

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia “Galileo Ferraris”



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento Energia
“G.Ferraris”

Contratto di consulenza

Politecnico di Torino – Dipartimento Energia

e

E4e servizi srl

***“Monitoraggio in opera del comportamento termico di un pannello
contenente materiale a cambiamento di
fase (PCM) installato sul tetto di un edificio”***

Report tecnico

PhD. Arch. Stefano Fantucci (Responsabile Scientifico)

Ing. Emanuela Sassaroli

Luglio 2021

Indice

1. Introduzione	3
1.1. Inquadramento normativo.....	4
2. Metodologia	5
2.1. Realizzazione delle test room.....	5
2.2. Allestimento del setup di misura.....	8
2.3. Periodi di monitoraggio e condizioni al contorno.....	10
3. Risultati	12
3.1. Test_01.....	12
3.1.1. Temperatura superficiale interna.....	13
3.1.2. Flusso termico.....	14
3.1.3. Temperatura del PCM.....	15
3.1.4. Temperatura media radiante e temperatura operativa.....	16
3.2. Test_02.....	17
3.2.1. Temperatura superficiale interna.....	18
3.2.2. Flussi termici.....	19
3.2.3. Temperatura del PCM.....	20
3.2.4. Temperatura media radiante e temperatura operativa.....	20
4. Conclusioni	22
Riferimenti.....	23
Allegato “A”.....	24

1. Introduzione

Le coperture degli edifici rappresentano le superfici maggiormente esposte alla radiazione solare durante la stagione estiva, per tale ragione, gli ambienti direttamente confinanti con esse, quali i sottotetti, sono caratterizzati da un elevato rischio di surriscaldamento o, se dotati di impianti di climatizzazione, elevati consumi per raffrescamento.

Per ridurre la richiesta di raffrescamento o il rischio di surriscaldamento estivo è necessario che le coperture garantiscano un elevato livello di isolamento e di inerzia termica. Tuttavia, soprattutto nei casi di riqualificazione energetica e di intervento dall'intradosso della copertura, elevati spessori di isolamento e incremento della massa frontale possono comportare una serie di ricadute e limitazioni, quali l'incremento del carico sulla copertura e la riduzione dell'altezza interna (requisito base al fine di ottenere l'abitabilità degli spazi).

Al fine di migliorare l'inerzia termica del componente edilizio, evitando di incrementare la massa del componente e lo spessore degli strati isolanti, nuove soluzioni avanzate come i materiali a cambiamento di fase (PCM) si stanno affacciando al mondo dell'edilizia.

I PCM (Phase Change Materials) sono in grado, grazie all'elevato calore latente di fusione/solidificazione, di accumulare e rilasciare energia termica durante la loro transizione di fase a temperature prossime a quelle a cui è sottoposto un componente edilizio.

L'oggetto della presente relazione riguarda l'applicazione e il monitoraggio di un componente di copertura trattato con PCM macro-incapsulato Infinite-R. Obiettivi di tale analisi sono:

- Verificare l'influenza della scelta della temperatura di transizione del PCM;
- Valutare l'effetto della ventilazione naturale sul miglioramento del comportamento termico del componente;
- Valutare le ricadute sull'ambiente interno in termini di miglioramento del comfort;
- Dimostrare l'efficacia nell'impiego dei PCM tramite analisi comparativa con un componente di riferimento che non adotta tale soluzione.

Per rispondere agli obiettivi sopracitati, si è proceduto applicando due diversi pannelli Infinite-R contenenti PCM a due diverse temperature nominali di transizione (21 e 23°C). Tale analisi è stata condotta realizzando tre test-room, identiche tra loro, poste al di sotto di tre porzioni di copertura aventi la stessa stratigrafia di base. Tale numero ha reso possibile il monitoraggio e la comparazione simultanea di tre componenti, i primi due costituiti dall'applicazione dei PCM Infinite-R 21 e 23 e il terzo di riferimento (privo di PCM).

I risultati ottenuti hanno dimostrato l'efficacia dell'impiego dei PCM nel ridurre le temperature interne di picco rispetto alla soluzione di riferimento "tradizionale". Inoltre, l'analisi ha fornito informazioni utili a comprendere le ricadute derivanti dalla scelta della temperatura di transizione del PCM e dell'impiego di strategie di ventilazione naturale.

1.1. Inquadramento normativo

Il “Decreto interministeriale 26 giugno 2015 “*Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*” [1] prescrive i valori minimi di isolamento termico per le coperture (Tabella 1). Tuttavia, nel caso di interventi di riqualificazione energetica dell’involucro opaco, che prevedano l’isolamento termico dall’interno, i valori limite di trasmittanza termica indicati in tabella sono incrementati del 30%.

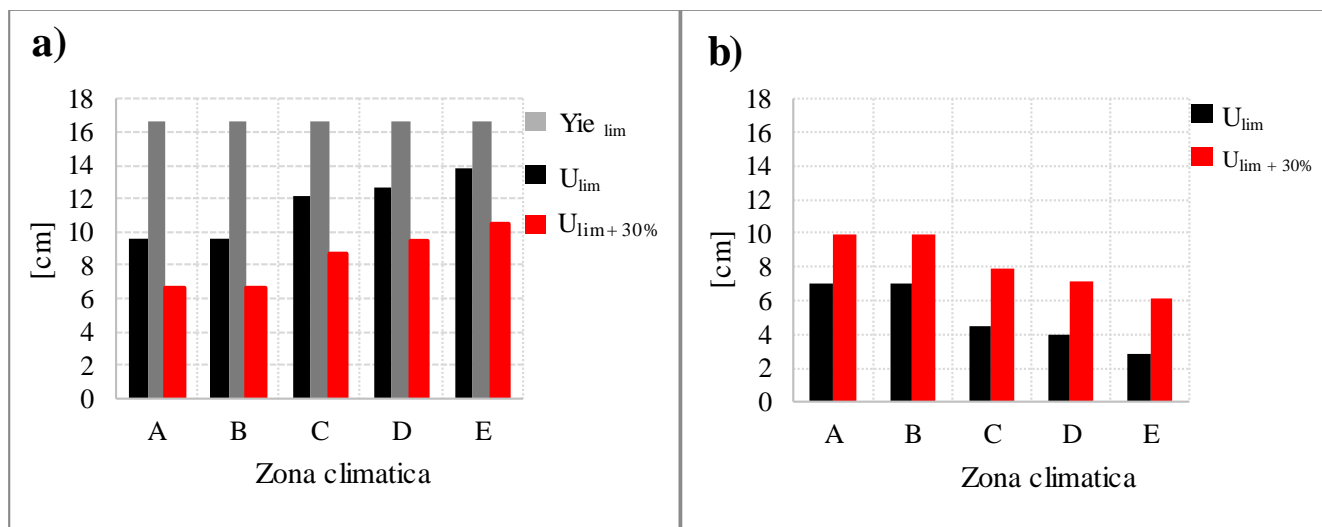
Tabella 1: Trasmittanze limite per le diverse zone climatiche italiane

Zona climatica	Gradi giorno [°C]	Trasmittanza termica U_{lim} [W/m ² K]	Trasmittanza termica con deroga $U_{lim+30\%}$ [W/m ² K]
A	<600	0.32	0.416
B	600-900	0.32	0.416
C	900-1400	0.26	0.338
D	1400-2100	0.24	0.312
E	2100-3000	0.22	0.286
F	>3000	0.20	0.260

Un’ulteriore prescrizione riguarda l’inerzia termica del componente edilizio. Nel caso delle coperture orizzontali o inclinate è fatto obbligo¹ al progettista di verificare almeno uno dei seguenti requisiti:

- che il valore della massa superficiale M_s , sia superiore a 230 kg/m²;
- che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica Y_{ie} , calcolata secondo il metodo UNI EN ISO 13786 [3], sia inferiore a 0,18 W/m²K.

Si riporta a titolo esemplificativo lo spessore di materiale isolante equivalente² tale da garantire la verifica dei requisiti minimi di trasmittanza termica (U_{lim} , $U_{lim+30\%}$) e di trasmittanza termica periodica Y_{ie} nelle diverse zone climatiche (Figura 1).



¹ Tale verifica è obbligatoria in tutte le zone climatiche a esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell’irradiazione sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s}$, sia maggiore o uguale a 290 W/m².

² Si è assunta come riferimento una copertura con tegole in laterizio (2 cm), intercapedine d’aria non ventilata (5 cm), isolamento dall’interno in EPS ($\lambda=0.035$) e finitura con lastra di cartongesso (1 cm). Metodo di calcolo impiegato EN ISO 6946 [2]

Figura 1. a) Spessore isolante (EPS) necessario al raggiungimento dei requisiti minimi di isolamento termico; b) Spessore aggiuntivo di isolante necessario al raggiungimento del valore limite di trasmittanza termica periodica $Y_{ie\ lim}$.

Come è possibile osservare in Figura 1a, lo spessore di isolante necessario al raggiungimento del requisito di trasmittanza termica periodica Y_{ie} è sempre superiore a quello necessario al raggiungimento del requisito di isolamento termico U_{lim} . In Figura 1b si evidenzia come lo spessore aggiuntivo di isolante necessario al raggiungimento del valore limite Y_{ie} rispetto allo spessore necessario al raggiungimento della trasmittanza limite in deroga ($U_{lim+30\%}$) sia compreso tra i ~6 cm della zona E e i ~10 cm delle zone A e B.

Tuttavia, il decreto 25 giugno 2015 precisa che qualora si ritenga di raggiungere i medesimi effetti positivi ottenibili con il raggiungimento dei valori limite di trasmittanza termica periodica, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti è possibile andare in deroga alla verifica di trasmittanza termica periodica.

L'impiego dei materiali a cambiamento di fase si colloca in questo contesto, in quanto una loro applicazione è in grado di contenere le oscillazioni di temperatura interna come sarà dimostrato dall'analisi sperimentale documentata nella presente relazione.

2. Metodologia

L'analisi sperimentale si è svolta tramite la successione di fasi diverse:

- Fase 1: Realizzazione delle test room
- Fase 2: Allestimento del setup di misura
- Fase 3: Monitoraggio sperimentale

2.1. Realizzazione delle test room

L'apparato sperimentale denominato TRIS (Testing Roofing Innovative Systems) consiste in tre celle identiche, con la copertura avente un'esposizione a Sud/Sud-ovest, site nel comune di San Francesco al Campo (TO).

Tutte le partizioni (pavimenti e pareti) confinano con un volume di controllo, mentre la copertura, con stratigrafia intercambiabile in base all'oggetto di prova, confina con l'ambiente esterno. In Tabella 2. vengono riportate le informazioni rilevanti riguardanti le dimensioni delle celle e l'orientamento della copertura. Si precisa che le celle risultano essere reciprocamente disaccoppiate in quanto separate da un'intercapedine d'aria ventilata aperta verso il volume di controllo (spessore 10 cm) e disaccoppiate dal pavimento del volume di controllo tramite intercapedine d'aria ventilata dello spessore di 5 cm. Le celle sono provviste di un sistema di riscaldamento controllato, mediante radiatori ad olio o tappetini radianti ed un sistema di ventilazione costituito da un estrattore elicoidale posto in ciascuna stanza.

In Figura 2 è possibile osservare le fasi di realizzazione delle test room, mentre in Figura 3 è possibile osservare il sistema TRIS completo.

