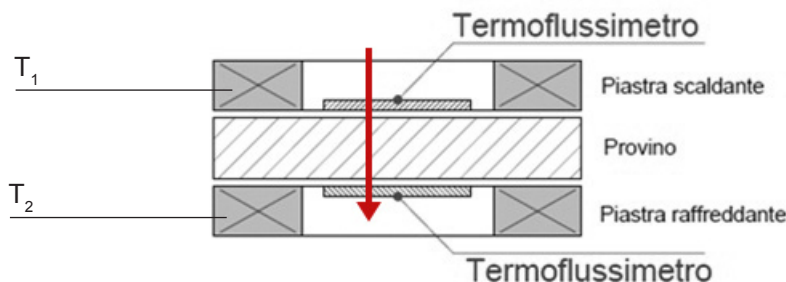


Si rendono necessarie quindi ulteriori prove sul contenuto d'acqua per poter controllare la riduzione di volume della fibra e il ritiro della componente legante una volta essiccato il pannello. Andranno comunque effettuate le prove per definire le caratteristiche termiche del pannello ed il comportamento termico accoppiato al campione di parete in terra battuta.

## 7.5 TEST TERMICI

Una volta realizzati i componenti campione sono state effettuate prove per stabilirne le caratteristiche termiche e valutare le prestazioni termiche invernali ed estive di pacchetti murari ottenuti dall'abbinamento dei campioni in terra battuta con pannelli in terra alleggerita, per poi valutarne le variazioni in rapporto alle proporzioni di terra e fibra contenute nei pannelli. A questo scopo test con il metodo della piastra calda, sono stati realizzati su tutti i singoli componenti prodotti in laboratorio. I test sono stati svolti secondo le norme UNI EN 12667, UNI EN 12664, ASTM C518, con un apparato sperimentale secondo il metodo termoflussimetrico con anello di guardia, il *Lasercomp FOX600*, capace di misurare conducibilità termica e resistenza termica dei materiali. L'apparecchio è stato settato in modo da poter effettuare prove in regime statico e in regime dinamico.

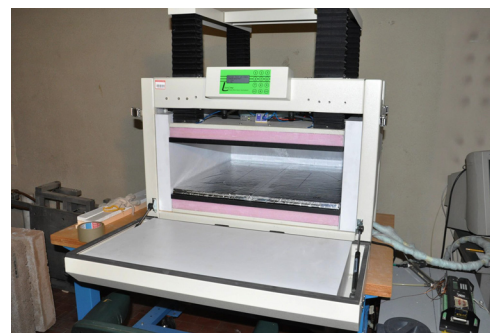


**Fig. 7.91**, Schema funzionale apparecchio Lasercomp FOX600.

Lo strumento è dotato di una camera coibentata le cui estremità superiori ed inferiori sono piastre termicamente attive che possono essere scaldate o raffreddate. Attraverso le piastre, la macchina è capace di generare cicli di variazioni di temperatura sulle superfici opposte del materiale da testare in modo da indurre un flusso di calore per conduzione attraverso di esso.



**Fig. 7.89**, Provino in terra alleggerita con canapa essiccata.



**Fig. 7.90**, L'apparecchio Lasercomp FOX600, con cui sono stati effettuati i test termici sui campioni realizzati in laboratorio.

### Specifiche Lasercomp FOX600

dimensione MAX	610x610 mm
Area di misura	254x254 mm
Gamma di spessori consentiti	0 - 180 mm
Temperatura operativa	da -15 °C a 85 °C
Conducibilità termica minima	0.001 W/mK
Accuratezza	+/- 1%
Riproducibilità	+/- 0.5%

**Tabella 7.15**, Specifiche tecniche dell'apparecchio misuratore del flusso di calore Lasercomp FOX600.

L'apparato è in grado di registrare i valori di temperatura che assumono le superfici durante il ciclo di variazioni termiche ed i flussi termici correlati.

I muri campione in terra battuta sono stati testati in regime statico e in regime dinamico, mentre i pannelli in terra alleggerita sono stati testati solo in regime statico. Ancora in regime dinamico è stato poi osservato come variano le prestazioni termiche di un campione in terra battuta composto se accoppiato ai pannelli in terra alleggerita realizzati, a seconda delle proporzioni in terra e fibra degli stessi pannelli. Per l'esecuzione dei test in coppia con i pannelli è stato scelto il campione in terra battuta con contenuto iniziale d'acqua del 15%, sulla base dei risultati di densità massima raggiungibile durante la compattazione, ottenuti durante lo *Standard Proctor test*, maggiori rispetto all'altro campione.

Le caratteristiche fisiche dei componenti sono state inserite in un foglio di calcolo excel relativo alla norma UNI EN ISO 13786 per le proprietà termiche dinamiche dei componenti edilizi<sup>13</sup>, modificando il valore del calore specifico fino a che i risultati termici in regime dinamico di *Trasmittanza termica periodica* ( $Y_{ie}$ )<sup>14</sup>, *Sfasamento termico* ( $\varphi$ ) e *Fattore di attenuazione* ( $f_a$ ), non coincidessero con quelli ottenuti dalle prove sperimentali.

Una volta ottenuto il valore del calore specifico, ancora utilizzando il foglio di calcolo UNI EN ISO 13786, sono stati modificati gli spessori dei componenti e sono stati ricavati i valori di *trasmittanza termica periodica*, *sfasamento termico*, *fattore di attenuazione*, ed *ammittenza termica*, nonché di *trasmittanza termica*  $U$  di pacchetti murari di dimensioni reali, composti con i componenti realizzati in laboratorio. In questo modo sono stati ricavati dati sufficienti per una valutazione della prestazione termica in regime dinamico dei pacchetti murari prodotti e per una comparazione con le prestazioni ottenute dalla sola parete in terra battuta.

Dalla comparazione dei risultati dei test è lecito attendersi una moderata variazione della conducibilità termica e della resistenza termica dovuta alla presenza di fibre all'intero dei pannelli accostati ai campioni in terra battuta; è altrettanto probabile una certa diminuzione del fattore di attenuazione ed un aumento non trascurabile dello sfasamento termico. Non siamo in grado di prevedere invece come possano variare le prestazioni legate all'inerzia termica della parete, mancando completamente dati in letteratura per pacchetti murari in terra battuta e componenti in terra alleggerita in questo senso.

---

**13** Il foglio è scaricabile al sito [www.mygreenbuildings.org](http://www.mygreenbuildings.org)

**14** La *Trasmittanza termica periodica* permette di valutare la risposta di un componente alle sollecitazioni periodiche sinusoidali di temperatura, nell'arco delle 24h, ed è definita come il rapporto tra la variazione di flusso termico in entrata in un ambiente tenuto a temperatura costante, e la variazione di temperatura sull'ambiente confinante. È determinata da due parametri:

- *Fattore di attenuazione*  $f_a$ : rapporto tra l'ampiezza dell'onda termica esterna e l'ampiezza di quella interna all'ambiente considerato; definisce l'attenuazione che si verifica nei picchi massimi dell'onda termica uscente dal componente, rispetto ai corrispondenti picchi massimi dell'onda termica entrante dall'esterno.
- di quanto risultano attenuati i picchi massimi dell'onda termica entrante, nell'onda termica uscente dal componente.
- *Coefficiente di sfasamento termico*  $\Phi$ : è il ritardo con cui si verifica il picco massimo dell'onda termica all'interno, rispetto quello corrispondente dell'onda termica agente all'esterno dell'ambiente. Definisce il ritardo con cui il flusso termico esercitato sulla superficie esterna del componente si ripercuote sull'ambiente a contatto con la superficie interna.

### 7.5.1 TEST TERMICI SUI CAMPIONI: terra battuta e pannelli alleggeriti

I campioni in terra battuta con contenuto iniziale d'acqua del 12% e 15% sono stati testati in regime stazionario e in regime dinamico utilizzando il metodo della piastra calda secondo la norma UNI EN 12667, UNI EN 12664, ASTM C518. Con lo stesso metodo sono stati testati in regime stazionario i pannelli in terra alleggerita con paglia realizzati in laboratorio.

Ad essiccazione naturale avvenuta secondo le modalità illustrate al paragrafo 7.3.3, i campioni in terra sono stati completamente essiccati in forno ad una temperatura di 60 °C per un periodo di 48 h, prima di essere sottoposti alle prove termiche. In questo modo l'intera quantità d'acqua contenuta nei campioni, al netto di quella necessaria a mantenere le forze di coesione tra le particelle, è stata eliminata, lasciando spazio a piccolissimi vuoti d'aria.

