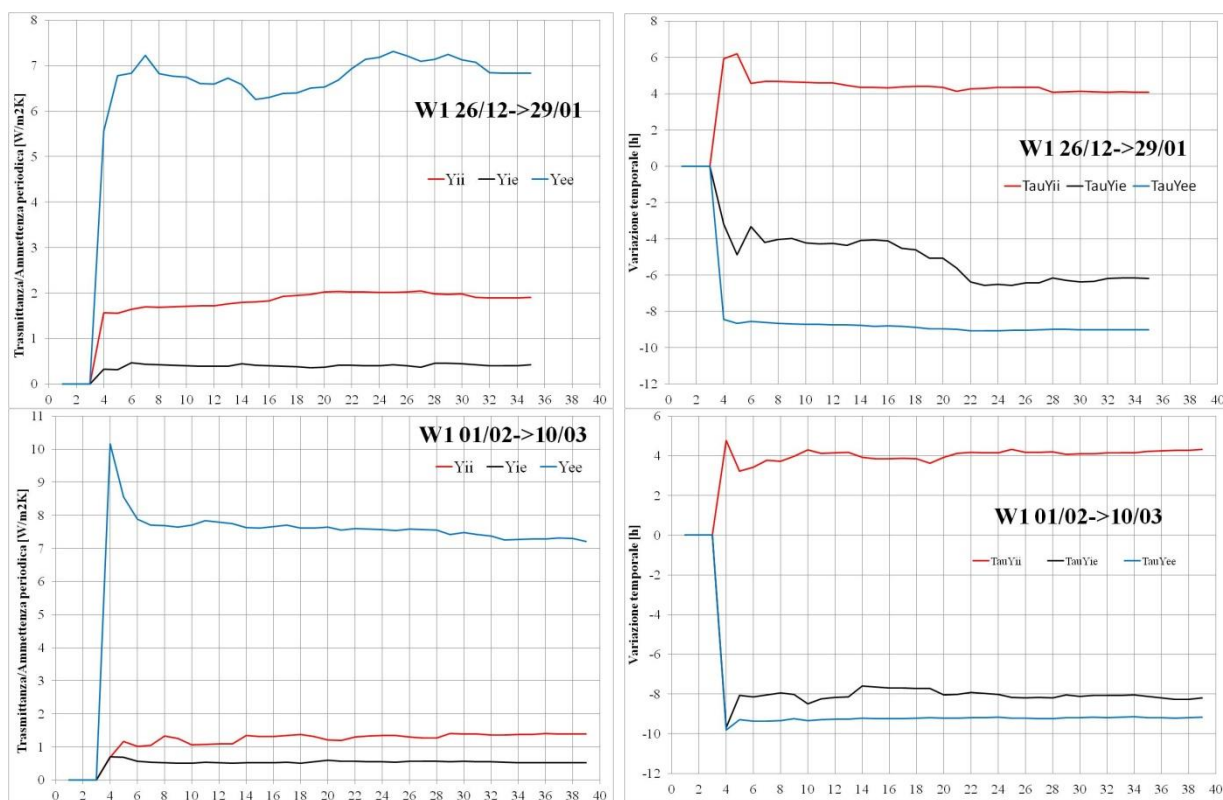


È dunque possibile ricondurre ad una forma sinusoidale il segnale giornaliero registrato nelle misurazioni utilizzando il termine al primo ordine di una serie di Fourier con frequenza dominante corrispondente al periodo di un giorno. Estendendo tale procedura all'intero periodo di misurazione è possibile ottenere una serie di funzioni sinusoidali giornaliere approssimanti gli andamenti reali per le



funzioni periodiche nelle equazioni (2) e (3). E' quindi possibile ricavare una stima delle ammettenze e trasmissioni termiche del componente edile utilizzando una approssimazione ai minimi quadrati delle equazioni valutate per i giorni del periodo. I risultati indicati in Figura 8 sono ottenuti estendendo l'approssimazione ai minimi quadrati al progredire del numero di giorni all'interno del periodo di misura di riferimento.