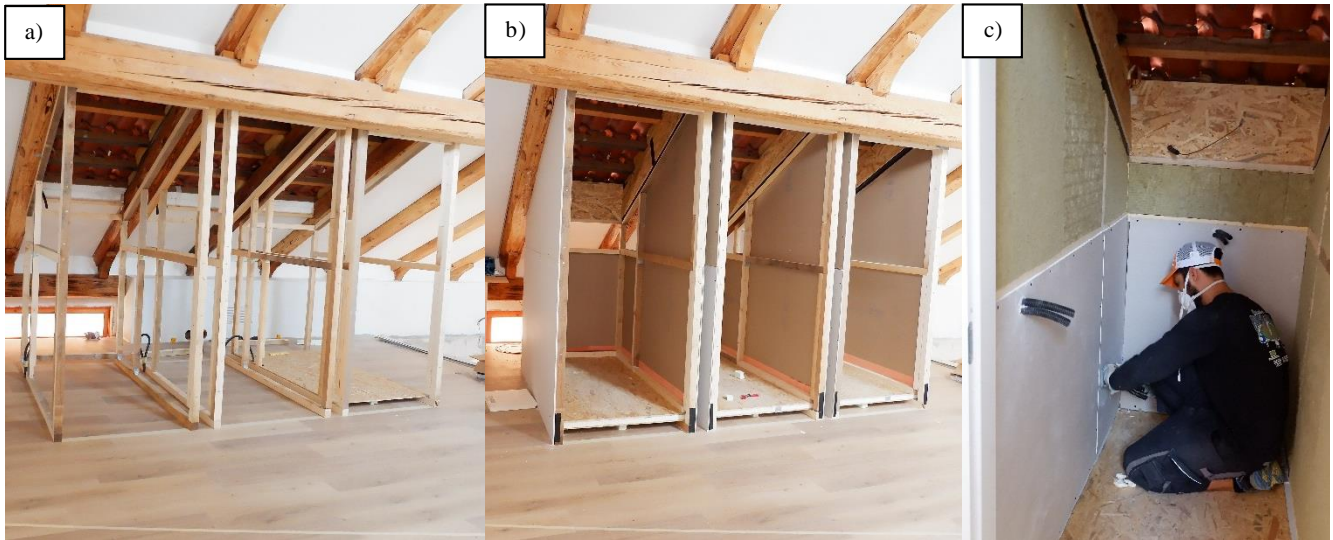


Figura 2. a) Installazione della struttura in listelli di abete; b) Pannellatura in cartongesso; c) Isolamento e finitura.



Figura 3. Sinistra) Vista esterna delle tre test room; destra) Vista interna di una test room.

Tabella 2: Dati salienti delle test room

	Caratteristiche	Valore
Caratteristiche dimensionali	Dimensioni in pianta interne	0.78 x 1.64 [m ²]
	Altezza minima interna	1.45 [m]
	Altezza massima esterna	2.20 [m]
	Volume interno	2.3 [m ³]
Esposizione	Azimuth	193° (Sud – Sud ovest)
	Angolo di inclinazione della falda	28°
Caratteristiche dell'involucro	Trasmittanza termica pavimento U	0.55 [W/m ² K]
	Trasmittanza termica partizioni verticali U	0.76 [W/m ² K]
	Trasmittanza termica porta U	1.85 [W/m ² K]
	Trasmittanza termica copertura (riferimento)	0.55 [W/m ² K]
	Trasmittanza termica copertura con PCM	0.53 [W/m ² K]
Riscaldamento	Generazione di calore interna (illuminazione)	19 [W]
	Potenza del radiatore elettrico	1000 [W]
Ventilazione	Tasso di ricambio d'aria naturale da e verso il volume di controllo	0.17 [1/h]
	Tasso di ricambio d'aria naturale da e verso esterno	0.39 [1/h]
	Ricambi d'aria con ambiente esterno (sistema di ventilazione ON)	4.50 [1/h]

Al fine di validare la perfetta comparabilità tra le tre test room, queste sono state sottoposte preliminarmente a test di collaudo. I test eseguiti sono di seguito riassunti e i risultati riportati in Tabella 3:

- Test delle dispersioni: tale verifica prevede che la differenza di dispersioni termiche tra le tre celle fosse inferiore al valore soglia del 5%. Il test è stato condotto riscaldando simultaneamente le tre celle con un radiatore elettrico (potenza nominale 1000W) e valutando la deviazione standard della differenza di temperatura tra l'interno delle celle e l'ambiente esterno.
- Test di infiltrazione: tale verifica è stata effettuata misurando in ogni test room il tasso di ricambio d'aria in diverse configurazioni di utilizzo. Il test è stato effettuato impiegando la metodologia del decadimento di un gas tracciante (SF6) [4] e verificando che la differenza relativa al livello di infiltrazioni fosse inferiore al valore soglia del 5%.

Tabella 3: Risultati dei test di collaudo.

Collaudo	Tipo	Volumi d'aria di ricambio (1/h)	Differenza percentuale massima rilevata	Valore soglia	Superamento test
Test delle dispersioni	Test 1 (infiltrazione naturale)	0.39	1.3%	5.0%	SI
	Test 2 (ventilazione attiva)	4.5	4.0%		SI
Test di infiltrazione	Test 1 (infiltrazione naturale)	0.39	0.5%	5.0%	SI
	Test 2 (ventilazione attiva)	4.5	4.3%		SI

2.2. Allestimento del setup di misura

Le test room del sistema TRIS sono state identificate come “cella A”, “cella B” e “cella C”.

- Cella A componente di riferimento privo di PCM;
- Cella B componente avanzato (installazione PCM_Infinite_R_23);
- Cella C componente avanzato (installazione PCM_Infinite_R_21).

In Tabella 4, sono descritte le stratigrafie dei componenti di copertura con indicazione dei materiali e degli spessori, relativi alle tre configurazioni (cella A, cella B e cella C). La posizione dei sensori rispetto alla stratigrafia e la loro collocazione sui componenti delle test-room è indicata in Figura 4.

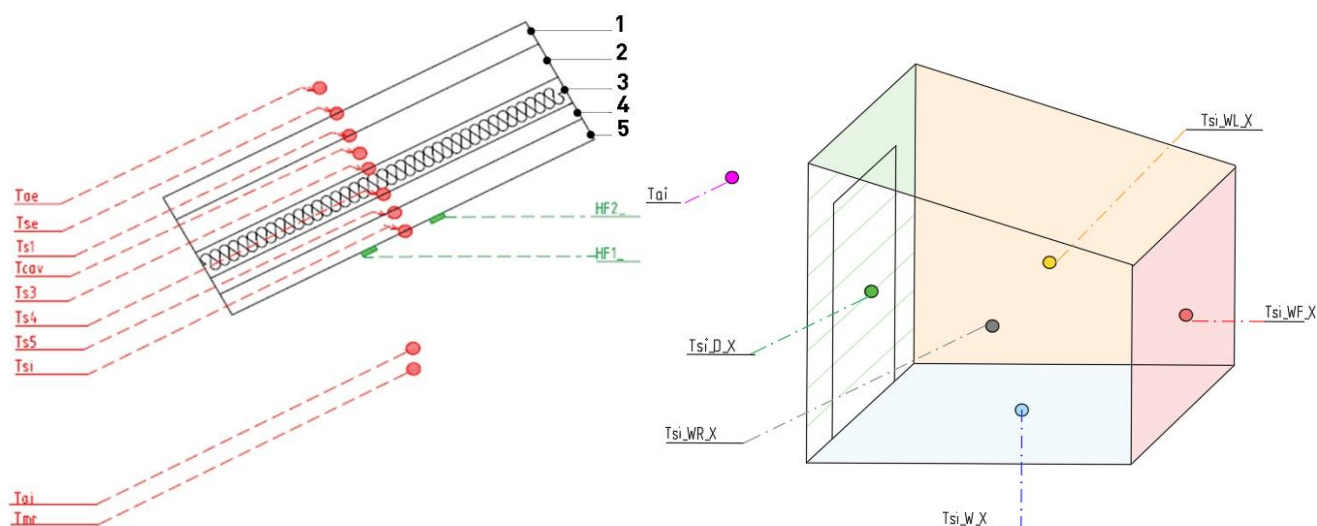


Figura 4. Schema della stratigrafia e posizione dei sensori

Tabella 4: Stratigrafie installate nelle test room

strato	materiale	Cella A	Cella B	Cella C
1	Tegole in laterizio		30 mm	
2	Intercapedine d'aria ventilata		70 mm	
3	Polistirene estruso XPS		50 mm	
4	PCM	no PCM	6 mm (Infinite_R_23)	6 mm (Infinite_R_21)
5	Cartongesso		1.25 mm	

Ciascuna delle test-room è stata equipaggiata con una serie di sensori volti a individuare i flussi termici, le temperature superficiali e di interfaccia, le temperature ambientali e la temperatura media radiante. In Figura 5 è possibile osservare le fasi di installazione del PCM Infinite-R e della sensoristica.

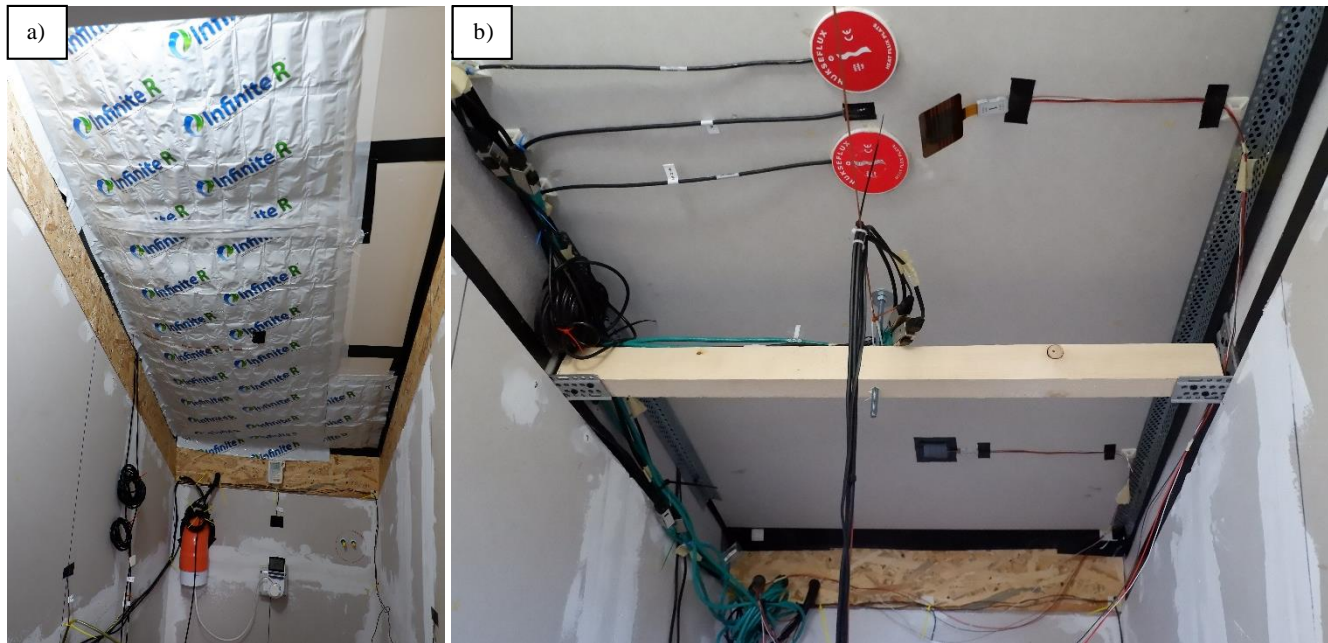


Figura 5. a) Installazione del PCM Infinite-R nelle celle B e C; b) Installazione della sensoristica

Il setup sperimentale riguarda in particolare gli strumenti utilizzati, il loro posizionamento ed il processo volto alla caratterizzazione di parametri termici rilevanti.

Sensori utilizzati:

- Stazione meteo per la misura della temperatura, dell'umidità relativa dell'aria esterna, la direzione e la velocità del vento.
- Piranometro (LP02) per la misura dell'irradianza solare globale incidente ed orizzontale (6a).
- Termoflussimetri (HFP01) per la misura dei flussi termici.
- Termocoppie (Tipo_T) per la misura delle temperature superficiali interne e di ciascuno strato del componente di copertura.
- Globotermometro non normalizzato (diametro 50 mm) per la misura della temperatura globotermometrica.
- Datalogger (DT85) strumento di registrazione e acquisizione dati con modulo di espansione (CEM) (6b).

