

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in:

ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE  
Anno Accademico 2020/2021

Tesi di laurea magistrale

## Sviluppo di moduli opachi di facciata basati sull'integrazione di materiali avanzati per edifici non residenziali

Approccio metodologico per una progettazione termo-energetica  
dalla scala del materiale a quella dell'edificio



**Relatore**

PhD. Arch. Stefano Fantucci

**Candidate**

Giorgia Autretto s257331

Rita Adamo s262156

**Co-relatrice**

M.Sc Elisa Fenoglio

Febbraio 2021





## Abstract

Il contenuto di questo elaborato riflette il lavoro di progettazione, ottimizzazione e caratterizzazione sperimentale di moduli opachi avanzati per facciate adattive svolte nell'ambito del progetto Powerskin+, finanziato dal programma *Horizon 2020* dell'Unione Europea in cui è coinvolto il Politecnico di Torino ed altri numerosi partners industriali e istituti di ricerca. Il progetto intende sviluppare elementi opachi modulari, prefabbricati e di facile installazione per edifici non residenziali ex-novo o per interventi di retrofit di architetture esistenti.

Il significativo impatto ambientale del settore edilizio dovuto alla crescente domanda di energia ed alle conseguenti emissioni di gas serra ha portato alla necessità di intervenire con soluzioni efficaci sulla progettazione degli involucri edilizi, i quali devono soddisfare determinati requisiti connessi alla sostenibilità ed al comfort interno degli utenti.

Pertanto, l'obiettivo di questo lavoro, è stato quello di indagare gli strumenti, le tecnologie e i materiali al fine di definire preliminarmente un prototipo di facciata che risponda a determinati requisiti fisici e prestazionali definiti dal progetto Powerskin+.

In particolare, sono state condotte due tipologie di analisi a scala di componente: una simulativa in regime dinamico per valutare i comportamenti termoigrometrici delle stratigrafie ipotizzate ed i limiti dei materiali in termini di temperatura di esercizio; una sperimentale mirata alla caratterizzazione dei materiali dal punto di vista delle proprietà fisiche e termiche ed alla validazione dei modelli simulativi dei BPS (Building Performance Simulation).

Le indagini effettuate hanno portato alla selezione di determinati materiali e di un numero ristretto di configurazioni da simulare alla scala di edificio.

Per mezzo di un'ulteriore analisi termica in regime dinamico di un ambiente tipo è stato valutato il fabbisogno energetico derivante dall'applicazione delle diverse alternative in funzione di differenti WWR (Window to Wall Ratio) ovvero il rapporto tra la superficie trasparente e la superficie opaca. Questo parametro ha un profondo impatto non solo sul bilancio energetico ma anche sull'aspetto architettonico dell'intera costruzione.

Pertanto, lo studio condotto ha permesso di sviluppare un approccio metodologico volto alla risoluzione di problemi complessi derivanti dalla progettazione di facciate avanzate e di valutarne l'impatto energetico, tecnologico e compositivo a scala di edificio.



## Abstract (English version)

The content of this paper reflects the design, optimisation and experimental characterisation of advanced opaque modules for adaptive façades carried out within the framework of the Powerskin+ project, funded by the European Union's Horizon 2020 programme in which Politecnico di Torino and numerous other industrial partners and research institutions are involved. The project aims to develop modular, prefabricated and easy-to-install opaque elements for new non-residential buildings or for retrofitting existing architecture.

The significant environmental impact of the building sector due to the increasing demand for energy and the consequent emission of greenhouse gases has led to the need to intervene with effective solutions in the building envelopes design, which must fulfil specific requirements related to sustainability and the internal comfort of users. Therefore, the goal of this work at hand was to investigate the tools, technologies and materials in order to preliminarily define a prototype façade that meets certain physical and performance requirements defined by the Powerskin+ project.

In particular, two types of analysis were carried out on a component scale: a simulative one in dynamic conditions to assess the thermo-hygrometric behaviour of the hypothesised stratigraphies and the limits of the materials in terms of operating temperature; an experimental one aimed at characterising the materials from the point of view of their physical and thermal properties and validating the BPS (Building Performance Simulation) models.

The results of these analysis led to select some materials and a limited number of configurations to be simulated at the building scale.

By means of a further thermal analysis in dynamic regime of a typical room, the energy demand deriving from the application of the different alternatives was evaluated as a function of different WWR (Window to Wall Ratio), i.e. the ratio between the transparent surface and the opaque surface. This parameter has a profound impact not only on the energy balance but also on the architectural appearance of the whole building.

Therefore, the study allowed to develop a methodological approach to solve complex problems derivatd from the design of advanced façades and to evaluate their energy, technological and compositional impact at the building scale.



# Indice

<b>1. Introduzione .....</b>	<b>14</b>
1.1 Obiettivi .....	14
1.2 Powerskin+ .....	17
<b>2. Stato dell'arte sulle facciate avanzate .....</b>	<b>19</b>
2. 1 Facciate adattive .....	19
2. 2 Facciate multifunzionali.....	22
2. 3 Materiali per facciate avanzate .....	23
2. 3. 1 PCM (Phase change material) .....	24
2. 3. 2 VIP (Vacuum Insulation panel) .....	28
2. 3. 3 GFP (Gas filled panel) .....	32
2. 3. 4 Perovskite .....	35
<b>3. Individuazione della tipologia edilizia target all'interno del patrimonio edilizio europeo .....</b>	<b>37</b>
3. 1 La facciata continua.....	37
3. 2 Analisi del patrimonio edilizio europeo .....	40
3. 3 Analisi della città di Torino .....	44
<b>4. Progettazione di una facciata avanzata.....</b>	<b>50</b>
4.1 Requisiti prestazionali .....	50
4.1.1 Requisiti aggiuntivi .....	50
4.1.2 Stress termico.....	51
4.2 Configurazioni .....	53
4.2.1 Caratteristiche prestazionali delle configurazioni.....	60
<b>5. Stato dell'arte sulla simulazione delle facciate avanzate.....</b>	<b>68</b>
5.1 Simulazione a scala di componente.....	68
5.2 Simulazione a scala di edificio .....	70
5.3 Software analizzati .....	72

---

<b>6. Analisi simulativa a scala di componente .....</b>	<b>84</b>
6.1 Dati di input.....	85
6.2 Metodologia di indagine .....	86
6.3 Configurazioni .....	89
<b>7. Analisi sperimentale .....</b>	<b>107</b>
7.1 Analisi a scala di materiale.....	107
7.1.1 PCM.....	108
7.1.1.1 Metodologia .....	109
7.1.1.1.1 Conducibilità termica.....	109
7.1.1.1.2 Entalpia in funzione della temperatura.....	133
7.1.1.1.3 Risposta sinusoidale .....	139
7.1.1.2 Risultati sperimentali .....	147
7.1.1.2.1 Conducibilità termica.....	147
7.1.1.2.2 Entalpia in funzione della temperatura.....	152
7.1.1.2.3 Risposta sinusoidale .....	162
7.1.1.2.4 Caratterizzazione completa e definizione di un benchmark.	168
7.1.2 VIP .....	172
7.1.2.1 Metodologia (conducibilità termica) .....	172
7.1.2.2 Risultato sperimentali.....	173
7.2 Analisi a scala di componente.....	173
7.2.1 Metodologia.....	174
7.2.1.1 Prototipo 1 .....	177
7.2.1.2 Prototipo 2 .....	182
7.2.2 Risultati sperimentali .....	184
7.2.2.1 Prototipo 1 .....	184
7.2.2.2 Prototipo 2 .....	188
<b>8. Analisi WWR di facciata.....</b>	<b>190</b>
8.1 Obiettivo .....	190
8.2 Metodologia.....	190

8.3 Caso studio .....	191
8.4 Analisi simulativa.....	195
8.4.1 Modellazione .....	195
8.4.2 Dati di input.....	195
8.4.3 Risultati .....	199
<b>9. Conclusioni .....</b>	<b>211</b>
<b>Bibliografia e sitografia .....</b>	<b>213</b>
<b>Appendice .....</b>	<b>221</b>

## Dichiarazione delle autrici

Il presente elaborato è frutto del lavoro di ricerca di Rita Adamo e Giorgia Autretto, le quali hanno condotto in parallelo due tipologie di analisi: simulativa (Rita Adamo) e sperimentale (Giorgia Autretto). In particolare si riportano di seguito i contributi per ciascun capitolo.

Capitolo	Titolo	A cura di:
1	Introduzione	R. Adamo, G. Autretto
2	Stato dell'arte sulle facciate avanzate	G. Autretto
3	Individuazione della tipologia edilizia target all'interno del patrimonio edilizio europeo	G. Autretto
4	Progettazione di una facciata avanzata	R. Adamo
5	Stato dell'arte sulla simulazione delle facciate avanzate	R. Adamo
6	Analisi simulativa	R. Adamo
7	Analisi sperimentale	G. Autretto
8	Analisi WWR di facciata	R. Adamo, G. Autretto
9	Conclusioni	R. Adamo, G. Autretto

## Lista dei simboli utilizzati

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
A	Area	[m <sup>2</sup> ]
w	Larghezza	[m]
l	Lunghezza	[m]
t	Spessore	[m]
μ	Resistenza al vapore	
ε	Porosità	
Q	Flusso termico	[W]
Q <sub>se</sub>	Flusso termico su superficie esterna	[W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>si</sub>	Flusso termico su superficie interna	[W/m <sup>2</sup> ]
ψ	Trasmittanza termica lineica del ponte termico	[W/mK]
U	Trasmittanza termica	[W/m <sup>2</sup> K]
λ	Conducibilità termica	[W/mk]
R	Resistenza termica	[m <sup>2</sup> K/W]
R <sub>si</sub>	Resistenza superficiale interna	
R <sub>se</sub>	Resistenza superficiale esterna	
ρ	Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]
W	Peso	[kg/m <sup>2</sup> ]
m	Massa	[kg]
c	Calore specifico	[J/kgK]
T	Temperatura	[°C]
T <sub>si</sub>	Temperatura su superficie interna	[°C]
T <sub>se</sub>	Temperatura su superficie esterna	[°C]
ΔT	Differenza di temperatura	[°C]
τ - T <sub>sol</sub>	Trasmissione solare	
ρ - R <sub>sol</sub>	Riflessione solare	
α - Abs <sub>n</sub>	Assorbimento	
E <sub>n</sub>	Emissività	
I <sub>sol,i</sub>	Radiazione solare incidente	[W/m <sup>2</sup> ]
c	Capacità termica	[kJ/m <sup>2</sup> ]



# 1. Introduzione

## 1.1 Obiettivi

Il significativo impatto ambientale del settore edilizio, dovuto alla domanda di energia e alle relative emissioni di gas serra, ha portato a sempre più severe normative che insistono sulla necessità di progettare *nearly Zero Energy Building*<sup>1</sup> (nZEB) e di concepire l'edificio non più come un "assemblaggio statico di diversi componenti", bensì come un organismo integrato caratterizzato da un comportamento "reattivo" e "dinamico". Ciò può essere perseguito andando a modificare l'interazione tra gli elementi di un edificio (pareti, copertura, aperture finestrate) con l'ambiente esterno, ovvero sfruttando le "energie naturali" (radiazione solare, vento ecc.) per massimizzare la qualità ambientale e minimizzare il consumo energetico. [1] In quest'ottica la progettazione degli involucri degli edifici assume un'importanza cruciale in quanto comporta una serie di sfide al fine di soddisfare determinati requisiti connessi alla sostenibilità. In particolare, in questo scenario grande attenzione viene posta all'applicazione di elementi edilizi reattivi (RBEs - *Responsive Building Elements*), allo sfruttamento delle fonti di energia rinnovabile (RES - *Renewable Energy Sources*) per la progettazione di *Advanced Integrated Facades AIFs*, una delle tecnologie di facciate più promettenti nel controllo dei flussi di energia e di massa tra l'edificio e l'ambiente esterno[2].

L'obiettivo di questo elaborato è stato quello di progettare, attraverso un processo per fasi, dei moduli opachi per facciate avanzate che permettano la **riqualificazione di edifici del terziario esistente** e la **realizzazione di edifici ex novo** che si avvicinino al concetto di *nearly Zero Energy Building*.

In primo luogo, questo processo è stato seguito andando ad indagare gli strumenti, le tecnologie e i materiali necessari alla definizione di un prototipo di facciata che risponda a determinati requisiti fisici e prestazionali.

---

<sup>1</sup> "[...] un edificio che ha un rendimento energetico molto elevato [...] ed una domanda energetica quasi nulla o molto bassa dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da fonti rinnovabili, compresa l'energia rinnovabile prodotta sul posto o nelle vicinanze." Definizione data dalla Direttiva 2010/31/EU del 2010 EPBD Recast e riportata in [1].

Successivamente sono state condotte due tipologie di **analisi a scala di materiale e componente**: una **simulativa** volta a riprodurre le condizioni reali a cui sono sottoposte le stratigrafie ipotizzate e a valutarne i rispettivi comportamenti termici; una **sperimentale** mirata alla caratterizzazione dei materiali dal punto di vista delle proprietà fisiche e termiche ed alla validazione dei modelli simulativi dei BPS (Building Performance Simulation).

Le indagini effettuate hanno portato alla selezione di determinati materiali e di un numero ristretto di configurazioni da simulare alla scala di edificio.

Per mezzo di un'ulteriore analisi in regime dinamico di un ambiente tipo è stato valutato il fabbisogno energetico necessario a garantire delle condizioni di comfort termico all'interno dell'ambiente, in base alle diverse tipologie di WWR (Window to Wall Ratio) e alle diverse configurazioni.

Questo parametro ha permesso la valutazione dell'impatto di quest'ultime non solo sul bilancio energetico ma anche sull'aspetto architettonico dell'intera costruzione.

Di seguito si riportano le fasi che si sono susseguite nell'attività di ricerca trattata nella presente tesi:

- **Ricerca di letteratura** relativa alle facciate adattive e multifunzionali e ad i materiali innovativi in esse utilizzati, volta a comprendere verso quale direzione si stia muovendo la letteratura scientifica e quali siano i livelli di prestazioni raggiunti dai materiali coinvolti [capitolo 2];
- **Definizione** di differenti tipologie di **stratigrafie per moduli opachi** e dei **requisiti** fisici e prestazionali da esse richiesti [capitolo 4];
- **Studio dello stato dell'arte** relativo ai **software** attualmente disponibili, in grado di simulare, sia alla scala di componente sia a quella di edificio, determinati fenomeni fisici che coinvolgono una facciata avanzata, al fine di definire con precisione quali siano gli strumenti disponibili e le competenze richieste ad un professionista nel progettare una facciata di questo tipo [capitolo 5];
- **Analisi simulativa** attraverso la quale è stato possibile simulare ed analizzare il comportamento ed i limiti dei singoli materiali all'interno delle configurazioni ipotizzate. Sottoponendo quest'ultime a condizioni (esterne ed interne) realistiche è stato possibile riconoscere quale fosse la migliore dal punto di vista delle proprietà fisiche e termiche dei materiali e delle prestazioni energetiche garantite [capitolo 6];
- **Analisi sperimentale** sui materiali innovativi. Questa analisi ha permesso di caratterizzare ed analizzare il comportamento termico dei materiali attraverso la misura di determinate proprietà termiche mediante l'utilizzo

di un termo-flussimetro, strumento di cui è dotato il laboratorio del Dipartimento di Energia (DENERG) del Politecnico di Torino.

Inoltre, è stato possibile definire una metodologia sperimentale in grado di offrire delle linee-guida ben precise sulle modalità di misura di materiali innovativi e di validare i modelli simulativi creati con appositi software [capitolo 7];

- **Analisi del patrimonio edilizio europeo e torinese** al fine di individuare la **tipologia edilizia target** di eventuali interventi di retrofit che prevedono l'utilizzo dei pannelli oggetto di studio. In questo caso, è stato indagato il patrimonio edilizio europeo esistente da più punti di vista (funzione, tipologia, età, tecnologie costruttive) al fine di fornire dei dati, in termini qualitativi e quantitativi, circa la percentuale di edifici su cui si potrebbe intervenire [capitolo 3];
- **Analisi WWR** (Window to Wall Ratio) **di facciata**. L'ultima fase ha visto una dilatazione della scala di indagine: dalla scala di componente a quella di edificio. In particolare, è stato simulato un ambiente tipo ad uso ufficio al quale sono state associate alcune delle configurazioni analizzate in precedenza con differenti valori di WWR. Questo ha permesso di definire quale fosse l'impatto dal punto di vista prestazionale dei diversi rapporti tra la superficie trasparente e la superficie opaca per ciascuna stratigrafia studiata. [Capitolo 8]

Tuttavia, per quanto l'analisi si sia soffermata molto sulle proprietà fisiche e sui comportamenti dei diversi moduli opachi dal punto di vista energetico, è bene sottolineare che si tratta di un **sistema di componenti prefabbricati**, caratterizzati da un peso per unità di superficie e da uno spessore ridotti che consente una riduzione non solo dei volumi di stoccaggio ma anche dei costi di trasporto. Inoltre, trattandosi di pannelli modulari, questi sono ancorati ad un sistema prefabbricato di facciata continua formato da montanti e traversi, che permettono il fissaggio di pannelli opachi e trasparenti. Tutto questo permette di ottenere degli edifici luminosi, contraddistinti da alte prestazioni energetiche e caratterizzati da una notevole continuità di facciata sia esternamente sia internamente.

## 1.2 Powerskin+

È importante sottolineare che il presente lavoro di tesi si contestualizza all'interno dell'ampio progetto di ricerca finanziato dall'Unione Europea nell'ambito dell'*Horizon2020*<sup>2</sup> e chiamato **Powerskin+**, volto allo sviluppo di una soluzione di facciata innovativa basata sull'integrazione intelligente di componenti ad alta efficienza energetica (incluso materiali super-isolanti) e sull'accumulo di energia solare. Il tutto deve essere garantito da un unico sistema di gestione combinata attiva/passiva ed è rivolto alle attuali soluzioni di retrofit su edifici non residenziali caratterizzati dalle tecnologie della facciata continua o della facciata a doppia pelle.

Il progetto intende perseguire questo obiettivo attraverso la creazione di **componenti** di prima generazione, opachi e trasparenti, **prefabbricati, modulari** e di **facile installazione**, caratterizzati da un sistema di telai eco-sostenibili, da soluzioni tecnologiche di accumulo di energia termica attiva e passiva e da celle fotovoltaiche integrate semitrasparenti [4].

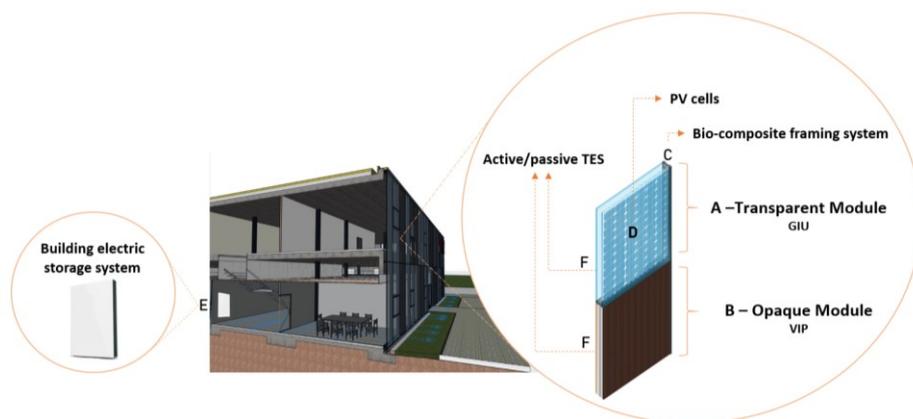


Fig. 1 Concept Powerskin+. Fonte:[4]

Inoltre, l'intento è quello di integrare questi moduli in modo sinergico ovvero adattandoli alle condizioni climatiche e geografiche, ai vincoli fisici e normativi del sito in cui verranno installati.

<sup>2</sup> "Horizon 2020 (H2020) è il Programma Quadro dell'Unione Europea (UE) per la ricerca e l'innovazione relativo al periodo 2014-2020. I Programmi Quadro, di durata settennale, sono il principale strumento con cui l'Unione Europea (UE) finanzia la ricerca in Europa. Horizon 2020 unifica in un unico strumento finanziario tre programmi precedenti (2007-2013) finalizzati a supportare la ricerca, l'innovazione e lo sviluppo tecnologico" [3].

Pertanto, si tratta di moduli altamente prestanti, la cui modularità li rende idonei a qualsiasi tipologia di esigenza progettuale/architettonica ed economica e che presentano tre funzioni principali [4]:

- isolamento/controllo del clima;
- raccolta e stoccaggio di energia;
- interventi di retrofit degli edifici con il minimo adattamento e con elevata facilità di costruzione.

## 2. Stato dell'arte sulle facciate avanzate

L'obiettivo di questo capitolo è quello di indagare le tecnologie e i materiali utilizzati per la progettazione di facciate avanzate tra le quali emergono le **facciate adattive** e le **facciate multifunzionali**.

### 2. 1 Facciate adattive

“Le facciate adattive sono sempre più utilizzate nelle architetture contemporanee, nelle quali possono assumere la forma di sistemi complessi e manifestare la loro adattabilità in modalità differenti” [5]. In termini generali, Loonen et al.[6] definiscono le facciate adattive come sistemi multifunzionali, nei quali il separatore fisico tra l'ambiente interno ed esterno è in grado di modificare le proprie funzioni, caratteristiche o il proprio comportamento nel tempo in risposta a requisiti prestazionali transitori ed alle condizioni al contorno, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio. [6]

Già negli anni passati architetti e ricercatori edili si sono interrogati su quali potessero essere le possibilità affinché gli involucri edilizi fossero in grado di generare un certo tipo di risposta adattiva alle mutevoli condizioni ambientali. Tra questi è importante ricordare Negroponte [7], il quale nel 1975 ha introdotto il concetto di *ambiente reattivo*, capace di svolgere un ruolo attivo, generando cambiamenti in misura maggiore o minore come risultato di calcoli semplici o complessi e Mike Davies, che sei anni dopo ha proposto il concetto di *polyvalent wall* ossia un sistema di facciata nel quale diverse funzioni sono integrate in un unico strato. Negli ultimi anni gli studi e le ricerche si sono intensificati con l'obiettivo di dimostrare l'efficacia di questa tipologia di facciata e di proporre nuovi modelli di approccio nei quali l'edificio viene visto come un organismo biologico in grado di gestire i flussi di energia che si generano attraverso l'involucro edilizio e di garantire autonomamente il comfort degli utenti [7].

“Pertanto, le facciate adattive possono essere considerate l'ultima frontiera dell'architettura contemporanea e della ricerca tecnologica sempre più legata alla

volontà di progettare nuovi modelli di facciate dinamiche, che, con l'aiuto di sensori, componenti di sistema per la produzione di energia e materiali intelligenti, contribuiscono a ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio. Queste sono soluzioni tecnologiche che, sono in grado di gestire i flussi di energia alterando le proprietà dei dispositivi fissi (materiali intelligenti) o controllando (manualmente o automaticamente) parti mobili (ad es. frangisole, finestre, bocchette di ventilazione, ecc.) in relazione al tipo di utente ed alla complessità dell'edificio" [7].

Inoltre, gli involucri adattivi sono caratterizzati da soluzioni diverse a seconda dell'esposizione dell'edificio.

Dal momento che le variabili coinvolte sono molteplici e il livello di complessità di tali involucri è elevato, si riporta in Fig. 2.



Fig. 2 Caratterizzazione elaborata da COST Action TU 1403 [7] in termini di tecnologie adottate e finalità (tradotto da [7]).

In essa è possibile osservare come le facciate adattive siano sistemi complessi alle quali si possono far assumere funzioni differenti attraverso particolari materiali o sistemi, a seconda della scala spaziale su cui si lavora e con modalità davvero molteplici.

Inoltre, come riportato in Fig. 3, è possibile operare un'ulteriore classificazione in tre gruppi principali:

- **Materiali:** l'adattabilità e la flessibilità delle facciate adattive può essere ottenuta attraverso un uso innovativo di materiali convenzionali e/o materiali innovativi, che a loro volta possono essere divisi in diverse classi, a seconda della loro fonte di attivazione. "L'uso di materiali intelligenti in campo architettonico dipende principalmente dalla loro capacità di cambiare le loro forme e caratteristiche, sotto l'influenza di stimoli esterni

quali forze meccaniche, potenza elettrica, ma anche umidità, temperatura, radiazione solare, luce, movimento dell'aria, inquinamento ecc" [5] [Tabella 1]. Infine i materiali possono trovarsi in diversi stati di affinamento come grezzo, estruso, rivestito [7].

- **Componenti:** concepiti come assemblaggio di diversi materiali/elementi, i componenti costituiscono un'unità costruttiva o funzionale della facciata. Possono essere definiti componenti i dispositivi di schermatura solare, un lastra di vetro isolante o anche un telaio di una finestra comprensivo di vetri ecc. [7].

**Sistemi di facciata:** sono composti da diversi sistemi trasparenti o opachi oppure da componenti tecnici. Svolgono le funzioni tecniche di base dell'involucro edilizio, quali l'isolamento, la tenuta all'acqua e al vento [7]. Gli esempi più diffusi sono la facciata continua, i moduli prefabbricati, la facciata a doppia pelle e la facciata ventilata.



Fig. 3 Diagramma concettuale della classificazione delle facciate adattive (tradotto da [7]).

Tabella 1: Materiali per facciate adattive e relativa fonte di attivazione

Materiali	Attivazione
Bimetalli termici	Temperatura
Plastiche termosensibili	
Polimeri termocromici	
PCM	
Pigmenti fosforescenti	Luce
Polimeri reattivi alla luce	
Coloranti fotocromatici	
Legno (faggio, acero europeo)	Umidità
Idrogel	
Polimeri reattivi all'anidride carbonica	Anidride carbonica
Biossido di titanio	

## 2. 2 Facciate multifunzionali

La facciata multifunzionale è una tipologia di facciata adattiva che implementa più funzioni nello stesso involucro edilizio. In letteratura si parla di **moduli di facciata multifunzionale** (MFM -Multifunctional Façade Module) quando questi hanno la funzione di svolgere ruoli diversi grazie alla capacità di cambiare il loro comportamento termofisico in modo da soddisfare le diverse esigenze dell'edificio ed affrontare diverse condizioni al contorno [5].

Mostrano un comportamento dinamico e incorporano tecnologie differenti (unità di riscaldamento/raffreddamento decentralizzate, scambiatori di calore, dispositivi di fornitura di energia, immagazzinamento dell'energia, dispositivi di illuminazione, dispositivi di ombreggiamento, cavità ventilate) volte a ridurre la domanda di energia dell'edificio, da un lato, e a convertire l'energia a partire da fonti di energia rinnovabili, dall'altro [2].

Le MFM rientrano nella categoria delle cosiddette **Advanced Integrated Façades (AIF)**, uno dei concetti più promettenti degli elementi edilizi reattivi (RBE - Responsive Building Element). Negli ultimi anni le più note aziende di moduli e sistemi per facciate hanno iniziato a sviluppare queste tipologie di involucri edilizi. Ciò dimostra quanto le tecnologie costituite da componenti avanzati e reattivi possano rappresentare una risposta potenzialmente molto valida alla sfida posta dalle più recenti normative energetiche [2]. Un esempio interessante di modulo di facciata multifunzionale è quello che implementa un **sistema fotovoltaico integrato nell'edificio** (BiPV - Building-integrated photovoltaic) il quale è a sua volta **potenziato da un intercapedine d'aria ventilata** (facciata ventilata) o **dall'accumulo di energia termica latente** dato dai PCM.

I sistemi BiPV sono diventati parte funzionale ed architettonica dell'involucro edilizio, tuttavia, bisogna considerare la loro tendenza al surriscaldamento che può verificarsi nelle calde giornate di sole. Un importante fattore che incide sull'efficienza e sulla durata dei pannelli PV è la radiazione solare incidente, di cui l'80/95% circa non contribuisce alla produzione di elettricità. Generalmente l'efficienza dei sistemi fotovoltaici diminuisce con l'aumento della temperatura delle celle. Tuttavia ci sono diverse tecniche per controllare la temperatura di esercizio del fotovoltaico tra cui la circolazione (naturale o forzata) di aria intorno alla superficie posteriore del modulo fotovoltaico o l'integrazione di uno strato di PCM. Il primo sistema, da noi proposto nella configurazione 3.3 descritta nel paragrafo 4.2 *Configurazioni*, fa sì che l'intercapedine d'aria funga da tampone termico d'inverno, durante il quale il pannello fotovoltaico preriscalda l'aria esterna che passa attraverso la cavità durante una giornata di sole; e da canale di ventilazione naturale durante l'estate.