Con le prove in piastra calda sono state stabilite le caratteristiche termiche in regime stazionario ed il comportamento termico in regime dinamico dei campioni, ed è stato valutato l'impatto del contenuto d'acqua iniziale sulle caratteristiche termiche a secco dei campioni. In particolare si è considerato di interesse verificare l'incidenza su di esse dei vuoti lasciati nella struttura della terra battuta, dall'evaporazione dell'acqua.



Fig. 7.92, Il campione in terra battuta B,  $\omega$  di compattazione 15%, viene pesato prima di essere sottoposto ai test termici.

### Prove termiche in regime stazionario

#### *Campioni in terra battuta*

I campioni di prova sono stati inseriti nell'apparecchio *Lasercomp FOX600*, in posizione orizzontale; non avendo la possibilità di controllare l'umidità all'interno dell'ambiente di prova, sono stati avvolti in un telo di plastica e sigillati con adesivo, in modo da evitare che la terra, particolarmente sensibile agli scambi di vapore con l'ambiente potesse variare il proprio contenuto umido durante i test. Così facendo si è limitata la dipendenza degli esiti della prova alle sole variabili fisiche conosciute del campione, escludendo da queste il tenore d'acqua.

Le prove in regime statico sono state eseguite secondo normativa nell'arco di 24h ed hanno permesso di stabilire la conducibilità termica dei campioni.

La prova è stata eseguita per tre diversi settaggi di temperatura media: 20°, 30° e 40°, imponendo per ognuno di essi una differenza di temperatura tra



Fig. 7.93, Prova termica con l'apparecchio Lasercomp FOX600, sul campione in terra battuta B

le piastre a contatto con il campione di 10 °C; La conducibilità è calcolata come media delle conducibilità risultanti da ognuna delle condizioni di temperatura testate. Per migliorare l'aderenza delle piastre alla superficie di contatto del componente, sono stati utilizzati fogli di *gomma para*, di spessore 2mm e conducibilità  $\lambda = 0.1356 \text{ W/mK}$ , nelle interfacce piastra - componente.

Lo spessore dei campioni è stato calcolato direttamente dall'apparecchio, posizionando le due piastre sulle superfici dello stesso al giusto grado di pressione. Alla misura restituita è stato sottratto lo spessore dei due tappetini di gomma para.

I risultati delle prove sono riportati in tabella 7.15, dove  $\lambda_{eq}$  rappresenta il valore di conducibilità termica reale del componente, cui è stato sottratto l'apporto dei fogli in gomma, utilizzando la formula:

$$\lambda_{eq} = s_{eq} / R_{eq}$$

$$\text{dove } R_{eq} = R_{tot} - R_{tappetini}$$

I valori di conducibilità termica riscontrati per via sperimentale sono mediamente un po' al di sotto di quelli indicati in letteratura (Röhlen-Ziegert, 2011, pp.171), ma il valore di  $\lambda = 0.601 \text{ W/mK}$ , ottenuto per il campione B vi si avvicina molto. Come previsto, a parità di composizione granulometrica e modalità di compattazione, i valori di conducibilità termica in regime stazionario dei campioni, aumentano proporzionalmente all'aumentare della densità a secco.

Test termici in regime stazionario						
Conducibilità termica campioni in terra battuta						
Campioni	Mean Temp. [°C]	Upper $\lambda_{tot}$ [W/mK]	Lower $\lambda_{tot}$ [W/mK]	Avg $\lambda_{tot}$ [W/mK]	$\lambda_{tot}$ [W/mK]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]
A) Terra battuta 12%	20.02	0.438	0.410	0.424		0.473
	30.02	0.440	0.419	0.429	0.430	
	40.02	0.434	0.438	0.436		
B) Terra battuta 15%	20.02	0.5518	0.5336	0.5427		0.601
	30.02	0.5466	0.5425	0.5446	0.5464	
	40.02	0.5444	0.5595	0.5519		

Tabella 7.15, Valori di conducibilità termica sperimentali da prove in piastra calda

per campioni di terra battuta.

### Pannelli in terra alleggerita con paglia di riso

I pannelli realizzati sono stati testati in regime stazionario utilizzando lo stesso metodo e le stesse condizioni di prova descritti in precedenza per i campioni in terra battuta, ma sono stati tenuti liberi da rivestimenti in plastica. Tramite l'apparato *Lasercomp FOX 600* sono stati determinati gli spessori dei pannelli. Ai risultati di conducibilità termica ottenuti sono stati poi sottratti gli apporti dei tappetini in gomma para.

Test termici in regime stazionario						
Conducibilità termica pannelli in terra alleggerita con paglia di riso						
Composizione campioni	Mean Temp. [°C]	Upper $\lambda_{tot}$ [W/mK]	Lower $\lambda_{tot}$ [W/mK]	Avg $\lambda_{tot}$ [W/mK]	$\lambda_{tot}$ [W/mK]	$\lambda_{eq}^*$ [W/mK]
Pannello 1:3	20.02	0.070	0.06966	0.06961		
	30.02	0.072	0.07162	0.07159	0.072	0.072
	40.02	0.074	0.07426	0.07418		
Pannello 1:1	20.02	0.104	0.102	0.103		
	30.02	0.108	0.106	0.107	0.107	0.111
	40.02	0.112	0.111	0.111		

**Tabella 7.16**, Valori di conducibilità termica ottenuti con il metodo della piastra calda per pannelli campioni in terra alleggerita con paglia di riso.

\*  $\lambda_{eq}$  rappresenta il valore di conducibilità dei pannelli ottenuto dalla prova, sottraendo gli apporti dei tappetini in gomma.

### Prove termiche in regime dinamico

Per le prove in regime dinamico i campioni sono stati testati per un periodo di tempo di 48 -72h. Per l'esecuzione della prova la piastra inferiore è stata mantenuta ad una temperatura costante di 25 °C, attraverso un refrigeratore esterno collegato allo strumento, mentre la piastra superiore è stata tenuta a regime dinamico, con cicli di temperatura variabile con un'ampiezza di 10 °C, tra i 25 °C e i 35°C. Allo stato iniziale della prova entrambe le piastre si trovavano, alla stessa temperatura di 25 °C. All'oscillazione delle temperature indotta sulla superficie superiore del componente corrisponde un'oscillazione del flusso termico sulla sua superficie inferiore; i valori delle oscillazioni delle due grandezze, nell'arco

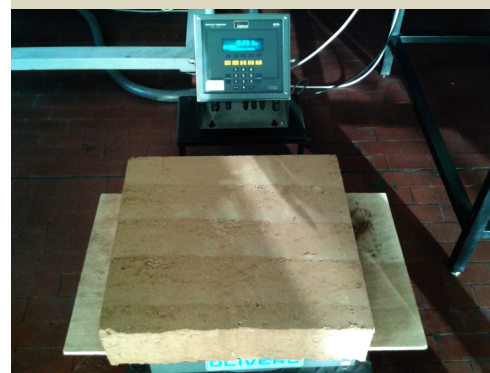


Fig. 7.94, Pesatura del campione in terra battuta A,  $w$  di compattazione 12% in seguito ad essiccazione.



di tempo in cui è stata realizzata la prova, è stato utilizzato per l'elaborazione dei dati.

Campione Terra battuta A $\omega$ 12%						
Tasmittanza termica periodica $Y_{ie}$			Sfasamento $\varphi$			
$\varphi$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$		$f_{max}$			
29,69	7,23		$t(\varphi_{max})$	-29,82		
Amp [°C]	$\psi$		$T_{max}$	203490		
10,05	4,78		$t(T_{max})$	35,06		
				194180		
$Y_{ie}$	modulo	fase	$\Delta t$ [s]	9310		
[W/m <sup>2</sup> K]	2,95	2,45	$\Delta t$	h	min	s
				2	35	10
Attenuazione $f_a$	0,76		Conduttanza C	3,88		

Tabella 7.17, Risultati dei test termici dinamici in piastra calda sul campione Terra battuta A