Grazie a tali sensori è stato possibile monitorare i seguenti parametri:

- Condizioni al contorno: temperatura esterna, umidità relativa, radiazione solare incidente e orizzontale ed infine la temperatura dell'aria interna del volume di controllo.
- Temperature superficiali interne di ciascuna parete con cui è stato possibile calcolare la temperatura media radiante³ T_{mr} attraverso i fattori di vista. La temperatura media radiante è stata anche determinata per confronto a partire dalla temperatura globotermometrica.

³ La temperatura media radiante considerata nel presente report si riferisce a la temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con una sfera posta al centro dell'ambiente la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale.

- Temperatura operativa⁴ T_{op} calcolata come media della temperatura dell'aria interna e della temperatura media radiante.
- Temperatura dell'aria interna di ciascuna cella attraverso una termocoppia posta in un cilindro opportunamente schermato.
- Flusso termico che attraversa la copertura misurato in W/m^2 .

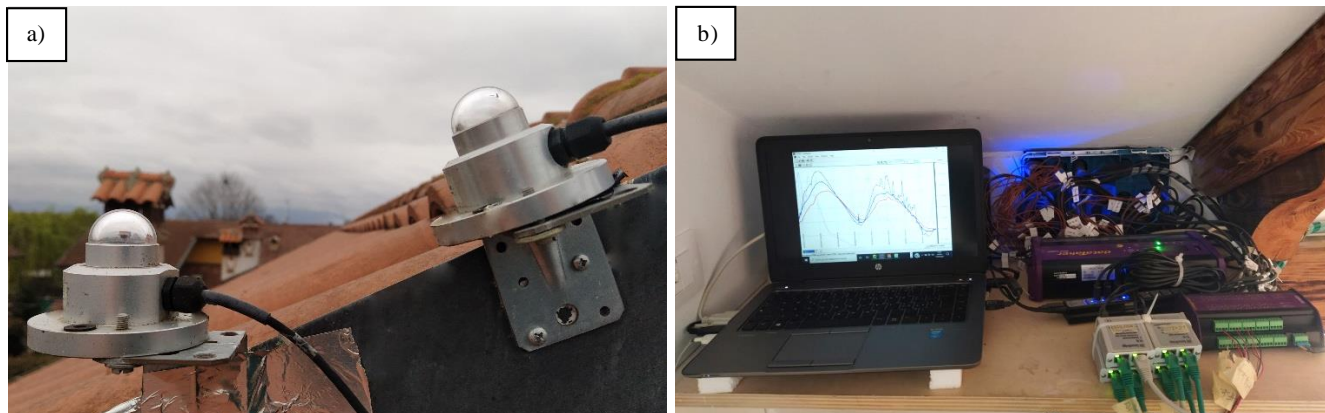


Figura 6. a) Piranometri in copertura; b) Sistema di acquisizione dati DataTaker

2.3. Periodi di monitoraggio e condizioni al contorno

Il monitoraggio è stato effettuato in modalità free-running: ovvero le misure sono state raccolte per tutta la durata della prova senza l'utilizzo di sistemi di climatizzazione. Il monitoraggio ha avuto una durata pari a 20 giorni suddivisi in due test:

- **Test_01:** Presenza di ricambio d'aria, il sistema di ventilazione è stato acceso dalle ore 7:00 alle ore 8:00 portando il ricambio d'aria all'interno dell'ambiente a circa 4.5 [1/h]. In tale configurazione si è simulata una condizione quale l'apertura delle finestre nelle ore del mattino durante la stagione estiva finalizzata al raffrescamento passivo dell'edificio. Nelle ore in cui il sistema di ventilazione è rimasto spento il ricambio d'aria con il volume di controllo e con l'ambiente esterno è stato rispettivamente di ~ 0.39 [1/h] e ~ 0.17 [1/h] assumendo una perfetta tenuta⁵ del componente di copertura.
- **Test_02:** assenza di ricambio d'aria con l'esterno. Il sistema di ventilazione meccanica è stato mantenuto spento e i canali dell'aria sono stati sigillati. In tal caso, assumendo una quasi perfetta tenuta della copertura, il tasso d'infiltrazione misurato tra le celle e il volume di controllo è pari a ~ 0.39 [1/h].

Tabella 5: Riepilogo test effettuati

	Test_01	Test_02
Periodo	5-13 ottobre	14-25 ottobre
Apporti interni ^a	ON (6:00 - 20:00)	ON (6:00 - 20:00)
Ventilazione meccanica	ON (7:00 - 8:00)	OFF (00:00 - 24:00)

^a Gli apporti interni sono stati generati con una sorgente luminosa a LED da 19W.

Le condizioni al contorno rilevate durante il monitoraggio, in particolare la temperatura, l'umidità relativa dell'ambiente esterno, la temperatura del volume di controllo e l'irradianza solare globale, sono riportate in Figura 7.

⁴ Temperatura operativa T_{op} è la temperatura uniforme di un ambiente in cui una sfera posta al centro scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia termica che scambia nell'ambiente reale non uniforme. In condizioni di aria in quiete è possibile assumere che la T_{op} sia uguale alla media tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria.

⁵ La stratigrafia di copertura è stata sigillata con nastro di tenuta sui bordi e nei giunti tra i pannelli isolanti.

Si nota che la temperatura esterna oscilla tra i 6 °C e i 24 °C nel periodo relativo al Test_01, e tra i 6°C e i 21°C nel periodo relativo al Test_02 caratterizzato da temperature mediamente inferiori rispetto al periodo precedente (Test_01). Per quanto riguarda la temperatura del volume di controllo, è possibile osservare che nel periodo del Test_01 questa è oscillata tra 17 °C e 22°C, mentre nel periodo relativo al Test_02, ha subito escursioni inferiori a causa dell'accensione del sistema di riscaldamento, assestandosi tra 18°C e 20.5 °C.

L'irradianza solare massima incidente misurata attraverso i piranometri risulta compresa mediamente tra 800 e 900 W/m².

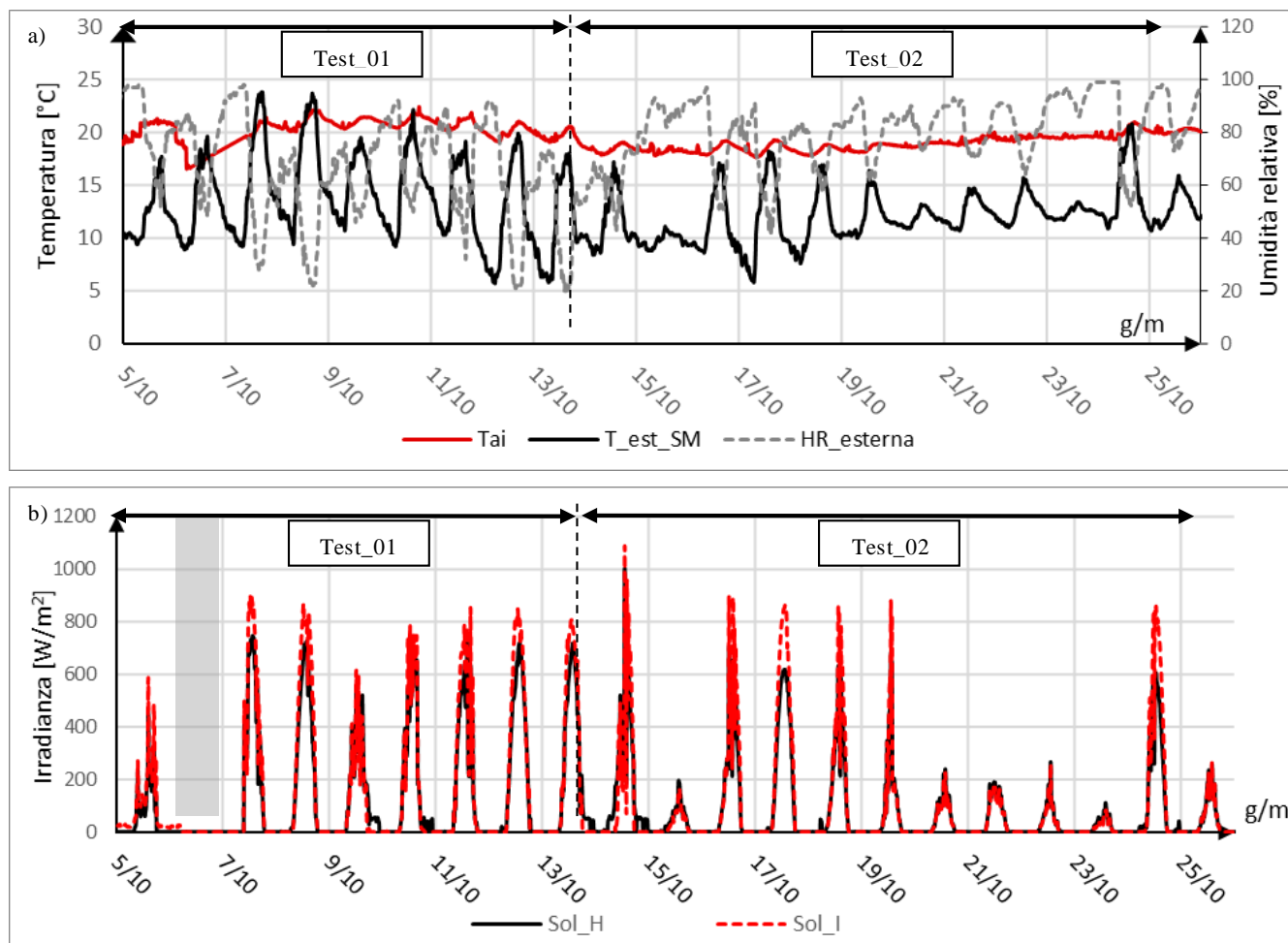


Figura 7. a) Condizioni al contomo (temperatura interna volume di controllo (Tai), temperatura esterna (T_est), umidità relativa esterna HR; b) Irradianza solare globale incidente (Sol_I), orizzontale (Sol_H).

3. Risultati

I risultati dei due periodi di monitoraggio Test_01 e Test_02 sono di seguito descritti in maniera dettagliata.

3.1. Test_01

Il monitoraggio del test_01 è stato condotto dal 5 al 13 ottobre 2020 (Figura 8). Al fine di analizzare più nel dettaglio i dati monitorati si analizzeranno due giornate caratterizzate da temperature dell'aria esterna simili, ma diversi andamenti dell'irradianza solare. Infatti, il giorno 08/10 è stato caratterizzato da cielo sereno, mentre il 10/10 è stato caratterizzato dalla presenza di nubi sparse.