Il secondo, applicato nella configurazione 3.2 [capitolo 4], si basa sull'assorbimento da parte del PCM dell'eccessiva energia termica del pannello fotovoltaico. Durante le calde giornate di sole, la temperatura di funzionamento del PV viene sostanzialmente mantenuta ad un temperatura vicina al punto di fusione del PCM in base alla sua capacità termica latente complessiva. La quantità di energia termica latente assorbita provoca nel PCM il passaggio dalla fase solida a quella liquida. Di notte (o eventualmente durante un periodo nuvoloso del giorno) la temperatura circostante e la temperatura di esercizio del fotovoltaico scendono al di sotto del punto di fusione del PCM, provocando la solidificazione del materiale. Durante quest'ultimo processo, l'energia termica assorbita dal PCM viene emessa nell'ambiente circostante.

Questa tecnologia di raffreddamento passivo consente un maggiore controllo della temperatura di esercizio di un sistema BiPV, un miglioramento della resa annua di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico ed un notevole risparmio energetico medio giornaliero [8].

Pertanto, l'implementazione di diverse tecnologie all'interno di pannelli per involucri edilizi costituisce una questione altamente rilevante dal punto di vista del consumo energetico degli edifici.

## 2. 3 Materiali per facciate avanzate

Come precedentemente affermato l'adattabilità e la flessibilità di queste tipologie di involucri edilizi possono essere ottenute attraverso un uso innovativo di materiali convenzionali o l'utilizzo di materiali innovativi. Nei paragrafi successivi si riportano i materiali innovativi che sono stati utilizzati ed analizzati in questo elaborato per lo sviluppo di componenti opachi avanzati per edifici non residenziali. In particolari tra i materiali approfonditi vi sono:

- I materiali a cambiamento di fase (PCM);
- I pannelli isolanti sottovuoto (VIP);
- I Gas Filled Panels GFP);
- Il fotovoltaico a base di Perovskite.

Per ciascun materiale utilizzato nell'analisi simulativa e/o sperimentale si riporta in *Appendice capitolo 2* la scheda con i relativi dati dichiarati dal produttore e, nel caso in cui questo sia stato testato in laboratorio, il confronto con quelli ottenuti sperimentalmente.

### 2. 3. 1 PCM (Phase change material)

“I materiali a cambiamento di fase (PCM) sono materiali che utilizzano il calore latente del cambiamento di fase per controllare le temperature all’interno di un intervallo specifico. Quando la temperatura sale al di sopra di un certo valore, i legami chimici nel materiale inizieranno a rompersi ed il materiale assorbirà calore in un processo endotermico in cui cambia stato da solido a liquido. Quando la temperatura scende, il materiale emette energia e ritorna allo stato solido.” [9].

Questi materiali hanno ricevuto una notevole attenzione negli ultimi quindici anni per via del principio che sfruttano, ovvero il **principio dell’accumulo termico latente** (LHTS<sup>3</sup>) che consiste nell’assorbimento di energia in grandi quantità quando c’è un surplus ed un rilascio quando c’è un deficit. L’uso di PCM, pertanto, consente di ridurre i picchi di riscaldamento e di raffreddamento limitando l’uso di energia e permettendo il ridimensionamento delle attrezzature tecniche per il riscaldamento ed il raffreddamento [10].

Generalmente i materiali a cambiamento di fase si distinguono in PCM **organici**, **inorganici** ed **eutettici**, categorie a sua volta ulteriormente suddivise a seconda dei vari componenti che li caratterizzano [Fig. 4].

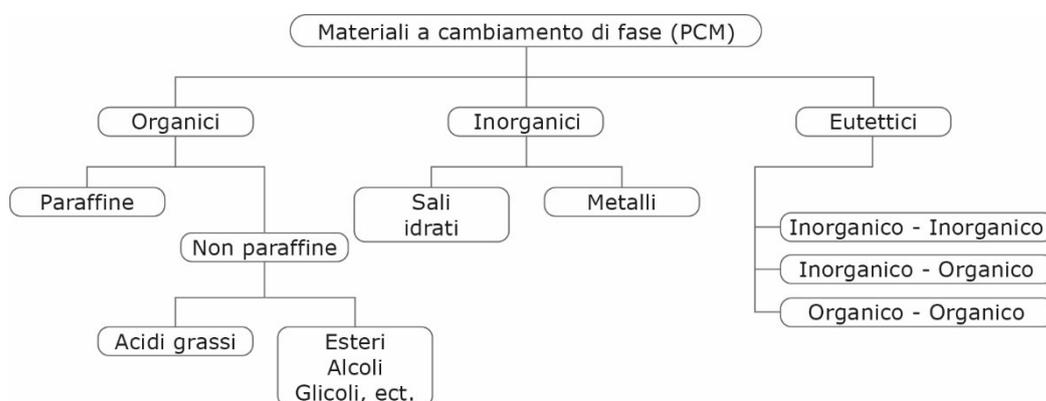


Fig. 4 Classificazione generale dei PCM. Fonte: [10]. Rielaborazione dell’autrice.

I PCM organici, classificati in **paraffine** e **non paraffine**, sono utilizzati in numerosi settori compreso quello edilizio. Sono caratterizzati da un calore latente basato sulla massa e da una bassa pressione di vapore, inoltre non mostrano alcun segno di separazione di fase dopo ripetuti cicli di transizione solido-liquido. Tuttavia, presentano alcuni svantaggi: una bassa conducibilità termica (che si aggira intorno a 0.2 W/mK), un’incompatibilità con i contenitori plastici ed una moderata infiammabilità che

<sup>3</sup> LHTS (*latent heat thermal storage*): accumulo termico latente

costituisce un inconveniente cruciale e che incide notevolmente sull'aspetto della sicurezza in ambito edilizio [10].

I PCM inorganici, invece, sono costituiti da **sali idrati** o da **metalli**, quest'ultimi però non sono adatti alle applicazioni edilizie poiché non rientrano in un intervallo di temperatura adeguato e sono caratterizzati da un peso eccessivo. I sali idrati, diversamente, sono formati da una lega di sali inorganici e acqua che rendono i PCM di facile disponibilità e a basso costo. Ulteriori vantaggi dei PCM a base di sali idrati sono: l'elevato calore di fusione per unità di volume ed una maggiore conducibilità termica rispetto i PCM organici. Tra gli svantaggi vi sono il processo di fusione che porta il sale a rilasciare acqua e a trasformarsi in un sale anidro o in un sale diverso, il quale avendo una densità maggiore tende ad accumularsi sul fondo del contenitore riducendo l'efficacia del PCM e per ultimo il super-raffreddamento<sup>4</sup> [10].

Infine, i PCM eutettici sono materiali a cambiamento di fase costituiti da una miscela di due o più componenti che fondono e solidificano in maniera analoga. Gli eutettici possono essere miscele di composti organici e/o inorganici (**organico-organico**, **inorganico-inorganico**, **organico-inorganico**). Questa varietà di combinazioni rende i PCM personalizzabili e adatti ad applicazioni specifiche. Tra i benefici delle miscele eutettiche rientrano la loro capacità di ottenere determinate proprietà quali un punto di fusione specifico o una maggiore capacità di accumulo di calore per unità di volume; tuttavia si tratta di composti di cui non si conoscono in maniera approfondita le proprietà termo-fisiche per cui il campo di ricerca è aperto ad ulteriori indagini [10].

Una caratteristica importante dei PCM, soprattutto in ambito architettonico ed edile è l'**incapsulamento** che deve evitare problemi di fuoriuscita del materiale in superficie. Inoltre, il materiale dell'incapsulamento non deve reagire con il PCM, subire variazioni di volume in seguito alla transizione di fase del materiale e deteriorarsi nel tempo. Più specificatamente esistono due differenti metodologie, il **micro** e il **macro-incapsulamento**.

Il primo comporta l'inserimento dei materiali a cambiamento all'interno di capsule caratterizzate da dimensioni comprese tra meno di 1µm e 300 µm e da materiali quali polimeri organici o silice [

Fig. 5]. I vantaggi di questa tipologia di incapsulamento sono la maggiore superficie di scambio termico che garantisce un più elevato trasferimento di calore, una ridotta reattività con i materiali circostanti, una potenziale variazione di volume ininfluenza

---

<sup>4</sup> Il super-raffreddamento si verifica quando la fase liquida di un PCM non solidifica alla temperatura prevista, ma raggiunge temperature inferiori al punto di congelamento prima di solidificare effettivamente. Questo fenomeno costituisce un difetto in quanto altera la temperatura di cambiamento di fase [10].

sulla struttura circostante ed infine la non necessità di protezione dalla distruzione grazie alle piccole dimensioni degli elementi. Questa modalità permette inoltre di aggiungere il PCM direttamente all'interno dei materiali da costruzione (calcestruzzo, gesso) senza il rischio di perdite. In questo caso gli unici inconvenienti sono l'inferiore capacità di stoccaggio di calore latente per unità di volume, un peso unitario maggiore rispetto al PCM puro e la riduzione della resistenza meccanica del materiale nel quale avviene l'aggiunta di microcapsule [10].



Fig. 5 PCM micro-incapsulato con nucleo in cera e guscio polimerico (a sinistra). PCM micro-incapsulato disperso in un liquido e in una polvere (a destra). Fonte: [10]

Il secondo metodo si riferisce a PCM incapsulati in diverse tipologie di contenitori (tubi, sfere, pannelli) [Fig. 6] i quali possono essere incorporati nei materiali da costruzione o inseriti all'interno di stratigrafie ben definite. Per quanto concerne le dimensioni, esse sono generalmente superiori ad 1 cm e devono essere abbastanza resistenti alla distruzione o perforazione. Inoltre, trattandosi di elementi che devono essere integrati nella struttura degli edifici risultano più costosi. Infine, poiché i PCM puri al loro interno sono caratterizzati da una bassa conducibilità termica, uno svantaggio del macro-incapsulamento è la tendenza a solidificare/fondere ai bordi che provoca un più lento assorbimento e rilascio di energia [10].



Fig. 6 Esempi di PCM macro-incapsulati. Fonte: [10]

Infine, l'ultimo aspetto importante in questa panoramica sui materiali a cambiamento di fase è la **varietà di applicazioni in edilizia**. I PCM sono disponibili sottoforma di

pannelli per pareti, piastrelle per pavimenti, sistemi di ventilazione, tappetini e tubi e come riportato da Zhu et al. nell'articolo *Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review* [11], possono essere suddivisi in quattro categorie di applicazione:

- **I sistemi di *free cooling*.** Essi funzionano conservando il fresco all'esterno (per es. durante la notte) e rilasciando il fresco all'interno durante il giorno.
- **Lo spostamento del carico di picco.** Come mostrato in Fig. 7 i PCM possono essere utilizzati per spostare ed attenuare i carichi di picco che colpiscono durante il giorno mettendo sottopressione la rete elettrica e richiedendo un dimensionamento dei sistemi di ventilazione, riscaldamento e condizionamento dell'aria.
- **I sistemi attivi.** I PCM possono essere integrati all'interno di sistemi attivi (sistemi a pompa di calore, sistemi di recupero del calore, sistemi di riscaldamento a pavimento etc.) per ridurre il carico di punta per esempio;
- **I sistemi passivi.** In maniera analoga, i PCM vengono anche integrati nei sistemi passivi degli involucri edilizi leggeri per aumentare la loro inerzia termica.

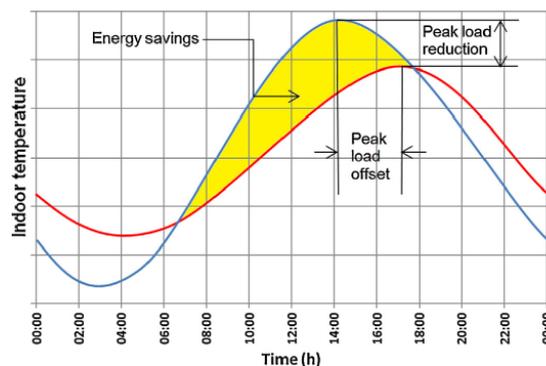


Fig. 7 Spostamento e riduzione del carico di picco. Fonte: [10]

Oltre a queste applicazioni un vantaggio indiscusso legato all'utilizzo di PCM in edilizia è la loro capacità di **aumentare il comfort termico** per compensare le fluttuazioni di temperatura [10].

Nel caso specifico dell'attività di ricerca descritta in questo elaborato sono stati presi in considerazione sia PCM organici a base di paraffina sia PCM inorganici a base di sali idrati. In entrambi i casi, i materiali a cambiamento di fase analizzati e riportati in *Appendice capitolo 2* sono macro-incapsulati all'interno di differenti pannelli di alluminio o di plastica. L'applicazione ipotizzata per essi consiste nella loro integrazione all'interno di stratigrafie ben studiate, alcune delle quali costituiscono dei sistemi passivi ed altre dei sistemi attivi caratterizzati dalla presenza di pannelli fotovoltaici integrati

nel modulo di facciata e connessi a degli elementi riscaldanti, utilizzati sia per l'attivazione dei materiali a cambiamento di fase, sia per il condizionamento degli ambienti interni.

### 2. 3. 2 VIP (Vacuum Insulation panel)

I pannelli isolanti sottovuoto (VIP) rappresentano una promettente soluzione di isolamento termico ad alte prestazioni per la riduzione del consumo di energia negli edifici attraverso strati sottili, caratterizzata da valori di conducibilità termica da 5 a 10 volte inferiore rispetto ai tradizionali materiali isolanti. Nello specifico, si tratta di pannelli costituiti da un'**anima porosa** (materiale di riempimento) avvolta da una un **involucro** avente la funzione di barriera con tenuta all'aria ed al vapore (laminato ad alta resistenza) [12]. La Fig. 8 riporta uno schema di un VIP. In essa si può osservare la struttura a pori aperti che consente la fuoriuscita dell'aria e la creazione del vuoto; il rivestimento caratterizzato da una stratificazione di layers necessaria affinché il pannello mantenga le sue proprietà termoisolanti nel tempo e l'aggiunta di particolari sostanze chimiche chiamate *getter* o *essiccanti*.

Queste vengono utilizzate per prolungare la vita utile dei VIP in quanto garantiscono l'assorbimento di gas (*getter*) e umidità (*essiccanti*).

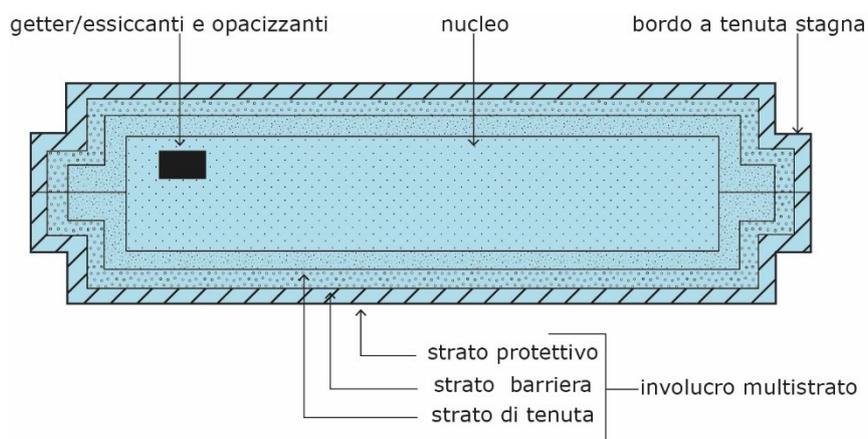


Fig. 8 Schema struttura VIP. Fonte: [12]. Rielaborazione dell'autrice.

Tra le caratteristiche influenti dei materiali utilizzati come materiali di riempimento vi è la **dimensione dei pori**: più piccoli sono i pori, meno sono i requisiti, relativi al livello di pressione, che devono essere raggiunti e mantenuti al fine di sopprimere il significativo contributo del gas sulla conducibilità totale del pannello [12].

In particolare, tra i materiali testati ed utilizzati come riempimento per i VIP è possibile operare una distinzione in funzione della caratteristica dimensione dei pori:

- Materiali con pori nella gamma dei sub-micrometri (fino a 0.5  $\mu\text{m}$ ): polveri di silice (*fumed silica*, *precipitated silica*, *silica aerogel*, miscele di polveri sottili);
- Materiali con pori di dimensioni maggiori (fino 100  $\mu\text{m}$ ): schiume organiche a celle aperte (poliuretano, polistirolo, poliammide), fibre di vetro, fibre minerali, materiali granulari inorganici (perlite, aerogel di silice granulare).

Rispetto ai materiali isolanti comunemente utilizzati, la densità dei materiali di riempimento dei VIP è più alta (compresa tra 150 e 300  $\text{kg/m}^3$ ). Questo è dovuto alla resistenza alla compressione richiesta, infatti il materiale deve resistere al carico della pressione esterna di 1 bar che equivale ad un carico di 10 tonnellate/ $\text{m}^2$ .

Per le applicazioni edilizie vengono utilizzati principalmente due tipi di VIP: **fumed silica VIP**, **fiber glass VIP**.

Nel primo caso si tratta di pannelli isolanti sottovuoto con nucleo di *fumed silica* caratterizzati da una conducibilità termica al centro del pannello che varia da 0.004 e 0.0048  $\text{W/mK}$  in condizioni ottimali. Tali valori si riducono a 0.02  $\text{W/mK}$  in caso di perforazione del pannello e di conseguenza di perdita del vuoto e a 0.008  $\text{W/mK}$  se si tiene conto degli effetti dei ponti termici dovuti ai bordi e dell'invecchiamento (25 anni) del pannello. La silice pirogenica presenta numerosi vantaggi che la rendono una buona scelta per le applicazioni in edilizia: è atossica, incombustibile e riciclabile, non rilascia sostanze nocive in ambiente e funziona come materiale essicante assorbendo il vapore acqueo che permea attraverso l'involucro. Tuttavia, presenta altresì degli svantaggi poiché non è in grado di bloccare in maniera ottimale la radiazione termica, motivo per il quale vengono solitamente aggiunti degli opacizzanti IR [12].

Nel secondo caso, il materiale che costituisce il nucleo dei pannelli è la fibra di vetro la quale garantisce valori di conducibilità termica anche inferiori a 0.002  $\text{W/mK}$ . Pertanto, i glass fiber VIP sono caratterizzati da un isolamento termico circa doppio rispetto ai fumed silica VIP. Tuttavia, in caso di perforazione del pannello la conducibilità termica peggiora maggiormente raggiungendo valori di 0.040  $\text{W/mK}$ . Inoltre, per quanto questo materiale sia più economico di quello precedente, la durata di vita utile di VIP con nucleo in fibra di vetro è decisamente più bassa di quella dei fumed silica VIP ed è circa di 15 anni [12].

Un'ulteriore differenza si può riscontrare dal punto di vista dell'**involucro**. La scelta di questo aspetto dipende da numerosi fattori: l'applicazione finale dei pannelli, il tipo di nucleo, le dimensioni dei VIP e le condizioni ambientali (temperatura, umidità ed esposizione ai raggi UV). In linea generale si distinguono due tipologie di involucro [12], rappresentate in Fig. 9 :

- Involucro realizzato con foglio di **alluminio laminato** (AF - laminated Aluminium Foil). Esso consiste in un foglio di alluminio con spessore di 5-

10  $\mu\text{m}$  combinato ad una pellicola di polietilene (PET) e ad uno strato di copertura per la protezione del foglio di alluminio dai danni meccanici. Questa tipologia di rivestimento del nucleo consente di soddisfare le prestazioni termiche richieste dal VIP ma, allo stesso tempo, causa significativi ponti termici in corrispondenza dei bordi del pannello;

- Involucro costituito da **pellicole di alluminio metallizzate** (MF – multilayer high barrier film with Metalized Films). Esso è caratterizzato da due o più strati di pellicole polimeriche metallizzate in alluminio e laminate tra loro con un processo di laminazione adesiva. Anche in questo caso viene solitamente accoppiata una pellicola sigillante di polietilene (PET). Dal momento che lo spessore dell'alluminio metallizzato è decisamente inferiore, il conseguente effetto dei ponti termici legati alle cuciture è significativamente più basso.

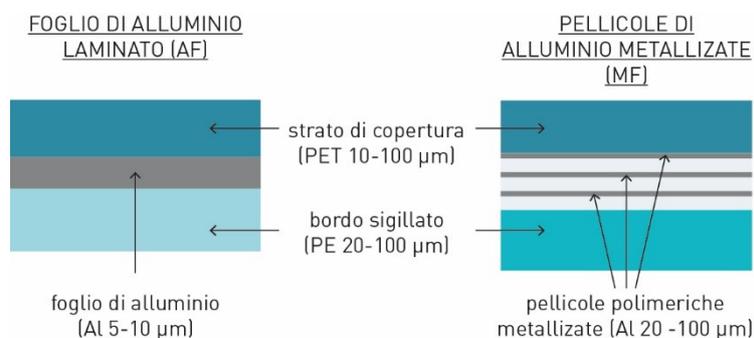


Fig. 9 Tipologie di involucro dei VIP. Fonte: [12]. Rielaborazione dell'autrice

In particolare, nel caso dei fumed silica VIP vengono utilizzate tipologie di involucro con film metallizzati (MF), al contrario, per i glass fiber VIP film di alluminio laminati [12]. Dal punto di vista delle **applicazioni edilizie**, uno dei principali vantaggi [Tabella 2] nell'utilizzo di pannelli isolanti sottovuoto è la riduzione dello spessore degli strati isolanti rispetto ai tradizionali materiali di isolamento termico grazie alla loro conducibilità termica, la quale essendo inferiore di 5-10 volte consente un equivalente diminuzione in termini di spessore [13]. Questo aspetto è particolarmente evidente in Fig. 10, nella quale si pongono a confronto i valori di conducibilità termica di materiali termo-isolanti convenzionali e innovativi.

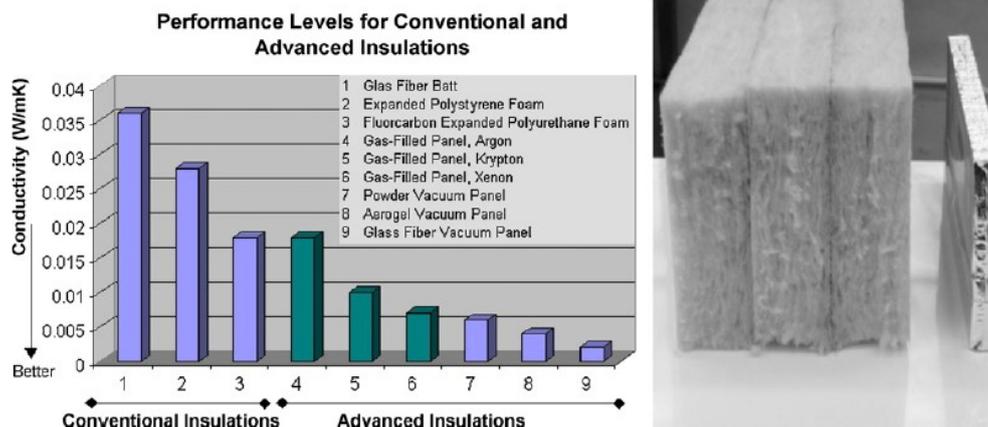


Fig. 10 Confronto (a sinistra) tra le conducibilità termiche di materiali isolanti convenzionali e avanzati e (a destra) tra lo spessore richiesto per l'isolamento convenzionale con della lana di vetro e un VIP.

Fonte: [13]

Tuttavia, per l'applicazione dei VIP, si deve porre attenzione ad alcuni svantaggi [Tabella 2] rispetto ai tradizionali materiali termo-isolanti [13].

**Tabella 2: Vantaggi e svantaggi VIP**

Vantaggi	Svantaggi
Isolamento termico ad alte prestazioni	Molto fragile per cui necessita di protezione contro la perforazione
Maggiore superficie pavimentata	Perde le proprie prestazioni termiche nel tempo
Ristrutturazione adeguata degli edifici con forti restrizioni	Durata limitata che implica la sostituzione
Possibilità di creazione di <i>isolamento termico a ponte</i> laddove non vi sia spazio a sufficienza	Prestazioni termiche effettive ridotte a causa dei ponti termici dovuti all'involucro
Unico materiale che attualmente garantisce i valori di isolamento termico richiesti da normativa in soli 4 cm	Aumento del ponte termico strutturale dovuto all'involucro
Una più bassa temperatura di esercizio aumenta le prestazioni termiche (vantaggioso per i paesi nordici)	Pannelli non flessibili e adattabili in loco (taglio pannelli)
	Imprecisione di produzione delle dimensioni dei pannelli

Tra le applicazioni più comuni rientrano:

- Isolamento di edifici esistenti all'interno o all'esterno dell'involucro edilizio originario;
- Applicazione di VIP all'interno di pannelli sandwich (VIS – vacuum insulation sandwich) utilizzati in corrispondenza di telai di porte e finestre, di facciate continue e pareti non portanti;
- Utilizzo di VIP su tetti piani, logge, terrazze e pavimenti interni laddove vi sia uno spazio limitato per lo strato isolante;
- Isolamento principale per involucri edilizi di edifici ex-novo. In questo caso la stratigrafia deve essere pre-assemblata in anticipo per garantire il corretto trattamento dei VIP;
- Impiego di VIP negli impianti edilizi (isolamento delle tubature, isolamento dei cilindri di acqua calda o sotto-isolamento del riscaldamento a pavimento).

Nel caso specifico dell'analisi a scala di materiale effettuata, sono stati presi in considerazione due differenti tipologie di VIP, uno con il nucleo in fumed silica ed uno con riempimento in fibre di vetro. Nel primo caso, trattandosi di un pannello caratterizzato da un valore di conducibilità più elevato, il pannello è caratterizzato da uno spessore superiore rispetto al secondo, al fine di garantire lo stesso livello di isolamento termico all'interno delle configurazioni studiate e riportate nel capitolo 4.

### 2. 3. 3 GFP (Gas filled panel)

Un'altra soluzione di pannelli termo-isolanti ad alte prestazioni per applicazioni edilizie sono i gas filled panel (GFP), i quali, però, rispetto ai VIP sono caratterizzati da valori di conducibilità termica maggiori.

“I GFP sono pannelli costituiti da un **involucro ermetico esterno** che funge da barriera e da una **struttura interna a diaframma** che contiene un **gas**. L'involucro a bassa emissività viene utilizzato per racchiudere il gas e per diminuire il trasferimento di calore dovuto all'irraggiamento, mentre la struttura a bassa emissività del diaframma ha la funzione di ridurre la convezione del gas e l'irraggiamento”[14].



Fig. 11 Struttura di un GFP. Fonte:[14]

Le prestazioni termiche di questa tipologia di elementi isolanti dipendono in primo luogo dal gas contenuto all'interno, sul quale si basa il meccanismo del trasferimento di calore del pannello. In particolare, la scelta del gas da inserire all'interno, il quale è caratterizzato da una conducibilità termica minore di quella dell'aria, deve tener conto dei seguenti principi: un gas con un peso molecolare più elevato ha una minore conducibilità termica ed i gas monoatomici (gas nobili) hanno una conducibilità termica minore rispetto ai gas poliatomici a parità di peso molecolare. Tuttavia, la conducibilità termica non è l'unico parametro da prendere in considerazione, poiché è importante tener conto di ulteriori aspetti [14]:

- i gas non devono essere dei gas climalternanti, ovvero gas atmosferici in grado di assorbire ed emettere nello spettro dell'infrarosso;
- devono essere stabili;
- la loro produzione deve essere rispettosa dell'ambiente;
- non devono essere tossici né infiammabili.

Inoltre, negli ultimi anni l'attenzione dei ricercatori si è concentrata sui **gas nobili inerti**, quali Argon (Ar), Krypton (Kr) e Xenon (Xe), poiché possono essere estratti dall'atmosfera pertanto hanno un potenziale di riscaldamento globale (GWP – *global warming potential*) pari a zero [14].

Il gas è contenuto all'interno di una struttura a diaframma che riduce al minimo il trasferimento di calore convettivo del gas. Per questa compartimentazione del gas, i fogli sottili, costituiti da film polimerici metallizzati, sono assemblati secondo una forma tridimensionale a formare più strati con molte cavità. Il trasferimento di calore per irraggiamento viene ridotto utilizzando superfici a bassa emissività, le quali sono anche poco costose. La geometria della struttura a diaframma può variare fortemente ma quella esagonale è la più diffusa e di più facile produzione. Infine, le dimensioni del foglio e delle cavità formate ed il numero ottimale di strati del diaframma devono essere selezionati al fine di minimizzare la convezione di gas all'interno [14].