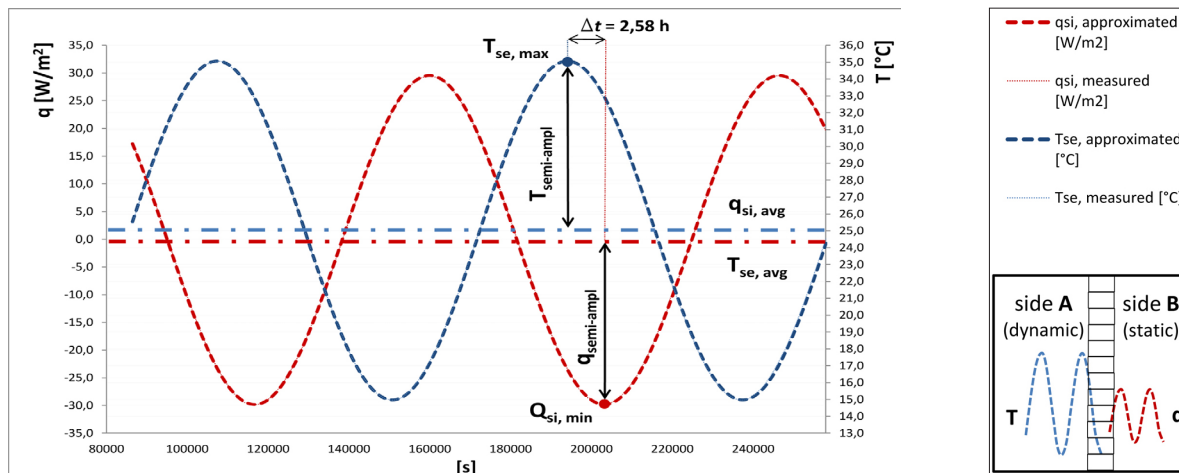
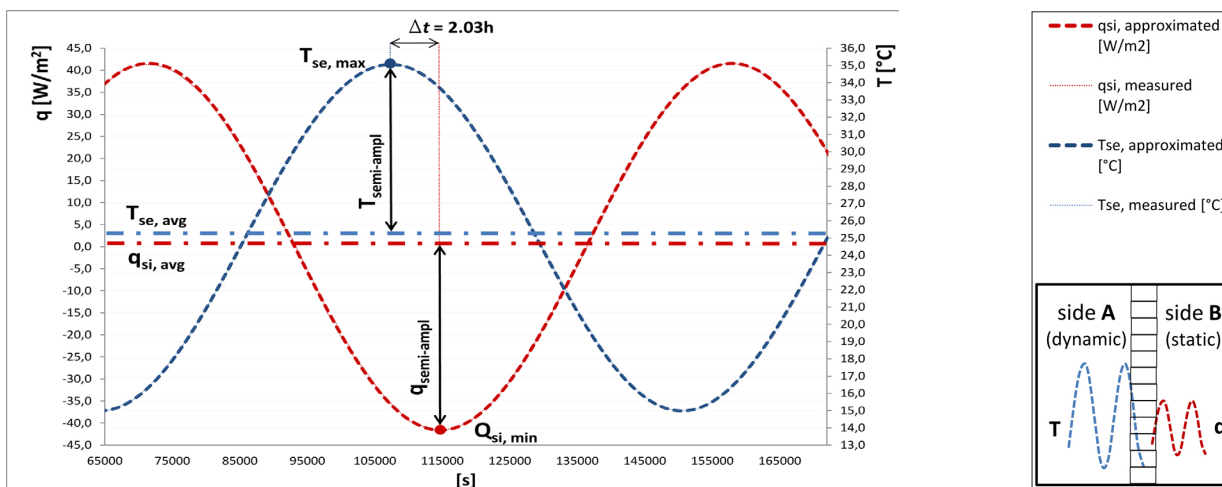


Fig. 7.95, Grafico che riproduce l'andamento delle temperature  $T$  agenti sulla superficie superiore del campione A, e il flusso termico oscillatorio uscente dalla superficie opposta. In evidenza lo sfasamento orario con cui si riproduce il massimo valore di temperatura entrante nel sinusoide del flusso di calore uscente sulla superficie opposta.

Campione B: Terra battuta $\omega$ 15%						
Tasmittanza termica periodica $Y_{ie}$			Sfasamento $\varphi$			
$\varphi$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$		$f_{max}$	-41,57		
41,57	7,37		$t(\varphi_{max})$	114552		
Amp [°C]	$\psi$		$T_{max}$	35,06		
10,04	4,75		$t(T_{max})$	107226		
$Y_{ie}$ [W/m <sup>2</sup> K]	modulo	fase	$\Delta t$ [s]	7326		
	4,14	2,62	$\Delta t$	h	min	s
				2	02	6
Attenuazione $f_a$	0,81		Conduttanza C	5,1300		

**Tabella 7.18**, Risultati dei test termici dinamici in piastra calda sul campione Terra battuta B



**Fig. 7.96**, Grafico che riproduce l'andamento delle temperature  $T$  agenti sulla superficie superiore del campione A, e il flusso termico oscillatorio uscente dalla superficie opposta. In evidenza lo sfasamento orario con cui si riproduce il massimo valore di temperatura entrante nel senoide del flusso di calore uscente sulla superficie opposta.

Una volta ottenuti i dati di *Trasmittanza periodica*, *Sfasamento termico* e *Attenuazione*, utilizzando il foglio UNI EN ISO 13786, si è ricavato il calore specifico del materiale terra battuta. Sono stati inseriti i dati di spessore, densità e conducibilità termica dei campioni in terra battuta A e B, ottenuti sperimentalmente nel il foglio di calcolo, e partendo da un valore di calore specifico da letteratura lo si è modificato di modo che le proprietà termiche in regime dinamico calcolate dal foglio si avvicinassero il più possibile a quelle ottenute per via sperimentale. Le caratteristiche fisiche dei fogli in gomma Para necessarie al calcolo sono state ottenute dalle schede tecniche dei produttori.

Il valore di  $c$  che permette maggiormente di avvicinarsi ai valori termici dinamici del componente ottenuti sperimentalmente in piastra calda risulta di 950 J/kgK, che si può considerare perfettamente in linea con i dati riscontrabili in letteratura (Houben - Guillaud 1989; Bollini 2013 pp. 31, 52-53).

Il valore di calore specifico così trovato, viene utilizzato per il calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario di un'ipotetica parete di spessore reale, di 50 cm, avente le stesse caratteristiche fisiche dei campioni realizzati in laboratorio, modificando il valore dello spessore nei dati inseriti nel foglio di calcolo UNI EN ISO 13786. Per il calcolo vengono inclusi gli apporti degli strati laminari dell'aria interno ed esterno, che erano stati invece esclusi per il calcolo del calore specifico, poiché durante la prova in piastra calda le piastre sono direttamente a contatto con i fogli di gomma para; per la resistenza degli strati laminari interno ed esterno, vengono assunti valori di 0.13 e 0.04 W/m<sup>2</sup>K rispettivamente. Dal calcolo vengono invece esclusi gli apporti dei fogli in gomma para, utilizzati invece nel primo caso.

Campione terra battuta A, $\omega$ iniziale 12%									
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T		[sec]						86400
	Resistenza termica sup interna Rsi		[m <sup>2</sup> K/W]						0,13
	Resistenza termica sup esterna Rse		[m <sup>2</sup> K/W]						0,04
Descrizione degli strati		s [m]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/KgK]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Prof. di penetrazione al periodo T ( $\delta$ ) [m]	$\xi = s/d$ [-]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	
Rsi	Strato laminare interno							0,13	
1	Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000	
2	Terra battuta	0,50	0,470*	950	1573	0,093	5,376	1,064	
3	Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000	
Rse	Strato laminare esterno							0,04	
Risultati Regime periodico stabilizzato				T = 24 ore					
Fattore di decremento (attenuazione)			fd [-]			0,038			
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)			$\varphi$ [h]			19,61			
Trasmittanza termica periodica			Yie  [W/m <sup>2</sup> K]			0,030			
Ammettenza termica lato interno			Yii [W/m <sup>2</sup> K], [h]	4,01	1,56				
Ammettenza termica lato esterno			Yee [W/m <sup>2</sup> K], [h]	5,86	2,36				
Capacità termica areica lato interno			k1 [kJ/m <sup>2</sup> K]	54,8	97,7				
Capacità termica areica lato esterno			k2 [kJ/m <sup>2</sup> K]	80,3	97,7				
Fattore di smorzamento superficiale interno									
Parete disperdente			fsd [-]	0,479	0,238				
Parete interna			fsi [-]	0,482	0,241				
Regime stazionario									
Massa superficiale			Ms [kg/m <sup>2</sup> ]			787			
Resistenza termica tot.			Rt [m <sup>2</sup> K/W]			1,234			
Trasmittanza			U [W/m <sup>2</sup> K]			0,810			
Conduttanza			C [W/m <sup>2</sup> K]			0,940			
Capacità termica areica			Cta [kJ/m <sup>2</sup> K]			747			
Costante di tempo			$\tau$ [h]			256			

**Tabella 7.19**, Calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario di una parete in terra battuta di 50 cm di spessore dalle caratteristiche fisiche corrispondenti a quelle ottenute per via sperimentale dal campione di terra battuta A realizzato in laboratorio.



\* Il valore di conducibilità termica è stato calcolato dai dati ottenuti dalla prova in piastra calda, escludendo l'apporto dei fogli ingomma para.