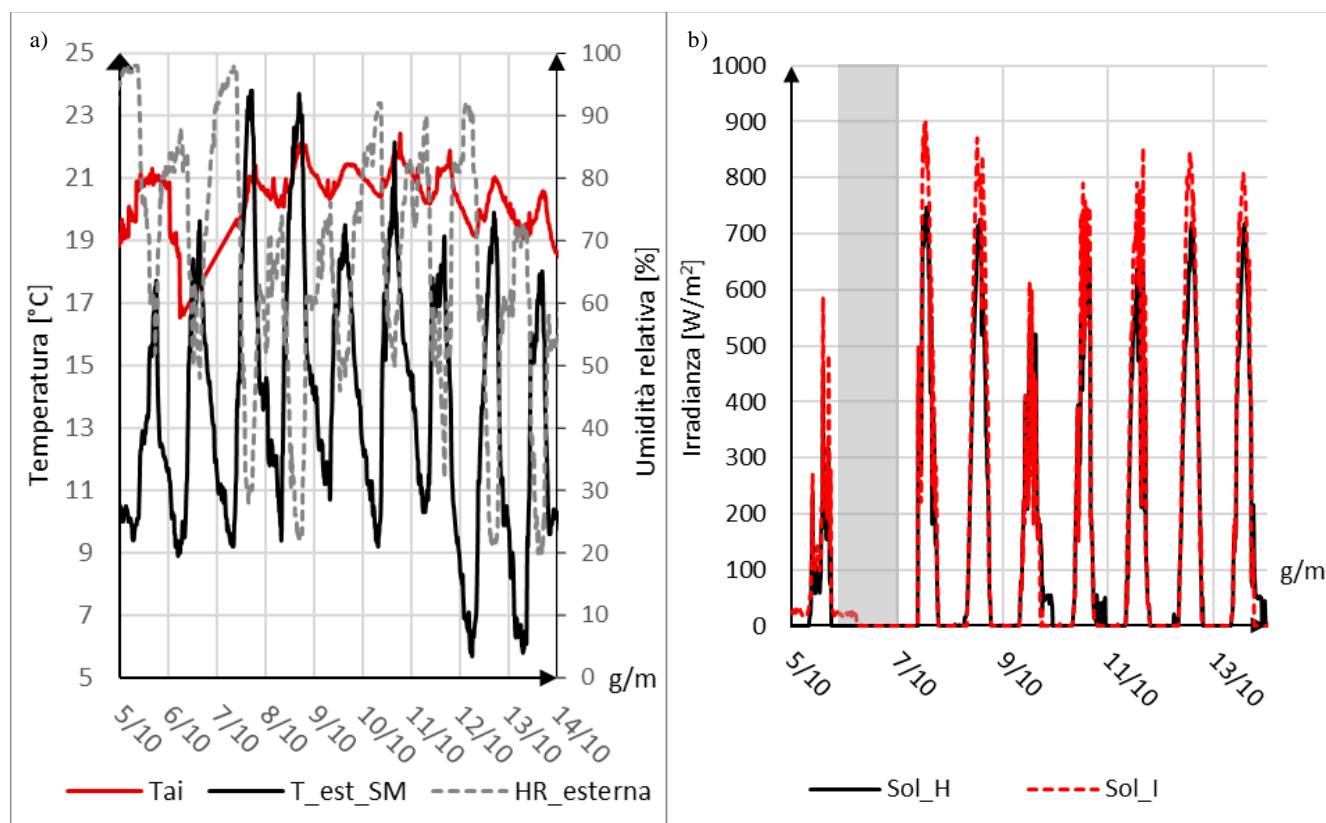


Figura 8. a) Condizioni al contorno (temperatura interna volume di controllo (T_{ai}), temperatura esterna (T_{est}), umidità relativa esterna HR); b) Irradianza solare globale incidente (Sol_I), orizzontale (Sol_H).

Al fine di comparare il comportamento termico dei materiali a cambiamento di fase installati nella stanza B (PCM 23°C) e nella stanza C (PCM 21°C) rispetto alla stanza di riferimento (cella_A), sono state comparate le principali grandezze analizzate:

- Temperatura superficiale interna;
- Flusso termico;
- Temperatura media dello strato di PCM;
- Temperatura media radiante;
- Temperatura operativa.

I principali risultati ottenuti nella campagna di monitoraggio sono stati riassunti e riportati nella Tabella 6 dell'allegato A.

3.1.1. Temperatura superficiale interna

I risultati di temperatura superficiale sono stati riportati in Figura 9. Come è possibile osservare, la cella_A di riferimento raggiunge nelle ore pomeridiane temperature superficiali sempre maggiori rispetto alle celle con il PCM (cella_B e cella_C).

Analizzando il giorno 8/10 (Figura 9b), la cella B con Infinite-R 23 presenta, rispetto alla cella_A, una riduzione del picco di temperatura superficiale interna pari a ~ 1.2 °C (da 23.6 a 22.4 °C), mentre la cella C con Infinite-R 21 presenta una riduzione pari a ~ 1.5 °C (da 23,6 a 22.1°C). Un'altra osservazione riguarda le ore notturne e le prime ore del mattino, infatti, si nota che le temperature superficiali di B e C risultano maggiori rispetto ad A, in quanto i PCM sono in fase di rilascio del calore accumulato nella giornata precedente.

E inoltre necessario evidenziare come l'impiego del PCM porti, in entrambe le giornate analizzate, a uno sfasamento temporale della temperatura di picco. Nel giorno 8/10 il picco nella cella_A è stato raggiunto alle ore 18:00, mentre nelle celle B e C il picco è stato raggiunto con circa 45' di ritardo.

Analizzando il giorno 10/10 (Figura 9c) si può osservare una riduzione in linea con quanto osservato nella giornata del 8/10. Tuttavia, a causa di una inferiore irradianza solare, la riduzione di temperatura superficiale nelle ore del mattino è risultata inferiore a quanto osservato il giorno 8/10.

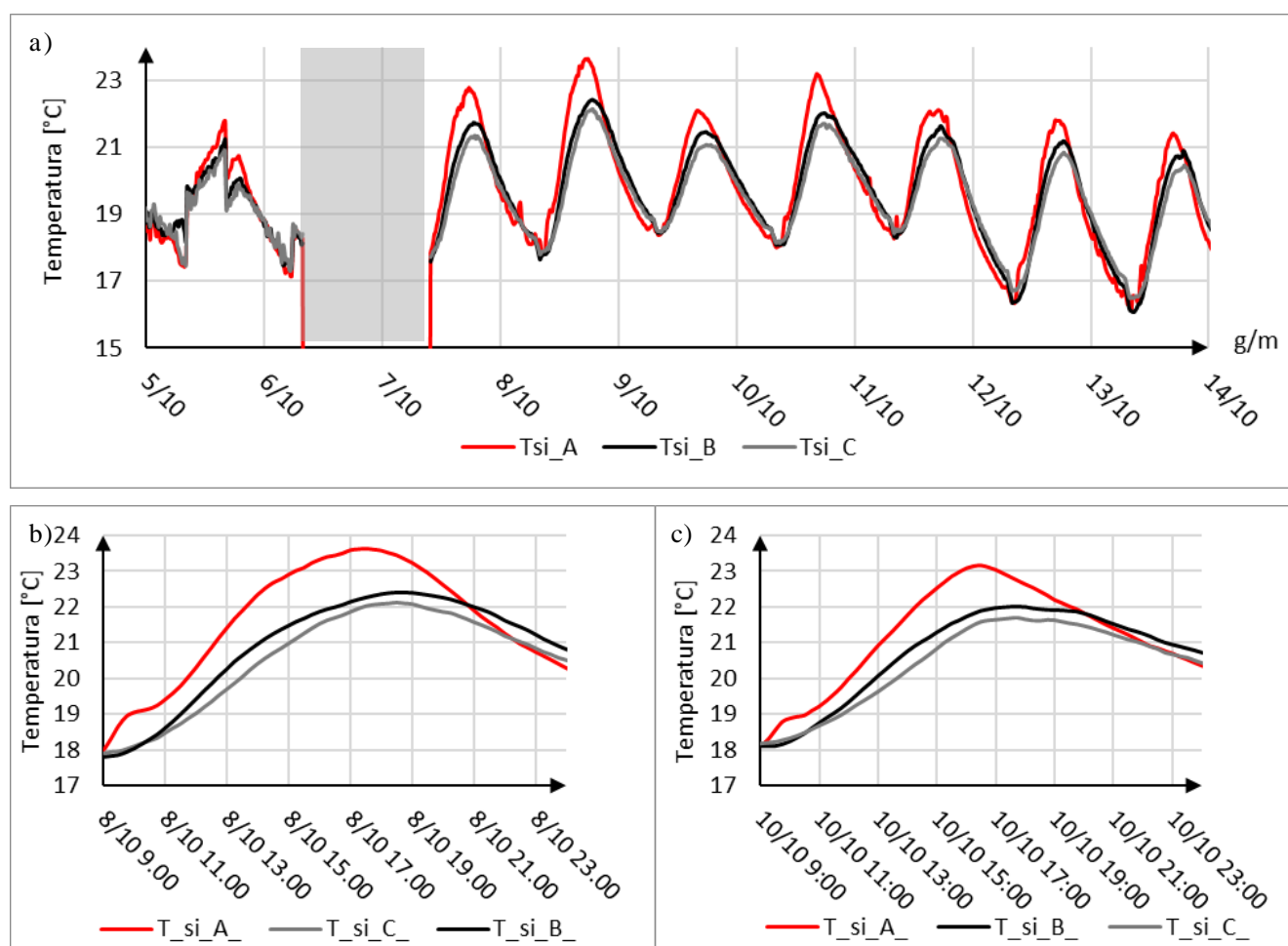


Figura 9. Temperatura superficiale interna (T_{si}) nelle tre test room. a) Intero periodo; b) dettaglio del giorno 8/10; c) dettaglio del giorno 10/10

3.1.2. Flusso termico

L'andamento del flusso termico (Figura 10) ripercorre quello della temperatura superficiale interna. I flussi di B e C hanno un'ampiezza ridotta rispetto alla cella di riferimento (cella_A). In termini di valore assoluto gli apporti massimi nelle celle con PCM sono risultati sempre minori rispetto alla cella A.

Quando il flusso è negativo il calore viene disperso dall'interno verso l'esterno (tipicamente di notte), pertanto si nota che il calore uscente dalle celle B e C è contenuto. Il contributo fondamentale si nota quando i flussi sono positivi ovvero entranti nelle test room.

Il giorno 8/10 la riduzione del flusso massimo per la cella B (PCM_23) è risultata pari al 40% (passando da 9.4 W/m² a 5.6 W/m²) mentre per la cella C (PCM_21) la riduzione è pari al 47% (passando da 9.4 W/m² a 4.9 W/m²).

Il giorno 10/10 la riduzione del flusso massimo per la cella B (PCM_23) è risultata pari al 47% (passando da 8.1 W/m² a 4.3 W/m²) mentre per la cella C (PCM_21) la riduzione è pari al 60% (passando da 8.1 W/m² a 3.2 W/m²).

La riduzione media del picco di flusso termico entrante, calcolata sul periodo compreso dal giorno 7/10 al giorno 14/10, è risultata pari al 57%.