Per quanto concerne l'involucro esterno, si tratta di un elemento ermeticamente sigillato

avente la funzione di barriera ai gas nelle due direzioni: l'umidità e l'aria vengono convogliati all'interno del pannello, mentre il gas di riempimento viene spinto al di fuori del pannello. I materiali disponibili in commercio per la realizzazione degli involucri dei GFP sono molteplici e comprendono sia gli strati sottili di alluminio utilizzati per i VIP sia un gruppo di resine polimeriche ad alta barriera (EVOH - *viniletenolo*, PVdC - *polivinildencloruro*, PVOH - *alcool polivinilico*). Nonostante questi materiali siano risultati promettenti per le applicazioni in GFP, tuttavia non si conoscono gli effetti a lungo termine del loro utilizzo né come i fattori climatici (radiazioni nello spettro dell'ultravioletto, del visibile e dell'infrarosso, variazioni di temperatura, cicli di gelo/disgelo, acqua sotto forma di pioggia o umidità, vento, erosione, inquinamento, presenza di microrganismi, ossigeno) possano incidere sui pannelli. I fattori di invecchiamento dei polimeri utilizzati per l'involucro dei GFP possono essere suddivisi in quattro principali categorie: ambienti chimici aggressivi, shock termici, radiazioni ultraviolette e radiazioni ad alta energia. Le conseguenze dell'azione di sostanze chimiche e delle radiazioni sui pannelli sono al momento sconosciute, va però sottolineato che questi elementi potrebbero risultare irrilevanti per GFP incorporati in altri materiali o componenti edilizi. Mentre, potrebbe essere più frequente l'invecchiamento dell'involucro dovuto ad alte temperature e a danni causati da carichi meccanici. Pertanto, essendo i GFP materiali piuttosto fragili e delicati è importante porre la dovuta attenzione sia in fase di produzione sia in fase di posa in opera in cantiere. Anche in questo caso, la soluzione ideale sarebbe quella di includere questi pannelli all'interno di componenti edilizi maggiormente durevoli [14].

In particolare, in *Appendice* si riportano due pannelli:

- Il primo è un prodotto ed è composto da due laminati esterni in alluminio/polimero e cinque pellicole interne in alluminio metallizzato. Una volta espansi, gli strati interni di alluminio a bassa emissione formano una struttura a nido d'ape, all'interno della quale è inserito un gas (aria, argon, kripton, nel caso specifico sono stati utilizzati i dati di  $\lambda$  relativi al kripton) [Fig. 12 (sinistra)];
- Il secondo non è stato definito dal produttore come un GFP dal momento che al suo interno non sono contenuti specifici gas. Tuttavia, si tratta di un isolante alveolare di nuova generazione da una struttura a "nido d'ape", formata da strati complessi di polietilene espanso su pellicole metallizzate con scarsissima emissività. La struttura alveolare gli conferisce un coefficiente di conducibilità termica eccellente, una notevole leggerezza ed una resistenza meccanica elevata. Inoltre, la pellicola metallizzata color rame costituisce una barriera integrata a tenuta ermetica all'aria [Fig. 12 (destra)].

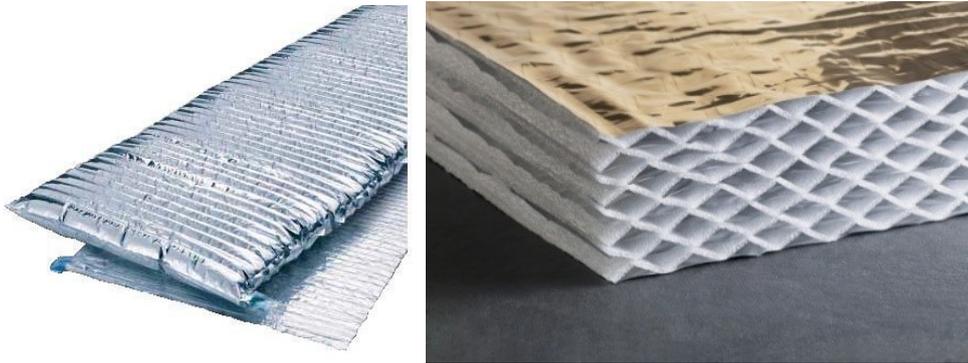


Fig. 12 GFP utilizzato nell'analisi simulativa (a sinistra). Materiale isolante multistrato riflettente (a destra). Fonti: schede tecniche materiali.

### 2. 3. 4 Perovskite

La Perovskite è un minerale che si presenta sottoforma di cristalli singoli o a gruppi formati per gemmazione [Fig. 13] ed è costituito da titanato di calcio ( $\text{CaTiO}_3$ ). Esistono quattro gruppi di questo materiale, ciascuno dei quali è caratterizzato da una struttura cristallina che conferisce loro un gran numero di proprietà: ferroelettriche, piezoelettriche, magnetiche e magnetoelettriche, piroelettriche nonché optoelettroniche e di superconduzione [15],[16].

Inoltre, la sua composizione chimica rende la Perovskite particolarmente efficiente nell'assorbimento della luce, motivo per il quale negli ultimi anni è stata studiata a fondo nell'ambito delle **celle solari** (PSC – Perovskite Solar Cells) [Fig. 13] e dei **pannelli fotovoltaici integrati nell'edificio** (BIPV) [17]. “La sua capacità di assorbire la luce fa sì che le cariche generate dalla luce catturata dai PSC viaggino per distanze maggiori di  $1 \mu\text{m}$ , una distanza enorme nel mondo delle nano-tecnologie. Questo consente la permanenza della carica per un tempo superiore all'interno del pannello, dunque, un maggior accumulo di energia”[16].



Fig. 13 Cristalli di Perovskite (a sinistra). Fonte:[15].Cella solare in Perovskite (a destra). Fonte: [20]

In particolare, la Perovskite, presenta numerosi punti di forza:

- **Costi di produzione inferiori** rispetto a quelli dei pannelli fotovoltaici in silicio attualmente utilizzati. Questo è dovuto all'abbondanza del materiale e ad un **metodo di fabbricazione più semplice**, poiché avviene a basse temperature ed è estendibile su larga scala [16];
- **Spessore esiguo** del pannello (minore di 1  $\mu\text{m}$ ). A parità di quantità di luce assorbita, i pannelli in silicio hanno uno spessore di 180  $\mu\text{m}$ . "Ciò è possibile in quanto le celle dei PSC possono essere realizzate spargendo il pigmento su una lamina di vetro o metallo, utilizzando pochi altri strati di materiali atti a facilitare il movimento degli elettroni attraverso la cella"[16];
- Possibilità di realizzare **PSC semitrasparenti** (ST). Tali celle ST hanno eccitanti applicazioni future nell'ambito del fotovoltaico integrato negli edifici (BIPV), delle colorazioni per scopi estetici, dell'elettronica indossabile e dei veicoli fotovoltaici [17];
- **Efficienza di potenza di conversione** (PCE – Power Conversion Efficiency) **elevata**. Questo parametro, inizialmente molto basso, è passato dal 3.8% (2009) al 25.2% (2019). Tale miglioramento è stato attribuito all'elevato coefficiente di assorbimento, alla debole energia di legame dell'eccitone e ad una elevata lunghezza di diffusione di fase della Perovskite [18];
- **Possibilità di utilizzare la versione sintetica della Perovskite**, realizzata con materiali poco costosi ed abbondanti nella crosta terrestre. Secondo alcuni ricercatori della Oxford PV, ciò permette di **migliorare l'efficienza solare**, in quanto i composti sintetici della Perovskite funzionano meglio del Silicio quando c'è ombra, nelle giornate nuvolose o addirittura all'interno degli edifici [16].

Tuttavia, sebbene sia stato raggiunto un notevole livello in termini di prestazioni dei dispositivi PSC esistono ancora problemi critici per il raggiungimento di ulteriori sviluppi dei sistemi. Si tratta di limiti legati all'Instabilità della Perovskite quando si espone ad un'illuminazione continua, all'umidità e a temperature elevate.

Recenti studi hanno comunque permesso dei progressi nel potenziamento delle PSC con capacità di auto-guarigione per migliorare efficacemente la stabilità e la durata a lungo termine dei dispositivi [18]. Pertanto, si tratta di soluzioni estremamente innovative sulle quali i ricercatori stanno effettuando numerosi studi.

---

### 3. Individuazione della tipologia edilizia target all'interno del patrimonio edilizio europeo

L'obiettivo di questo capitolo è quello di individuare il patrimonio edilizio target, ovvero la tipologia edilizia alla quale si addicono i pannelli studiati ed analizzati in questo elaborato. Senza dubbio la tecnologia alla quale si rifanno è quella della facciata continua, ovvero la tipologia di facciata più comune e diffusa negli edifici multipiano per uffici a partire dagli '50 del Novecento fino ad ora.

Questi pannelli possono essere utilizzati sia per la realizzazione di edifici ex-novo sia per interventi di retrofit, per la riqualificazione energetica di edifici esistenti. Come noto, infatti, "le grandi superfici vetrate presentano alcune sfide in termini di isolamento termico o di guadagno di calore" soprattutto negli edifici costruiti in Europa prima degli anni '70 quando le normative relative ad un miglioramento delle prestazioni per il comfort termico non erano ancora in vigore.[22]

Pertanto, questa analisi si propone di analizzare il patrimonio edilizio europeo esistente, dal punto di vista della funzione, della tipologia, dell'età e dei metodi di costruzione al fine di fornire dei dati, in termini qualitativi e quantitativi, circa la percentuale di patrimonio edilizio europeo su cui si potrebbe intervenire con degli interventi di retrofit che prevedono l'utilizzo dei suddetti pannelli.

#### 3. 1 La facciata continua

La facciata continua è una tecnologia costruttiva che nasce a cavallo del XIX e del XX secolo contemporaneamente all'invenzione della struttura a telaio che utilizza pilastri e travi di cemento, ferro e acciaio in sostituzione ai tradizionali sistemi in muratura. In un contesto fortemente influenzato dalla Rivoluzione Industriale e dalla conseguente diffusione della produzione di massa di componenti realizzati con sistemi meccanizzati, la facciata continua diventa non solo il "mezzo per una diffusione capillare di nuove realizzazioni tecniche in edilizia ma anche il catalizzatore di nuove forme

dell'architettura".[23]

Le prime sperimentazioni della facciata si devono a un gruppo di architetti, noti come la Scuola di Chicago, i quali iniziarono a progettare edifici sviluppati in altezza con strutture a telaio e sistemi di tamponamento non portanti di piccole dimensioni al fine di massimizzare la superficie delle aperture finestrate.

Dalla fine degli anni '40 attraverso gli anni '60, questa tecnologia è stata metodicamente indagata ed esplorata in diversi edifici tipi, su un'ampia gamma di scale e in varie città di tutto il mondo, ma ha trovato la sua espressione più influente in tre edifici per uffici costruiti a New York negli anni '50: lo United Nations Secretariat , la Lever House, e il Seagram Building [Fig. 14].



Fig. 14: United Nations Secretariat, 1950 (a sinistra). Lever House, New York, 1952 (al centro). Seagram Building, New York, 1958 (a destra). Fonte:[23].

A partire dagli anni '60 fino ai giorni nostri, l'applicazione della facciata continua è stata caratterizzata da diverse strategie, dovute in parte alle vicissitudini della moda architettonica ed in parte alle conseguenze del crescente impatto ambientale globale e delle forze economiche. Ogni decennio ha portato con sé nuove dottrine del design – il postmodernismo, l'architettura high-tech, il decostruttivismo, la green architecture – e conseguentemente il concetto di facciata continua si è modificato.

Infine, le crisi energetiche degli anni Settanta e l'inizio del XXI secolo hanno portato ad una rivalutazione continua dell'architettura, maggiormente focalizzata sulle prestazioni degli edifici. Tuttavia, la mutevolezza della facciata continua ha dimostrato che si tratta di una tecnologia in grado di adattarsi a tutte le strategie di progettazione, agli impulsi stilistici ed ai progressi della tecnologia.

Dunque, dopo più di un secolo di sviluppo, la struttura a telaio e il suo corollario, la curtain-wall, continuano a dominare l'architettura di oggi.[23]

In termini generali la facciata continua (in inglese curtain-wall: letteralmente muro-tenda) può essere definita come un sistema di tamponatura esterna che consente la realizzazione di facciate autoportanti, in grado di resistere al proprio peso ed alle spinte orizzontali causate dal vento e dai terremoti, addossate a edifici con struttura a telaio in acciaio o cemento armato, caratterizzati da spazi modulari ripetuti. Nella pratica corrente, la facciata continua è un sistema progettato con diversi componenti: un sistema realizzato con montanti e traversi metallici e pannelli, i quali possono essere trasparenti o opachi. [22]



Fig. 15 Frame di facciata continua come cornice caratterizzata da variazioni multiple in termini di materiali e forme. [23]

### 3. 2 Analisi del patrimonio edilizio europeo

L'analisi e le considerazioni riguardo il patrimonio edilizio europeo costituiscono un punto chiave dell'elaborato in quanto hanno consentito di condurre una sorta di indagine di mercato che ha come obiettivo l'identificazione di una percentuale di edifici su cui questi pannelli possono essere applicati nell'ambito di un intervento di retrofit.

“La disponibilità e la qualità dei dati riferiti al patrimonio edilizio europeo, nonostante siano cresciute rispetto agli anni passati per via di una serie di iniziative promosse dall'Unione Europea, sono ancora limitate.” [22].

Tuttavia, si possono trovare informazioni sufficienti presso la sezione “Building Stock Observatory” del sito ufficiale della commissione europea [24], la quale colleziona dati a partire da diverse istituzioni nazionali e regionali, ufficiali e non.

In linea generale è possibile operare una prima classificazione suddividendo il patrimonio edilizio europeo in **edifici residenziali**, che costituiscono il 91% ed occupano il 75% della superficie totale; e in **non residenziali**. Il settore non residenziale, che costituisce solamente il 9% dell'intero patrimonio edilizio e ricopre il 25% della superficie totale, è caratterizzato da una serie eterogenea di settori: **uffici pubblici e privati**, immobili per la vendita all'ingrosso e al dettaglio, hotel e ristoranti, edifici per l'assistenza sanitaria, stabili per l'istruzione ed altro [Fig. 16].

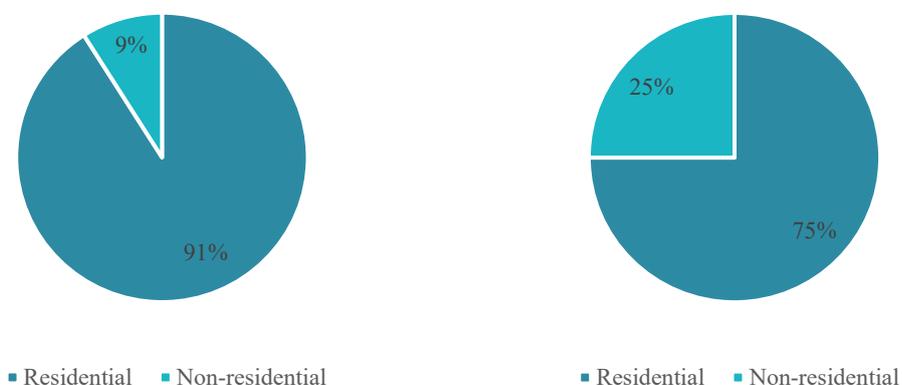


Grafico 1: Patrimonio edilizio europeo (a sinistra). Distribuzione aree di edifici residenziali e non residenziali in Europa (a destra). Fonte:EU Building Stock Observatory [24]. Rielaborazione delle autrici.

Tra questi, gli uffici (24%) e gli edifici per la vendita all'ingrosso e al dettaglio (23%) occupano quasi il 50% in termini di superficie. Seguono poi gli immobili destinati all'educazione (18%) ed infine le categorie restanti che si aggirano intorno al 10%.

Il Grafico 2 mostra la distribuzione degli stabili non residenziali in termini di superficie occupata:

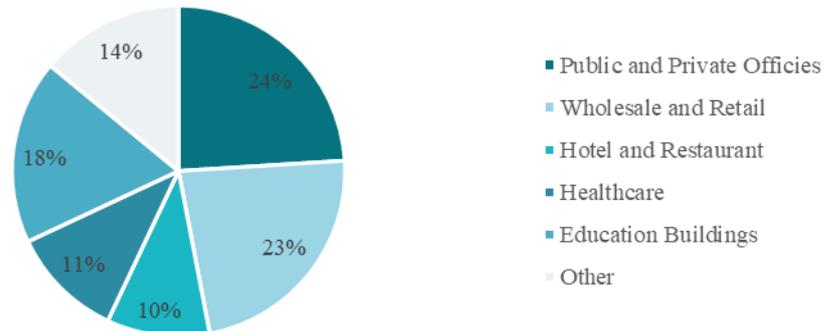


Grafico 2: Distribuzione aree delle differenti tipologie di edifici non residenziali in Europa. Fonte: EU Building Stock Observatory[24]. Rielaborazione dell'autrice.

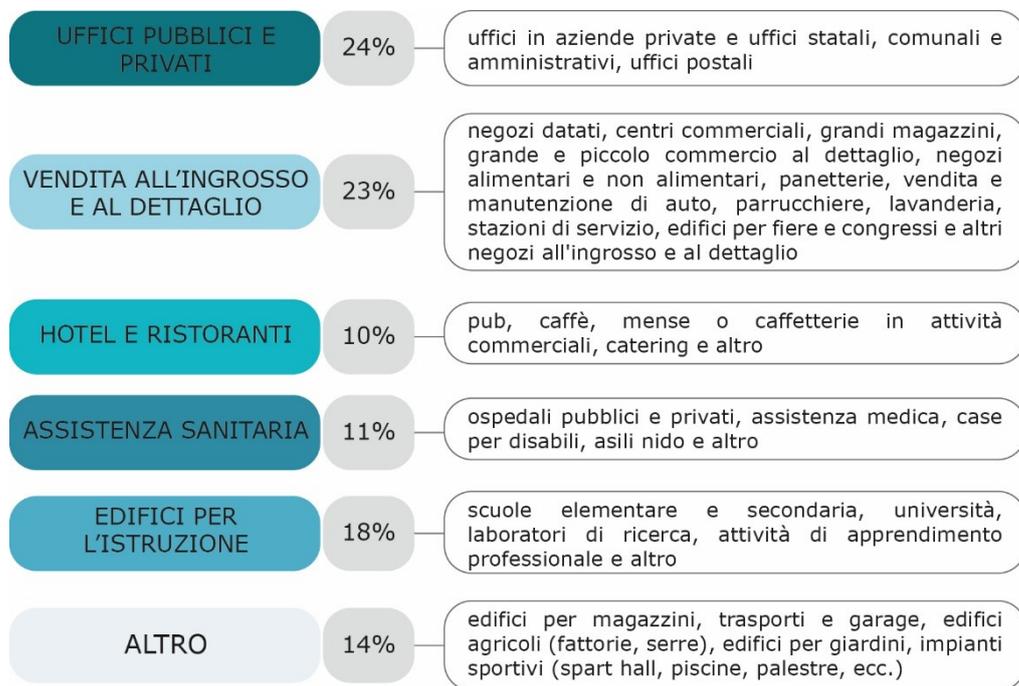


Fig. 16 Definizione dei settori non residenziali del patrimonio edilizio europeo[22].

Una volta nota la percentuale di edifici adibiti ad uffici in Europa è stato necessario effettuare un'analisi ulteriore relativa agli anni di costruzione di questi immobili, al fine di selezionare una percentuale più ristretta che si riferisca al periodo nel quale gli edifici realizzati secondo la tecnologia della facciata continua erano quelli più diffusi.

In termini generali, il patrimonio edilizio per uffici è più recente di quello residenziale, la cui costruzione massiva risale per lo più ai primi anni Settanta, quando la ricostruzione post bellica degli anni Cinquanta e Sessanta fu caratterizzata dalla necessità di un'attività edilizia rapida ed economica.

La costruzione di stabili per uffici varia da nazione a nazione, tuttavia, osservando il Grafico 3 è possibile affermare che una larga porzione del patrimonio immobiliare per uffici è stato realizzato prima del 1980: in particolare, la costruzione è cresciuta a partire dagli anni '60 fino a raggiungere un piccolo negli anni '90. [22]

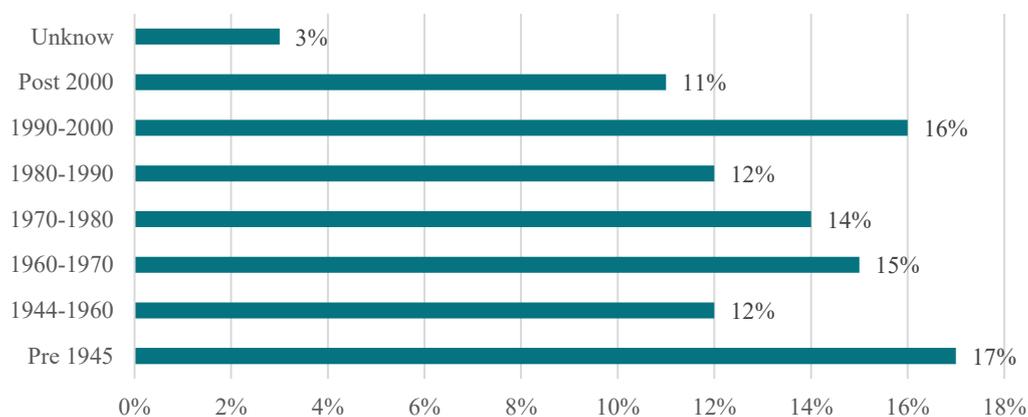


Grafico 3: Distribuzione media della costruzione di edifici ad uffici per fasce temporali. Fonte: E. Altunkeyik (2019) [22]. Riellaborazione delle autrici

Inoltre, come riporta E. Altunkeyik nel proprio elaborato *"Curtain Wall. Analysis of European Office Buildings with Design and Retrofitting Strategies of the Curtain Wall"* [22], è importante analizzare questi edifici dal punto di vista delle tecnologie costruttive adottate e dei materiali utilizzati. Tendenzialmente la maggior parte dei paesi europei presenta un livello uniforme circa le modalità costruttive, infatti, il materiale più utilizzato è senza dubbio il calcestruzzo.

"L'analisi effettuata dal progetto Inspire (2016) evidenzia come gli edifici più vecchi, costruiti prima del 1960, fossero spesso realizzati in muratura, con pareti strutturali in mattoni e pareti in muratura faccia a vista (patrimonio precedente al 1945) o strutture in calcestruzzo con pareti in mattoni o in calcestruzzo (1945-1964). Negli anni successivi, in seguito alla diffusione delle prime facciate continue, le strutture in calcestruzzo hanno continuato ad essere predominanti (1970-1980), tuttavia l'utilizzo di vetrate è progressivamente aumentato. Cominciano inoltre a comparire anche le pareti

sandwich prefabbricate.

Infine, gli edifici per uffici realizzati **dopo gli anni '80** sono quelli realizzati secondo la tecnologia della **facciata continua**, la quale diventerà la più comune e diffusa sino ai giorni nostri.”[22]

Pertanto, gli edifici per uffici in Europa su cui si potrebbe potenzialmente intervenire con i componenti avanzati opachi, studiati in questo elaborato, sono quelli costruiti a partire dagli anni 80 del Novecento fino alla fine del Millennio, quando sono emerse le prime normative in termini di isolamento e comfort termico. Essi costituiscono circa il 28% (12% + 16%) del patrimonio edilizio per uffici in Europa, la quale a sua volta è caratterizzata da una superficie del 24% di occupazione da parte di uffici pubblici e privati.

Si tratta dunque di una **percentuale piuttosto discreta** in relazione all'intero patrimonio edilizio europeo tuttavia importante se si pensa che:

- gran parte della popolazione trascorre 1/3 della loro quotidianità all'interno di uffici, nei quali spesso non sono garantite determinate condizioni di comfort;
- gli edifici residenziali e non residenziali sono responsabili del 40% di consumo di energia in Europa.

### 3. 3 Analisi della città di Torino

Un'ultima analisi è stata condotta sulla **città di Torino**. In questo caso l'obiettivo è stato quello di mappare all'interno della città gli **edifici multipiano non residenziali** costruiti in un **arco temporale** che si estende dal **secondo dopoguerra fino agli anni '90**. È proprio in questo periodo che sono state emanate le prime norme italiane relative al contenimento del consumo energetico e all'isolamento termico degli edifici. Prima di allora le questioni dell'impatto ambientale e del risparmio energetico non avevano molta risonanza in ambito edilizio, pertanto "venivano costruiti edifici molto disperdenti, scarsamente isolati termicamente e con sistemi di riscaldamento poco efficienti"[25]. In questo contesto due sono le leggi importanti per le innovazioni introdotte dal punto di vista energetico negli edifici:

- la **Legge n. 373/1976** "*Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*", la quale "stabiliva i primi vincoli per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici e le prescrizioni per l'isolamento termico degli edifici. Inoltre, introduceva una serie di grandezze, quali il coefficiente di dispersione volumico  $C_d$ , i gradi giorno, le zone climatiche e il rapporto S/V tra superficie disperdente e il volume riscaldato"[26].
- la **Legge n. 10/1991** "*Norme per l'attuazione del Piano Energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*"  
Essa è stata "la prima legge quadro finalizzata a regolare le modalità progettuali e la gestione del sistema edificio/impianto, definendo obiettivi precisi e imponendo determinati limiti legati alla tenuta dell'isolamento termico delle pareti e dei solai e al rendimento dei sistemi impiantistici. In particolare, è importante ricordare l'art. 26 comma 7 che prevedeva che per gli edifici di proprietà pubblica o adibiti ad uso pubblico fosse obbligatorio soddisfare il fabbisogno energetico, favorendo il ricorso a fonti rinnovabili di energia, salvo impedimenti di natura tecnica e economica" [26].

Pertanto, sulla base di quanto appena esposto, è stata effettuata una ricerca in bibliografia degli edifici torinesi precedenti all'introduzione di tali leggi. I risultati, riportati in Tabella 3, dimostrano che gli immobili individuati sono per lo più architetture realizzate prima degli anni Settanta e caratterizzate da un elevato pregio architettonico. Inoltre, la maggior parte degli immobili sono caratterizzati da strutture in calcestruzzo armato ed elementi di tamponamento in cemento o muratura. Di conseguenza sono pochi gli edifici nella città su cui si potrebbe operare con interventi di retrofit. Tuttavia, è possibile affermare che Torino è altresì dotata di una serie di

edifici per uffici caratterizzata dalla tecnologia della facciata continua in corrispondenza delle aree produttive della città. Si tratta di edifici "mediocri" che raramente sono riportati in letteratura, costruiti a partire dagli anni Settanta quando la tipologia di uffici più diffusa, non solo in Italia ma anche in Europa, era quella dei palazzi con facciata continua. Si trattava di fabbricati, sviluppati in altezza, caratterizzati da uno scarso livello di isolamento termico e da un elevato consumo di energia.

Pertanto, il patrimonio edilizio per uffici della città di Torino è costituito non solo da edifici multipiano di elevato pregio architettonico che sorgono nei pressi del centro della città, bensì da numerosi immobili di "importanza minore" sparsi nelle aree più limitrofe della città, quelle che ne costituiscono tutt'ora l'area industriale e produttiva. Non è tuttavia facile definire una percentuale di questi edifici a causa della scarsità di informazioni ad essi relativi.