Campione terra battuta B, $\omega$ iniziale 15%										
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400		
	Resistenza termica sup interna Rsi						[m <sup>2</sup> K/W]	0,13		
	Resistenza termica sup esterna Rse						[m <sup>2</sup> K/W]	0,04		
Descrizione degli strati		s	$\lambda$	c	$\rho$	Prof. di penetrazione al periodo T ( $\delta$ )	$\xi = s/d$	Resistenza termica		
		[m]	[W/mK]	[J/KgK]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m]	[-]	[m <sup>2</sup> K/W]		
Rsi	Strato laminare interno							0,13		
1	Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000		
2	Terra battuta	0,50	0,601*	950	1645	0,103	4,862	0,832		
3	Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000		
Rse	Strato laminare esterno							0,04		
Risultati Regime periodico stabilizzato					T = 24 ore		Regime stazionario			
Fattore di decremento (attenuazione)			fd	[-]	0,053		Massa superficiale		Ms [kg/m <sup>2</sup> ]	823
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)			$\varphi$	[h]	17,84		Resistenza termica tot.		Rt [m <sup>2</sup> K/W]	1,002
Trasmittanza termica periodica			Yie	[W/m <sup>2</sup> K]	0,053		Trasmittanza		U [W/m <sup>2</sup> K]	0,998
Ammettenza termica lato interno			Yii	[W/m <sup>2</sup> K], [h]	4,31	1,44	Conduttanza		C [W/m <sup>2</sup> K]	1,202
Ammettenza termica lato esterno			Yee	[W/m <sup>2</sup> K], [h]	6,58	2,28	Capacità termica areica		Cta [kJ/m <sup>2</sup> K]	781
Capacità termica areica lato interno			k1	[kJ/m <sup>2</sup> K]	59,1	113,4	Costante di tempo		$\tau$ [h]	217
Capacità termica areica lato esterno			k2	[kJ/m <sup>2</sup> K]	90,1	113,4				
Fattore di smorzamento superficiale interno										
Parete disperdente			fsd	[-]	0,439	0,144				
Parete interna			fsi	[-]	0,442	0,148				

**Tabella 7.20**, Calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario di una parete in terra battuta di 50 cm di spessore dalle caratteristiche fisiche corrispondenti a quelle ottenute per via sperimentale dal campione di terra battuta B realizzato in laboratorio.

\* Il valore di conducibilità termica è stato calcolato dai dati ottenuti dalla prova in piastra calda, escludendo l'apporto dei fogli ingomma para.

I risultati di trasmittanza termica in regime stazionario, al pari di quelli della trasmittanza termica periodica, del fattore di attenuazione, e dell'ammiettenza sono leggermente più bassi dei valori riscontrabili in letteratura (Bollini 2013, pp 187), mentre il fattore di decremento risulta leggermente più alto. Le ragioni potrebbero risiedere nella densità dei campioni realizzati in laboratorio, minima, per il campione B, e troppo bassa del campione A, rispetto agli standard in letteratura.

Il tenore d'acqua della miscela di terra al momento della compattazione del muro non sembra avere un'incidenza rilevabile sulle prestazioni termiche dei campioni. Ci si sarebbe potuto aspettare che una maggiore quantità d'acqua iniziale, asciugando potesse produrre un maggiore volume di pori nella struttura del muro, che una volta essiccato contenesse una maggiore quantità d'aria e di conseguenza una conducibilità termica più bassa. I risultati ottenuti invece sembrano invece essere legati maggiormente alla densità del materiale, leggermente superiore nel campione a tenore d'acqua iniziale del 15%, che risulta avere anche la conducibilità termica più alta.

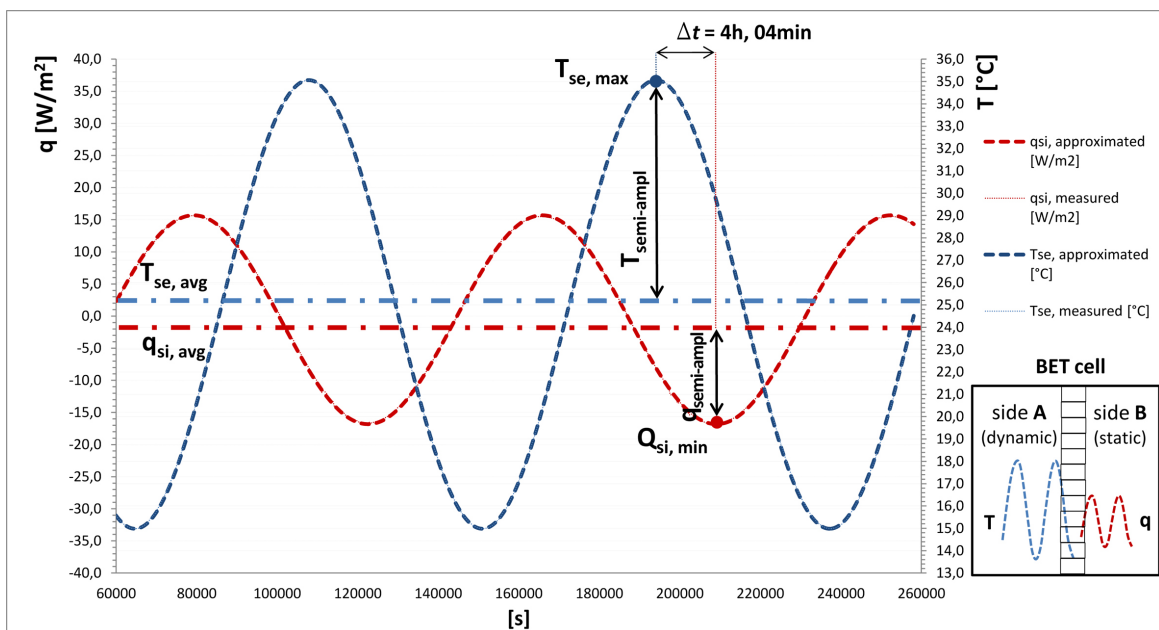
## 7.5.2 TEST TERMICI SU PACCHETTI MURARI COMPOSITI

Le prove termiche in piastra calda in regime dinamico sono state ripetute accoppiando il campione in terra battuta B, con tenore iniziale d'acqua del 15%, ai pannelli in terra alleggerita realizzati, per verificare come questi ultimi influiscano sulla prestazione della parete in terra. Le prove sono state eseguite ripetendo il protocollo utilizzato per le prove dinamiche sui campioni in terra battuta. All'interno dell'apparato *Lasercomp FOX600*, i pannelli sono stati adagiati al di sopra dei campioni in terra battuta, mantenuti avvolti nel telo di plastica, sotto il tappetino a contatto con la piastra superiore dinamica.

Prestazioni termiche delle pareti campione composte					
Composizione campioni	s [cm]	$f_a$ [-]	$\varphi$ [h]	$Y_{ie}$ [W/m <sup>2</sup> K]	C [W/m <sup>2</sup> K]
Terra battuta B + Pannello 1:3	15,5	0,83	3,87	1,33	1,60
Terra battuta B + Pannello 1:1	15,0	0,53	4,07	1,62	3,08

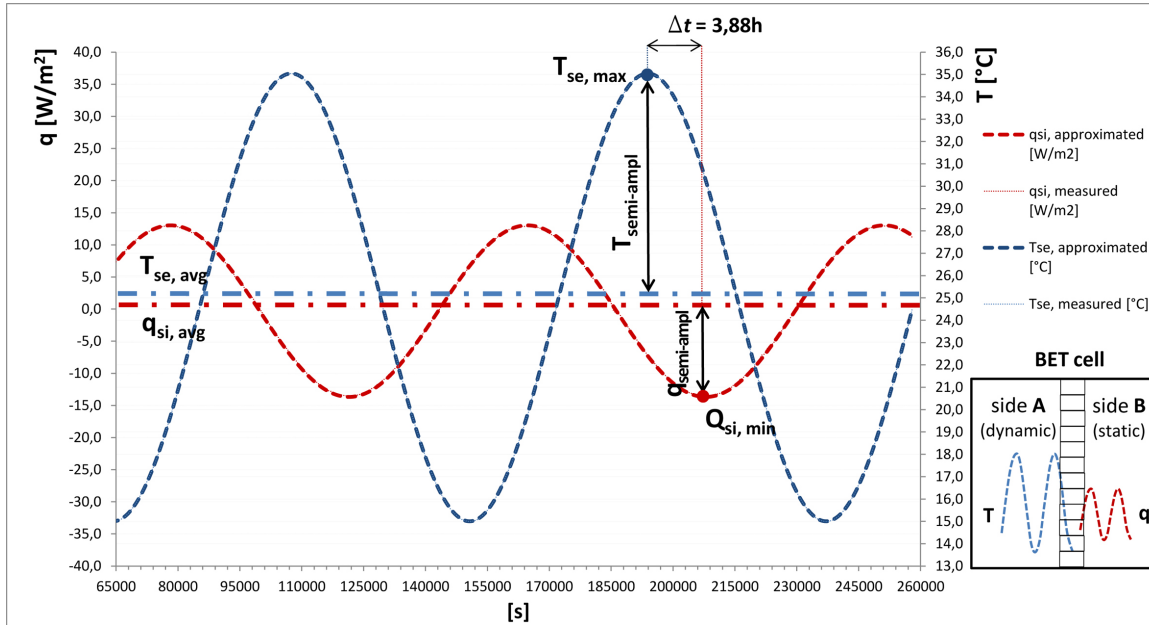
**Tabella 7.21**, Calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico di pareti campione composte con il metodo della piastra calda.