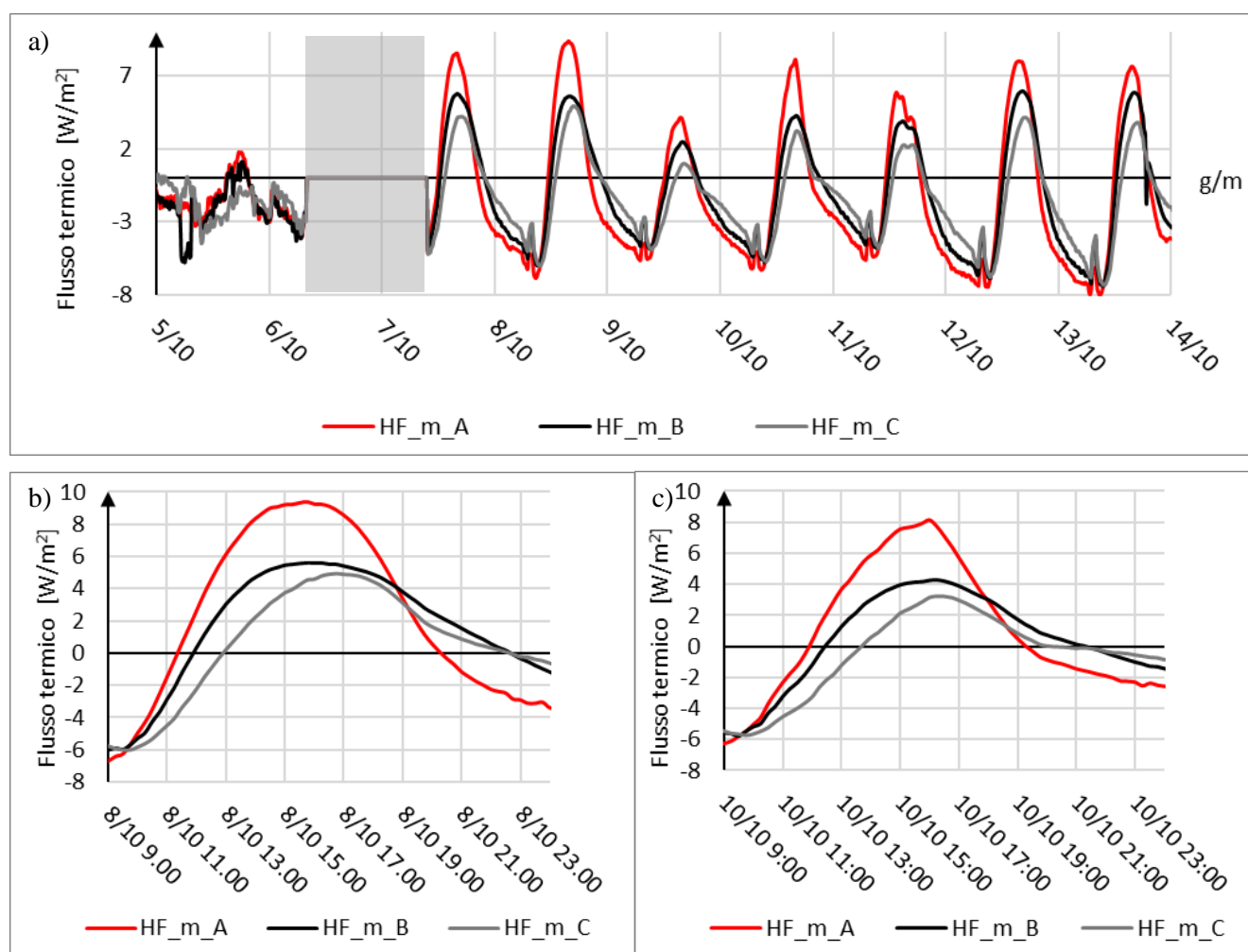


Figura 10. Flussi termici (HF_m) nelle tre test room. a) Intero periodo; b) dettaglio del giorno 8/10; c) dettaglio del giorno 10/10.

3.1.3. Temperatura del PCM

Grazie al posizionamento delle termocoppie sull'interfaccia superiore ed inferiore del pannello di PCM è stato possibile monitorare il comportamento di tali materiali. In Figura 11 è stato riportato il valore medio di queste due termocoppie.

Dalla Figura 11a è possibile evincere le temperature medie raggiunte dai due PCM rispettivamente nelle giornate del 8/10 e del 10/10.

In entrambe le giornate si è osservata una maggiore oscillazione nella temperatura del PCM_B (23°) rispetto a quella del PCM_C (21°C). Tale risultato è indice del fatto che il PCM_C (21°C) ha lavorato maggiormente in prossimità della sua temperatura di transizione. Infatti, tale differenza è stata più accentuata il giorno 10/10 in cui si sono raggiunte temperature di picco mediamente più basse per via della inferiore irradianza solare (il giorno 10/10 era caratterizzato da cielo con nubi sparse).

Da tale analisi è possibile evincere che i migliori risultati in termini di riduzione degli apporti interni siano da associare al fatto che, la temperatura di lavoro riscontrata nel test_01, sia stata tale da garantire un maggior sfruttamento del PCM_C con temperatura di transizione a 21°C.

Infatti, per il PCM 23°C (stanza B) il range di lavoro oscilla tra i 17 °C e i 23 °C, pertanto si presuppone che il materiale stia iniziando il processo di transazione di fase per un periodo ridotto, probabilmente non raggiungendo mai la totale fusione. Per quanto concerne il PCM 21 °C (stanza C) esso lavora in un range tra i 17.5 e i 23°C (giorno 8/8) e tra i 18 e i 22.3°C il giorno 10/10, temperature ottimali e prossime al suo punto nominale di transizione (21°C).

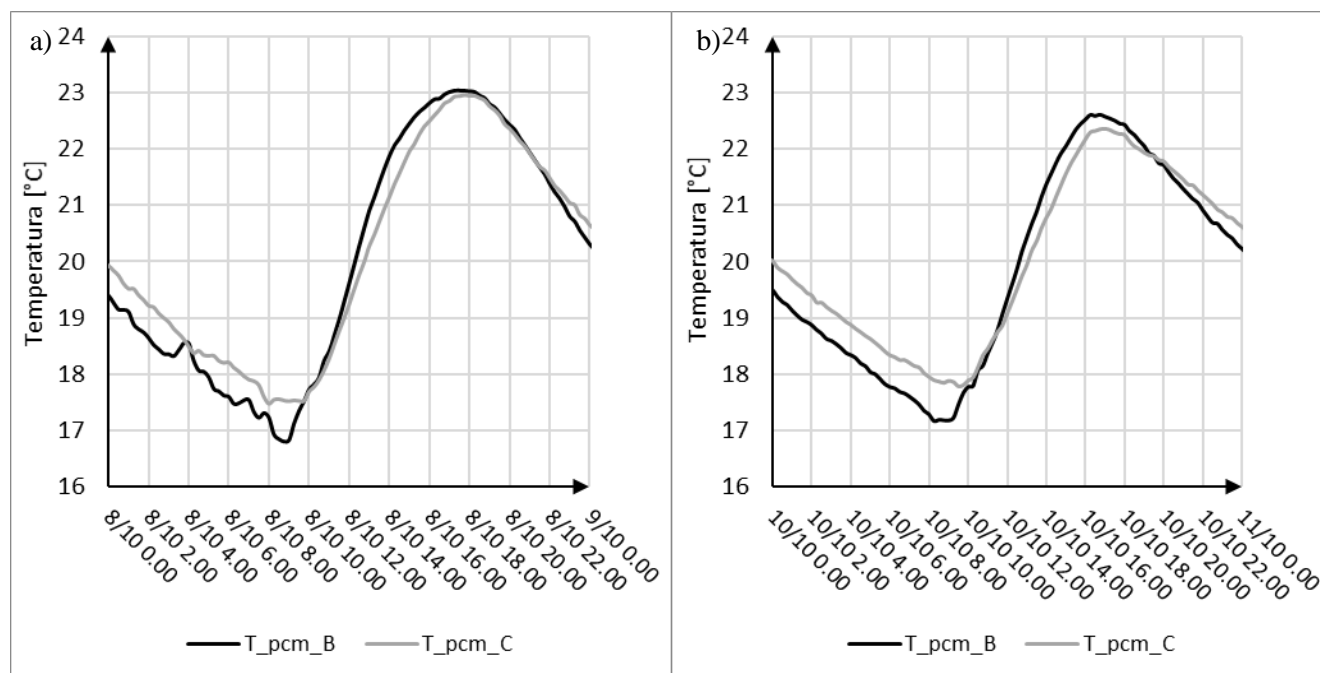


Figura 11. Temperatura media dello strato di PCM ($T_{pcm_B} = \text{Infinite-R23}$), ($T_{pcm_C} = \text{Infinite-R21}$). a) dettaglio del giorno 8/10; b) dettaglio del giorno 10/10

3.1.4. Temperatura media radiante e temperatura operativa

Analizzando le condizioni termiche interne di temperatura media radiante (Figura 12) e di temperatura operativa (Figura 13), si evidenzia come i benefici ottenuti, se pur in linea con quanto visto precedentemente, sono risultati meno evidenti.

Tale risultato può essere facilmente spiegato. Infatti, viste le dimensioni ridotte delle celle, la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante risultano pesantemente influenzate da:

- l'infiltrazione dell'aria esterna;
- le temperature degli altri componenti (pareti e pavimento) che presentano superfici esposte maggiori rispetto a quelle della copertura che costituisce circa il 14% della superficie interna esposta con un fattore di vista rispetto a una sfera immaginaria posta al centro dell'ambiente del 9.6%.

Ciononostante, è comunque possibile apprezzare una riduzione non trascurabile del picco di temperatura media radiante e di temperatura operativa nelle celle con PCM rispetto alla cella di riferimento (cella_A).

Coerentemente con l'andamento delle temperature superficiali e dei flussi misurati è possibile osservare una riduzione del picco di T_{mr} rispetto alla cella_A di riferimento pari a:

- ~ 0.7 °C per la cella_C (Infinite-R 21) è pari a ~0.5 °C per la cella_B (Infinite-R 23) il giorno 8/10 (Figura 12b)
- ~ 0.5 °C per la cella_C (Infinite-R 21) è pari a ~0.2 °C per la cella_B (Infinite-R 23) il giorno 10/10 (Figura 12c)

Per quanto riguarda la temperatura operativa, anche in questo caso l'impiego dei materiali a cambiamento di fase ha sempre mostrato una riduzione delle temperature di picco diurne come illustrato in Figura 13.

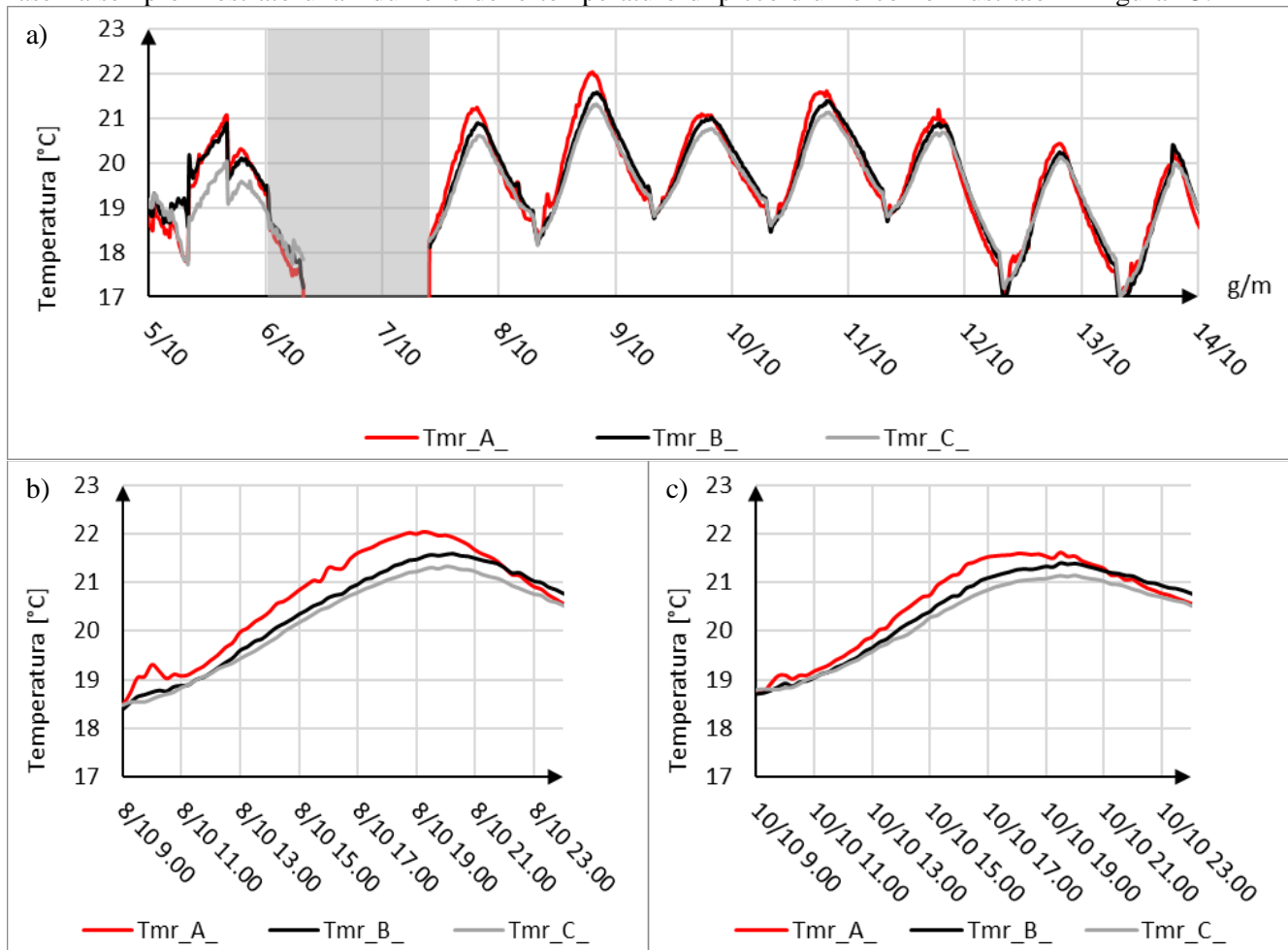


Figura 12. Temperatura media radiante (T_{mr}) nelle tre test room. a) Interperiodo; b) dettaglio del giorno 8/10; c) dettaglio del giorno 10/10