Tabella 3: Rassegna edifici multipiano non residenziali di Torino

N°	EDIFICIO	ANNO	DESTINAZIONE D'USO	PROGETTISTI	POSIZIONE	DESCRIZIONE	FONTI
1	Palazzo Lancia 	1955	Uffici	Nino Rosani, studio Ponti Fornaroli, Rosselli, Danusso, Pugno	Via Vincenzo Lancia	“Edificio a ponte caratterizzato da una struttura a maglia quadrata compresa tra due testate a diedro in cemento armato”[5]. Altezza: 70 m (17 piani)	[1] [2] [3] [4] [5]
2	Palazzo per uffici RIV 	1955	Uffici: ex sede per la direzione amministrativa della RIV, oggi Toro Assicurazioni	Amedeo Albertini	Via Mazzini, angolo Corso Cairoli	L'edificio consta della tradizionale scansione tripartita del blocco edilizio in basamento leggermente arretrato, corpo compatto, caratterizzato da una partizione verticale in paraste in pietra bianca di Finale alternate ad aperture vetrate e coronamento vetrato sulla sommità [6]. Altezza: 10 piani	[3] [4] [6]
3	Cartiere Burgo 	1956	Uffici, attività commerciali	Gualtiero Casalegno, Piero Versano	Corso Matteotti	Edificio multipiano impostato secondo una tipologia stellare a tre corpi di fabbrica rispettivamente di nove, sette e sei piani fuori terra, concepiti per accogliere le diverse funzioni: direzioni, uffici tecnici, commerciali, finanziari, legali, segreteria e saloni di rappresentanza. L'immobile poggia su un basamento destinato a spazi commerciali ed è coperto da un tetto giardino [2].	[2]

4	<p>Palazzo Uffici Tecnici del Comune di Torino (Palazzaccio)</p> 	1956-1961	Uffici	Mario Passanti, Paolo Perona, Giovanni Garbaccio	Piazza San Giovanni	Edificio a cinque piani fuori terra caratterizzato da una struttura in cemento armato e da tamponamenti in mattoni rossi faccia a vista. Costruito in sostituzione al palazzo dei Portici di Castellamonte, ospita oggi gli uffici Tecnici del Comune di Torino.	[1] [4]
5	<p>Complesso per uffici, abitazioni, albergo</p> 	1960 (circa)	Uffici/residenze/albergo	Gino Becker	Via Giolitti, Via Pomba	“Complesso ad angolo eseguito in curtain-wall ed arricchito da un prezioso basamento in muratura e da sapienti bow-windows che in alto intersecano le falde di rame”[7].	[1] [7]
6	<p>Palazzo Nuovo</p> 	1961-1966 2014: restauro	Università	Gino Levi-Montalcini, Felice Bardelli, Sergio Hutter e Domenico Morelli	Via Sant' Ottavio	Edificio totalmente in acciaio costituito da volumi disposti su fasce parallele: <ul style="list-style-type: none"> <li>- un corpo lineare alto 28 m ospita piccole aule al primo piano, e uffici e dipartimenti nei quattro livelli soprastanti;</li> <li>- un blocco di altezza inferiore (14 m) è destinato alle aule di media grandezza ed è collegato a quello principale tramite corpi vetrati dedicati alla distribuzione;</li> </ul>	[3] [4] [8]
7	<p>Grattacielo RAI</p>	1962-1968	Uffici	Domenico Morelli, Aldo Morbelli, Sergio Hutter, Domenico Bagliani	Via Cernaia	“Edificio di 18 piani fuori terra, appoggiato su una piastra di cinque e sei livelli che occupa l'intero isolato.	[1] [3] [9]

						Lo sviluppo verticale, accentuato dalle partizioni di facciata, è concluso sulla terrazza sommitale da un'ampia pensilina che genera uno <i>scurello</i> portato alla scala dell'intero edificio. La struttura in acciaio lasciata a vista è rivestita da curtain-wall in alluminio e vetro caratterizzata da una scansione regolare ed elegantemente proporzionata"[9]. Altezza: 72 m (18 piani)	
8	Camera di commercio, industria, artigianato, architettura 	1964-1969	Palazzo per uffici e congressi	Carlo Mollino, Carlo Graffi, Alberto Galordi	Via San Francesco da Paola, Via Giolitti	"Struttura sospesa a un unico pilone centrale tramite tiranti, che si libra sopra un basamento vetrato. Alla copertura, realizzata con travi e tiranti in cemento armato precompresso, sono appesi i solai del volume sospeso. Quest'ultimo, caratterizzato da una facciata in alluminio e vetro leggermente incurvata, ospita gli uffici, mentre la grande piastra del primo piano è destinata a parcheggio"[10].	[1] [3] [10]
9	CTO 	1965	Servizi	Ufficio tecnico dell'Inail di Roma, architetti Livio Brusa e Longo	Via Zoretti	La torre si innesta su una piastra di tre piani destinata a funzioni ospedaliere ed universitarie e si sviluppa per 19 piani fuori terra. Le facciate dei lati lunghi sono costituite da grandi pannelli-serramenti a tutta altezza che tamponano la regolare maglia in calcestruzzo armato, e sono concluse in sommità da una sorta di coronamento svuotato [11]. Altezza: 75 m (19 piani)	[2] [11]

10	<p>Palazzi Uffici Sip Ex Stipel</p> 	<p>1966 2008: completa ristrutturazione interna ed esterna</p>	Uffici	Ottorino Aloiso	Corso Inghilterra	<p>Il grattacielo orizzontale, progettato originariamente da Aloiso, fu caratterizzato da una scansione verticale di leggere ed alte paraste intervallate da finestrate anch'esse verticali. "L'edificio ha subito una ristrutturazione interna ed esterna su progetto di Paolo Rosani nel 2008" [13]. Altezza: 65 m</p>	<p>[1] [2] [4] [13]</p>
11	<p>Nuovo centro di servizi dipartimentali ENEL</p> 	1971-1981	Uffici	Francesco Fasano, Ufficio Tecnico ENEL	Corso Regina Margherita 267	<p>"Edificio di "grande effetto urbano", basato sui principi dell'architettura mega-strutturale di una produzione giapponese o americana di quegli anni"[3].</p>	[3]

---

## 4. Progettazione di una facciata avanzata

### 4.1 Requisiti prestazionali

Nella definizione delle configurazioni da sviluppare per la progettazione di una facciata avanzata sono stati presi in considerazione una serie di requisiti riferiti al modulo opaco definiti nell'ambito del progetto Powerskin+:

- Valore di trasmittanza (U) per modulo opaco:  $\leq 0.098 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- Peso per unità di superficie:  $< 5 \text{ kg/m}^2$ ;
- Valore di resistenza termica del VIP migliore del 33% rispetto a quello di un PIR5 (25 mW/mK) avente lo stesso peso;
- Efficienza minima di conversione della potenza delle celle fotovoltaiche:  $\geq 12\%$
- Miglioramento della capacità di stoccaggio dell'energia fornita dai PCM: 15%.

#### 4.1.1 Requisiti aggiuntivi

Al fine di ottimizzare maggiormente i moduli opachi di facciata sono stati definiti dei parametri prestazionali aggiuntivi:

- Minimizzazione dello spessore dell'OSM6:  $< 60 \text{ mm}$ ;
- Minimizzazione dei costi di costruzione;
- Minimizzazione dei costi di manutenzione;
- Ridurre lo stress termico dei singoli strati al fine di evitare il danneggiamento dei materiali e la riduzione della loro vita utile.

---

<sup>5</sup> Con l'acronimo PIR si intende il poliuretano espanso rigido

<sup>6</sup> OSM (opaque sub-module) è la sigla con cui si identifica il modulo opaco di facciata

### 4.1.2 Stress termico

Ogni materiale utilizzato presenta dei valori limiti superati i quali si arriva ad una disfunzionalità del materiale. Per ciascuno di essi, è stata fatta una ricerca in letteratura con l'obiettivo di avere un quadro completo dei valori limite [Tabella 4].

#### *Fotovoltaico (PV)*

I pannelli fotovoltaici integrati nei moduli di facciata ipotizzati sono realizzati in Perovskite, un minerale a struttura cristallina [di cui si parla nel paragrafo 2. 3. 4 Perovskite] che sostituisce il silicio solitamente utilizzato nei sistemi fotovoltaici. La temperatura limite di questo materiale, affinché il sistema fotovoltaico produca un rendimento minimo è di 75°C, poiché superando di 55 °C i 25°C, si ottiene un rendimento nullo.

#### *Vacuum Insulation Panel (VIP)*

Questi pannelli per poter essere utilizzati in modo ottimale non devono superare i 60°C. Qualora si superi la temperatura limite si potrebbero verificare diversi meccanismi di degrado e quindi portare ad una rapida perdita delle sue proprietà meccaniche [27].

#### *Vetri laminati*

I vetri laminati, sono vetri stratificati di sicurezza costituiti da due o più lastre di vetro comune o temprato. In base alla combinazione dei vetri scelti, si ha una differenza  $\Delta T$  ammissibile o meno.

Per i vetri laminati vale il più piccolo valore di  $\Delta T$  tra i vetri utilizzati.

Ad esempio:

- il  $\Delta T$  massimo per il vetro float è di 30°C secondo lo standard britannico.
- il  $\Delta T$  massimo per il vetro completamente temprato è di 200°C
- il  $\Delta T$  massimo per il vetro chiaro (clearvision) è di 35°C [28].

#### *Shadow box*

Si tratta di una cavità sigillata che, in base alla temperatura raggiunta nell'intercapedine, può subire una deformazione.

Ad esempio, dal momento che l'uso di un vetro stratificato potrebbe limitare ulteriormente la temperatura accettabile all'interno della cavità è necessario consultare le informazioni dichiarate dal produttore relative ai limiti di temperatura del vetro stratificato prima di impiegarlo in una Shadow box.

Per le cavità non ventilate, il rischio è quello di causare la deformazione del vetro stesso o del pannello posteriore, con conseguente compromissione dell'aspetto [29].

Nel nostro caso, usando un vetro laminato potrebbe essere necessario limitare la temperatura massima della cavità al di sotto dei 77°C circa, per evitare eccessive deformazioni del laminato [30]. In alternativa potrebbe essere utilizzata una valvola di sfiato per mantenere costante la pressione della cavità.

### *Materiali a cambiamento di fase (PCM)*

I materiali a cambiamento di fase hanno la caratteristica di poter accumulare calore mantenendo inalterata la propria temperatura, garantendo così un adeguato comfort termico interno anche in climi caldi. Questo tipo di materiale va scelto quindi in base alla temperatura di fusione del PCM e in base all'utilizzo.

I PCM organici, in case di alluminio, non dovrebbero essere riscaldati a più di 65°C; mentre i PCM inorganici a base di sali idrati, in case di alluminio, se raggiungono una temperatura al di sotto di 0°C e al di sopra di 45°C possono incorrere in un degrado delle proprietà [31].

I PCM, in sacchetti "plastic film bags" a base minerale e in contenitori di plastica invece, non possono superare una temperatura massima di 60°C [dato fornito dall'azienda].

Riassumendo:

**Tabella 4: Heat stress materiali analizzati**

Fotovoltaico	< 75°C
VIP	< 50°C
Vetri laminati	Il più piccolo $\Delta T$ tra i vetri utilizzati
Shadow box	< 77°C
PCM	Aluminium_case_a < 65°C
	Aluminium_case_b < 65 °C
	Aluminium_case_c < 45°C
	Plastic film bags < 60°C
	Plastic container < 60°C

## 4.2 Configurazioni

Nella definizione delle possibili configurazioni di modulo opaco sono state ipotizzate tre differenti **tipologie di involucro opaco**: leggera, passiva e attiva.

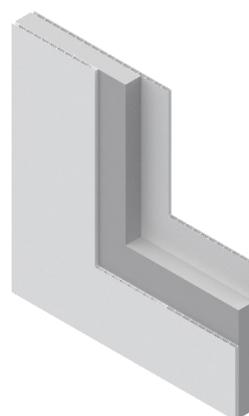
- Il sistema **leggero** (*light*) è caratterizzato da materiali che presentano densità piuttosto basse quali il policarbonato alveolare e i Gas Filled Panel.
- La configurazione **passiva** (*passive*) tenta di massimizzare gli apporti solari provenienti dall'esterno attraverso l'utilizzo di materiali innovativi come i PCM. Quest'ultimi, grazie al loro elevato calore latente di fusione/solidificazione sono in grado di accumulare/rilasciare grandi quantità di energia termica riducendo le fluttuazioni della temperatura interna e aumentando così il comfort degli utenti.
- Il sistema **attivo** (*active*) consta di elementi al suo interno come il pannello fotovoltaico (*PV*) o il tappetino termo-riscaldante (*heating foil*) che si attivano e producono energia solo esclusivamente attraverso la radiazione solare.
- La configurazione **"benchmark"** rappresenta lo stato dell'arte relativo ai componenti opachi per facciate continue ed è stato impiegato come riferimento.

Nelle tabelle di seguito si riportano le stratigrafie, suddivise nelle suddette categorie, che verranno analizzate nei capitoli successivi.

### OSM LIGHT

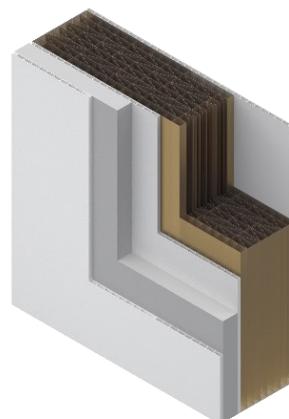
#### Configurazione 1.1.1

MATERIAL	THICKNESS
Alveolar polycarbonate	4 mm
Vip – glass fiber	20 mm
Alveolar polycarbonate	4 mm



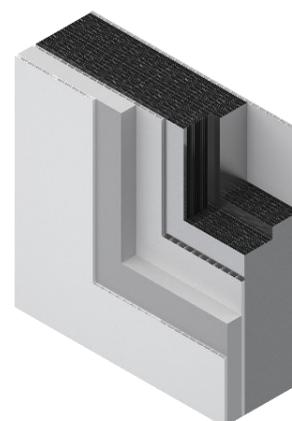
### Configurazione 1.2

MATERIAL	THICKNESS
Alveolar polycarbonate	4 mm
Vip – glass fiber	15 mm
Alveolar polycarbonate	4 mm
Multi-layer reflective insulation	75 mm
Alveolar polycarbonate	4 mm



### Configurazione 1.3

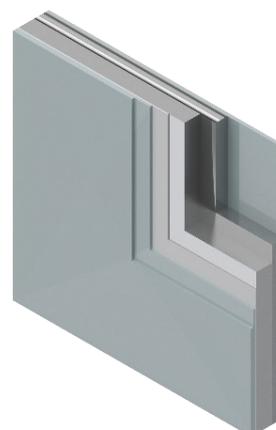
MATERIAL	THICKNESS
Alveolar polycarbonate	4 mm
Vip – glass fiber	10 mm
Alveolar polycarbonate	4 mm
Gas Filled Panel	38 mm
Gas Filled Panel	38 mm
Alveolar polycarbonate	4 mm



## OSM PASSIVE

### Configurazione 2.1.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
PEX	3 mm
VIP – glass fiber	20 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Tempered glass	4 mm



### Configurazione 2.1.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm

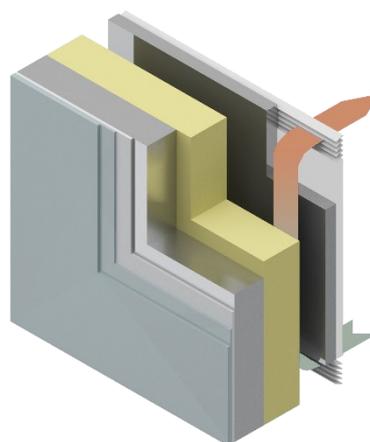
PEX	3 mm
VIP – glass fiber	20 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Tempered glass	4 mm

### Configurazione 2.2.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
PEX	3 mm
VIP – fumed silica	41 mm
Polyurethane	50 mm
Air cavity (ventilated)	35 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Gypsum board	9.5 mm

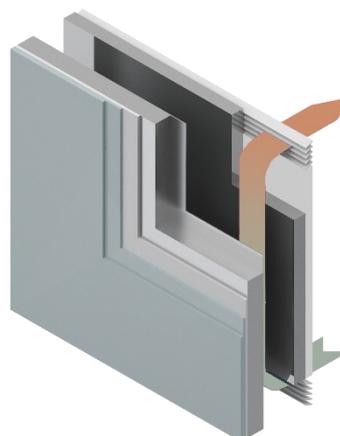
### Configurazione 2.2.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
PEX	3 mm
VIP – fumed silica	20 mm
Polyurethane	50 mm
Air cavity (ventilated)	35 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Gypsum board	9.5 mm



### Configurazione 2.3.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
PEX	3 mm
VIP – glass fiber	20 mm
Aluminium foil	0.1 mm
Air cavity (ventilated)	40 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Gypsum board	9.5 mm



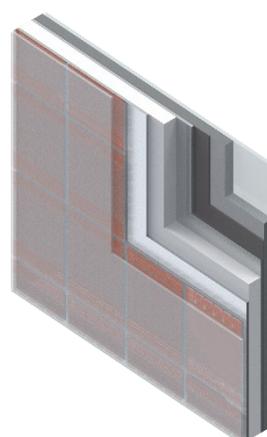
### Configurazione 2.3.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
PEX	3 mm
VIP – glass fiber	20 mm
Aluminium foil	0.1 mm
Air cavity (ventilated)	40 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Gypsum board	9.5 mm

## OSM ACTIVE

### Configurazione 3.1.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
VIP – glass fiber	14,63 mm
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Tempered glass	4 mm



Configurazione 3.1.2

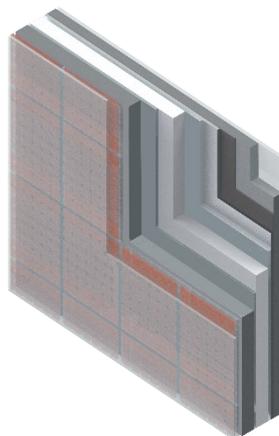
MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
VIP – glass fiber	16,63 mm
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Tempered glass	4 mm

Configurazione 3.2.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
PCM (aluminium case b)	15 mm
Tempered glass	3 mm
VIP – glass fiber	14,63 mm
Tempered glass	3 mm
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Tempered glass	4 mm

Configurazione 3.2.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
PCM (aluminium case b)	10 mm
Tempered glass	3 mm
VIP – glass fiber	14,63 mm
Tempered glass	3 mm



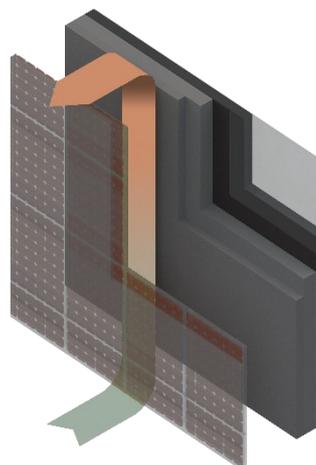
Crosslinked polyethylene (PEX)	3 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Tempered glass	4 mm

### Configurazione 3.3.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Air cavity (ventilated)	31 mm
Multi-layer reflective insulation	9 mm
VIP – glass fiber	14,63 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Aluminium foil	0.1 mm

### Configurazione 3.3.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Air cavity (ventilated)	31 mm
Multi-layer reflective insulation	9 mm
VIP – glass fiber	14,63 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Aluminium foil	0.1 mm

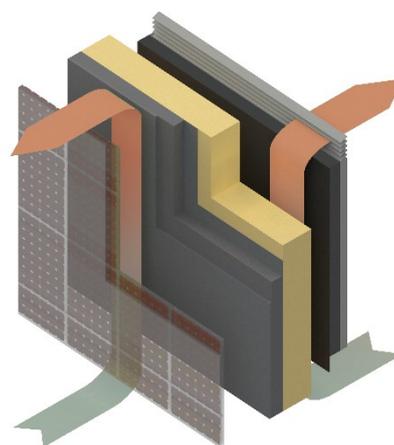


Configurazione 3.4.1

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Air cavity (ventilated)	19 mm
Multi-layer reflective insulation	9 mm
VIP – fumed silica	40 mm
Aluminium foil	0.1 mm
Polyurethane	40 mm
Air cavity (ventilated)	19 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (aluminium case a)	10 mm
Gypsum board	9.5 mm

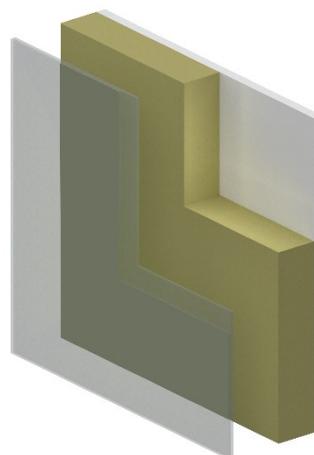
Configurazione 3.4.2

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass + PV	3+0.4+3 mm
Air cavity (ventilated)	19 mm
Aluminium foil	0.1 mm
VIP – fumed silica	40 mm
Aluminium foil	0.1 mm
Polyurethane	40 mm
Air cavity (ventilated)	19 mm
Heating foil	0.4 mm
PCM (plastic film bags)	6,8 mm
Gypsum board	9.5 mm



**BENCHMARK**

MATERIAL	THICKNESS
Laminated glass	3+3 mm
Air cavity (closed)	50 mm
Low-e	
PIR	100 mm
Low-e	
Gypsum board	9.5 mm

**4.2.1 Caratteristiche prestazionali delle configurazioni**

Nelle tabelle di seguito si riportano i risultati di calcolo relativi alle prestazioni termiche e di massa frontale delle diverse configurazioni precedentemente illustrate.

## OSM LIGHT

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U <sub>tot</sub> (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	W <sub>tot</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
1.1.1	1	Alveolar Polycarbonate	0.004	0.028	0.015	0.26	0.13	0.04	0.0935	Y	200	0.80	5.80	N
	2	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	3	Alveolar Polycarbonate	0.004		0.015	0.26					200	0.80		

1.2	1	Alveolar Polycarbonate	0.004	0.102	0.015	0.26	0.13	0.04	0.0935	Y	200	0.80	6.26	N
	2	VIP (glass fiber)	0.015		0.002	7.5					210	3.15		
	3	Alveolar Polycarbonate	0.004		0.015	0.26					200	0.80		
	4	Multi-layer reflective insulation	0.075		0.0333	2.25					9.5	0.71		
	5	Alveolar Polycarbonate	0.004		0.015	0.26					200	0.80		

1.3	1	Alveolar Polycarbonate	0.004	0.098	0.015	0.26	0.13	0.04	0.0814	Y	200	0.80	5.58	N
	2	VIP (glass fiber)	0.010		0.002	5					210	2.10		
	3	Alveolar Polycarbonate	0.004		0.015	0.26					200	0.80		
	4	GFP	0.038		0.012	3.167					14.26	0.0542		
	5	GFP	0.038		0.012	3.167					14.26	0.0542		
	6	Alveolar Polycarbonate	0.004		0.015	0.26					200	0.80		

## OSM PASSIVE

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U tot (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	W <sub>tot</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
2.1.1	1	Laminated glass exterior	0.006	0.043	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0971	Y	2500	15.00	38.10	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
	5	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

2.1.2	1	Laminated glass exterior	0.006	0.039	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0975	Y	2500	15.00	34.19	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	PCM (plastic films bags)	0.006		0.74	0.0081					815	4.89		
	5	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

2.2.1	1	Laminated glass exterior	0.006	0.155	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0731	Y	2500	15.00	40.40	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (fumed silica)	0.041		0.0041	10					200	8.20		
	4	Polyurethane	0.050		0.02	2.50					35	1.75		
	5	Air gap (ventilated)	0.035		0.042	0.833					1.3	0.05		
	6	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.050					880	8.80		
	7	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.50		

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U tot (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	W <sub>tot</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
2.2.2	1	Laminated glass exterior	0.006	0.151	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0734	Y	2500	15.00	36.49	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (fumed silica)	0.041		0.0041	10.00					200	8.20		
	4	Polyurethane	0.050		0.02	2.50					35	1.75		
	5	Air gap (ventilated)	0.035		0.042	0.833					1.3	0.05		
	6	PCM (plastic films bags)	0.006		0.74	0.0081					815	4.89		
	7	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.50		

2.3.1	1	Laminated glass exterior	0.006	0.089	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0886	Y	2500	15.00	34.92	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		
	5	Air gap	0.040		0.042	0.952					1.3	0.05		
	6	PCM	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
	7	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.50		

2.3.2	1	Laminated glass exterior	0.006	0.085	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0889	Y	2500	15.00	30.97	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		
	5	Air gap	0.040		0.042	0.952					1.3	0.05		
	6	PCM (plastic film bags)	0.006		0.74	0.0081					815	4.89		
	7	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.50		

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U <sub>tot</sub> (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	W <sub>tot</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
3.1.1	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.046	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0965	Y	2500	15.00	38.58	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	5	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.380		
	6	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
	7	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

## OSM ACTIVE

3.1.2	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.051	1.000	0.006	0.13	0.04	0.0969	Y	2500	15.00	34.67	N
	2	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	3	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	4	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	5	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.380		
	6	PCM (plastic film bags)	0.006		0.74	0.0081					815	4.89		
	7	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U tot (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{tot}$ (kg/m <sup>2</sup> )	
3.2.1	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.064	1.00	0.006	0.13	0.04	0.0964	Y	2500	15.00	65.85	N
	2	PCM (aluminium case b)	0.015		0.2	0.075					825	12.38		
	3	Tempered glass	0.003		1.00	0.003					2500	7.50		
	4	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	5	Tempered glass	0.003		1.00	0.003					2500	7.50		
	6	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	7	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.380		
	8	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
	9	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

3.2.2	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.060	1.00	0.006	0.13	0.04	0.1014	N	2500	15.00	61.94	N
	2	PCM (aluminium case b)	0.015		0.2	0.075					825	12.38		
	3	Tempered glass	0.003		1.00	0.003					2500	7.50		
	4	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	5	Tempered glass	0.003		1.00	0.003					2500	7.50		
	6	PEX	0.003		0.045	0.067					33.3	0.10		
	7	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.380		
	8	PCM (plastic film bags)	0.006		0.74	0.0081					815	4.89		
	9	Tempered glass	0.004		1.000	0.004					2500	10.00		

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>si</sub>	R <sub>se</sub>	U tot (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	W <sub>tot</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
3.3.1	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.077	1	0.006	0.13	0.04	0.0890	Y	2500	15	28.77	N
	2	Air gap (ventilated)	0.031		0.042	0.738					1.225	0.04		
	3	Multi- layer reflective insulatione	0.009		0.033	0.273					9.5	0.09		
	4	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	5	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.38		
	6	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
	7	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		

3.3.2	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.073	1	0.006	0.13	0.04	0.0893	Y	2500	15	24.86	N
	2	Air gap (ventilated)	0.031		0.042	0.738					1.225	0.04		
	3	Multi- layer reflective insulation	0.009		0.033	0.273					9.5	0.09		
	4	VIP (glass fiber)	0.020		0.002	10					210	4.20		
	5	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.38		
	6	PCM (plastic film bags)	0.006		0.2	0.05					815	4.89		
	7	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		

3.4.1	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.153	1	0.006	0.13	0.04	0.0757	Y	2500	15	40.44	N
	2	Air gap (ventilated)	0.019		0.042	0.452					1.225	0.04		
	3	Multi- layer reflective insulation	0.009		0.033	0.273					9.5	0.09		
	4	VIP (fumed silica)	0.04		0.0041	9.76					200	8		

5	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		
6	Polyurethane	0.04		0.02	2					35	1.4		
7	Air gap (ventilated)	0.019		0.042	0.452					1.225	0.02		
8	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.38		
9	PCM (aluminium case a)	0.010		0.2	0.05					880	8.80		
10	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.46		

	n.	Layer	Thickness (m)	$t_{tot}$ (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	Rsi	Rse	U tot (W/m <sup>2</sup> K)		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{tot}$ (kg/m <sup>2</sup> )	
3.4.2	1	Laminated glass + perovskite	0.006	0.158	1	0.006	0.13	0.04	0.0764	Y	2500	15	54.14	N
	2	Air gap	0.019		0.042	0.452					1.225	0.02		
	3	Multi- layer reflective insulation	0.009		0.033	0.273					9.5	0.09		
	4	VIP (fumed silica)	0.04		0.0041	9.76					200	8		
	5	Aluminium foil	0.0001		235	inf					2700	0.27		
	6	Polyurethane	0.04		0.02	2					35	1.4		
	7	Air gap	0.019		0.042	0.452					1.225	0.02		
	8	Heating foil	0.0004		0.38	0.001					950	0.38		
	9	PCM (plastic film bags)	0.015		0.5	0.03					1500	22.50		
	10	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.46		

## BENCHMARK

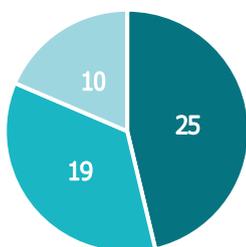
BENCHMARK	1	Laminated glass exterior	0.006	0.1655	1	0.006	0.13	0.04	0.0156	N	2500	15	25.025	N
	2	Air cavity (unventilated)	0.05		0.042	1.190					1.225	0.065		
	3	PIR	0.1		0.02	5					35	3.5		
	4	Gypsum board	0.0095		0.2	0.048					680	6.46		

## 5. Stato dell'arte sulla simulazione delle facciate avanzate

Da un punto di vista simulativo, attualmente esistono diversi software che offrono la possibilità di simulare le varie caratteristiche prestazionali richieste dal progetto Powerskin+.

È stata quindi condotta un'analisi sui software che lavorano principalmente con due scale di simulazione: a scala di componente e a scala di edificio al fine di individuare quali potessero essere i software più adatti per le nostre simulazioni.

Per ciascun software sono stati individuati gli scopi simulativi che possono essere raggiunti ed elencate le principali capacità prestazionali energetiche.