Utilizzando la UNI EN ISO 13786 è stato calcolato il calore specifico dei pannelli, modificandone il valore nel foglio di calcolo fino a raggiungere i valori di *sfasamento termico*  $\varphi$  e *trasmissione termica periodica*  $Y_{ie}$  ottenuti con le prove in piastra calda. Purtroppo, per il pannello di proporzioni 1:3 non è stato possibile ottenere una corrispondenza di risultati per valori di calore specifico attendibili, è quindi stato utilizzato il valore di calore specifico ottenuto per il pannelli di proporzioni 1:1, da 1000 J/kgK, per entrambi i casi, poiché si avvicina molto ai valori indicati in letteratura per terra alleggerita con paglia (Volhard 1995), anche per densità intorno ai 400 kg/m<sup>3</sup> come nel caso del pannello 1:3.



**Fig. 7.97**, Grafico che riproduce l'andamento delle temperature  $T_{se}$  agenti sulla superficie superiore della parete composta dal pannello in terra alleggerita con paglia di riso di proporzioni 1:3 ed il campione in terra battuta B e il pannello, e il flusso termico oscillatorio  $Q_{si}$  uscente dalla superficie opposta. In evidenza lo sfasamento orario con cui si riproduce il massimo valore di temperatura entrante nel sinusoide del flusso di calore uscente sulla superficie opposta.

Utilizzando il calore specifico ottenuto, i calcoli sono stati ripetuti utilizzando spessori potenzialmente reali per i componenti della parete: 50 cm per la terra battuta, mentre lo spessore dei pannelli in terra alleggerita è stato calcolato in modo da raggiungere le prestazioni di trasmittanza termica in regime stazionario indicate dalla normativa nel caso di interventi di retrofit<sup>15</sup>. Per raggiungere valori di  $U \leq 0,396 \text{ W/m}^2\text{K}$ , sono necessari 11 cm di spessore con il pannello di proporzioni 1:3 e 17 cm per il pannello di proporzioni 1:1.



**Fig. 7.98**, Grafico che riproduce l'andamento delle temperature  $T_{se}$  agenti sulla superficie superiore della parete composta dal pannello in terra alleggerita con paglia di riso di proporzioni 1:1 ed il campione in terra battuta B e il pannello, e il flusso termico oscillatorio  $Q_{si}$  uscente dalla superficie opposta. In evidenza lo sfasamento orario con cui si riproduce il massimo valore di temperatura entrante nel senoide del flusso di calore uscente sulla superficie opposta.

### Prestazioni termiche: parete composta terra battuta B - pannello in terra alleggerita 1:3

Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T		[sec]		86400		
	Resistenza termica sup interna $R_{si}$		[m²K/W]		0,13		
	Resistenza termica sup esterna $R_{se}$		[m²K/W]		0,04		
Descrizione degli strati	s [m]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/KgK]	$\rho$ [Kg/m³]	Prof. di penetrazione al periodo T ( $\delta$ ) [m]	$\xi = s/d$ [-]	Resistenza termica [m²K/W]
$R_{si}$ Strato laminare interno							0,13
1 Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000
2 Terra battuta B	0,50	0,601	950	1645	0,103	4,862	0,832
3 Pannello terra-paglia 1:3	0,11	0,072	1000	403	0,070	1,571	1,532
4 Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000
$R_{se}$ Strato laminare esterno							0,04

Risultati Regime periodico stabilizzato T = 24 ore				Regime stazionario	
Fattore di decremento (attenuazione)	<b>fd</b> [-]	0,010		Massa superficiale	<b>Ms</b> [kg/m <sup>2</sup> ] 867
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	<b>φ</b> [h]	23,27		Resistenza termica tot.	<b>Rt</b> [m <sup>2</sup> K/W] 2,534
Trasmittanza termica periodica	<b> Yie </b> [W/m <sup>2</sup> K]	0,004		Trasmittanza	<b>U</b> [W/m <sup>2</sup> K] 0,395
Ammettenza termica lato interno	<b>Yii</b> [W/m <sup>2</sup> K], [h]	4,31	1,44	Conduttanza	<b>C</b> [W/m <sup>2</sup> K] 0,423
Ammettenza termica lato esterno	<b>Yee</b> [W/m <sup>2</sup> K], [h]	1,31	2,86	Capacità termica areica	<b>Cta</b> [kJ/m <sup>2</sup> K] 826
Capacità termica areica lato interno	<b>k1</b> [kJ/m <sup>2</sup> K]	59,2	113,5	Costante di tempo	<b>τ</b> [h] 581
Capacità termica areica lato esterno	<b>k2</b> [kJ/m <sup>2</sup> K]	18,0	19,1		
Fattore di smorzamento superficiale interno					
Parete disperdente	<b>fsd</b> [-]	0,439	0,829		
Parete interna	<b>fsi</b> [-]	0,440	0,830		

**Tabella 7.22**, Calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario, secondo la UNI EN ISO 13786, di una parete composta in terra battuta spessore 50 cm e pannello in terra alleggerita con paglia di riso di proporzioni 1:3.

Prestazioni termiche: parete composta terra battuta B - pannello in terra alleggerita 1:1								
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T						[sec]	86400
	Resistenza termica sup interna Rsi						[m <sup>2</sup> K/W]	0,13
	Resistenza termica sup esterna Rse						[m <sup>2</sup> K/W]	0,04
Descrizione degli strati	s [m]	λ [W/mK]	c [J/KgK]	ρ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Prof. di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W]	
Rsi Strato laminare interno							0,13	
1 Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000	
2 Terra battuta B	0,50	0,601	950	1645	0,103	4,862	0,832	
3 Pannello terra-paglia 1:1	0,17	0,111	1000	740	0,064	2,657	1,532	
4 Foglio di gomma Para	0,000	0,136	1400	970	0,052	0,000	0,000	
Rse Strato laminare esterno							0,04	
Risultati Regime periodico stabilizzato T = 24 ore				Regime stazionario				
Fattore di decremento (attenuazione)	<b>fd</b> [-]	0,005		Massa superficiale	<b>Ms</b> [kg/m <sup>2</sup> ] 948			
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	<b>φ</b> [h]	27,48		Resistenza termica tot.	<b>Rt</b> [m <sup>2</sup> K/W] 2,533			
Trasmittanza termica periodica	<b> Yie </b> [W/m <sup>2</sup> K]	0,002		Trasmittanza	<b>U</b> [W/m <sup>2</sup> K] 0,395			
Ammettenza termica lato interno	<b>Yii</b> [W/m <sup>2</sup> K], [h]	4,31	1,44	Conduttanza	<b>C</b> [W/m <sup>2</sup> K] 0,423			
Ammettenza termica lato esterno	<b>Yee</b> [W/m <sup>2</sup> K], [h]	2,29	2,77	Capacità termica areica	<b>Cta</b> [kJ/m <sup>2</sup> K] 907			
Capacità termica areica lato interno	<b>k1</b> [kJ/m <sup>2</sup> K]	59,3	113,6	Costante di tempo	<b>τ</b> [h] 638			
Capacità termica areica lato esterno	<b>k2</b> [kJ/m <sup>2</sup> K]	31,5	33,7					
Fattore di smorzamento superficiale interno								

Parete disperdente	<b>fsd</b>	[-]	0,439	0,703
Parete interna	<b>fsi</b>	[-]	0,440	0,703

**Tabella 7.23**, Calcolo delle prestazioni termiche in regime dinamico e stazionario, secondo la UNI EN ISO 13786, di una parete composta in terra battuta spessore 50 cm e pannello in terra alleggerita con paglia di riso di porzioni 1:1.

Fattore di attenuazione e trasmittanza termica periodica decrescono fortemente applicando i pannelli sulla parete in terra battuta, per cui le oscillazioni di temperatura interna subiscono un ulteriore decremento, mentre viene migliorata anche la prestazione in termini di sfasamento termico, già di ottimo livello con la sola parete in terra.