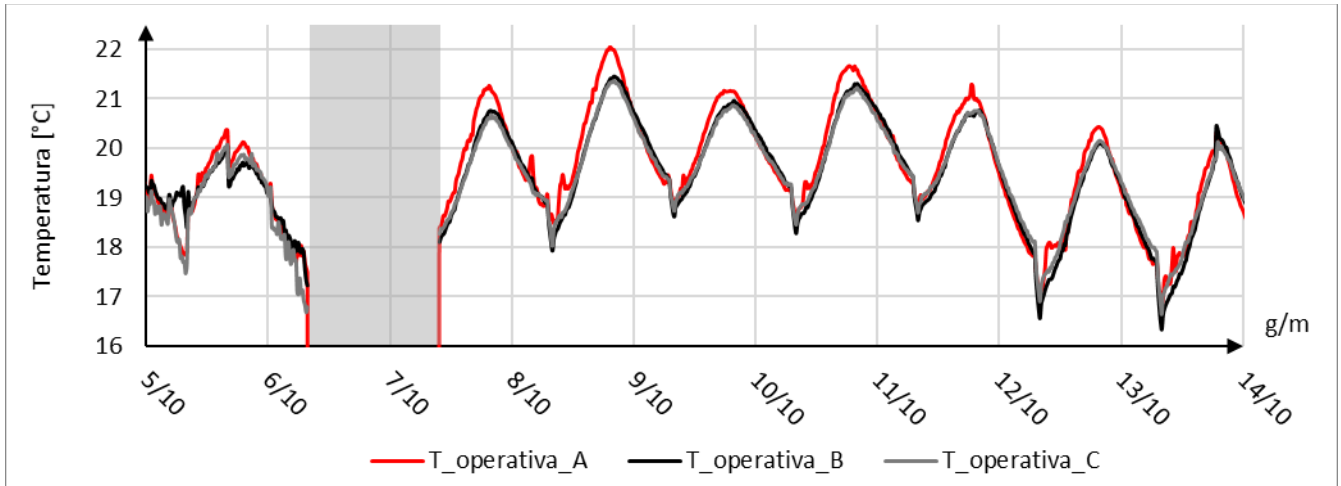


Figura 13. Temperatura operativa (T_{op}) nelle tre test room: intero periodo

3.2. Test_02

Il monitoraggio del Test_02 è stato condotto dal 14 al 26 ottobre 2020. In questo caso è stata analizzata nel dettaglio la giornata del 17/10 in quanto caratterizzata da cielo sereno e da temperature esterne ancora relativamente alte.

In Figura 14 sono rappresentate le condizioni al contorno riguardanti i giorni relativi al Test_02. I principali risultati ottenuti nella campagna di monitoraggio sono stati riassunti e riportati nella Tabella 7 dell'allegato A.

Analogamente al Test_01 si riportano di seguito le principali grandezze analizzate:

- Temperatura superficiale interna;
- Flusso termico;
- Temperatura media dello strato di PCM;
- Temperatura media radiante;
- Temperatura operativa.

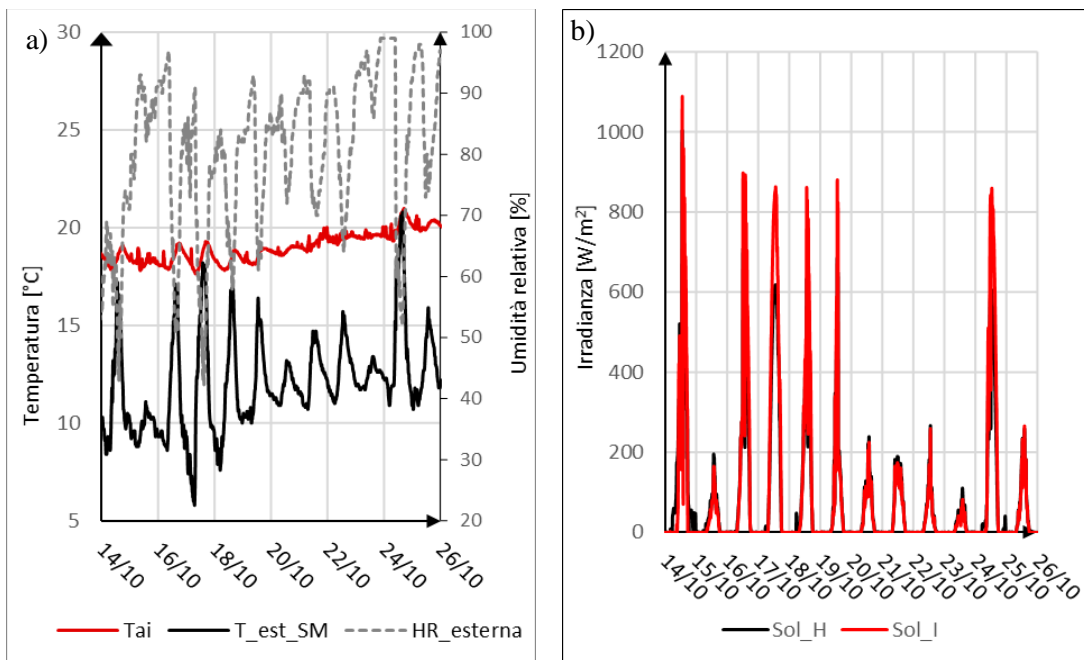


Figura 14. a) Condizioni al contorno: temperatura aria interna nel volume di controllo (T_{ai}), temperatura esterna (T_{est}), umidità relativa esterna HR ; b) Irradianza solare globale incidente (Sol_I), orizzontale (Sol_H).

3.2.1. Temperatura superficiale interna

I risultati di temperatura superficiale interna T_{si} sono stati riportati in Figura 15. Come è possibile osservare, la cella_A di riferimento raggiunge nelle ore pomeridiane temperature superficiali sempre maggiori rispetto alle celle con il PCM (cella_B e cella_C).

Analizzando il giorno 17/10 Figura 15b, la cella_B con Infinite-R 21 presenta, rispetto alla cella_A (riferimento), una riduzione del picco di temperatura superficiale interna pari a ~ 1.2 °C (da 21.1 a 19.9 °C), mentre la cella B con Infinite-R 23 presenta una riduzione pari a ~ 0.7 °C (da 21,1 a 20.5°C). Durante le ore notturne, in entrambe le celle con PCM la temperatura superficiale interna si attesta su valori analoghi.

Similmente al Test_01 è possibile evidenziare, rispetto alla cella_A, uno sfasamento del picco della T_{si} rispettivamente di $\sim 45'$ nella cella_B (PCM 23) e di $\sim 60'$ nella cella C (PCM 21)

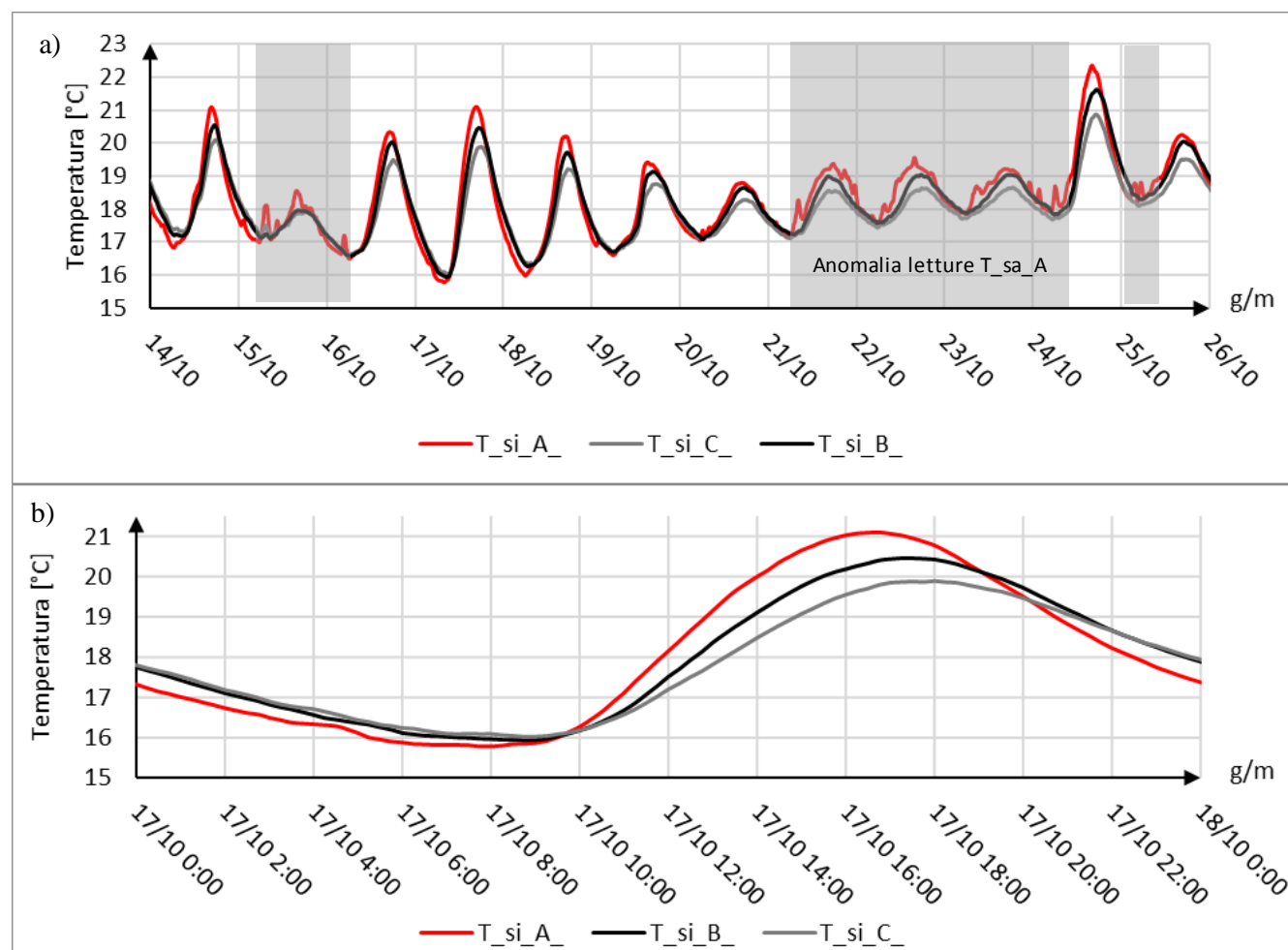


Figura 15. Temperatura superficiale interna (T_{si}) nelle tre test room. a) Intero periodo; b) dettaglio del giorno 17/10

3.2.2. Flussi termici

L'andamento del flusso termico (Figura 16) ripercorre quello della temperatura superficiale interna. I flussi di B e C hanno un'ampiezza ridotta rispetto alla cella di riferimento (cella_A). In termini di valore assoluto gli apporti massimi nelle celle con PCM sono risultati sempre minore rispetto alla cella A.

Quando il flusso è negativo il calore viene disperso dall'interno verso l'esterno (tipicamente di notte), pertanto si nota che il calore uscente dalle celle B e C è contenuto. Il contributo fondamentale si nota quando i flussi sono positivi ovvero entranti nelle test room.

Il giorno 17/10 la riduzione del flusso massimo per la cella B (PCM_23) è risultata pari al 20% (passando da 8.5 W/m² a 6.8 W/m²) mentre per la cella C (PCM_21) la riduzione è pari a circa il 47% (passando da 8.5 W/m² a 4.5 W/m²).