**Figura 8:** modulo e variazione temporale dei parametri dinamici periodici ottenuti dalla progressione estesa nei giorni del periodo della soluzione ai minimi quadrati di equazione (1) e (2) di parete W1



I valori ottenuti dall'analisi e riassunti in Figura 8, quando confrontati con quelli di Tabella 2 evidenziano un generale accordo negli ordini di grandezza dei diversi termini, anche se lo scarto rispetto ai valori di Tabella 2 risulta consistente ed il valore della variazione temporale stimata per l'ammettenza interna è essenzialmente errato.

Una seconda parete verticale, sempre nel complesso di Santa Marta è stata oggetto di analoghe misure nel periodo estivo. E' stato scelto un elemento murario molto differente da quello analizzato nel precedente paragrafo, dotato questa volta di importante massa e non isolato. La parete in esame, denominata "W2" è orientata a nord ed in posizione parzialmente protetta rispetto ai venti ed alla radiazione solare diretta. E' composta da una muratura mista in pietra e mattoni, di spessore totale pari a circa 70cm e costituisce la muratura perimetrale a piano terra del fabbricato storico del complesso di Santa Marta. Per brevità si riportano soltanto le caratteristiche termofisiche della stratigrafia in Tabella 3 e la valutazione delle conseguenti stime delle proprietà termiche stazionarie e dinamiche in Tabella 4.

**Tabella 3:** stratigrafia della parete W2

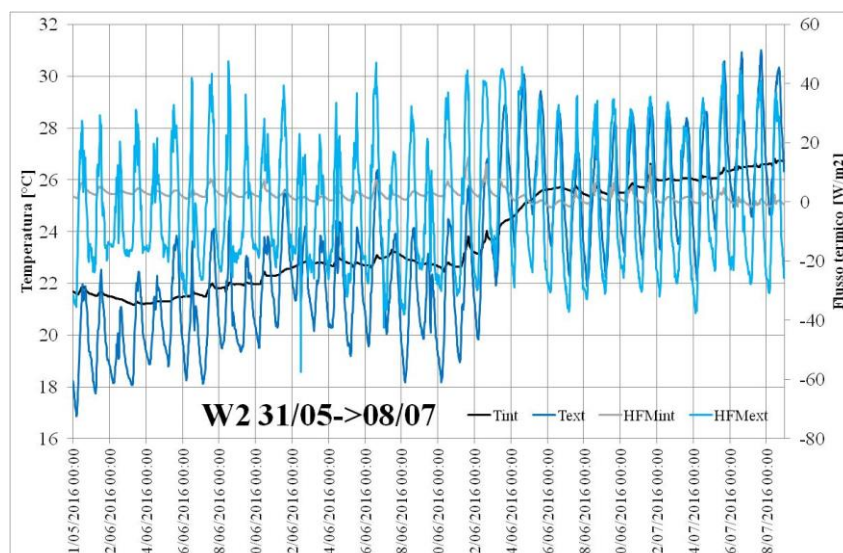
	$\lambda$	$\rho$	$c$	$d$	$R$
	(W/mK)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kgK)	(m)	(m <sup>2</sup> K/W)
Strato liminare interno					0.13
Intonaco	0.9	1800	910	0.02	0.022
Muratura mista	1.45	2000	840	0.65	0.448
Intonaco	0.9	1800	910	0.02	0.022
Strato liminare esterno					0.04

E' possibile stimare una resistenza termica totale della parete pari a  $0.66\text{m}^2\text{K/W}$ , quindi una trasmittanza di  $1.51\text{W/m}^2\text{K}$  ed una conduttanza di  $2.03\text{W/m}^2\text{K}$ . Sono inoltre valutate una massa frontale di circa  $1370\text{kg/m}^2$  ed una capacità termica per unità di area pari a circa  $1150\text{kJ/m}^2\text{K}$ .