Sono stati individuati in tutto 50 software, di cui:

- 25 eseguono una simulazione a scala di edificio
- 19 simulano la scala di componente
- 10 simulano entrambe le scale.

Grafico 4: software analizzati

### 5.1 Simulazione a scala di componente

Questo tipo di simulazione permette di capire come il componente reagisce a contatto con l'ambiente esterno.

Sono stati considerati software che lavorano sia in regime statico che dinamico, simulando sia la parte del componente opaco che trasparente.

I parametri prestazionali da verificare saranno il ponte termico, una risposta ad uno stress di calore ed il bilancio termico.

È emerso che la maggior parte dei software non sono ad accesso libero, ma a pagamento, anche se alcuni permettono una prova gratuita per qualche giorno. Inoltre, 18/25 software conducono la simulazione in regime dinamico, ovvero le grandezze fisiche variano nel tempo.

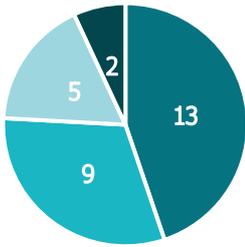


Grafico 5: software a scala di componenti analizzati

I software che lavorano a scala di componente, utilizzano le 3 dimensioni possibili, in particolare:

- 13 eseguono un'analisi 2D
- 2 eseguono un'analisi 1D
- 9 eseguono sia un'analisi 2D che 3D
- 5 eseguono un'analisi 3D

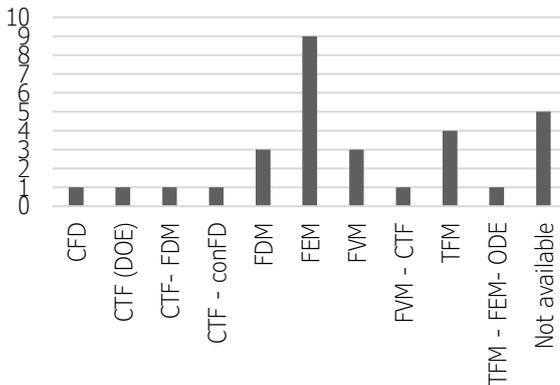


Grafico 6: metodi di calcolo dei software analizzati a scala di componente

I metodi di calcolo utilizzati sono molteplici.

Dall'analisi è emerso che il metodo più utilizzato è il FEM (Finite Element Method), un particolare metodo numerico che risolve equazioni differenziali parziali in due o tre variabili spaziali

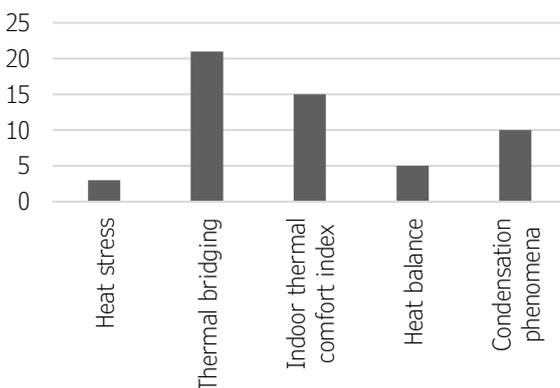
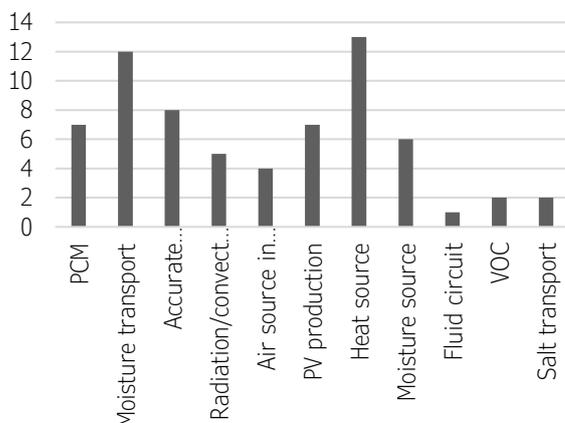


Grafico 7: scopi simulativi dei software analizzati a scala di componente

Sono emersi principalmente cinque scopi di simulazione a scala di componente.

Il più diffuso è la simulazione del ponte termico, che permette di determinare la dispersione termica



Per quanto riguarda le capacità di simulazione, le più diffuse sono: il trasporto di umidità e la possibilità di inserire una fonte di calore dipendente dal tempo

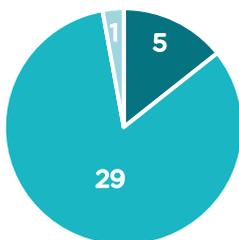
Grafico 8: capacità di simulazione dei software analizzati a scala di componente

## 5.2 Simulazione a scala di edificio

La simulazione a scala di edificio ci consente di capire come interagisce la facciata con l'ambiente interno.

I parametri prestazionali da verificare saranno sicuramente il fabbisogno di energia dell'edificio, il fattore medio di luce diurna e il livello di comfort interno. È emerso che anche i software a scala di edificio, sono per la maggior parte a pagamento anche se alcuni permettono la prova gratuita per qualche giorno.

Per una questione di utilizzo, sono stati scelti unicamente i software che lavorano in regime dinamico, in quanto è l'ambiente di lavoro a noi utile per svolgere le simulazioni per il progetto Powerskin+.



Dall'analisi dei software si evince come la maggior parte di essi (29) simulano un'analisi per diverse zone dell'edificio, mentre una minima parte (5) lavorano con una singola zona; solo 1 software riesce a simulare entrambe le condizioni.

Grafico 9: software a scala di edificio analizzati

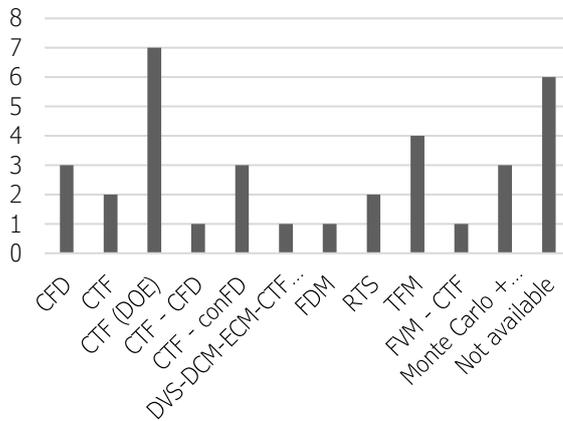


Grafico 10:metodi di calcolo dei software analizzati a scala di edificio

Il metodo di calcolo più diffuso è il CTF (Conduction Transfer Function), un metodo che permette di calcolare il trasferimento di calore per conduzione all'interno degli edifici.

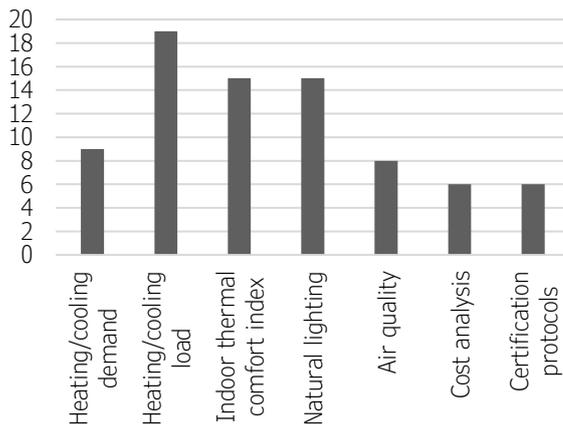
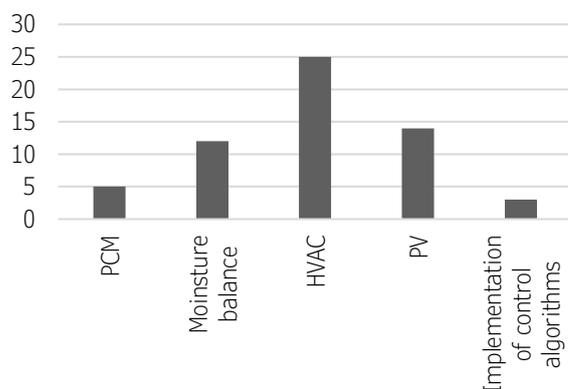


Grafico 11: scopi simulativi dei software analizzati a scala di edificio

Lo scopo della simulazione più diffuso tra i software che eseguono una simulazione a scala di edificio riguarda il fabbisogno di energia dell'edificio, in particolare il calcolo dei carichi di riscaldamento/raffrescamento; inoltre molti eseguono un'analisi anche del comfort termico interno e della luce naturale.



La capacità simulativa più ricorrente è la simulazione di HVAC (heating, ventilation and air conditioning), ovvero la capacità di saper simulare riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

Grafico 12: capacità di simulazione dei software analizzati a scala di edificio

### 5.3 Software analizzati

A seguito dell'analisi effettuata è stato condotto un ragionamento in base ai tempi di simulazione, i dati di input necessari e i dati di output che si ricavano da ciascun software. Sono stati scelti così, i software più opportuni per la conduzione delle nostre simulazioni.

Vista la grande varietà di questi software di simulazione energetica, è stato fondamentale comprendere le limitazioni di ciascun software e le loro complessità.

SOFTWARE	CARATTERISTICHE	LIMITI
<b>BISCO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trasferimento di calore allo stato stazionario in oggetti bidimensionali</li> <li>- Simulazione ponti termici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non simula PCM</li> <li>- Impossibilità di inserire una fonte di calore</li> <li>- Non simula PV</li> </ul>
<b>DesignBuilder</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulazione dinamica di oggetti tridimensionali</li> <li>- Illuminazione naturale giornaliera</li> <li>- Simulazione PCM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impossibilità di importare file input (es. modello 3D)</li> <li>- Non simula PV</li> </ul>
<b>DOE-2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Illuminazione naturale giornaliera</li> <li>- Simulazione PV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non simula PCM</li> </ul>
<b>Energy-Plus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulazione dell'isteresi nei materiali a cambiamento di fase</li> <li>- Simulazione di cavità con ventilazione naturale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Molto tempo per elaborare i dati di output della simulazione</li> </ul>

<b>eQuest</b>	- Simulazione PV	- Impossibilità di importare file CAD
<b>ESP-r</b>	- Simulazione PV - Calcolo ponti termici	- Non simula PV e PCM
<b>IDA – ICE</b>	- Calcolo ponti termici - Simulazione PCM - Simulazione PV - Simulazione di cavità con ventilazione naturale	
<b>THERM</b>	- Calcolo ponti termici	- Non simula PV e PCM - Non simula cavità ventilate
<b>TRNSYS</b>	- Simulazione PCM - Simulazione PV - Simulazione di cavità con ventilazione naturale -	
<b>VOLTRA e TRISCO</b>	- Calcolo ponti termici	- Non simula PCM - Non simula cavità ventilate
<b>WINDOW</b>	- Calcolo proprietà termiche e solari ottiche dei componenti trasparenti	- Non simula vetri laminati
<b>WUFI</b>	- Calcolo ponti termici - Simulazione PCM - Simulazione PV - Aggiunta fonte di calore e fonte di aria in cavità aperte	- Non simula la ventilazione naturale all'interno di una cavità

In conclusione, come espresso già al capitolo precedente, si è scelto di utilizzare il software WUFI sia per l'analisi a scala di componente, che a scala di edificio.

Questo software ci permette di inserire dei dati di input abbastanza facilmente, sia per quanto riguarda le caratteristiche dei materiali, che della simulazione in sé; inoltre i dati di output sono facili di leggere e da esportare per poterli poi analizzare correttamente su excel.

Inoltre, WUFI permette di poter analizzare il comportamento termico dei PCM (materiali a cambiamento di fase), del fotovoltaico e del tappetino termoriscaldante, grazie al fatto che si può inserire facilmente una fonte di calore nello strato di interesse.

Per quanto riguarda la cavità ventilata naturalmente, è stato inserito un file esterno che esprime la portata d'aria di ricambio in funzione delle 24 ore giornaliere. (argomento approfondito al capitolo 6.2 Metodologia di indagine).



BSIM Building Simulation	National Building Research Institute, Copenhagen	building	dynamic	Multi	NA	O / T														The data can be transferred to other programs for further processing, such as CFDs	[2] [3] [4]	no	<a href="https://sbi.dk/bsim/Pages/Bestillinger.aspx">https://sbi.dk/bsim/Pages/Bestillinger.aspx</a>			updated 2015
BSIMAC	team headed by Alec Johannsen, PhD (Mech Eng)	building	steady state	Multi	RTS	O / T				X	X											no	<a href="http://www.bsimac.co.za/">http://www.bsimac.co.za/</a>			updated 2015
Building Desing Advisor	Lawrence Berkeley National Laboratory	building	dynamic	Multi	DVS DCM ECM CTF (DOE2)	O / T															X	yes	<a href="http://gaia.lbl.gov/BDA/archive.htm">http://gaia.lbl.gov/BDA/archive.htm</a>	<a href="http://gaia.lbl.gov/BDA/bdainfo.htm">http://gaia.lbl.gov/BDA/bdainfo.htm</a>	<a href="http://gaia.lbl.gov/BDA/bda3help.pdf">http://gaia.lbl.gov/BDA/bda3help.pdf</a>	
CAN-QUEST	Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency	building	dynamic	Multi	CTF (DOE2)	O / T																yes	<a href="https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-efficiency-buildings/energy-management-resources-buildings/20697">https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-efficiency-buildings/energy-management-resources-buildings/20697</a>	It is a Canadian adaptation of eQUEST®		updated 2015
CAPSOL	Physibel	building	dynamic	Multi	FDM	O / T																no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/capsol">https://www.physibel.be/en/products/capsol</a>			updated 2015
CONTAM	National Institute of Standards and Technology	building	dynamic	Multi	CTF (DOE2) CFD	O / T																yes	<a href="https://www.nist.gov/services-resources/software/contam">https://www.nist.gov/services-resources/software/contam</a>	Multizone Airflow and Contaminant Transport Analysis Software	<a href="https://www.nist.gov/publications/contam-user-guide-and-program-documentation-version-32">https://www.nist.gov/publications/contam-user-guide-and-program-documentation-version-32</a>	updated 2019
Cove.tool	Pattern r + d	building	dynamic	Multi	CTF (DOE2)	O / T																no	<a href="https://www.cove.tools/pricing">https://www.cove.tools/pricing</a>	Model with Revit, Sketchup, Rhino/Grasshopper		updated 2015
Cypetherm Suite	CYPE	building	dynamic	Multi	RTS	O / T																no	<a href="http://cypetherm-suite.en.cype.com/">http://cypetherm-suite.en.cype.com/</a>	energy simulation with EnergyPlus		updated 2018

Design Builder	Design Builder Software Ltd	building	dynamic	Multi	CFD	O / T					X		UDIsDA ASE	X	X	LEED	X	X	X			[6]	no	<a href="https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#GetStarted.htm%3FToPath%3DGet%2520Started%7C__0">https://designbuilder.co.uk/download/release-software</a>	It is an interface for Energy Plus	<a href="https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#GetStarted.htm%3FToPath%3DGet%2520Started%7C__0">https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/#GetStarted.htm%3FToPath%3DGet%2520Started%7C__0</a>	updated 2015
DIAL +	Estia SA	building	dynamic	Single	hybrid (Monte Carlo and deterministic ray tracing)	O / T	X <sup>a</sup>		X	X	X		UDIsDA									[7]	no	<a href="https://www.dialplus.ch/telechargement">https://www.dialplus.ch/telechargement</a>	DIAL + is an extension of the LESO-DIAL software	<a href="https://535a9800-0781-42f0-a161-605077881f06.filesusr.com/ugd/4e84bd_96cc28d2498749d5a963c6fbc29837c1.pdf">https://535a9800-0781-42f0-a161-605077881f06.filesusr.com/ugd/4e84bd_96cc28d2498749d5a963c6fbc29837c1.pdf</a>	plug-in for Rhinoceros or Grassoppher
DIVA	Graduate School of Design at Harvard University	building	dynamic	Multi	NA	O / T					X		X									[8] [9] [10]	no	<a href="http://solemma.net/Buy.html">http://solemma.net/Buy.html</a>	builds on thoroughly tested simulations engines as Radiance and Energy Plus.	<a href="http://solemma.net/TrainingRhino.html">http://solemma.net/TrainingRhino.html</a>	updated 2017
DOE2	James J. Hirsch & Associates (JJH) in collaboration with Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)	building	dynamic	Multi	CTF	O / T					X		X		X			X	X	X			yes	<a href="http://doe2.com/doe2/">http://doe2.com/doe2/</a>		<a href="http://doe2.com/doe2/#doe2_3">http://doe2.com/doe2/#doe2_3</a>	updated 2016
EcoDesigner Star - Graphisoft	Graphisoft	component / building	dynamic	Multi	NA	O / T			X					X	LEED			X	X	X			no	<a href="https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/">https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/</a>	Is an ArchiCAD extension	<a href="https://energyplus.net/documentation">https://energyplus.net/documentation</a>	updated 2020
EiBRA		component / building	dynamic	Single	CTF	O / T			X			PMV, PPD	X				X	X	X				no	<a href="https://5da6c3170c135.site123.me/download">https://5da6c3170c135.site123.me/download</a>		-	update 2019
Energy Plus	U. S. Department of Energy	component / building	dynamic	Multi	CTF CondFD	O / T				X			X	X			X	X	X		X		yes	<a href="https://energyplus.net/downloads">https://energyplus.net/downloads</a>	is DOE's whole-building energy simulation engine	<a href="https://energyplus.net/documentation">https://energyplus.net/documentation</a>	updated 2020
EnerWin	Larry O. Degelman, P.E., Degelman Engineering Group, Inc., College Station, TX	building	dynamic	Multi	NA	O			X	X	X						X	X					no	<a href="http://pages.suddenlink.net/enerwin/">http://pages.suddenlink.net/enerwin/</a>		<a href="http://pages.suddenlink.net/enerwin/User-Manual-2007.pdf">http://pages.suddenlink.net/enerwin/User-Manual-2007.pdf</a>	updated 2010

eQUEST	Lawrence Berkeley National Laboratory and J.J. Hirsch and Associates	building	dynamic	Multi	CTF (DOE2)	O / T				X											yes	<a href="http://www.doe2.com/equest/">http://www.doe2.com/equest/</a>	simulation 'engine' within eQuest is derived from the latest version of DOE-2		updated 2016	
ESBO	EQUA Simulation AB	component / building	dynamic	Single / Multi	TFM	O / T	X <sup>a</sup>			X	PPD	X										no	<a href="https://www.equa.se/en/esbo">https://www.equa.se/en/esbo</a>	based on EQUA's building performance software IDA ICE	<a href="http://www.equaonline.com/esbouser/User_guide.pdf">http://www.equaonline.com/esbouser/User_guide.pdf</a>	updated 2016
ESP-r	University of Strathclyde, Glasgow	component / building	dynamic	Multi	CFD FVM	O / T	X <sup>a</sup>				X	X	X									yes	<a href="http://www.esru.strath.ac.uk/applications/esp-r/">http://www.esru.strath.ac.uk/applications/esp-r/</a>		<a href="http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_tut/esp_aps.htm">http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_tut/esp_aps.htm</a>	
FEDS	Pacific Northwest National Laboratory	component / building	dynamic	Multi	CTF (DOE)	O / T				X				X		X	X					no	<a href="https://www.pnnl.gov/feds/pdfs/FEDS_7-0_user_guide.pdf">https://www.pnnl.gov/feds/pdfs/FEDS_7-0_user_guide.pdf</a>		<a href="https://www.pnnl.gov/feds/pdfs/FEDS_7-0_user_guide.pdf">https://www.pnnl.gov/feds/pdfs/FEDS_7-0_user_guide.pdf</a>	updated 2015
Green Building Studio	Autodesk	building	dynamic	Multi	CTF (DOE2)	O / T							X	EnergyStar LEED		X	X	X				no	<a href="https://gsb.autodesk.com/GBS/">https://gsb.autodesk.com/GBS/</a>	optimize energy efficiency and works toward carbon neutrality	<a href="http://docs.autodesk.com/GBS/4.2UX/ENU/GBS%20User%20Documentation/index.html?url=../files/WS73099cc142f48755f2fc9df120970276f7-da0.htm.topicNumber=d0e24">http://docs.autodesk.com/GBS/4.2UX/ENU/GBS%20User%20Documentation/index.html?url=../files/WS73099cc142f48755f2fc9df120970276f7-da0.htm.topicNumber=d0e24</a>	updated 2015
IDA Indoor Climate and Energy	EQUA Simulation AB	component / building	dynamic	Multi	TFM	O / T		X	X		PPD PMV	X	X		LEED BRE EAM	X		X	X			no	<a href="https://www.equa.se/en/ida-ice">https://www.equa.se/en/ida-ice</a>		<a href="http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE45eng.pdf">http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE45eng.pdf</a>	
LESOSAI	Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB) of Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).	building	dynamic	Multi	hybrid (Monte Carlo and deterministic ray tracing)	O				X					MINERGI E, BBC, Effnergie, DGN B, SBN S, BRE EAM			X	X			no	<a href="http://www.lesosai.com/fr/02_download.html">http://www.lesosai.com/fr/02_download.html</a>		<a href="http://www.lesosai.com/fr/03_aide.html">http://www.lesosai.com/fr/03_aide.html</a>	

MicroFLO	Integrated Environmental Solutions (IES)	building	dynamic	Multi	CFD	O					X	X										no	<a href="https://www.iesve.com/software/virtual-environment/applications/airflow/microflo">https://www.iesve.com/software/virtual-environment/applications/airflow/microflo</a>				
Open Studio	NREL	building	dynamic	Single	CTF (DOE)	O / T				X	X											yes	<a href="https://www.openstudio.net/downloads">https://www.openstudio.net/downloads</a>	Works with Energy Plus and Radiance			
ParaSol	Lund University	building	dynamic	Single	NA (CTF?)	O / T				X	PPD PMV											yes	<a href="http://www.ebd.lth.se/software/parasol/">http://www.ebd.lth.se/software/parasol/</a>		<a href="http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Programvaror/Introduktion_till_ParaSol_E-webb.pdf">http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Programvaror/Introduktion_till_ParaSol_E-webb.pdf</a>	updated 2016	
Primer Comfort	HafenCity University, Hamburg	building	dynamic	Single	CTF CondFD	O / T	X <sup>b</sup>	X		X												yes	<a href="http://www.primerosoftware.de/download/">http://www.primerosoftware.de/download/</a>	is based on EnergyPlus software for the evaluation and optimization of thermal comfort			updated 2015
Radiance	Building Technologies Program of Lawrence Berkeley National Laboratory di Berkeley, California	building	dynamic	Multi	hybrid (Monte Carlo and deterministic ray tracing)	O / T						X										yes	<a href="https://www.radiance-online.org/download-install">https://www.radiance-online.org/download-install</a>	there are few limitations on the geometry or the materials that may be simulated	<a href="https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages">https://www.radiance-online.org/learning/documentation/manual-pages</a>		
Smart Energy	ISHRAE & Sarla Systems	building	dynamic	Multi	CTF CondFD	O / T	X <sup>b</sup>	X		X												no	<a href="http://www.smartenergysoftware.com/htmlwebsite/default.aspx">http://www.smartenergysoftware.com/htmlwebsite/default.aspx</a>				updated 2020
Tas Engineering	EDSL Tas	building	dynamic	Multi	NA	O / T					X	X										no	<a href="https://www.edsltas.com/gettas/">https://www.edsltas.com/gettas/</a>				updated 2015
TRNSYS	Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison	component / building	dynamic	Multi	TFM	O / T	X	X	X						X	X	X	X	X			no	<a href="http://trnsys.com/order/index.html">http://trnsys.com/order/index.html</a>		<a href="http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf">http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf</a>		

WUFI Plus	Fraunhofer IBP, Holzkirchen, Germania	component / building	dynamic	Multi	FVM CTF	O / T			X		X		X											[45]	no	<a href="https://wufi.de/en/websites/hop/">https://wufi.de/en/websites/hop/</a>	<a href="https://wufi.de/en/service/downloads/">https://wufi.de/en/service/downloads/</a>
-----------	---------------------------------------	----------------------	---------	-------	---------	-------	--	--	---	--	---	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	------	----	---	---

## Simulazioni a scala di componente

### Nomenclature

PDE: Partial Differential Equation  
 FDM: Finite Difference Method  
 FEM: Finite Element Method  
 TFM: Transfer Function Method  
 CTF: Conduction Transfer Function  
 condFD: conduction Finite Difference  
 CFD: Computational Fluid Dynamics  
 ODE: Ordinary Differential Equations  
 FVM: Finite /Control Volume Method

### Superscripts

a: function still under development  
 b: in the surface  
 c: only with RADCON model  
 \*: needed for powerkin+ project

### Nomenclature

PDE: Partial Differential Equation  
 FDM: Finite Difference Method  
 FEM: Finite Element Method  
 TFM: Transfer Function Method  
 CTF: Conduction Transfer Function  
 condFD: conduction Finite Difference  
 CFD: Computational Fluid Dynamics  
 ODE: Ordinary Differential Equations  
 FVM: Finite /Control Volume Method

### Superscripts

a: function still under development  
 b: in the surface  
 c: only with RADCON model  
 \*: needed for powerkin+ project

Software	Developer	Simulation scale	Time domain	Dimension	Calculation method	Envelope type	co-simulation capabilities	Models implementation	Simulation scope				Simulation capabilities											Reference	Open Source	Web Site	Description	Link manuals	Note			
									Heat stress	Thermal bridging	Heat balance	Condensation phenomena	PCM*	Moisture transport	Accurate modelling of natural ventil. in cavities*	radiation/convection in closed cavities	Air source in open cavities*	PV production*	heat source*	moisture source	fluid circuit	VOC	Salt transport							Additional features		
AnTherm	Kornicki Dienstleistungen in EDV & IT	component / building	dynamic	2D / 3D	TFM	O		X		X		X <sup>b</sup>			X	X												no	<a href="http://www.antherm.at/antherm/EN/">http://www.antherm.at/antherm/EN/</a>	Although entire buildings can also be evaluated, most practical applications will be only spatially limited problem zones need be scrutinised	<a href="http://he lp.antherm.eu/AnTherm_EN.pdf">http://he lp.antherm.eu/AnTherm_EN.pdf</a>	update d 2016
BISCO	Physibel	component	steady state	2D	FEM	O / T				X						X <sup>c</sup>										[1]	no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/bisco">https://www.physibel.be/en/products/bisco</a>			update d 2019	

BISTRA	Physibel	component	dynamic	2D	FEM	O / T				X			X													no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/bistra">https://www.physibel.be/en/products/bistra</a>			update d 2018	
BlumatiCAD		component	steady state	2D		T																				no	<a href="https://www.blumatica.it/software-calcolo-trasmittanza-infissi-componenti-trasparenti/#acq">https://www.blumatica.it/software-calcolo-trasmittanza-infissi-componenti-trasparenti/#acq</a>	Calculation: U-factor	-		
CaluWin	Swisspacer e Sommer Informatik	component	steady state	2D	FEM	T						X														no	<a href="https://www.sommer-informatik.com/cwclimalit/">https://www.sommer-informatik.com/cwclimalit/</a>	Calculation: U-window, window energy ratings, energy saving	-	update d 2016	
COMSOL Multiphysics	COMSOL Inc	component	dynamic	2D / 3D	TFM FEM ODE	O		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		[5]	no	<a href="https://www.comsol.com/comsol-multiphysics">https://www.comsol.com/comsol-multiphysics</a>	software multiphysics		update d 2020
DEKSOFT Photovoltaics	DEKSOFT Czech Republic	component		2D	NA	O / T																				no	<a href="https://deksoft.eu/en/products/category/21">https://deksoft.eu/en/products/category/21</a>	calcolo dell'elettricità prodotta dal sistema fotovoltaico	<a href="https://deksoft.eu/en/programy/p/hotovolt aics">https://deksoft.eu/en/programy/p/hotovolt aics</a>	update 2019	
Delphin	Delphine Software International	componet	dynamic	2D	FVM	O				X			X*	X	X											no	<a href="http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en">http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en</a>	calculates coupled heat, moisture, and matter transport in porous building materials.	<a href="http://bauklimatik-dresden.de/delphin/documentat ion.php">http://bauklimatik-dresden.de/delphin/documentat ion.php</a>	update d 2019 identified as GUI software	
EcoDesigner Star - Graphisoft	Graphisoft	component / building	dynamic	2D / 3D	NA	O / T				X			X													no	<a href="https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/">https://www.graphisoft.com/archicad/ecodesigner_star/</a>	Is an ArchiCAD extension	-	update d 2016	
EiBRA		component / building	dynamic	2D	CTF / FDM (thermal bridge)	O / T				X																no	<a href="https://5da6c3170c135.site123.me/download">https://5da6c3170c135.site123.me/download</a>		-	update d 2016	



HEAT 2	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics	component	dynamic	2D	FDM	O / T				X	X	X												no	<a href="https://buildingphysics.com/">https://buildingphysics.com/</a>	<a href="https://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT2_5.pdf">https://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT2_5.pdf</a>	updated 2016		
HEAT 3	Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics	component	dynamic	3D	FDM	O / T				X	X													no	<a href="https://buildingphysics.com/">https://buildingphysics.com/</a>	<a href="https://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT3_4.pdf">https://www.buildingphysics.com/manuals/HEAT3_4.pdf</a>	updated 2016		
IDA Indoor Climate and Energy	EQUA Simulation AB	component / building	dynamic	2D / 3D	TFM	O / T				X	X		X	X	X									[19] [31] [32] [33] [34] [35]	no	<a href="https://www.equa.se/en/ida-ice">https://www.equa.se/en/ida-ice</a>	<a href="http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE45eng.pdf">http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE45eng.pdf</a>	updated 2016	
SOLIDO	Physibel	component	steady state	2D / 3D	FEM	O / T				X				X										no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/solido">https://www.physibel.be/en/products/solido</a>		updated 2016		
THERM	Lawrence Berkeley National Laboratory	component	steady state	2D	FEM	O / T				X														yes	<a href="https://windows.lbl.gov/tools/therm/software-download">https://windows.lbl.gov/tools/therm/software-download</a>	<a href="https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW7UserManual.pdf">https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW7UserManual.pdf</a>	updated 2016		
TRISCO	Physibel	component	steady state	3D	FEM	O / T				X		X <sup>b</sup>			X <sup>c</sup>										[37]	no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/trisco">https://www.physibel.be/en/products/trisco</a>		
TRNSYS	Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison	component / building	dynamic		TFM	O / T							X	X											[19] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44]	no	<a href="http://trnsys.com/order/index.html">http://trnsys.com/order/index.html</a>	<a href="http://web.mit.edu/parnstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf">http://web.mit.edu/parnstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf</a>	
VOLTRA	Physibel	component	dynamic	2D / 3D	FEM	O / T				X					X <sup>c</sup>										no	<a href="https://www.physibel.be/en/products/voltra">https://www.physibel.be/en/products/voltra</a>			
WINDOW	Lawrence Berkeley National Laboratory	component	dynamic	2D		T				X (therm)															yes	<a href="https://windows.lbl.gov/tools/window/software-re-download">https://windows.lbl.gov/tools/window/software-re-download</a>	Calculation: U-factor, SHGC and Tvis	<a href="https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW7UserManual.pdf">https://windows.lbl.gov/sites/default/files/software/WINDOW7UserManual.pdf</a>	



## 6. Analisi simulativa a scala di componente

L'analisi simulativa a scala di componente è stata condotta utilizzando principalmente il software WUFI ® PRO.