In realtà si ottengono ottime prestazioni termiche sul regime dinamico anche con spessori di pannelli minori, pur non raggiungendo i parametri di trasmittanza termica stazionaria indicati dalla normativa. Accoppiando il pannello in terra e paglia 1:3 con spessore 8 cm, alla parete in terra battuta B da 50 cm di spessore ad esempio, si ottiene  $U = 0,47$   $W/m^2K$ , insufficiente secondo normativa, ma valori di  $Y_{ie}$  0,006  $W/m^2K$ ,  $\varphi = 21,81$  h,  $f_a = 0,012$ , per massa superficiale  $M_s = 855$ , mentre i valori di ammettenza termica  $Y_{ii}$  e Capacità termica areica interna rimangono immutati. Per il pannello 1:1 risultati simili sul regime stazionario si ottengono con spessori di 12 cm, mentre sul regime dinamico i valori sono leggermente migliori.

## 7.6 VALUTAZIONE RISULTATI

Il metodo seguito per giungere ai risultati presentati presenta in realtà qualche difficoltà nel passaggio dalla scala dei campioni testati sperimentalmente con il metodo della piastra calda, alla scala reale dei componenti murari per l'edilizia. Purtroppo non è stato possibile effettuare la misura diretta del calore specifico dei campioni, ed il metodo di calcolo attraverso il foglio di calcolo UNI EN ISO 13786 non sempre permette di avvicinare i risultati ottenuti per via sperimentale. Nel caso particolare della parete composta dal pannello di proporzioni 1:3 e terra battuta di tipo B, non si è riusciti ad ottenere un valore di  $c$  attendibile, per cui si è dovuto fare ricorso al risultato ottenuto con il pannello di proporzioni 1:1 che confrontato con i dati in letteratura offre un risultato attendibile anche per densità intorno ai 400  $kg/m^3$  del primo pannello. Non è stato trovato ancora un sistema più diretto per portare i dati sperimentali ad una scala reale dei componenti testati.

I test termici mostrano comunque risultati interessanti: i pannelli in terra alleggerita con paglia di riso, non raggiungono conducibilità termiche particolarmente basse in regime stazionario; se accoppiati alle pareti in terra battuta però, permettono di ottenere buoni risultati sulla prestazione invernale con spessori tutto sommato contenuti, in particolar modo nel caso dei pannelli di proporzione 1:3. Le ottime prestazioni sul periodo estivo della terra battuta non vengono compromesse se i pannelli vengono utilizzati sul lato esterno della parete;

Sono stati poi verificate le prestazioni della parete spostando la posizione dei pannelli sul lato interno. Le prestazioni in regime dinamico in termini di *fattore di attenuazione*, *sfasamento termico* e *trasmittanza termica periodica* diminuiscono molto leggermente, ma non mostrano variazioni sostanziali e rimangono di ottimo livello. I valori di *capacità termica areica interna*  $k_e$  e di *ammettenza termica interna* ( $Y_{ii}$ ), che rappresentano parametri importanti in relazione al mantenimento della temperatura interna costante nel tempo. Questo aspetto è tuttavia particolarmente



importante soprattutto in presenza di elevati carichi interni.

Prestazioni termiche delle pareti in terra battuta e delle pareti composite										
Composizione pareti	s [cm]	f <sub>a</sub> [-]	φ [h]	Y <sub>ie</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	Y <sub>ji</sub> [W/m <sup>2</sup> K] [h]	k <sub>1</sub> [kJ/m <sup>2</sup> K]	M <sub>s</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> K]	R [m <sup>2</sup> K/W]	C [W/m <sup>2</sup> K]
Terra battuta B	50	0,053	17,84	0,053	4,31	59,1	823	1,00	1,00	1,20
Terra battuta B - Pannello 1:3 (interno)	61	0,014	22,71	0,005	1,21	16,5	867	0,395	2,53	0,42
Terra battuta B - Pannello 1:1 (interno)	67	0,007	27,09	0,003	1,97	27,1	948	0,395	2,53	0,42
Terra battuta B - Pannello 1:3 (esterno)	61	0,010	23,27	0,004	4,31	59,2	867	0,395	2,53	0,42
Terra battuta B - Pannello 1:1 (esterno)	67	0,005	27,48	0,002	4,31	59,3	948	0,395	2,53	0,42

**Tabella 7.24**, Quadro riassuntivo comparativo delle prestazioni termiche in regime dinamico e in regime stazionario delle pareti a spessore reale con i componenti edilizi realizzati in laboratorio.

Da un punto di vista tecnologico, della produzione dei pannelli, i risultati termici ottenuti imponendo spessori quattro o cinque volte maggiori di quelli dei campioni realizzati in laboratorio. Questo non solo si ripercuote sulle quantità di materiali necessarie alla produzione, calcolabili con maggiorazione direttamente proporzionale all'aumento dello spessore del pannello, ma con tutta probabilità anche sul procedimento di realizzazione. Nel tentativo fallito di produzione di un pannello con fibre di *Poligono del Giappone*, si è notato come una volta preparata e posta nel cassero la miscela di terra e fibre, si avesse una maggiore difficoltà nella compressione dell'impasto. La miscela tendeva a gonfiare durante la compattazione e successivamente durante l'essiccazione, segno di una scarsa coesione raggiunta attraverso la componente legante, probabilmente dovuta in parte alla natura legnosa delle fibre della pianta, ma anche allo spessore maggiore (5 cm) del pannello. Con spessori ancora maggiori il sistema di pressione manuale utilizzato risulterebbe con tutta probabilità insufficiente. Una soluzione potrebbe essere costituita da un sistema meccanico con piastra a pressione dall'alto, con possibilità di modificarne il peso, in modo da poter gestire il grado di compressione del pannello. Andrebbero in questo caso nuovamente verificate le prestazioni termiche di campioni realizzati con questo metodo in modo da stabilire come la pressione esercitata sull'impasto influenzi il volume di vuoti del pannello e di conseguenza le caratteristiche termiche.

## CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca, indirizzato in principio alla realizzazione di uno strumento operativo di guida per interventi di recupero su edifici in terra battuta, ha investito un campo di studio ampio. Sono stati analizzati i temi della **riqualificazione e del recupero del patrimonio architettonico in terra battuta sul territorio Piemontese** sotto diversi aspetti, che vanno dall'approfondimento di politiche per il recupero dei saperi artigiani e della filiera della costruzione in terra cruda ad aspetti prettamente tecnologici relativi alle tecniche di intervento per il recupero, per finire con aspetti legati al comportamento termico degli edifici e dei componenti murari realizzati con questa antica tecnica costruttiva. Il percorso di studio si è poi spinto fino a proporre soluzioni tecnologiche appropriate per l'incremento della resistenza termica di costruzioni in terra battuta aprendo la ricerca verso ulteriori campi di indagine.

Lo studio delle **strategie per il recupero della filiera della costruzione in terra cruda** attuate in Italia e in Francia negli ultimi decenni ha permesso di individuare le criticità da superare nell'ambito del recupero dei saperi artigiani relativi alla tecnica costruttiva e della ricostituzione di un mercato edilizio locale legato alle tecnologie in terra cruda. In Italia in particolare, limiti di carattere sociale e di gestione del territorio rurale, responsabili della sensibile riduzione del patrimonio costruito in terra locale, rischiano di rivelarsi una montagna difficile da scalare nell'ottica di riavviare una filiera e un mercato edilizio della terra cruda. I risultati dell'analisi, tuttavia pongono l'accento sulla necessità di un attualizzazione delle tecnologie costruttive in terra cruda anche attraverso la realizzazione di edifici di nuova costruzione, e lo studio di una normativa di riferimento specifica che faciliterebbe una sua collocazione nei processi edilizi contemporanei.

**Le linee guida per il recupero di murature in terra battuta** si propongono come strumento tecnico di supporto operativo per la progettazione e realizzazione di interventi di recupero su pareti in terra battuta e contribuiscono a colmare, seppur in modo non esaustivo, carenze dovute alla perdita dei saperi alla base della tecnica costruttiva. La guida, a completamento di precedenti lavori promossi dalla Regione Piemonte, va a riempire in particolare il vuoto sull'uso di tecniche di riparazione di strutture murarie in terra battuta con materiali a base di terra. Le schede realizzate presentano approfondimenti sulla composizione di miscele a base di terra utilizzate per risarciture di lesioni, reintegro di materiale mancante, rivestimenti di pareti, nonché indicazioni sulla procedura di posa in opera per una corretta realizzazione degli interventi di riparazione sulle murature. Per la messa a punto delle schede oltre che allo studio della letteratura tecnica scientifica ha contribuito l'esperienza diretta su un cantiere sperimentale che ha dimostrato la validità operativa delle tecniche proposte.

Gli interventi sono perfettamente riusciti, a dimostrazione che la riparazione di strutture murarie in terra battuta con materiali a base di terra cruda è possibile e non presenta particolari rischi.