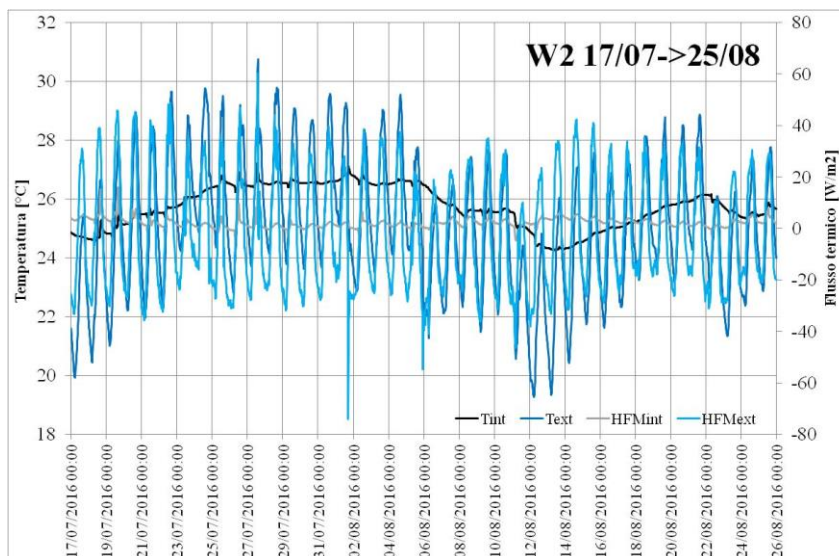
**Tabella 4:** proprietà dinamiche calcolate secondo UNI EN ISO 13786 per la parete W2

Proprietà		Modulo	variazione temporale
		W/m <sup>2</sup> K	h
Ammetenza termica periodica interna	$Y_{II}$	12.285	2.78
Trasmittanza termica periodica	$Y_{IE}$	0.259	9.40
Ammetenza termica periodica esterna	$Y_{EE}$	12.285	2.78
Fattore di decremento	$f$	0.13	
Tempo di sfasamento	$\tau$	9.40	

Anche per questa parete sono stati installati termoflussimetri e termoresistenze allineati su ciascun lato della muratura, interno ed esterno, e sono stati considerati due distinti periodi di misura: il primo dal 31 maggio al 8 luglio ed una seconda sessione dal 17 luglio al 25 agosto. La parete insiste su un ufficio della Scuola di Ingegneria, salturiamente occupato durante il periodo delle misure. Gli impianti di raffrescamento del vano interno alla parete sono stati quindi occasionalmente accesi dagli utenti afferenti dell'ufficio. Si riportano i diagrammi dei dati misurati dagli strumenti in Figura 10 e Figura 11. Le misure sono state impostate con un tempo di campionamento di 1 minuto, mediate e registrate dal data logger con frequenza di 30 minuti.

**Figura 9:** Dati misurati nel periodo dal 31/05 al 08/07 sulla parete W2

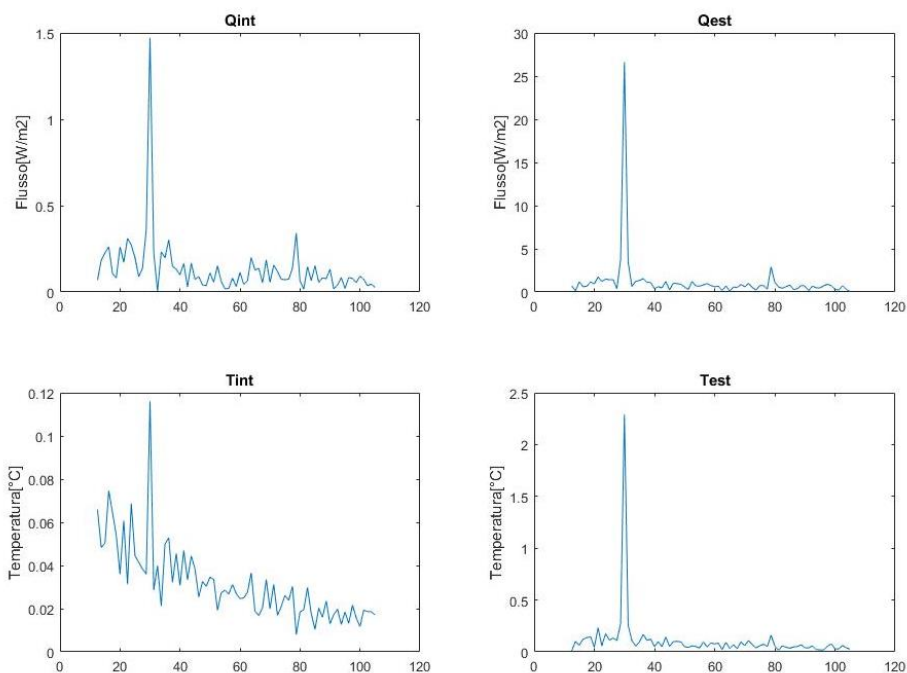
**Figura 10:** Dati misurati nel periodo dal 17/07 al 25/08 sulla parete W2