Questo software permette di effettuare delle simulazioni termoigrometriche in regime dinamico, ovvero queste simulazioni permettono di ottenere informazioni sul comportamento di un componente edilizio o di un materiale, quando questo è sottoposto, per un breve o lungo periodo, a condizioni ambientali reali (dinamiche). Attraverso questa tipologia di analisi simulativa è stato possibile determinare il comportamento dei vari materiali nelle singole configurazioni, quando questi sono sottoposti a condizioni realistiche sia per l'ambiente interno che per l'ambiente esterno; così da capire qual è la migliore configurazione in termini di prestazioni e caratteristiche fisiche.

WUFI ® PRO (**W**ärme und **F**euchte **I**nstationär) è un software sviluppato dal Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics) che consente di effettuare simulazioni di calore ed umidità in condizioni dinamiche. Inoltre, è stato uno dei primi software ad essere validato per la normativa UNI EN 15026 [32]

Il metodo di calcolo di WUFI®Pro si basa sul *Finite Volume Method* (FVM), un metodo di discretizzazione delle equazioni differenziali.

Utilizzando questo software si va incontro a due limitazioni principali: la prima è rappresentata dalla possibilità di poter assegnare come dati di input solo profili orari, mentre la seconda è data dall'impossibilità di implementare l'effetto di isteresi. [33]

Come dati di output, il software consente di esportare una serie di dati relativi alla stratigrafia simulate ed alle condizioni dei materiali durante tutto il periodo di simulazione, gli output possono essere i valori di temperatura nei vari strati e/o i flussi termici che li attraversano.

## 6.1 Dati di input

### Impostazioni

Il software richiede una serie di dati e di impostazioni necessarie per descrivere correttamente la stratigrafia o l'elemento preso in analisi; in particolare sono richieste:

- Stratigrafia, spessore e le diverse proprietà dei materiali che compongono i vari layers;
- Orientamento dell'elemento e inclinazione (piano orizzontale o verticale);
- Coefficienti di trasmissione superficiale;
- Temperatura iniziale del componente;
- Data di inizio e fine e time step del periodo di calcolo;
- Clima esterno e interno.

### Caratteristiche dei materiali

Il software richiede che per ogni materiale siano inserite le seguenti caratteristiche:

- Spessore [m];
- Densità [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]; 0
- Conduttività termica [ $\text{W}/\text{mK}$ ];
- Calore specifico [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

Spesso per alcuni materiali non è stato possibile trovare tutte le informazioni richieste, è stato quindi preso un materiale presente nel database che più si avvicinasse al materiale preso in analisi. I database utilizzati per avere i prodotti da inserire nel modello di simulazione sono stati *Fraunhofer IBP* e dal database *MASEA*. Per alcuni di essi, ad esempio, conoscendo alcune proprietà note come la densità o la conduttività termica, sono state apportate delle modifiche solamente a queste singole proprietà.

Per poter monitorare il comportamento delle pareti e soprattutto le interfacce dei singoli materiali, è possibile inserire dei punti di controllo (telecamere) per poter ad esempio valutare la variazione di temperatura che subisce quel layer durante tutto il periodo di simulazione.

Tra i vari layer è possibile inserire delle fonti igrotermiche, nello specifico si possono specificare fonti di calore, di umidità e di ricambio d'aria.

Non occupandoci di umidità all'interno del componente, sono state inserite solo fonti di calore o di ricambio d'aria.

Per inserire una **fonte di calore** è possibile:

- effettuare una lettura da File (la forza della fonte di calore per ogni fase viene letta da un file formato .txt)
- inserire una frazione di radiazione solare incidente (La forza della sorgente di calore per ogni fase è una frazione della radiazione solare incidente sulla superficie del componente, specificata dall'utente.)

Questo permette di simulare materiali isolanti trasparenti, facciate semitrasparenti e assemblaggi simili. Nello specifico per calcolare la frazione di radiazione solare incidente in un componente trasparente è stato utilizzato il software WINDOW.

Per il calcolo del ricambio d'aria all'interno di un layer, occorre che l'utente inserisca un tasso di ricambio d'aria, questo può essere costante [1/h] o essere un valore dipendente dal tempo ed in questo caso dovrà essere inserito il file .txt.

#### Orientamento ed inclinazione

Le pareti simulate avranno un orientamento sud, sud-ovest, ovest, in modo da metterci sempre nelle peggiori condizioni esistenti. L'inclinazione sarà sempre e solo verticale, trattando unicamente delle pareti.

#### Periodo di calcolo, data inizio, fine e time step

Il periodo di calcolo imposto è stato pari a 1 anno, a partire dal 01/01/2020 fino al 31/12/2021. Il time step è stato posto pari ad un quarto d'ora.

#### Dati climatici

In accordo con il progetto Powerskin+, tutte le configurazioni saranno simulate con base Torino.

Per quanto riguarda le condizioni interne, il software permette di determinarle secondo diverse normative, tra cui la EN 15026, la ISO 13788 e la normativa ASHRAE 160. Così si è scelto di utilizzare la EN 15026, che mantiene una temperatura media invernale sui 20 °C (con fuori -10°C) ed una temperatura media estiva intorno ai 25°C (con fuori 30°C)

## 6.2 Metodologia di indagine

Per poter capire se una superficie è soggetta a surriscaldamento, è stato utilizzato il software WUFI Pro, programma che esegue delle simulazioni termo-igrometriche in regime dinamico.

Al fine di poter simulare delle condizioni quanto più verosimili alla quelle reali, sono state inserite delle sorgenti di calore interne che hanno l'obiettivo di riprodurre fonti di

energia quali il pannello fotovoltaico e il tappetino termo-riscaldante.

In modo analogo per simulare una cavità d'aria ventilata, è stato utilizzato lo stesso strumento che dà la possibilità di inserire una sorgente di ricambio d'aria costante o variabile nel tempo.

Il valore della sorgente di calore da inserire su WUFI è stato determinato tramite il software WINDOW, un particolare programma che ha lo scopo di determinare le proprietà termiche e ottiche solari dei sistemi di vetrate e finestre.

In base alla configurazione, è stata definita la stratigrafia del componente attraverso l'inserimento di layers e ad alla definizione delle rispettive caratteristiche (spessore, fattore di trasmissione  $T_{sol}$  e riflettanza  $R_{sol}$ ) e successivamente è avviato il calcolo. Lo scopo è quello di trovare l'assorbimento su ogni superficie del componente analizzato, così da inserire questo valore (in percentuale) sul software WUFI come fonte di calore sottoforma di frazione della radiazione solare incidente.

Per quanto riguarda il **pannello fotovoltaico**, al fine di poter inserire una fonte di calore e di capire quindi la quota assorbita da parte del fotovoltaico, sono stati considerati i dati relativi all'assorbimento ( $\alpha$ ) in funzione del coefficiente di trasmissione ( $\tau$ ) e di riflessione ( $\rho$ ) (dati calcolati tramite il software Optics)

È stata quindi applicata la formula:

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

In cui:

$$- \tau = 0.003 \quad - \rho = 0.0042$$

Ne deriva che:

$$\alpha = 1 - \tau - \rho$$

Quindi il valore della quota assorbita risulta:

$$\alpha = 1 - 0.003 - 0.0042 = 0.95 = 95\%$$

Sapendo che la quota assorbita viene convertita in energia elettrica, viene detratto un 10%, così da avere un assorbimento totale del 85.95%

Per la simulazione del **tappetino termo-riscaldante**, è stata inserita una sorgente di calore pari al 10% della radiazione solare incidente (efficienza di targa del pannello). Ciò significa che il 10% della radiazione solare incidente la superficie opaca verticale verrà convertita in energia elettrica.

Supponendo che non ci siano particolari perdite, questa energia verrà utilizzata esclusivamente per attivare i tappetini termo-riscaldanti.

Per simulare **la cavità d'aria ventilata**, invece, sono stati condotti due diversi ragionamenti. Per la cavità ventilata dall'interno è stata assunto un valore di 5 Vol/h, valore cautelativo. Al contrario, per la cavità ventilata dall'esterno, la portata d'aria è

stata calcolata prendendo in considerazione l'irradianza solare nei diversi orientamenti. È stata scelta una giornata-tipo estiva ed è stata considerata la sua irradianza solare rispetto all'orientamento. Ad esempio, l'orientamento sud-ovest:

**Tabella 5: Irradianza solare – Orientamento sud-ovest**

time [h]	Isol [Wh/m <sup>2</sup> ]	vol/h
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	29	0.043
6	104	0.156
7	185	0.275
8	264	0.393
9	307	0.457
10	358	0.534
11	431	0.643
12	541	0.806
13	632	0.941
14	671	1
15	651	0.97
16	556	0.82
17	377	0.56
18	131	0.19
19	16	0.24
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0

Successivamente è stato ipotizzato che la radiazione massima corrispondesse ad 1 ricambio d'aria all'ora (1 vol/h) e di conseguenza sono stati ricalcolati tutti i valori nella Tabella 6.

Per poter ottenere poi un ricambio d'aria adeguato è stata eseguita la seguente operazione:

$$\text{Portata d'aria (vol/h)} = 5 + x * 60$$

- essendo 5 vol/h il valore assunto per una cavità ventilata dall'interno, priva di effetto camino

- viene moltiplicato per 60 vol/h poiché è il valore di portata d'aria ideale per una cavità di uno spessore di 5 cm e con un'ipotetica velocità del vento di 0,5 m/s.

È stato poi inserito su WUFI un file formato .txt in cui viene espressa la portata di ricambio d'aria in funzione della variazione oraria.

Tabella 6: Calcolo dei ricambi d'aria sui diversi orientamenti

SUD-OVEST		SUD		OVEST	
time [h]	vol/h	time [h]	vol/h	time [h]	vol/h
0	5	0	5	0	5
1	5	1	5	1	5
2	5	2	5	2	5
3	5	3	5	3	5
4	5	4	5	4	5
5	8	5	8	5	8
6	15	6	14	6	15
7	22	7	22	7	22
8	32	8	29	8	29
9	44	9	32	9	33
10	56	10	37	10	38
11	62	11	44	11	41
12	65	12	56	12	42
13	63	13	61	13	49
14	55	14	65	14	59
15	44	15	63	15	65
16	30	16	55	16	63
17	19	17	39	17	49
18	11	18	17	18	21
19	6	19	6	19	7
20	5	20	5	20	5
21	5	21	5	21	5
22	5	22	5	22	5
23	5	23	5	23	5

### 6.3 Configurazioni

A scala di componente sono state eseguite in particolare 12 simulazioni che verranno descritte di seguito. Ciascuna di esse è stata simulata per tre orientamenti diversi: sud, sud-ovest, ovest (che rappresentano le condizioni più critiche). In particolare, verranno analizzate nel dettaglio 4 configurazioni una per ciascuna categoria, per i risultati delle restanti configurazioni, si rimanda all' *Appendice capitolo 6*.

Inoltre, con il simbolo  verranno indicate tutte le fonti di calore calcolate tramite il software WINDOW ed inserite su WUFI sottoforma di frazione di radiazione solare incidente.

Con il simbolo  si indica invece il ricambio d'aria all'interno di una cavità ventilata (per i valori inseriti, si rimanda al paragrafo 6.2 *Metodologia di indagine*)

## Configurazione 1.2\_LIGHT

### a. Metodologia



#### Dati di input su Window

##### Polycarbonato alveolare

Tsol: 0.53

Rsol: 0.40

E<sub>1,2</sub>: 0.840

Abs<sub>1</sub>: 0.1136 = **11.36%**

##### VIP - glass fiber

Tsol: 0

Rsol: 0.8 (rivestimento bianco)

E<sub>1,2</sub>: 0.25

Abs<sub>2</sub>: 0.1559 = **15.59%**

#### ■ Polycarbonato alveolare

Spessore: 0.004 m

Densità: 200 kg/m<sup>3</sup>

Conducibilità termica: 0.015 W/mK

Calore specifico: 1300 J/kgK

#### ■ VIP - glass fiber

Spessore: 0.015 m

Densità: 210 kg/ m<sup>3</sup>

Conducibilità termica: 0.001573 W/mK

Calore specifico: 850 J/kgK

#### ■ Isolante multi-strato riflettente

Spessore: 0.075 m

Densità: 9.5 kg/m<sup>3</sup>

Conducibilità termica: 0.033 W/mK

Calore specifico: 2300 J/kgK

## b. Risultati

Dai risultati emerge che l'esposizione più critica cui può essere sottoposta la configurazione è con orientamento a sud [Appendice capitolo 6]. Per le altre esposizioni vedi Appendice capitolo 6.

Per quanto riguarda l'analisi del flusso termico sulla superficie interna del componente, su base mensile [Grafico 13], si nota, anche qui, come le principali dispersioni termiche (*heat losses*) si registrano nei periodi invernali, raggiungendo un flusso di  $-900 \text{ Wh/m}^2$ ; i guadagni termici (*heat gain*), che avvengono principalmente nei periodi estivi, arrivano a registrare un flusso di circa  $1170 \text{ Wh/m}^2$ .

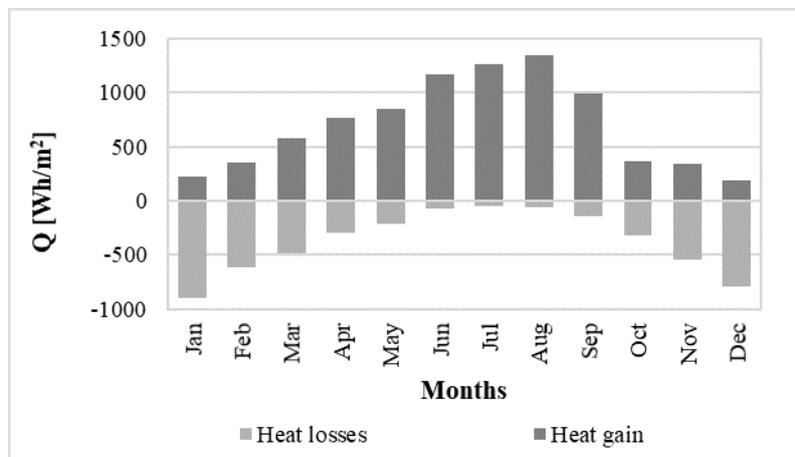


Grafico 13: analisi mensile dei flussi sulla superficie interna\_Config.1.2

Effettuando successivamente un'analisi sulla temperatura massima che raggiunge il VIP durante l'arco di tutta la simulazione, risulta che la superficie esterna del pannello supera la temperatura limite di  $50^\circ\text{C}$ , per tutto l'anno, valore limite oltre il quale si rischia la rottura del materiale. [Grafico 14].

In particolare, si nota come questa temperatura venga superata di circa  $+50^\circ\text{C}$  nel periodo estivo.

Come sulla superficie esterna, anche la temperatura al centro del pannello supera, seppur di poco, il limite di  $50^\circ\text{C}$ , in particolar modo nel periodo estivo.

La superficie interna, invece, ha una temperatura che si mantiene sempre al di sotto del limite imposto.

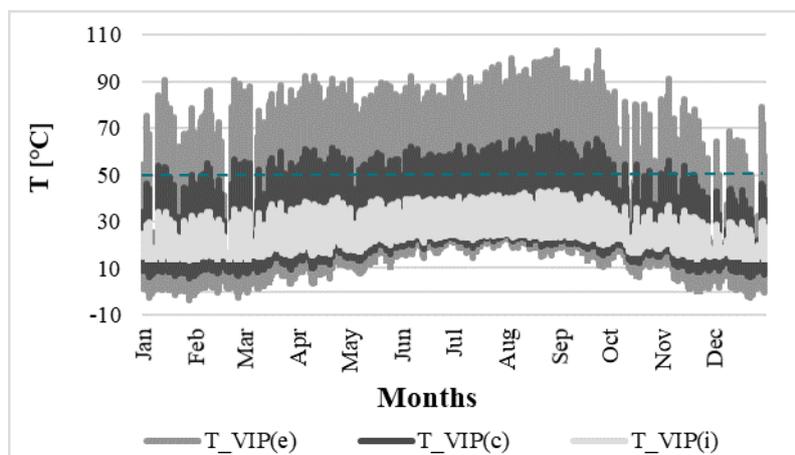


Grafico 14: analisi della temperatura del pannello VIP\_Config.1.2

Nello specifico, nel giorno in cui la temperatura raggiunge il picco (31/08), si registra che la superficie esterna del VIP raggiunge una temperatura massima di 103°C alle ore 12.00. Per circa 6 ore (25% del tempo) il VIP lavora quindi ad una temperatura maggiore del suo limite di 50°C.

Come si è già visto nel grafico precedente, la temperatura al centro del pannello, supera di circa 20°C il limite, anche se solo per il 25% del tempo. La temperatura della superficie interna, invece, si mantiene al di sotto dei 50°C per tutta la giornata. [Grafico 15]

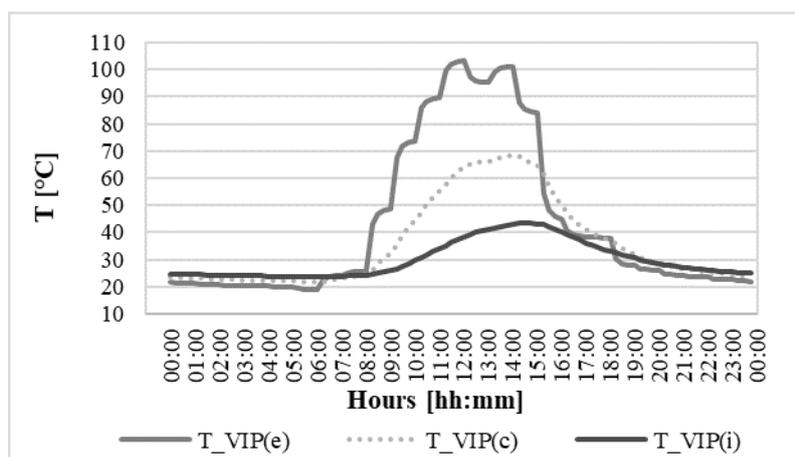


Grafico 15: analisi della temperatura del pannello VIP in un giorno tipo\_Config.1.2

Dall'analisi delle frequenze cumulate [Grafico 16], si evince come il pannello, per circa l'80% del tempo, è esposto ad una temperatura inferiore a 50°C, mentre per il restante 20% è esposto ad una temperatura maggiore di 50°C, in particolare la temperatura sulla superficie esterna è al di sopra dei 50°C per un buon 20% del tempo, la temperatura centrale supera i 50°C per circa il 10% del tempo, mentre la temperatura sulla superficie interna si mantiene sempre al di sotto dei 50°C.

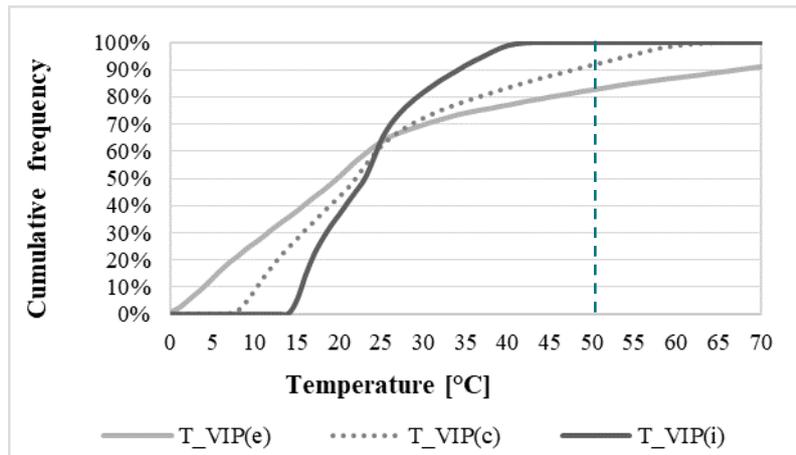


Grafico 16: frequenze cumulate relative al pannello VIP\_Config.1.2

Nel grafico successivo [Grafico 17] riguardante l'analisi della temperatura sulla superficie interna dell'intero componente, emerge come il flusso sulla superficie interna oscilla tra i  $-2 \text{ W/m}^2$  e i  $6 \text{ W/m}^2$ .

Mentre la temperatura sulla superficie interna si mantiene al di sotto dei  $25 \text{ °C}$  nei mesi invernali e sotto i  $30 \text{ °C}$  nei mesi estivi.

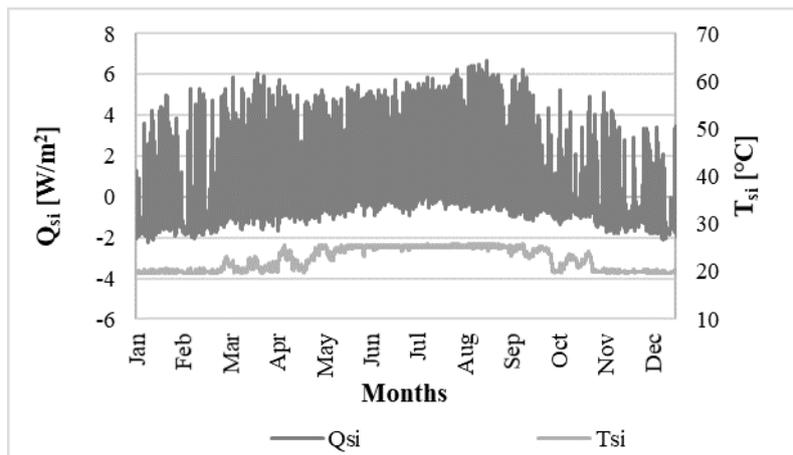
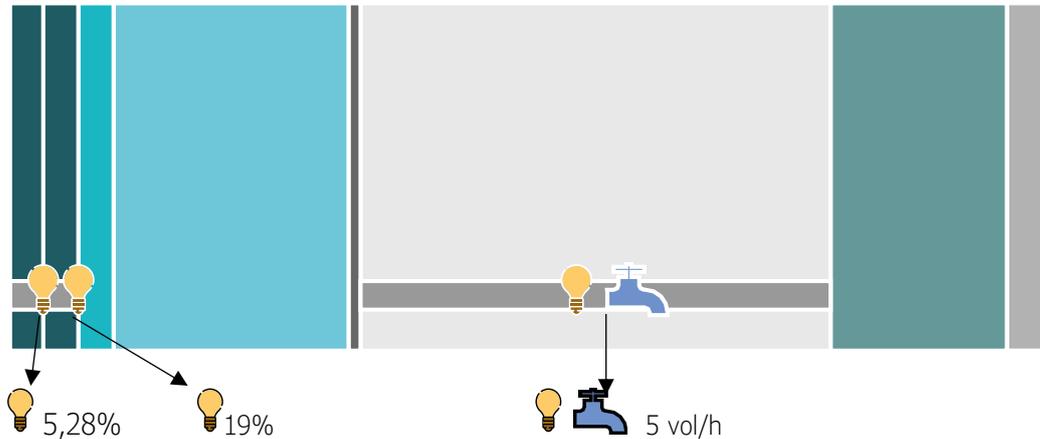


Grafico 17: analisi della temperatura e dei flussi sulla superficie interna\_Config.1.2

## Configurazione 2.3.2\_ PASSIVE\_con PCM\_inorganic\_plastic film bags

### a. Metodologia



### Dati di input su Window

#### Vetro laminato

Tsol: 0.89

Rsol: 0.80

E<sub>1,2</sub>: 0.840

#### Polietilene (PEX)

Tsol: 0

Rsol: 0.8 (rivestimento bianco)

E<sub>1,2</sub>: 0.25

Abs<sub>1</sub>: 0.0528 = **5,28 %**

(assorbimento su vetro laminato)

Abs<sub>2</sub>: 0.1902 = **19.02 %**

(assorbimento su PEX)

<span style="color: #004a5c;">■</span>	<b>Vetro laminato</b> Spessore: 0.003 + 0.003 m Densità: 2500 kg/m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 1 W/mK Calore specifico: 795 J/kgK
<span style="color: #008080;">■</span>	<b>Polietilene (PEX)</b> Spessore: 0.003 m Densità: 33.3 kg/ m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.045 W/mK Calore specifico: 2302 J/kgK
<span style="color: #4682b4;">■</span>	<b>VIP – glass fiber</b> Spessore: 0.015 m Densità: 210 kg/m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.0015 W/mK Calore specifico: 850 J/kgK

<span style="color: #a9a9a9;">■</span>	<b>Cavità d'aria (ventilata dall'interno)</b> Spessore: 0.035 m Densità: 1.3 kg/ m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.071 W/mK Calore specifico: 1000 J/kgK
<span style="color: #008080;">■</span>	<b>PCM_base minerale</b> Spessore: 0.007 m Densità: 815 kg/ m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.74 W/mK Calore specifico: 3140 J/kgK
<span style="color: #696969;">■</span>	<b>Cartongesso</b> Spessore: 0.0095 m Densità: 680 kg/m <sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.2 W/mK Calore specifico: 795 J/kgK



### Foglio di alluminio

Spessore: 0.0001 m

Densità: 2700 kg/ m<sup>3</sup>

Conducibilità termica: 235 W/mK

Calore specifico: 896 J/kgK

## b. Risultati

Questa configurazione a differenza della precedente, ha il PCM a base minerale. A seguito delle simulazioni svolte, si prende in analisi l'esposizione sud ovest [Appendice capitolo 6], in quanto risulta essere l'esposizione più critica cui può essere sottoposto il componente.

Per gli altri orientamenti si rimanda all'Appendice capitolo 6.

Per l'analisi del flusso termico sulla superficie interna del componente, su base mensile [Grafico 18], si nota come le principali dispersione termiche (*heat losses*) si registrano nei periodi invernali, raggiungendo un flusso di -1700 Wh/m<sup>2</sup>.