Di particolare interesse risultano gli esperimenti per la composizione di miscele a base di terra per la realizzazione di uno strato di protezione dall'acqua piovana per la testa di muri in terra battuta, con funzione anche di superficie di appoggio per strutture in legno di completamento della parete. Tra le diverse miscele di terra stabilizzate con piccole percentuali di cemento o additate con olio di lino, inaspettatamente quelle di terra pura hanno mostrato miglior

resistenza meccanica, ma scarsa resistenza all'erosione secondo il test di Geelong (Walker, Maniatidis 2003). Risultati migliori in questo senso si sono ottenuti coprendo la superficie dei campioni con olio di lino. Le criticità legate a fenomeni di ritiro durante la posa in opera e alla necessaria resistenza meccanica non sono state completamente risolte, l'esperimento andrebbe ripetuto per strati protettivi di spessore maggiore.

il **monitoraggio di un edificio in terra battuta** nell'Alessandrino, conferma come la terra battuta sia in grado di regolare la temperatura degli ambienti interni in modo particolarmente efficace durante il periodo estivo (sebbene realizzato durante l'estate del 2014 che ha offerto temperature atipiche). Le temperature ambiente interne hanno mantenuto un andamento costante, con oscillazioni tra i 21 e 27 °C durante tutto l'arco del periodo di prova, a fronte di oscillazioni di temperatura esterna tra i 15 e 33°C. I valori di trasmittanza termica in regime stazionario, restituiti dai risultati del monitoraggio eseguito durante il periodo invernale, sono in linea con i dati reperibili in letteratura e si attestano su 1.2 W/m<sup>2</sup>K. I risultati confermano la scarsa compatibilità delle caratteristiche termiche dei setti murari monolitici in terra battuta ad alta densità, con le normative italiane in materia di prestazioni termiche dei componenti di involucro, che impongono valori di trasmittanza termica di 0.33 W/m<sup>2</sup>K, maggiorate del 20% in caso di retrofit. Le ottime potenzialità termiche sul periodo estivo del materiale terra non sono tenute in considerazione dalla normativa italiana nonostante, anche complici i cambiamenti climatici globali, la climatizzazione estiva stia assumendo un peso consistente nei consumi energetici degli edifici.

I risultati del progetto di ricerca *Le patrimoine bâti face aux normes thermiques*, nella *Communauté des Communes Chalaronne - Centre*, definiscono lo stato dell'arte sui **consumi energetici del patrimonio costruito** locale in **terra battuta** e introducono nuovi interessanti parametri di ricerca. Gli edifici mostrano mediamente consumi energetici superiori alla media Francese, ma la maggior parte di essi non se ne discosta molto. L'incrocio dei dati analizzati tende a spostare l'attenzione dall'aspetto meramente tecnologico, verso l'interessante aspetto della trasformazione degli spazi abitativi, dovuta in gran parte ai mutamenti della società, rurale e agricola in particolare, del secolo scorso e alle nuove concezioni dell'abitare della società contemporanea. Per quanto i risultati dell'indagine non risolvano il tema dell'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici antichi in terra battuta, emergono tuttavia una serie di fattori che hanno contribuito a modificare fortemente il comportamento termico di queste strutture, tra gli altri:

- La scomparsa degli spazi dedicati allo stoccaggio dei prodotti agricoli quali fienili, stalle e granai che avevano anche funzione di "tampone termico" a protezione degli ambienti abitati dell'edificio, e contribuivano a mitigare le dispersioni di calore verso l'esterno.
- L'aumento vertiginoso dei volumi abitati e riscaldati degli edifici
- La drastica diminuzione dei componenti del nucleo familiare.

Il quadro risultante indica che a fronte di maggiori volumi da riscaldare in rapporto agli abitanti gli edifici, il compito di mitigare le dispersioni di calore è affidato interamente agli elementi d'involucro edilizio.

**L'analisi delle tecnologie per l'isolamento** termico di edifici in terra battuta con materiali naturali e **l'attività di sperimentazione in laboratorio** ha permesso di proporre soluzioni tecnologiche appropriate per l'incremento della resistenza termica di murature in terra battuta, puntando su materiali a base di terra e fibre vegetali reperibili sul territorio regionale Piemontese considerati scarti di produzione di prodotti derivati dalla pianta di origine o risorse

sotto-utilizzate sul territorio. Paglia di riso, fibra di canapa e Poligono del Giappone sono stati individuati quali materiali potenzialmente interessanti sotto questo aspetto per la **produzione di pannelli in terra alleggerita con fibre**. Terra proveniente dalla zona di Novi Ligure è stata utilizzata per la realizzazione in laboratorio di **muri campione in terra battuta**, da sottoporre con i pannelli a **prove termiche con il metodo della piastra calda**<sup>1</sup>.

Indice di plasticità, coesività e espansività della terra ottenuti dai test in laboratorio indicano si tratti di un suolo versatile, ricco in limo, poco plastico, con granulometria compresa nel fuso indicato da CRAterre per terreni adatti alla costruzione in terra battuta. Il tenore d'acqua ottimale di compattazione risultante dalle prove Proctor standard eseguite sul terreno a disposizione risulta del 9% e del 15%. I campioni in terra battuta sono stati realizzati con contenuto d'acqua del 9%, 12%<sup>2</sup> e 15%.

Una coppia di pannelli in terra alleggerita con paglia di riso, di dimensioni 50x49x4cm è stata realizzata in laboratorio senza particolari difficoltà, all'interno di appositi casseri, con due diverse proporzioni di terra e fibre,:

- 1:3) 1 volume di terra e 3 volumi di paglia di riso, (densità a secco 400 kg/m<sup>3</sup>)
- 1:1) 1 volume di terra e 1 volume di paglia di riso, (densità a secco 740 kg/m<sup>3</sup>)

I campioni sono stati realizzati con una miscela di terra a forte componente di limo e argilla e non mostrano segni di fessurazione da ritiro una volta essiccati. Per densità intorno a 400 kg/m<sup>3</sup> il campione sembra poco resistente ed è soggetto a leggero sfaldamento negli angoli, ma è possibile che per spessori maggiori il problema si riduca. Per densità di 740 kg/m<sup>3</sup> la coesione del materiale migliora decisamente ed il peso risulta ancora contenuto; raddoppiando lo spessore della sezione il peso del pannello potrebbe però risultare importante.

La fibra di canapa ha dimostrato invece particolari criticità in fase di lavorazione. Un provino di dimensioni ridotte è stato realizzato con fibra umida, ma i fenomeni di ritiro si sono dimostrati incontrollabili e ne hanno ridotto fortemente lo spessore. Sono state incontrate difficoltà inaspettate nella gestione delle proporzioni dei componenti per la produzione di pannelli in terra alleggerita con fibre di Poligono del Giappone; le prove realizzate presso CRAterre si sono dimostrate inattendibili per campioni in forma di pannelli. Sarebbe necessario effettuare ulteriori prove per stabilire efficaci proporzioni per la composizione dell'impasto di terra e fibre.

Le prove termiche eseguite in regime stazionario sui campioni in terra battuta mostrano valori di conducibilità termica di 0.47 W/mK per densità di 1550 kg/m<sup>3</sup>, e 0.61 W/mK per densità di 1650 kg/m<sup>3</sup>, inferiori rispetto a quelli riscontrabili in letteratura<sup>3</sup>. Il tenore d'acqua della miscela di terra in fase di compattazione non sembra incidere sulla prestazione termica dei campioni, che viene invece influenzata fortemente dalla densità a secco del componente. Le prestazioni termiche ottenute dalle prove in regime dinamico confermano le particolari capacità di inerzia termica della terra

---

<sup>1</sup> I test sono stati eseguiti secondo le norme di riferimento UNI EN 12667, UNI EN 12664, ASTM C518, e con un apparato sperimentale secondo il metodo termoflussimetrico con anello di guardia, capace di misurare conducibilità termica e resistenza termica dei materiali, lo strumento è stato settato per effettuare prove in regime statico e in regime dinamico. Un'ampia descrizione delle prove viene fornita nel capitolo 7.5.

<sup>2</sup> Il tenore d'acqua ottimale di compattazione del 12% è il valore tipicamente indicato in letteratura per la realizzazione di muri in terra battuta (Bollini 2013).

<sup>3</sup> In letteratura per densità di 1700 kg/m<sup>3</sup>, sono indicate conducibilità termiche di 0.82 W/mK (Röhlen, Ziegert 2011, pp.171)

battuta. Per componenti murari riconducibili a spessori reali, i valori di *fattore di attenuazione* e *sfasamento* del lato interno risultano particolarmente interessanti<sup>4</sup> e mostrano come la terra battuta permetta di attenuare le oscillazioni di temperatura dell'aria ambiente esterna e trasferirle agli ambienti interni con un notevole ritardo<sup>5</sup>.