La valutazione delle proprietà termiche stazionarie secondo il metodo della media progressiva secondo lo standard ISO9869 non può dare risultati attendibili a causa delle ridotte differenze di temperatura misurate fra le superfici della parete.

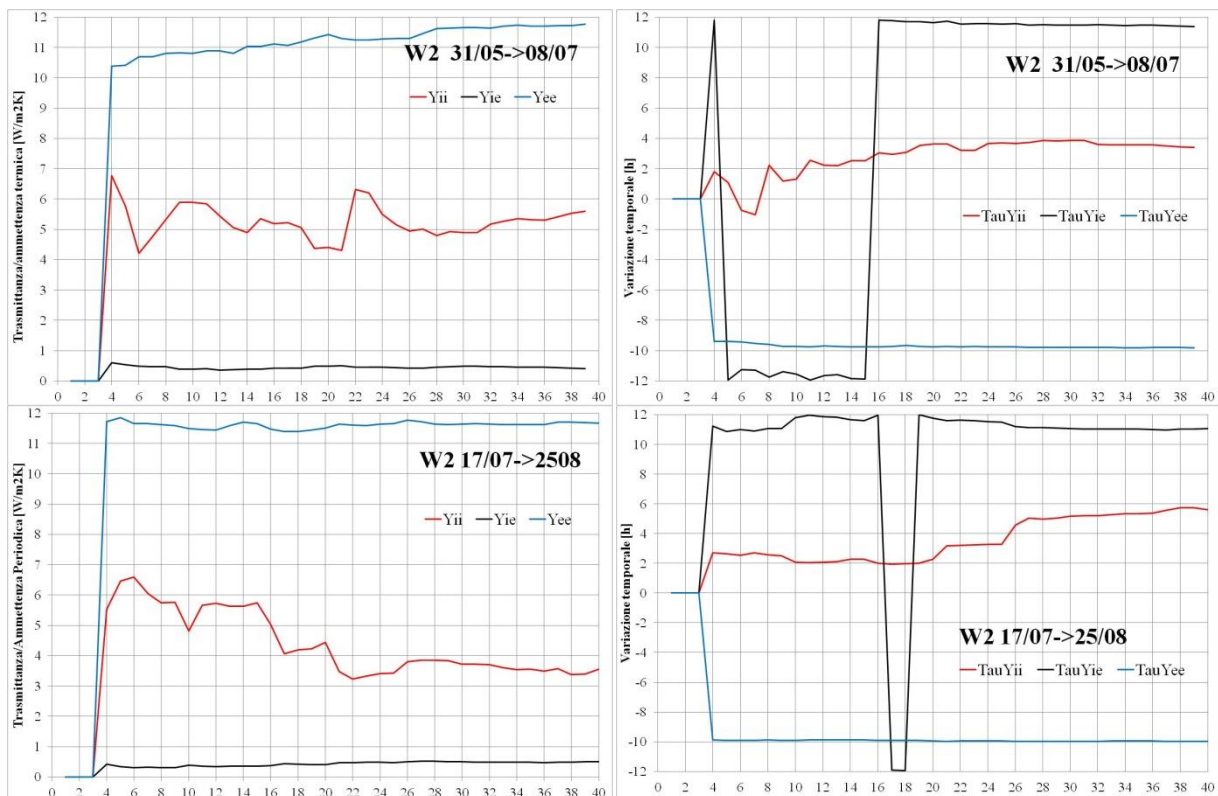
L'analisi in frequenza delle serie misurate di flusso termico e temperatura sulla superficie interna ed esterna del componente edile sono illustrate in Figura 11 dove appare una frequenza dominante con periodo pari alle 24 ore per tutti i segnali presenti, essendo stato escluso dalla Figura 11 il valor medio per dare evidenza al valore dell'ampiezza di variazione per la frequenza relativa al periodo (in ore) riportato in ascissa.