I guadagni termici (*heat gain*), che avvengono principalmente nei periodi estivi, arrivano a registrare un flusso di circa 170 Wh/m<sup>2</sup>

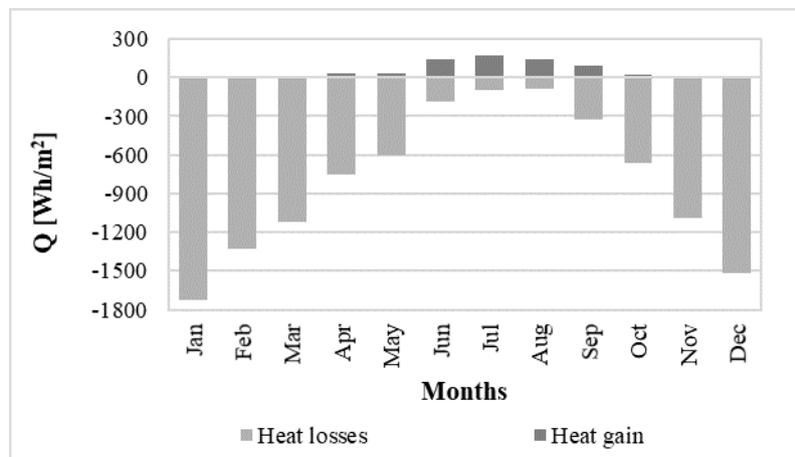


Grafico 18: analisi mensile dei flussi sulla superficie interna\_Config.2.3.2

Per quanto riguarda l'analisi della temperatura che raggiunge il VIP durante l'arco di tutta la simulazione, risulta che il pannello, per tutto l'anno si mantiene al di sotto della temperatura di 50°C, valore limite oltre il quale si rischia la rottura del materiale. [Grafico 19].

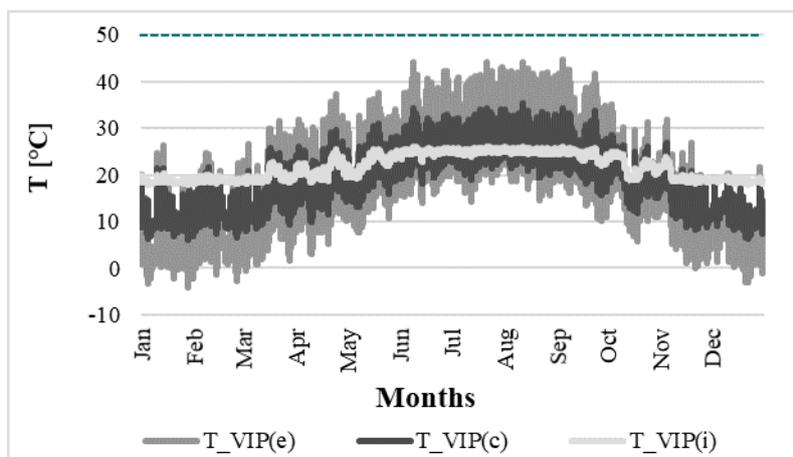


Grafico 19: analisi della temperatura del pannello VIP\_Config.2.3.2

Nello specifico, nel giorno in cui la temperatura raggiunge il picco (12/08), si registra che la superficie esterna del VIP raggiunge una temperatura massima di 45°C alle ore 17.00.

La temperatura del centro del pannello e della superficie interna, si mantengono anch'essi al di sotto del limite. [Grafico 20]

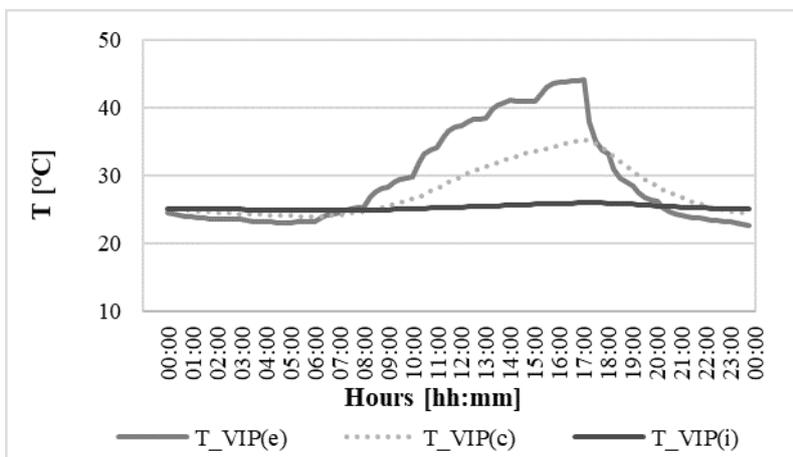


Grafico 20: analisi della temperatura del pannello VIP in un giorno tipo\_Config.2.3.2

Dall'analisi delle frequenze cumulate risulta quindi che il pannello non raggiunge mai la sua temperatura limite di 50°C. [Grafico 21]

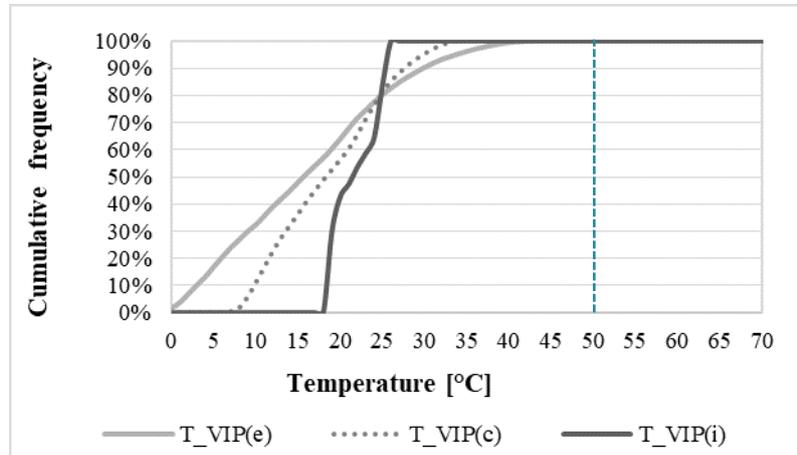


Grafico 21: frequenze cumulate relative al pannello VIP\_Config.2.3.2

Passando all'analisi del PCM, come già espresso in precedenza (vedi paragrafo 3.3.1), sappiamo che il pannello non deve raggiungere la temperatura di 65°C, per evitarne la rottura, ma deve raggiungere i 26°C per fondere e poter effettuare il passaggio di stato da solido a liquido. Dall'analisi effettuata emerge che il pannello raggiunge la temperatura di 25°C, quindi il materiale fonde. [Grafico 22]

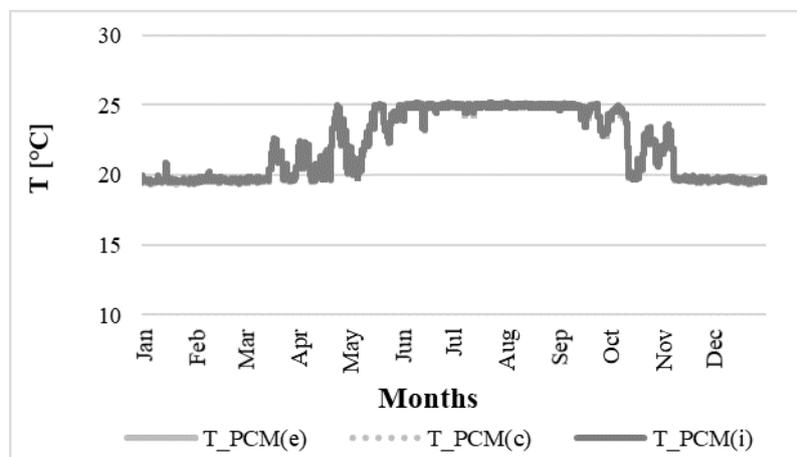


Grafico 22: analisi della temperatura del PCM\_plastic film bags\_Config.2.3.2

Nel grafico successivo [Grafico 23] riguardante l'analisi della superficie interna dell'intero componente, emerge che il flusso sulla superficie interna oscilla principalmente tra i -4 in periodo invernale e i 4 W/m<sup>2</sup> nel periodo estivo.

Mentre la temperatura sulla superficie interna si mantiene al di sotto dei 20 °C nei mesi invernali e su quasi 25°C nei mesi estivi.

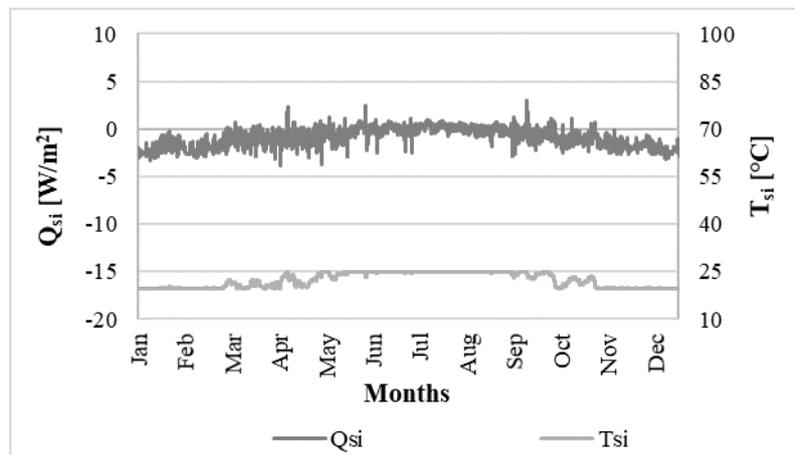
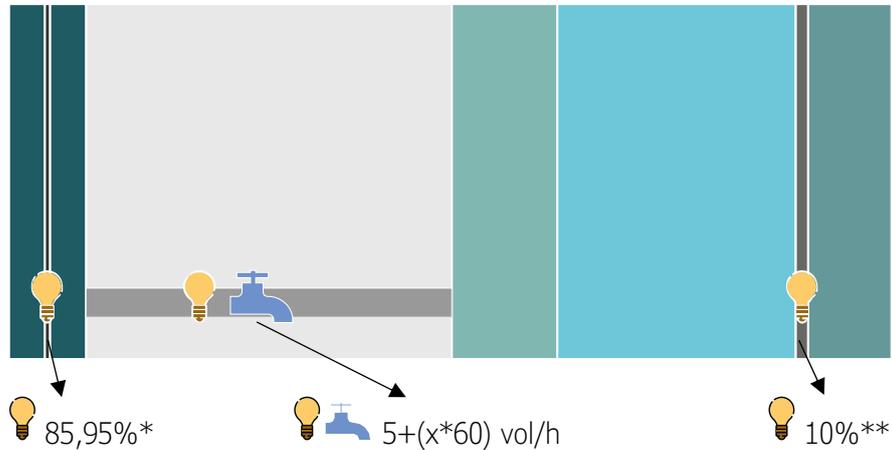


Grafico 23: analisi della temperatura e dei flussi sulla superficie interna\_Config.2.3.2

## Configurazione 3.3.2\_ ACTIVE\_con PCM\_ inorganic\_plastic film bags

### a. Metodologia



### Dati di input su Window

\*Calcolati con software optical  
[6.2 Metodologia di indagine]

\*\* efficienza di targa del pannello

<p><b>Vetro laminato</b> Spessore: 0.003 + 0.003 m Densità: 2500 kg/m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 1 W/mK Calore specifico: 795 J/kgK</p>	<p><b>VIP – glass fiber</b> Spessore: 0.020 m Densità: 200 kg/m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.0041 W/mK Calore specifico: 800 J/kgK</p>
<p><b>Fotovoltaico (PV)</b> Spessore: 0.00042 m Densità: 950 kg/m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.38 W/mK Calore specifico: 1100 J/kgK</p>	<p><b>Tappetino termoriscaldante</b> Spessore: 0.0004 m Densità: 950 kg/m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.38 W/mK Calore specifico: 1100 J/kgK</p>
<p><b>Cavità d'aria (ventilata dall'esterno)</b> Spessore: 0.031 m Densità: 1.3 kg/ m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.042 W/mK Calore specifico: 1000 J/kgK</p>	<p><b>PCM_base minerale</b> Spessore: 0.0068 m Densità: 784 kg/ m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.17 W/mK Calore specifico: 3140 J/kgK</p>
<p><b>Isolante multi-strato riflettente</b> Spessore: 0.009 m Densità: 20 kg/ m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 0.026 W/mK Calore specifico: 896 J/kgK</p>	<p><b>Foglio di alluminio</b> Spessore: 0.0001 m Densità: 2700 kg/ m<sup>3</sup> Conducibilità termica: 235 W/mK Calore specifico: 896 J/kgK</p>

## b. Risultati

Questa configurazione appartiene alla categoria *active*, per questo è caratterizzata dalla presenza del fotovoltaico unito all'utilizzo del tappetino termoriscaldante, utilizzato esclusivamente in stagione invernale. Inoltre, è presente il PCM a base minerale.

A seguito delle simulazioni svolte, si prende in analisi l'esposizione sud ovest [Appendice capitolo 6], in quanto risulta essere l'orientamento più critico cui può essere sottoposto il componente.

Per gli altri orientamenti si rimanda all'Appendice capitolo 6.

Per l'analisi del flusso termico sulla superficie interna del componente, su base mensile [Grafico 24], si nota come la configurazione sia simile ad una parete riscaldante, quasi priva di dispersioni termiche. Infatti, la massima dispersione termica (*heat losses*) si registra a gennaio con  $-700 \text{ Wh/m}^2$ .

I guadagni termici (*heat gain*), invece, raggiungono un flusso di  $8600 \text{ Wh/m}^2$  nel mese di marzo.

Durante il periodo invernale è stata considerata sia la potenza del fotovoltaico che il tappetino termoriscaldante, mentre durante il periodo estivo, il tappetino termoriscaldante non viene attivato.

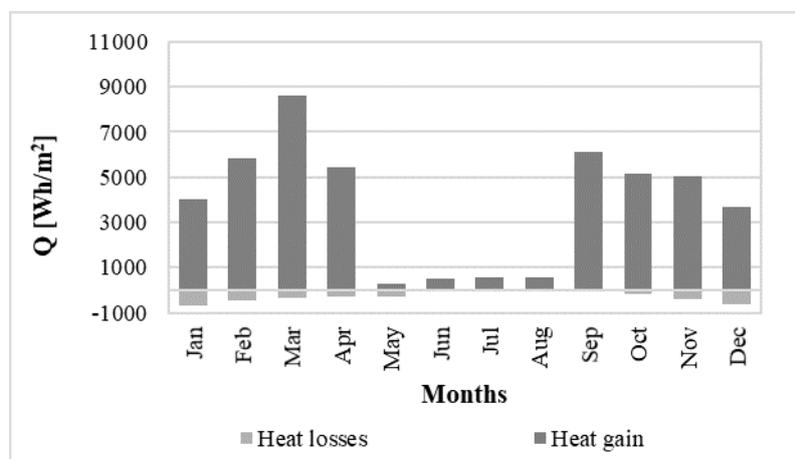


Grafico 24: analisi mensile dei flussi sulla superficie interna\_Config.3.3.2

Per quanto riguarda l'analisi della temperatura che raggiunge il VIP durante l'arco di tutta la simulazione, risulta che la superficie esterna del pannello VIP, in particolar modo nel periodo estivo, raggiunge una temperatura superiore a  $50^\circ\text{C}$  (valore limite) fino ad un massimo di circa  $70^\circ\text{C}$  [Grafico 25].

Il centro del pannello e la superficie interna del VIP, si mantengono ad una temperatura al di sotto del limite, per tutto l'arco della simulazione.

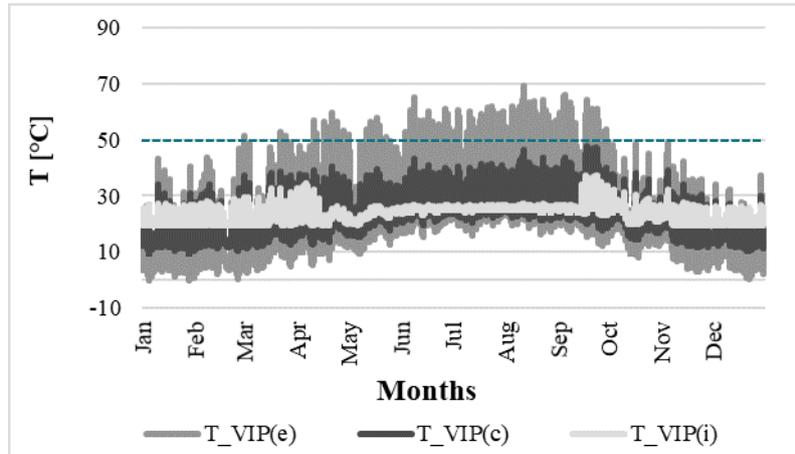


Grafico 25: analisi della temperatura del pannello VIP\_Config.3.3.2

Nello specifico, nel giorno in cui la temperatura raggiunge il picco (12/08), si nota come la superficie esterna del VIP raggiunge una temperatura massima di 69°C alle ore 17.00. La temperatura del centro del pannello e la temperatura della superficie interna, si mantengono, invece, al di sotto del limite. [Grafico 26]

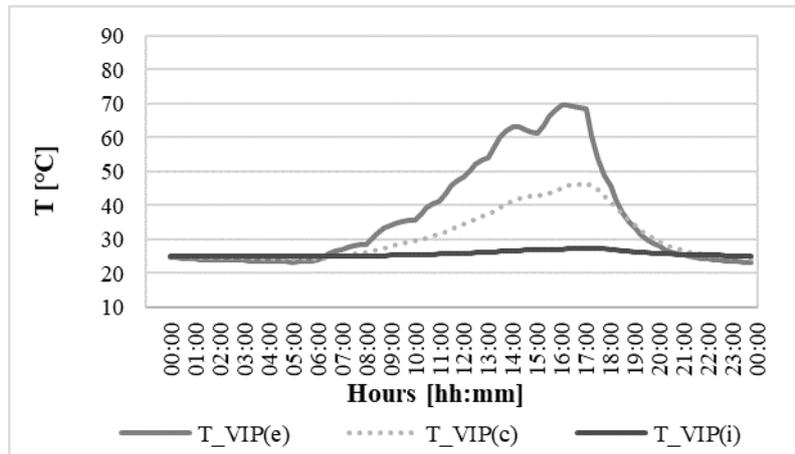


Grafico 26: analisi della temperatura del pannello VIP in un giorno tipo\_Config.3.3.2

Dall'analisi delle frequenze cumulate risulta quindi che il pannello oltrepassa la temperatura limite per un periodo di tempo davvero limitato. [Grafico 27]

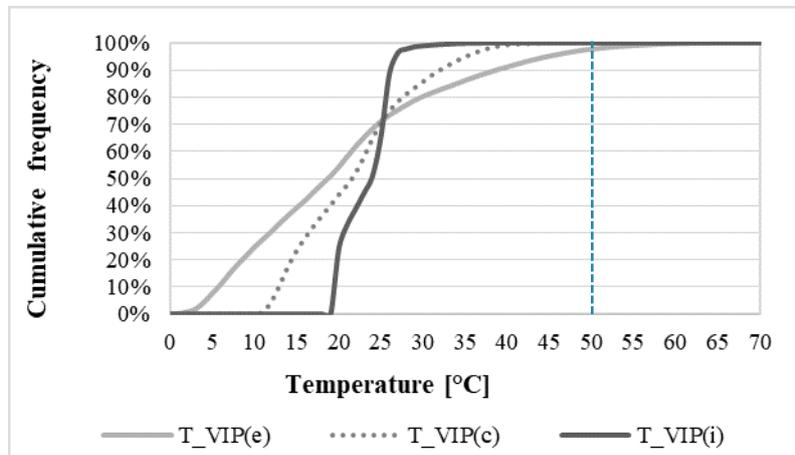


Grafico 27: frequenze cumulate relative al pannello VIP\_Config.3.3.2

Passando all'analisi del PCM\_plastic film bags), sappiamo che il pannello non deve raggiungere la temperatura di 65°C, per evitarne la rottura, ma deve raggiungere i 26°C per fondere e poter effettuare il passaggio di stato da solido a liquido. Dall'analisi effettuata emerge che il pannello supera la temperatura di 26°C durante il periodo invernale, ma nel periodo estivo, raggiunge difficilmente la temperatura necessaria affinché possa fondere. [Grafico 28]

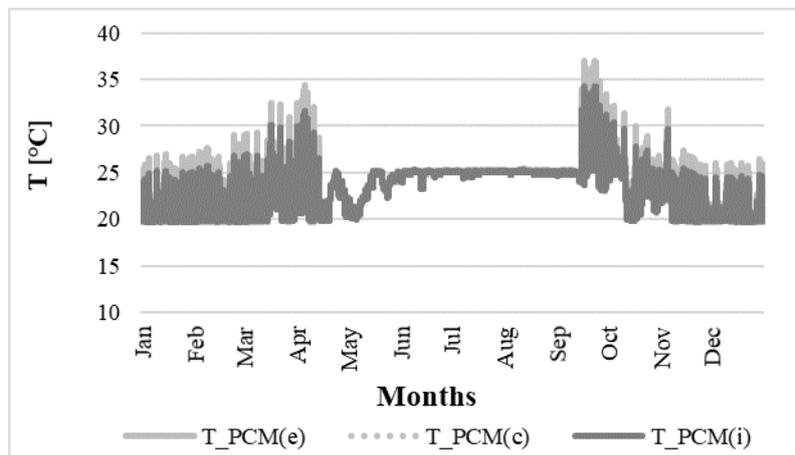


Grafico 28: analisi della temperatura del PCM\_plastic film bags\_Config.3.3.2

Nel grafico successivo [Grafico 29] riguardante la temperatura sulla superficie interna dell'intero componente, emerge che il flusso oscilla principalmente tra 0 W/m<sup>2</sup> e i 70 W/ m<sup>2</sup> in periodo invernale, mentre nel periodo estivo avremo un flusso entrante davvero minimo.

La temperatura sulla superficie interna si mantiene al di sotto dei 35 °C nei mesi invernali e su quasi 25°C nei mesi estivi.

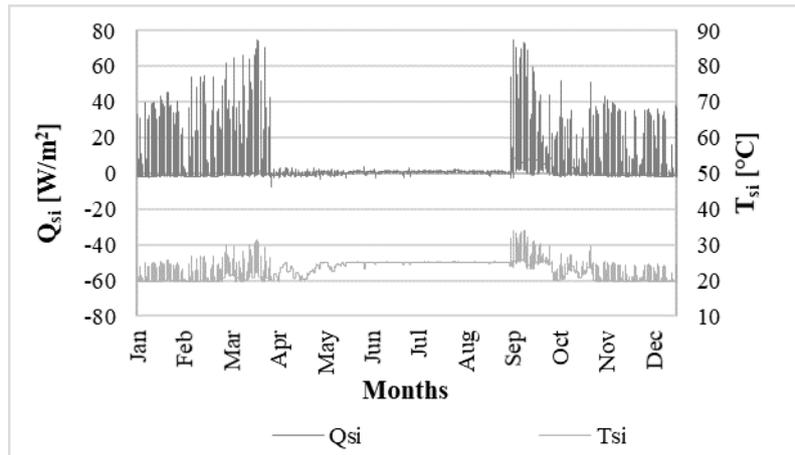


Grafico 29: analisi della temperatura e dei flussi sulla superficie interna\_Config.3.3.2

## Configurazione benchmark

### a. Metodologia



- Vetro laminato**  
Spessore: 0.003 + 0.003 m  
Densità: 2500 kg/m<sup>3</sup>  
Conducibilità termica: 1 W/mK  
Calore specifico: 795 J/kgK
- Cavità d'aria (non ventilata)**  
Spessore: 0.05 m  
Densità: 1.3 kg/ m<sup>3</sup>  
Conducibilità termica: 0.04 W/mK  
Calore specifico: 1000 J/kgK
- PIR (poliuretano espanso)**  
Spessore: 0.1 m  
Densità: 35 kg/ m<sup>3</sup>  
Conducibilità termica: 0.02 W/mK  
Calore specifico: 1453 J/kgK
- Cartongesso**  
Spessore: 0.0095 m  
Densità: 680 kg/m<sup>3</sup>  
Conducibilità termica: 0.2 W/mK  
Calore specifico: 795 J/kgK

## b. Risultati

La configurazione in analisi è caratterizzata dalla presenza del PIR, poliuretano espanso che su entrambi i lati ha un rivestimento a base di lamina composita a bassa emissività. Questa superficie riflettente è utile al fine di migliorare la resistenza termica di qualsiasi cavità non ventilata adiacente al pannello.

L'orientamento più critico cui può essere sottoposta è con orientamento a sud-ovest [Appendice capitolo 6]. Per le altre esposizioni vedi *Appendice capitolo 6*.

Per l'analisi del flusso termico sulla superficie interna del componente, su base mensile [Grafico 30], si nota come le principali dispersione termiche (*heat losses*) si registrano nei periodi invernali, raggiungendo un flusso di quasi  $-2600 \text{ Wh/m}^2$ .

I guadagni termici (*heat gain*), che avvengono principalmente nei periodi estivi, arrivano a registrare un flusso di circa  $620 \text{ Wh/m}^2$

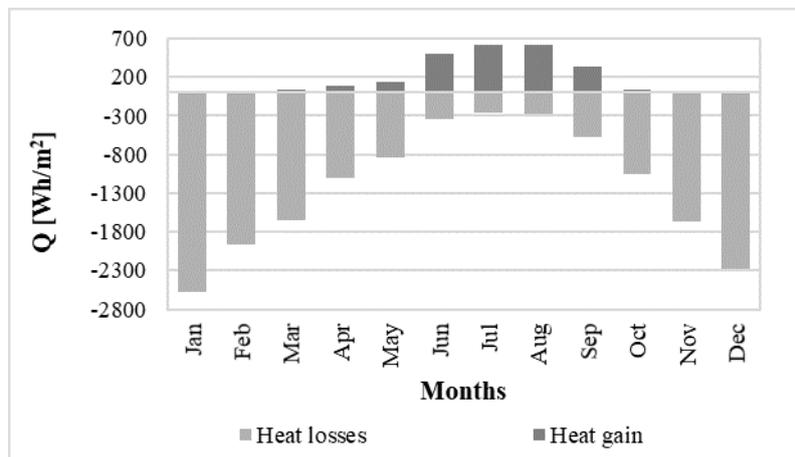


Grafico 30: analisi mensile dei flussi sulla superficie interna\_Config. Benchmark

Per quanto riguarda l'analisi della temperatura che raggiunge il PIR durante l'arco di tutta la simulazione, risulta che la superficie esterna arriva ad una temperatura appena superiore ai  $40^\circ\text{C}$  [Grafico 31].

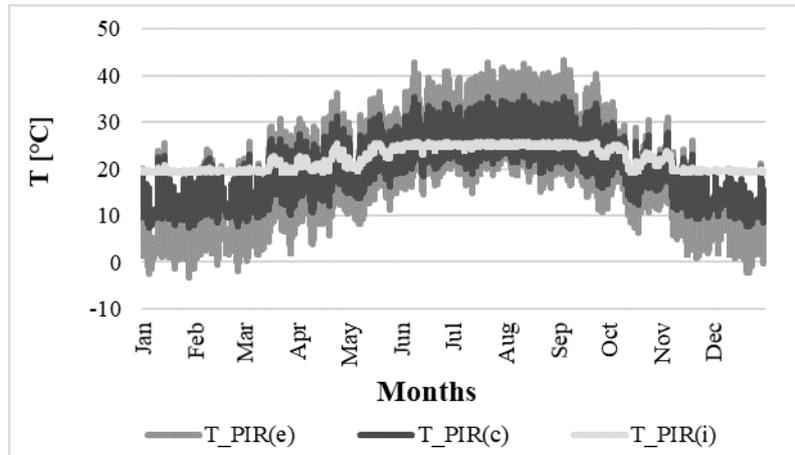


Grafico 31: analisi della temperatura del PIR\_Config. Benchmark

Nel grafico successivo [Grafico 32] riguardante la temperatura sulla superficie interna dell'intero componente, emerge come il flusso sulla superficie interna oscilla tra i  $-4 \text{ W/m}^2$  in periodo invernale e i  $+4 \text{ W/m}^2$  nel periodo estivo.

Mentre la temperatura sulla superficie interna si mantiene al di sotto dei  $25 \text{ °C}$  nei mesi invernali e sui quasi  $26 \text{ °C}$  nei mesi estivi.