Le prestazioni termiche in regime stazionario misurate per via sperimentale sui pannelli in terra alleggerita con paglia di riso risultano particolarmente confortanti: 0.07 W/mK per pannello di densità 400 kg/m<sup>3</sup>, e 0.11 W/mK per il pannello di densità 740 kg/m<sup>3</sup>. I valori sono leggermente inferiori a quelli indicati in letteratura per materiali in terra alleggerita con paglia (Volhard 1995).

I risultati dei test in regime dinamico effettuati sui campioni in terra battuta affiancati ai pannelli, mostrano una sostanziale riduzione della *trasmissione termica periodica* e un aumento dello *sfasamento termico*, rispetto al solo componente in terra battuta, più importante nella soluzione con pannello di proporzioni di terra e fibra 1:1. Il fattore di attenuazione invece aumenta nel caso dell'accoppiamento con pannello 1:3 e diminuisce molto nel pacchetto terra battuta-pannello 1:1<sup>6</sup>. Quest'ultimo dato, anomalo, indicherebbe che la soluzione con pannello di proporzioni 1:3 ha una capacità inferiore di attenuare le oscillazioni di temperatura dell'aria ambiente esterna, anche rispetto al solo componente in terra battuta, nonostante la densità media inferiore.

I risultati ottenuti per via sperimentale sono confermati da quelli ottenuti per via analitica per elementi costruttivi di dimensioni reali, utilizzando il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 13786<sup>7</sup>. Lo spessore dei pannelli isolanti è stato calcolato in modo da raggiungere i valori di *trasmissione termica U* indicati dalla normativa italiana per l'adeguamento termico in caso di retrofit<sup>8</sup>. Le pareti composite dimostrano di poter raggiungere le prestazioni termiche richieste dalla normativa vigente anche sul periodo invernale con spessori dei pannelli tutto sommato contenuti, in particolar modo nel caso del pannello 1:3, nell'ordine di 11 cm. Le ottime prestazioni termiche sul periodo estivo della terra battuta non vengono compromesse, in particolar modo se i pannelli vengono utilizzati sul lato esterno della parete. Posizionando i pannelli sul lato interno della parete composita, *fattore di attenuazione*, *sfasamento termico* e *trasmissione termica periodica* diminuiscono solo leggermente, restando tuttavia di ottimo livello, mentre la *capacità termica areica* interna ( $Y_{ii}$ ) si riduce notevolmente<sup>9</sup>. Quest'ultimo parametro influenza la capacità della parete di accumulare calore dal lato interno, e una sua drastica riduzione potrebbe comprometterne in parte la prestazione termica sul periodo invernale. Inoltre, per spessori dell'ordine di oltre 10 cm, potrebbe essere necessario modificare la procedura di produzione dei pannelli, prevedendo di applicare una maggiore forza di compressione sul composto di terra e fibre all'interno del cassero in modo da evitare l'aumento di volume del pannello durante l'essiccazione.

---

4 I risultati sono riportati in tabella 7.19 e 7.20, al paragrafo 7.5.1

5 I risultati di sfasamento termico per i campioni testati sono riportati nei grafici 7.96 e 7.97, paragrafo 7.5.1

6 I valori sono riportati in tabella 7.21, paragrafo 7.5.2

7 La norma UNI EN ISO 13786 stabilisce metodi di calcolo per definire le caratteristiche e le prestazioni termiche in regime dinamico dei componenti edilizi.

8 Il valore massimo di U consentito dalla normativa in termini di adeguamento termico, secondo la Legge Regionale DGR 46-11968 della Regione Piemonte, viene maggiorato del 20% in caso di retrofit per la riqualificazione energetica del sistema edificio-impianto, ed è di  $U = 0.396 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

9 Una tabella riassuntiva (7.24) che mette a confronto le prestazioni termiche in regime stazionario e dinamico della sola parete in terra battuta e della terra battuta accoppiata ai pannelli in terra alleggerita posti sia sul lato esterno che esterno è riportata nel paragrafo 7.6

La necessità di raggiungere spessori compatibili con i valori di U indicati dalla normativa potrebbero permettere di risolvere i problemi di resistenza meccanica, ma andrebbe controllato l'aumento di peso dei pannelli che potrebbe complicare le operazioni di posa in opera. Va però sottolineato che, pur senza raggiungere i valori di trasmittanza termica in regime stazionario indicati dalla normativa, buone prestazioni in regime dinamico sono raggiungibili anche con pannelli di spessori sensibilmente minori, intorno ai 7-8 cm. Come sottolineato anche da altri autori (Bollini 2013) si rileva come non sia il materiale terra cruda in sé inadatto a raggiungere prestazioni termiche efficienti anche alle nostre latitudini, piuttosto l'esclusione dei parametri della prestazione termica estiva dei materiali, deducibili dai test in regime dinamico, da parte della normativa, finisce per penalizzare fortemente la terra battuta.

### **Limiti del metodo sperimentale**

Si sottolinea una certa difficoltà nella produzione di campioni di parete in terra battuta con densità a secco più vicine ai valori riscontrabili in letteratura, probabilmente dovuta all'uso di strumentazione artigianale, in gran parte autoprodotta.

Per quel che riguarda i test termici, il metodo sperimentale della piastra calda, pur consentendo di ottenere misure dirette su campioni testati, presenta il limite della trasposizione dei risultati ottenuti dalla prova in regime dinamico, su componenti edilizi di dimensioni reali. L'apparecchio permette infatti di testare campioni di spessore massimo di 18 cm. Il ricorso al metodo di calcolo indicato dalla norma UNI EN ISO 13786 non sempre ha permesso di avvicinarsi ai risultati ottenuti per via sperimentale. Il calcolo delle prestazioni termiche per componenti in scala reale viene effettuato interamente per via analitica ed il ruolo delle prove sperimentali viene sminuito, riducendosi di fatto al calcolo del calore specifico del singolo materiale. Un passaggio più diretto dai dati sperimentali sui campioni al calcolo delle prestazioni termiche dei componenti di dimensioni reali sarebbe necessario.

### **Ulteriori margini di ricerca**

Ulteriori ricerche per individuare una corretta procedura per la produzione di pannelli in terra alleggerita con fibra di canapa e poligono del Giappone si ritengono interessanti, in modo da poter verificare l'incidenza della natura della componente fibrosa sulle prestazioni termiche dei pannelli e delle pareti composite.

Prove di resistenza meccanica andrebbero realizzate sui pannelli di spessore indicato dai risultati della ricerca; sarebbe interessante verificare l'effettiva possibilità di utilizzare i pannelli realizzati sul lato esterno della parete conducendo test di resistenza all'erosione in laboratorio.

Ulteriori prove, finalizzate alla ricerca del miglior rapporto possibile tra spessore dei pannelli e prestazione termica in regime dinamico della parete composta con muro in terra battuta, permetterebbero di ottimizzare il peso dei pannelli e di facilitarne la posa in opera. Prove di posa in opera sarebbero inoltre necessarie a verificare le possibilità di ancoraggio dei pannelli direttamente alla parete in terra, senza l'ausilio di strutture di supporto in legno.

I test termici condotti sulle pareti composte indicano una diminuzione considerevole della *capacità termica areica interna*, e, indirettamente, della capacità di accumulo termico sul lato interno. Per mantenere inalterate le capacità di inerzia termica della parete in terra battuta, proteggere lo strato di isolante dagli agenti atmosferici e permettere al contempo di mantenere la terra battuta a vista sulla faccia esterna della parete, sarebbe di grande interesse



sviluppare una ricerca finalizzata alla definizione di un sistema tecnologico che consentisse di inserire l'isolante nell'interfaccia tra due strati di parete in terra battuta, senza dover per questo stravolgere completamente il sistema costruttivo in crudo<sup>10</sup>. I risultati della ricerca potrebbero essere certamente di grande interesse per edifici di nuova costruzione in crudo più che per interventi di recupero a causa dello spessore eccessivo che raggiungerebbero le pareti in terra battuta di edifici esistenti, di dimensioni già considerevoli, se isolate con una soluzione tecnologica di questo tipo.

---

**10** Esistono già in commercio soluzioni che propongono l'uso di isolante posto nell'intercapedine di due strati murari in terra battuta, ma prevedono accorgimenti tecnologici che di fatto alterano completamente il sistema costruttivo della terra battuta, utilizzando quantità di cemento importanti per la stabilizzazione e maglie di supporto strutturale in acciaio all'interno dei setti murari. Uno degli esempi più conosciuti è il sistema SIREWALL (<http://www.sirewall.com/>)