**Figura 11:** Spettro dei segnali misurati (in ascissa la durata del periodo in ore)



Si riportano quindi in Figura 12 i risultati dell'analisi condotta, analogamente al caso precedente, analizzando la progressione, nel rispettivo periodo di misura, della approssimazione ai minimi quadrati delle equazioni (1) e (2) utilizzando per le funzioni sinusoidali di flusso termico e temperatura superficiali le trasformate di Fourier, approssimate al primo ordine, dei segnali misurati, con frequenza di riferimento fissata sulla frequenza dominante corrispondente al periodo di un giorno.

**Figura 12:** modulo e variazione temporale dei parametri dinamici periodici ottenuti dalla progressione estesa ai giorni del periodo della soluzione ai minimi quadrati di equazione (1) e (2) di parete W2



Anche in questo caso, rispetto ai valori indicati in Tabella 4 sono confermati gli ordini di grandezza dei moduli e variazione temporale dei parametri termici dinamici ad eccezione del modulo della ammettenza termica interna e della variazione temporale dell'ammettenza termica esterna.

#### 4. Conclusioni

Sono state condotte ripetute campagne di misure termoflussimetriche su due componenti edili, il primo caratterizzato da un discreto isolamento termico e con bassa capacità termica sottoposto a monitoraggio durante la stagione invernale ed il secondo con elevata capacità termica e massa, non isolato, analizzato durante la stagione estiva. Sono stati posizionati un termoflussimetro a disco ed una termoresistenza a piastrina allineati su ciascun lato della muratura al fine di registrare i valori di flusso termico e temperatura sia sulla superficie interna che esterna. Sono state condotte analisi in frequenza dei segnali misurati ed ottenuti segnali sinusoidali mediante serie di Fourier dei segnali stessi approssimate al primo ordine e basate sulla frequenza dominante. Sono stati quindi valutate le

ammettanze e trasmittanze termiche dinamiche mediante approssimazione ai minimi quadrati delle equazioni della trasmissione del calore di una parete piana soggetta a flusso monodimensionale con forzanti sinusoidali. I risultati ottenuti evidenziano la capacità del metodo di cogliere le entità del fenomeno ed incoraggiano ad analizzare ulteriormente il modello estendendo l'analisi ad un dominio di frequenze più ampio al fine di migliorare la rappresentatività del segnale sinusoidale rispetto al segnale misurato.

## References

1. ISO standard 9869-1:2014, Thermal insulation—building elements—in situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance
2. Ficco G.; Iannetta F.; Ianniello E.; d'Ambrosio Alfano F.R.; Dell'Isola M. U-value in-situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings* **2015**, 104, 108-121. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.071.
3. Desogus G.; Mura S.; Ricciu R. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings* **2011**, 43, 2613–2620. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.025.
4. Cesaretto P.G.; De Carli M. A measuring campaign of thermal conductance in situ and possibile impacts on net energy demand in buildings, *Energy and Building* 2013, 59 29-36. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.036>
5. International Energy Agency, EBC Annex 58, Reliable building energy performance characterization based on full scale dynamic measurement, Final reports. Disponibile online: <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex58>
6. Gori V.; Marincioni V.; Biddulph P.; Elwella C.A. Inferring the thermal resistance and effective thermal mass distribution of a wall from in situ measurements to characterise heat transfer at both the interior and exterior surfaces, *Energy and Building* 2017, 135 398-409. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.043
7. Leoncini L.; Paganini D. Design and realization of an experimental apparatus based on hot plate concept for measure of thermal resistance of building insulating materials, In *XXX UIT Heat Transfer Conference Proceedings*, 25-27 Giugno, Italia, 2012, pp 319-324
8. Scirpi, F.; Rocchetti, A.; Pierangioli, L.; Milazzo, A. Thermal resistance of an innovative prefabricated wall: in-situ measurements, *MED GREEN Forum Mediterran Green Buildings and Renewable Energy Forum*, 26-29 2015, August Firenze.
9. UNI EN ISO 13786:2008, Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo
10. Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. Linear flow of heat in solid bounded by two parallel planes. In *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, 1959