Pertanto, rispetto al Test_01 si evidenzia un comportamento analogo nel caso del PCM 21°C, mentre si osserva una riduzione nell'attenuazione degli apporti dalla copertura nel caso del PCM 23°C. Tale comportamento è attribuibile alle temperature mediamente inferiori che hanno caratterizzato il secondo periodo di monitoraggio.

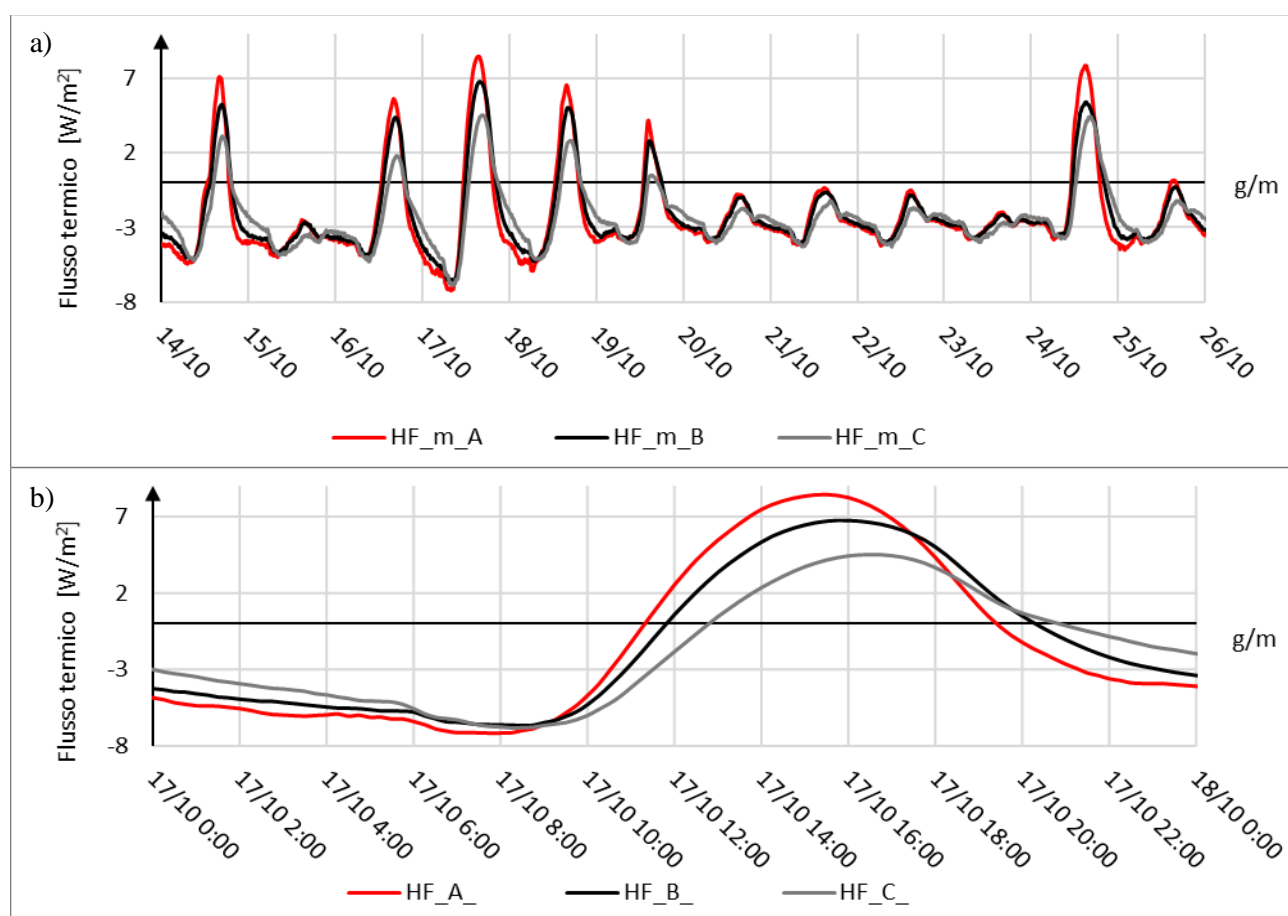


Figura 16. Flussi termici (HF_m) nelle tre test room. a) Intero periodo; b) dettaglio del giorno 17/10.

3.2.3. Temperatura del PCM

Dall'analisi della temperatura media del PCM (Figura 17) è possibile evincere che Il PCM 23 °C della cella B presenta un'oscillazione compresa tra i 14.8 °C delle 8:00 e i 21.4 °C delle 16:30 con una escursione massima di 6.6°C. Nel caso del PCM 21° (cella C) l'oscillazione delle temperature è risultata tra 15.5 °C delle 8:00 e i 20.7°C delle 17:00 con una escursione massima di 5.2°C. Tale riduzione nell'ampiezza di escursione è imputabile ad un maggior sfruttamento del calore latente di fusione/solidificazione del PCM Infinite-R 21 rispetto all'Infinite-R 23. Tale risultato è attribuibile al fatto che l'abbassamento delle temperature esterne del Test_02 rispetto al Test_01 ha comportato un'ulteriore riduzione nell'attivazione del PCM 23 che non ha mai raggiunto la sua temperatura nominale di transizione.

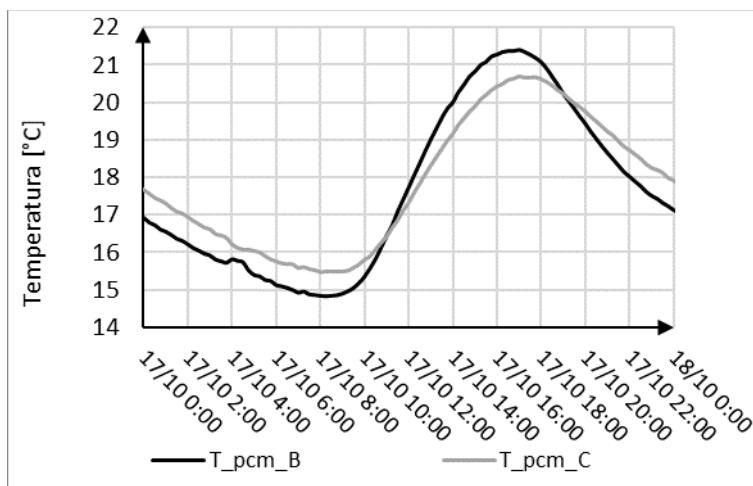


Figura 17. Temperatura media dello strato di PCM (T_{pcm_B} = Infinite-R 23), (T_{pcm_C} = Infinite-R 21)

3.2.4. Temperatura media radiante e temperatura operativa

Analogamente all'analisi delle temperature superficiali, dei flussi termici e della temperatura dei PCM; anche nell'analisi della temperatura media radiante (Figura 18) si osserva una più importante riduzione del picco nel caso del PCM 21°C (Cella_C).

Da una più attenta analisi del giorno 17/10, è possibile osservare che il discostamento tra la cella_C e la cella di riferimento (cella_A) è pari a ~0.4 °C, mentre la riduzione è solo di ~0.1°C nella cella_B (PCM 23°C). Tale risultato conferma il miglior comportamento del PCM_21 e conferma lo scarso sfruttamento della capacità termica latente del PCM_23 il quale si trova, con buona probabilità, sempre nel suo stato solido.

Anche nel caso della temperatura operativa (Figura 19) è possibile osservare nel caso della cella_C (PCM 21°C) una riduzione dei picchi di temperatura coerente con quanto osservato per gli altri parametri. A causa di un'anomalia nelle letture della temperatura dell'aria della cella_B, i dati di temperatura operativa, calcolati come media tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria, non sono stati riportati in Figura 19.

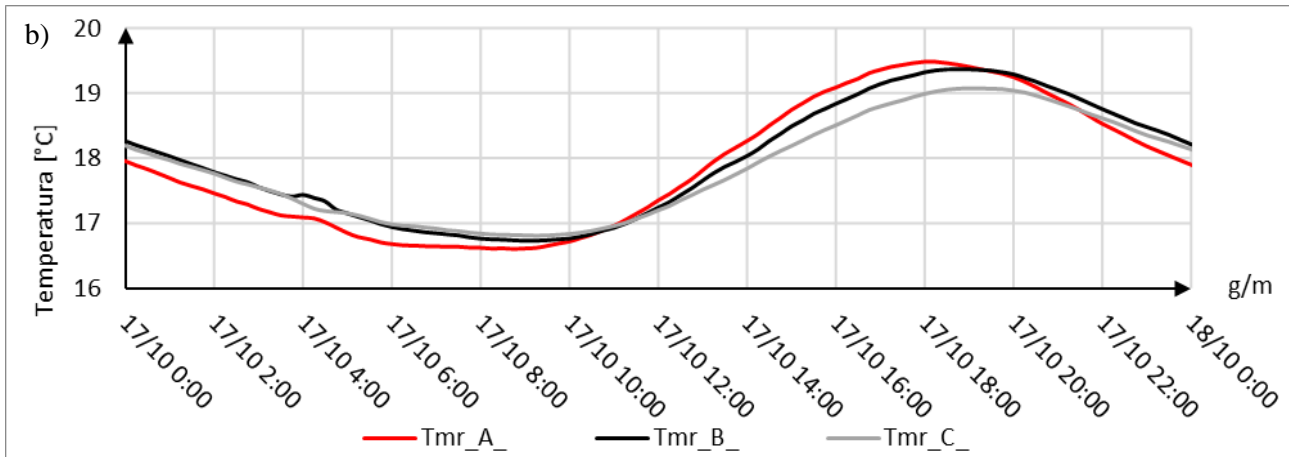
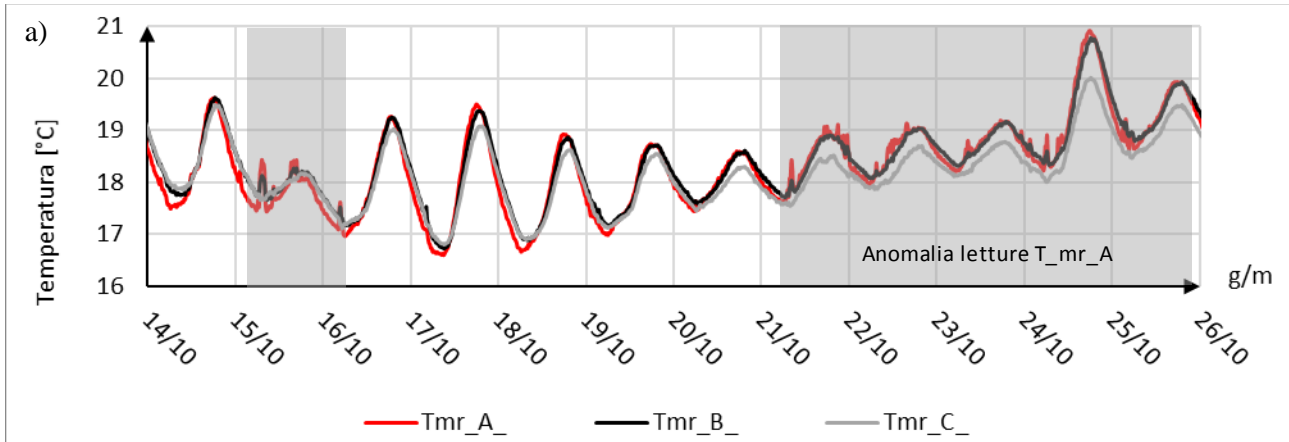


Figura 18. Temperatura media radiante (T_{mr}) nelle tre test room. a) Intero periodo; b) dettaglio del giorno 17/10.

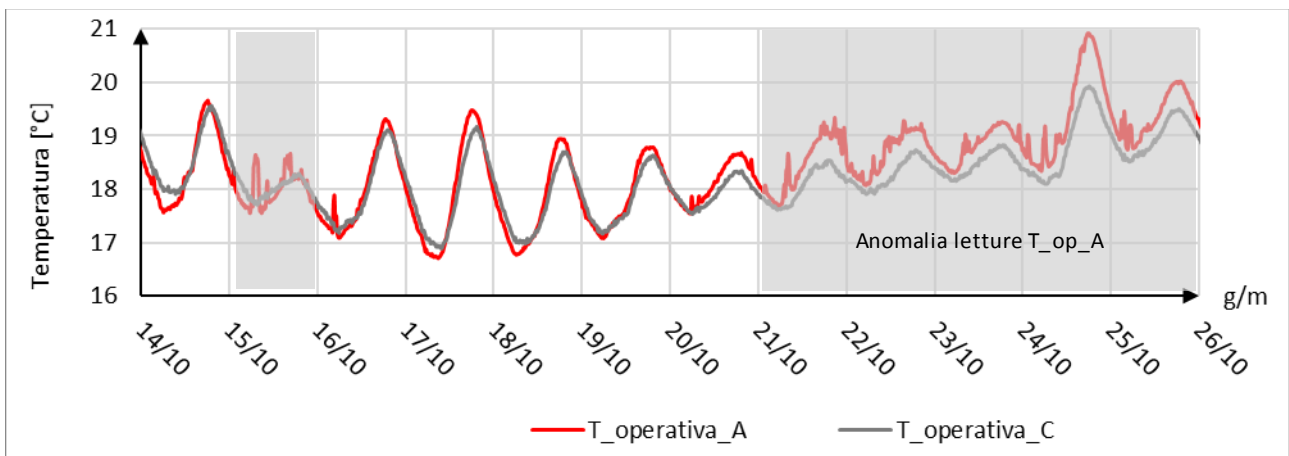


Figura 19. Temperatura operativa (T_{op}) nelle tre test room: intero periodo

4. Conclusioni

Il presente studio è stato volto a monitorare il comportamento termico di componenti di copertura a cui sono stati applicati pannelli PCM macro-incapsulati Infinite-R con due diverse temperature di transizione. Gli obiettivi di tale lavoro sono stati:

- Verificare l'influenza della scelta della temperatura di transizione del PCM sul comportamento termico del componente;
- Valutare l'effetto della ventilazione naturale sul miglioramento del comportamento termico del componente;
- Valutare le ricadute sull'ambiente interno in termini di miglioramento del comfort;
- Dimostrare l'efficacia nell'impiego dei PCM tramite analisi comparativa con un componente di riferimento che non adotta tale soluzione.

Da un'analisi del comportamento di due PCM caratterizzati da diverse temperature di transizione, PCM_21 (installato in cella_C) e PCM_23 (installato in cella_B) entrambi applicati su una copertura isolata di cui il riferimento, privo di PCM, è stato analizzato nella cella_A, è stato possibile mettere in luce le seguenti considerazioni:

- Il PCM_21 ha sempre mostrato una maggior capacità di ridurre le temperature di picco rispetto al PCM_23. Tale fenomeno può essere spiegato dal fatto che il PCM_21 ha sempre operato in un range di temperature più favorevoli (più vicine al suo range di transizione). Si ricorda che il monitoraggio è stato effettuato in corrispondenza dell'inizio della stagione autunnale con una temperatura media dell'aria esterna di $\sim 14^{\circ}\text{C}$ per il Test_01 e di $\sim 12^{\circ}\text{C}$ per il Test_02.
- Entrambi i PCM hanno fornito una risposta migliore nel primo periodo di monitoraggio (Test_01). Questo risultato può essere in parte attribuibile all'impiego del sistema di ventilazione nelle prime ore del mattino (accensione del sistema di ventilazione dalle ore 7:00 alle ore 8:00). Tale strategia ha potenzialmente favorito la cessione del calore accumulato dal PCM, garantendo una maggior capacità di attenuazione delle temperature di picco diurne.

Dall'analisi è emerso che l'impiego di materiali a cambiamento di fase ha consentito di ridurre le temperature superficiali interne della copertura fino a 1.5°C e di ridurre la temperatura operativa dell'ambiente sottostante fino a $0.5-0.7^{\circ}\text{C}$ (giorni 8/10 e 10/10).

Deve essere inoltre precisato, che i risultati di riduzione del picco delle temperature medie radianti e operative al centro dell'ambiente, principali fattori che influenzano il comfort termico, potrebbero potenzialmente risultare maggiori nel caso di applicazione dei PCM in ambienti che presentano superfici in pianta più congrui a uno spazio abitabile. Le test room su cui è stata effettuata l'analisi sono ambienti con dimensioni non ricorrenti in edilizia (superficie interna $\sim 1.3\text{ m}^2$), queste presentano una ridotta percentuale di superficie di copertura e un ridotto fattore di vista che minimizzano rispettivamente lo scambio termico convettivo e radiativo con essa.

Infine, un risultato degno di nota, lo si è ottenuto rispetto alla riduzione dei carichi termici per raffrescamento. Facendo riferimento al Test_01, caratterizzato da un periodo di condizioni climatiche stabili, si è osservato come l'impiego del PCM_21 ha consentito di ridurre mediamente di circa il 57% i carichi di picco entranti attraverso la copertura. Tale riduzione consentirebbe potenzialmente, da un lato di ridurre i consumi per raffrescamento e dall'altro di installare sistemi di condizionamento di taglia ridotta, o nel migliore dei casi, di evitarne l'installazione. Inoltre, facendo riferimento ai requisiti minimi di isolamento termico e inerzia termica [1], l'attenuazione e lo sfasamento del flusso termico, ottenibili con l'applicazione dei PCM, potrebbero essere comparati all'effetto equivalente derivante dall'impiego di un extra-isolamento termico e/o all'incremento della massa frontale del componente.

È indispensabile evidenziare che i risultati ottenuti vanno visti come trend e non come benefici assoluti. Questi sono infatti generalizzabili limitatamente a coperture inclinate con esposizione prevalente a sud, un livello di isolamento termico moderato (lo spessore di isolante utilizzato è pari a 50 mm) e un clima caratterizzato da elevate

escursioni termiche giornaliere comprese tra 12 e 17°C circa. Se ne deduce che i benefici riconducibili all'impiego dei PCM potrebbero variare fortemente a seconda della tipologia d'installazione e delle condizioni al contorno (clima esterno, apporti interni). Tuttavia, l'applicazione di PCM con più alte temperature di transizione, potrebbe potenzialmente portare benefici estivi anche maggiori rispetto a quanto osservato, infatti, durante il periodo di monitoraggio (inizio autunno) i maggiori benefici sono stati ottenuti durante le giornate caratterizzate da maggiori forzanti (alta irradianza e alta temperatura esterna di picco).

In conclusione, un'ultima importante considerazione riguarda l'aspettativa riposta nell'applicazione dei PCM di poter garantire dei benefici in termini di miglioramento del comfort termico e di riduzione dei consumi.

Lo studio dimostra come l'ottenimento di benefici significativi sia strettamente dipendente da una accurata progettazione dell'involucro edilizio e da una corretta selezione delle temperature di transizione del PCM insieme all'adozione di strategie di raffrescamento passivo quali la ventilazione notturna.

Riferimenti

- [1] Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici – Annex 1: Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici.
- [2] EN ISO 6946:2007. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method, European Committee for Standardization, 2007.
- [3] EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods.
- [4] Sherman, M. H. Tracer-Gas Techniques for measuring ventilation in a single zone, Building and Environment, vol 25:4, pp. 365-374 (1990).

Allegato "A"

Tabella 6: Riepilogo dei risultati del Test_01




















Giorno	Room	T operativa [°C]		T media radiante [°C]		T superficiale interna [°C]		Flusso termico [W/m ²]		Irradianza solare giornaliera incidente [Wh]	T aria esterna [°C]		
		MAX	DELTA	MAX	DELTA	MAX	DELTA	MAX	DELTA		MAX	MIN	MEDIA
07/10/2020 	A	21.3		21.2		22.8		8.6					
	B	20.8	0.5	20.9	0.4	21.7	1.0	5.8	2.8	4900	23.8	9.2	15.1
	C	20.7	0.6	20.6	0.6	21.4	1.4	4.2	4.3				
08/10/2020 	A	22.0		22.0		23.6		9.4					
	B	21.5	0.6	21.6	0.5	22.4	1.2	5.6	3.8	5716	23.7	9.4	16.3
	C	21.4	0.7	21.3	0.7	22.1	1.5	4.9	4.4				
09/10/2020 	A	21.2		21.1		22.1		4.2					
	B	21.0	0.2	21.0	0.1	21.5	0.6	2.5	1.7	2400	19.5	10.7	14.9
	C	20.9	0.3	20.8	0.3	21.1	1.0	1.0	3.2				
10/10/2020 	A	21.7		21.6		23.2		8.1					
	B	21.3	0.4	21.4	0.2	22.0	1.2	4.3	3.9	3975	22.1	9.2	14.8
	C	21.2	0.5	21.1	0.5	21.7	1.5	3.2	4.9				
11/10/2020 	A	21.3		21.2		22.1		5.9					
	B	20.8	0.5	20.9	0.3	21.6	0.5	3.9	2.0	4336	19.1	8.8	13.6
	C	20.8	0.5	20.7	0.5	21.3	0.8	2.3	3.6				
12/10/2020 	A	20.4		20.4		21.8		8.0					
	B	20.1	0.3	20.3	0.2	21.2	0.6	6.0	2.0	5437	19.9	5.7	11.8
	C	20.2	0.3	20.1	0.3	20.8	1.0	4.2	3.9				
13/10/2020 	A	20.3		20.2		21.4		7.6					
	B	20.5	-0.1	20.4	-0.2	20.9	0.5	5.9	1.8	4862	18.0	5.8	11.0
	C	20.1	0.2	20.0	0.2	20.5	1.0	3.8	3.8				

Tabella 7: Riepilogo dei risultati del Test_02

Giorno	Room	Toperativa [°C]		Tmedia radiante [°C]		T superficiale interna [°C]		Flusso termico [W/m ²]	Irradianza solare giornaliera incidente [Wh]	T aria esterna [°C]		
		MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN			MEDIA		
14/10/2020 	A	19.7		19.6		21.1		7.1				
	B	19.5	0.1	19.6	0.0	20.6	0.6	5.2	3417	17.2	8.4	11.5
	C	19.6	0.1	19.5	0.1	20.1	1.0	3.1				
15/10/2020 	A	18.7		18.4		18.6		-2.5				
	B	18.6	0.1	18.6	-0.1	18.2	0.4	-2.6	582	11.1	8.8	9.8
	C	18.7	0.0	18.6	-0.1	18.3	0.3	-2.2				
16/10/2020 	A	19.3		19.3		20.4		5.6				
	B	19.2	0.1	19.2	0.0	20.0	0.3	4.4	3469	17.1	8.6	11.4
	C	19.1	0.2	19.0	0.2	19.5	0.8	1.8				
17/10/2020 	A	19.5		19.5		21.1		8.5				
	B	19.2	0.2	19.4	0.1	20.5	0.7	6.8	5325	18.2	5.8	11.6
	C	19.2	0.3	19.1	0.4	19.9	1.2	4.5				
18/10/2020 	A	19.0		18.9		20.2		6.5				
	B	18.8	0.2	18.9	0.1	19.7	0.5	5.0	3213	16.9	7.6	11.4
	C	18.7	0.2	18.6	0.3	19.2	1.0	2.8				
19/10/2020 	A	18.8		18.7		19.4		4.2				
	B	18.7	0.1	18.7	0.0	19.1	0.3	2.8	1799	16.4	10.0	12.1
	C	18.6	0.1	18.5	0.2	18.8	0.7	0.5				
20/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	823	13.3	10.9	11.9
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
21/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	981	14.7	10.7	12.6
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
22/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	627	15.7	10.7	12.9
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
23/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	307	13.4	11.7	12.4
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
24/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4559	20.8	10.9	14.5
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
25/10/2020 	A	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				
	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	947	15.9	10.7	12.8
	C	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.				