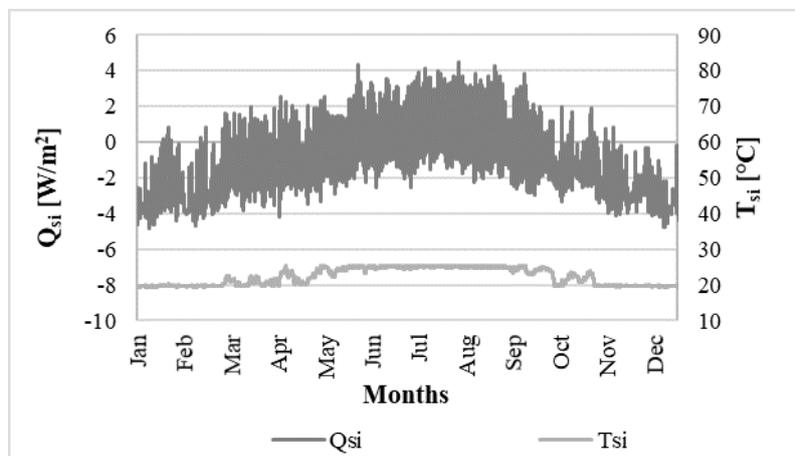


Grafico 32: analisi della temperatura e dei flussi sulla superficie interna\_Config. Benchmark

## 7. Analisi sperimentale

### 7.1 Analisi a scala di materiale

L'obiettivo della campagna sperimentale condotta è la **caratterizzazione di materiali innovativi** (PCM e VIP) al fine di creare un benchmark e indirizzare la scelta su un solo prodotto all'interno di ciascuna categoria di materiali. L'analisi sperimentale è stata condotta attraverso dei test in laboratorio che hanno previsto l'utilizzo di un **termo-flussimetro**, uno strumento in grado di generare una differenza di temperatura tra i due lati del campione e misurare il flusso termico che attraversa il provino e le temperature superficiali, determinando così specifiche proprietà termiche (conducibilità termica, entalpia in funzione della temperatura, risposta sinusoidale). Confrontando i dati ottenuti è stato possibile avere un quadro completo delle potenzialità e delle problematiche connesse all'uso di questi materiali.

Lo strumento utilizzato per queste misurazioni è un Lasercomp FOX 600 conforme alle norme ASTM C518-17 [34] e EN 12667 [35]. L'apparecchio può funzionare in condizioni stazionarie (per la misura della conducibilità termica e della resistenza termica) e in condizioni dinamiche, solitamente utilizzate per la caratterizzazione delle proprietà termiche dinamiche (risposta sinusoidale) [36]. Nel primo caso viene indicato con l'acronimo HFM (Heat Flow Meter), nel secondo caso con l'acronimo DHFM (Dynamic Heat Flow Meter) poiché si utilizza un software più avanzato in grado di riprodurre rampe e variazioni periodiche della temperatura. Nello specifico, il sistema è composto da due piastre metalliche (dimensioni 600x600 mm), una riscaldante ed una refrigerante, in grado di muoversi verticalmente ed abbassarsi fino ad incontrare il campione, determinandone in modo automatico lo spessore (con una precisione di misura di  $\pm 0.25$  mm). La piastra è dotata di un'area di misura centrale (dimensioni 254x254 mm) costituita da trasduttori di flusso termico in grado di convertire una grandezza fisica in segnale elettrico e da termocoppie di tipo E che registrano la temperatura superficiale del provino con un'accuratezza di  $\pm 0.01$  °C. Le termocoppie sono strumenti caratterizzati da due fili accoppiati costituiti da due metalli diversi (in questo caso, cromo e costantana) saldati insieme ad un'estremità. Quando due metalli

vengono abbinati si verifica un fenomeno per cui si genera una differenza di potenziale elettrico che dipende in maniera lineare dalla differenza di temperatura alle due estremità. Di conseguenza conoscendo la differenza di potenziale, questa può essere ricondotta ad una differenza di temperatura.

Inoltre, lo strumento è dotato sul perimetro e sulle piastre di pannelli di materiale isolante al fine di evitare che la misura venga influenzata dalle condizioni esterne.

Infine il dispositivo è riscaldato/raffreddato da un chiller costituito da una serie di celle Peltier che utilizzano un refrigeratore esterno come scambiatore di calore e consentono di portare le piastre a una temperatura che può variare da  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$  [37] [38]. I componenti principali dello strumento e il suo sistema di funzionamento sono illustrati nella Fig. 17.

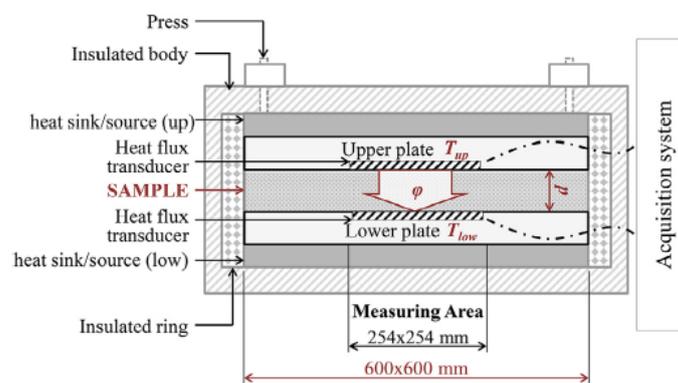


Fig. 17 Schema e principio di funzionamento dell'apparecchio HFM utilizzato

### 7.1.1 PCM

Al fine di ottimizzare l'applicazione dei PCM nei componenti edilizi è necessaria un'attenta scelta delle proprietà termiche del materiale. In questo senso l'attività sperimentale condotta si è posta i seguenti obiettivi [39][40]:

- Definire e sviluppare una **metodologia sperimentale** che possa essere condivisa dalle norme UNI EN e possa offrire delle indicazioni sulle corrette modalità di misura dei materiali a cambiamento di fase (PCM);
- Caratterizzare ed analizzare il comportamento termico dei PCM attraverso la misura della conducibilità termica, dell'entalpia in funzione della temperatura e della risposta sinusoidale mediante l'utilizzo di un termo-flussimetro;

- Fornire dei dati sperimentali che permettano di confrontare i risultati dei BPS (Building Performance Simulation) e possano essere validati da quest'ultimi.<sup>7</sup>

I dati sperimentali presentati in questo elaborato sono stati ottenuti da due diverse categorie di PCM: organici a base di paraffine ed inorganici a base di sali idrati. In particolare, i materiali testati sono riportati in Tabella 7.

Tabella 7: PCM testati

PCM Type	PCM code
Organic (Paraffine)	PCM_aluminium case_a
Inorganic (hydrated salts)	PCM_aluminium case_c
	PCM_plastic film bags
	PCM_plastic container
	PCM_plastic case_a
	PCM_plastic case_b
	PCM_plastic case_c

### 7.1.1.1 Metodologia

#### 7.1.1.1.1 Conducibilità termica

I test di conducibilità termica sui materiali a cambiamento di fase sono stati effettuati secondo la seguente metodologia:

- In primo luogo, sono stati **preparati i campioni** da inserire all'interno del termo-flussimetro: in alcuni casi la prova è stata effettuata su un **singolo pannello centrato** rispetto alla piastra ed alla relativa area di misura, in altri sono stati **accoppiati due elementi** e sono stati disposti anch'essi al centro dello strumento;
- Successivamente si è proceduto all'identificazione dei punti sul campione nei quali **collocare le termocoppie**. L'aderenza è stata garantita da del nastro di alluminio, il quale essendo un materiale conduttivo non genera una resistenza termica addizionale. Le termocoppie risultano fondamentali per

<sup>7</sup> I BPS (Building Performance Simulation) sono dei codici per la simulazione delle prestazioni degli edifici i quali possono essere utilizzati come strumenti di progettazione, di ricerca e sviluppo. Relativamente alla modellazione di componenti edilizi costituiti da PCM, i BPS presentano alcune limiti legati alla difficoltà di replicare gli effetti dei fenomeni termici del sottoraffreddamento e dell'isteresi.

poter conoscere l'andamento della temperatura su determinati punti di un'interfaccia tra due materiali distinti: in alcuni casi, infatti, è stato necessario ricorrere all'inserimento di termocoppie poiché il campione è stato interposto tra due **fogli di gomma naturale**, denominata para, di cui sono noti i dati riportati in Tabella 8:

Tabella 8: Tappetini di para gialla 2mm

t	$\lambda$	R [m <sup>2</sup> K/W]	m	V	$\rho$	c
[m]	[W/mK]		[kg]	[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]
0.00202	0.136	0.0149	0.743	0.000733	1013.266	1757.741

- A seguito della preparazione del provino e della collocazione delle rispettive termocoppie si è proceduto all'**inserimento del campione**, eventualmente interposto tra due i citati strati di gomma, all'interno dello strumento ed al **collegamento delle termocoppie** alla morsetta di cui questo è dotato. Essa è costituita da 16 canali, a ciascuno dei quali può essere associata una termocoppia. Durante quest'ultimo passaggio è bene porre la dovuta attenzione affinché i fili delle termocoppie non si sovrastino l'uno con l'altro creando ulteriore spessore. Inoltre, per ridurre gli effetti di trasmissione del calore bidimensionale dei bordi, sono state aggiunte delle strisce di **fibra di poliestere** ai lati del campione. La fibra di poliestere è un materiale isolante particolarmente idoneo per questo tipo di test poiché molto comprimibile dunque facilmente adattabile a qualsiasi spessore;
- Giunti a questo punto, dopo aver **acceso il chiller** ed averlo impostato ad una temperatura di 14°C, si è passati alla definizione delle impostazioni del software *WinTherm32v3* connesso allo strumento di misura per il lancio della prova sperimentale. In particolare, nel caso dei materiali a cambiamento di fase è stato necessario definire almeno due setpoint<sup>8</sup> affinché lo strumento effettuasse **due misurazioni**: una su **materiale solido** ed uno su **materiale fuso**. In alcuni casi per ciascuna fase del materiale sono stati definiti due setpoint, uno con flusso termico ascendente ed uno con flusso termico discendente.

Tuttavia, durante la campagna sperimentale, un guasto al chiller ha reso difficoltoso l'avvio di test lunghi (24748h), pertanto, per poter controllare in modo costante il corretto raffreddamento dello strumento da parte del chiller, si è deciso di lanciare test brevi della durata di qualche ora e dunque

<sup>8</sup> I setpoint (letteralmente punti fissi) sono delle coppie di temperature relative rispettivamente alla piastra superiore ed inferiore, che lo strumento deve raggiungere per poter effettuare il test secondo le modalità stabilite.

di effettuare dei test con PCM allo stato solido e test con PCM allo stato liquido. Nello specifico, per poter portare a fusione i materiali in esame è stata predisposta una teca di condizionamento nella quale la temperatura è stata portata al valore desiderato, ovvero ad una temperatura maggiore della temperatura di fusione del PCM da testare, attraverso l'utilizzo di un tappetino termo-riscaldante.

Inoltre, affinché i campioni non fossero influenzati dalla temperatura del pavimento, sono stati usati una serie di materiali isolanti seguendo la seguente configurazione [Fig. 18]:

- Sottile pannello in legno a contatto con il pavimento;
- Tappetino termo-riscaldante;
- Tappetino di para rossa di spessore 5 cm;
- Pannello di PCM sollevato rispetto allo strato di gomma rossa attraverso quattro pesetti metallici;
- Teca con termocoppia che rileva la temperatura interna dell'ambiente creato.

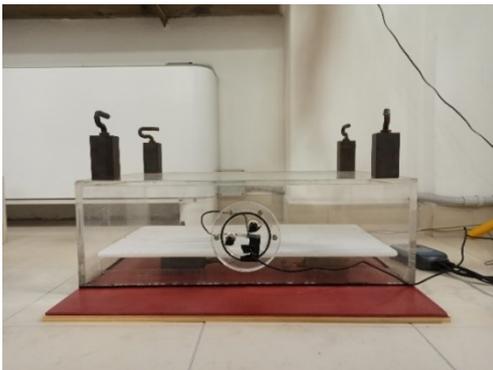


Fig. 18 Teca di condizionamento dei PCM.

- Infine, dopo aver stabilito determinati parametri relativi ai criteri di equilibrio, alle modalità di restituzione dei dati di output e al file di calibrazione da utilizzare, la prova è stata lanciata. Pertanto, la piastra superiore si è progressivamente abbassata e lo strumento è stato chiuso.

### PCM\_aluminium case (Design of experiment)

Prima di sottoporre questi PCM (PCM\_aluminium case\_a, PCM\_aluminium case\_c) alla misura di conducibilità termica è stata effettuata un'analisi preliminare che rientra nella metodologia del "design of experiment" (DOE), la quale consiste nel realizzare una serie di prove, attraverso dei software, nelle quali le variabili in ingresso (dati di input) vengono variate secondo una modalità programmata. In questo modo si possono individuare le cause di ogni effetto ottenuto conoscendo le condizioni che hanno generato determinati risultati. La progettazione degli esperimenti è uno strumento fondamentale che permette di migliorare un processo sperimentale, prevedendo ed evitando eventuali errori legati alle caratteristiche del materiale da testare o a limiti dell'apparecchio di misura stesso. [41]

Nello specifico, quest'analisi è stata effettuata per via del particolare contenitore in alluminio nel quale questi materiali sono macroincapsulati. Si tratta di contenitori CSM (compact storage modules) costituiti da due fogli di alluminio particolarmente sagomati che vengono fissati l'uno all'altro, snodati in due punti centrali ed incollati tra loro in corrispondenza del perimetro. Essi sono caratterizzati da dimensioni di 450 x 300 mm e sono disponibili in due diversi spessori (10 mm, 15 mm) [Fig. 19].



Fig. 19 Pannello CMS, spessore 10 mm (a sinistra). Pannello CSM, spessore 15 mm (a destra).

Osservando la particolare geometria del pannello ed immaginando di inserire lo stesso all'interno dello strumento di misura sono state individuate tre differenti cavità [Fig. 20].

- La prima è quella che caratterizza gran parte della superficie del pannello per la presenza di piccoli rigonfiamenti di base quadrata e forma tronco-conica;
- La seconda cavità si trova al centro del pannello sia sul lato superiore che quello inferiore. In particolare, nel pannello da 10 mm essa è identica su

entrambi i lati conferendo al campione una configurazione perfettamente simmetrica; in quello da 15 mm la cavità sulla superficie superiore presenta delle dimensioni maggiori rispetto a quella inferiore. Questa tipologia di intercapedine è stata considerata come un **ponte termico puntuale**.

- La terza è data dalla forma singolare di chiusura del pannello in corrispondenza del perimetro ed è stata interpretata come un **ponte termico lineare**.

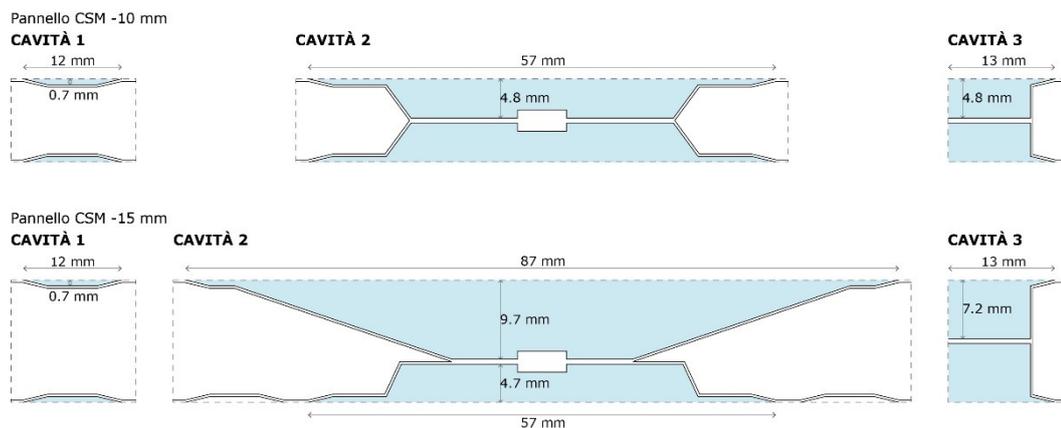


Fig. 20 Cavità pannello CSM.

L'obiettivo di questo DOE, il cui schema è riportato in Fig. 21, è stato quello di valutare preliminarmente l'impatto che queste intercapedini d'aria potessero avere sulla misura della conducibilità termica del pannello, per rispondere a due importanti questioni:

- Quale fosse la **differenza di temperatura massima  $\Delta T_{max}$**  tra la piastra superiore e quella inferiore dello strumento di misura affinché il flusso di calore non superasse il limite consentito dallo strumento ( $Q=800$  W);
- Quale **porzione del pannello** si dovesse collocare **in corrispondenza dell'area di misura del termo-flussimetro** per ottenere un risultato attendibile e non influenzato dalla presenza di potenziali ponti termici dati dalle cavità d'aria, le quali si creano tra il provino e l'apparecchio di misura (o eventuali strati aggiuntivi tra i quali il campione è stato interposto).

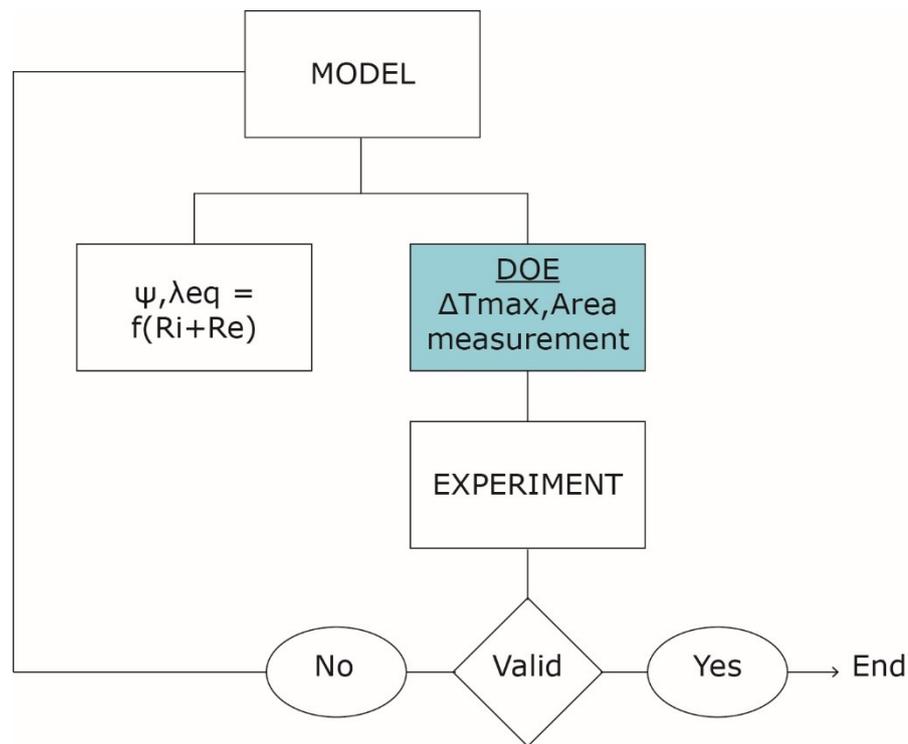


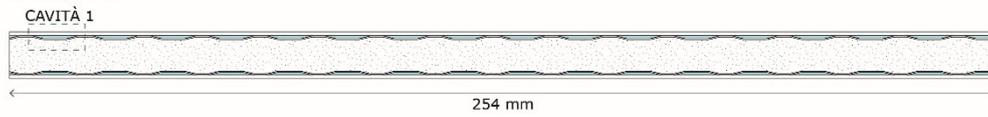
Fig. 21 Schema DOE

Per fare ciò è stato utilizzato il software **THERM 7.7.**, un programma che consente di modellare l'effetto del trasferimento di calore bidimensionale in componenti edilizi caratterizzati da geometrie complicate e ponti termici. Il software permette di disegnare/importare le sezioni trasversali dei prodotti da analizzare e di definire le proprietà dei materiali coinvolti e le condizioni al contorno alle quali il componente è esposto. Una volta creato il modello, l'analisi rimanente avviene in modo automatico restituendo i risultati in diversi termini (temperatura, flusso di calore, U factor, isoterme, ecc.). [42]

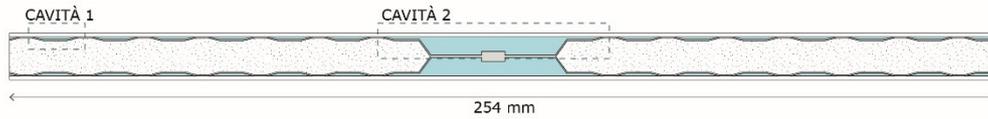
In particolare, sono state prese in esame tre differenti sezioni corrispondenti alle tre diverse cavità d'aria [Fig. 22]

Pannello CSM -10 mm

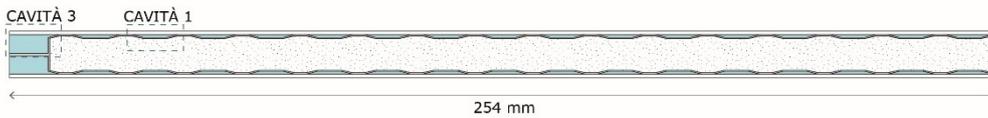
**SEZIONE 1**



**SEZIONE 2**

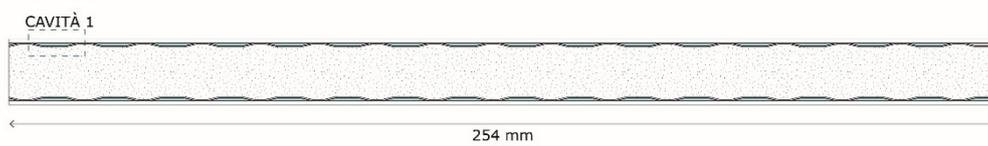


**SEZIONE 3**

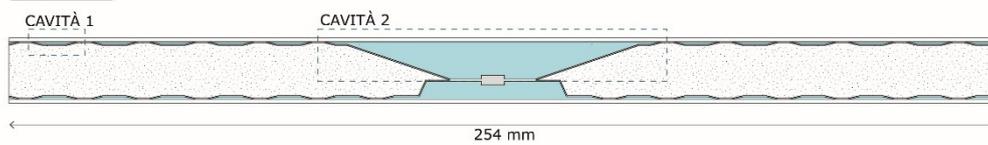


Pannello CSM -15 mm

**SEZIONE 1**



**SEZIONE 2**



**SEZIONE 3**

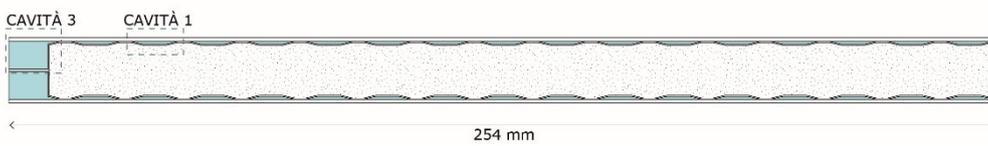


Fig. 22 Sezioni pannello CSM

**LEGENDA**

-  Pannelli aggiuntivi
-  Case di alluminio
-  PCM sfuso
-  Cavità d'aria

È stata effettuata una simulazione per ogni sezione analizzata e di ciascuna è stato considerato il dato di output relativo al flusso di calore trasmesso  $Q$ . A partire da quest'ultimo è stato possibile calcolare la conducibilità termica equivalente del pannello  $\lambda_{eq}$  secondo il seguente procedimento:

- in primo luogo, è stata calcolata la trasmittanza termica lineica del ponte termico puntuale  $\psi_2$  (relativo alla sezione 2). Questa grandezza descrive il flusso di calore aggiuntivo alla trasmittanza dell'elemento di riferimento in corrispondenza di ponte termici e si calcola con la seguente equazione:

$$\psi_2 = \frac{Q_{2D-2} - Q_{1D}}{L_{Therm} \times \Delta T} \quad (1)$$

dove:

$Q_{2D-2}$  è il flusso termico bidimensionale riferito alla sezione 2 (ponte termico puntuale);

$Q_{1D}$  è flusso monodimensionale riferito alla sezione 1(cavità di tipo1);

$L$  è la profondità unitaria riferita alla terza dimensione del modello del software Therm  $w_{Therm}$  ( $w_{Therm} = 1 \text{ m}$ );

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

- Analogamente è stata ricavata la trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare  $\psi_3$  (relativo alla sezione 3):

$$\psi_3 = \frac{Q_{2D-3} - Q_{1D}}{L_{Therm} \times \Delta T} \quad (2)$$

dove:

$Q_{2D-3}$  è il flusso termico bidimensionale riferito alla sezione 3(ponte termico lineare)

$Q_{1D}$  è flusso monodimensionale riferito alla sezione 1(cavità di tipo1);

$L$  è la profondità unitaria riferita alla terza dimensione del modello del software Therm  $l_{Therm}$  ( $l_{Therm} = 1 \text{ m}$ );

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

- Successivamente è stato determinato il flusso termico bidimensionale  $Q_{2D-1}$  relativo alla sezione 1 (cavità di tipo 1) ed i valori di extra flusso relativi ai due ponti termici  $Q_{extra2}$  e  $Q_{extra3}$  :

$$Q_{2D-1} = \frac{Q_{1D} \times A_{panel}}{A_{Therm}} \quad (3)$$

dove:

$Q_{1D}$  è flusso monodimensionale riferito alla sezione 1(cavità di tipo1);

$A_{panel}$  è l'area del pannello ( $A_{panel} = 0.450 \text{ m} \times 0.300 \text{ m} = 0.135 \text{ m}^2$ );

$A_{Therm}$  è l'area di misura data dalla lunghezza del modello di Therm  $l_{Therm}$  per la relativa profondità  $w_{Therm}$  ( $l_{Therm} \times w_{Therm} = 0.254 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 0.254 \text{ m}^2$ ).

$$Q_{extra2} = 2 \times (\psi_2 \times L_2 \times \Delta T) \quad (4)$$

dove:

$\psi_2$  è la trasmittanza termica lineica relativa al ponte termico puntuale (sezione 2)

$L_2$  è la lunghezza del ponte termico e trattandosi di un ponte termico puntuale è stata considerata pari al diametro della cavità di tipo 2;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

Il prodotto di quest'ultimi valori è stato raddoppiato poiché il pannello presenta due ponti termici puntuali.

$$Q_{extra3} = \psi_3 \times L_3 \times \Delta T \quad (5)$$

dove:

$\psi_3$  è la trasmittanza termica lineica relativa al ponte termico lineare (sezione 3);

$L_3$  è la lunghezza del ponte termico lineare e corrisponde al perimetro del pannello ( $L = 0.450 \text{ m} + 0.300 \text{ m} + 0.450 \text{ m} + 0.300 \text{ m} = 1,5 \text{ m}$ );

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

- A questo punto, sommando i valori ottenuti  $Q_{2D-1}$ ,  $Q_{extra2}$  e  $Q_{extra3}$  è stato determinato il flusso termico totale  $Q_{tot}$  necessario per risolvere

l'equazione finale della conducibilità termica equivalente  $\lambda_{eq}$ . Nello specifico:

$$Q_{tot} = Q_{2D-1} + Q_{extra2} + Q_{extra3} \quad (6)$$

$$\lambda_{eq} = \frac{t \times Q_{tot}}{A_{panel} \times \Delta T} \quad (7)$$

dove:

$t$  è lo spessore del pannello;

$Q_{tot}$  è il flusso termico totale;

$A_{panel}$  è l'area del pannello ( $A_{panel} = 0.450 \text{ m} \times 0.300 \text{ m} = 0.135 \text{ m}^2$ );

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

Il procedimento descritto è stato ripetuto per quattro volte poiché che si è immaginato di interporre il pannello tra due ulteriori strati (uno superiore e uno inferiore) a cui, di volta in volta, sono state assegnate 4 differenti resistenze termiche aggiuntive  $R_i + R_e$ , come mostrato in Tabella 9:

**Tabella 9: Resistenze aggiuntive**

Test	$R_i + R_e$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R_i = R_e$ [m <sup>2</sup> K/W]	$t$ [m]	$\lambda$ [W/mK]
A	0	0	0.001	99999
B	0.01	0.005	0.001	0.2
C	0.1	0.05	0.001	0.02
D	1	0.5	0.001	0.002

Le condizioni al contorno, impostate sul software Therm e riportate in

Tabella 10 hanno previsto una differenza di temperatura tra la superficie superiore (1) e quella inferiore (2) del modello di 10°C. Esse rappresentano le due piastre che costituiscono lo strumento di misura e attraverso le quali si genera uno scambio termico. Al contrario, le superfici laterali (3-4) sono state considerate adiabatiche, dal momento che nell'apparecchio non è previsto alcun scambio termico tra le superfici laterali del materiale e le pareti del dispositivo.

Tabella 10: Condizioni al contorno

BC	T [°C]	Hc [W/m <sup>2</sup> K]
1	10	9999
2	20	9999
3	Adiabatic	
4	Adiabatic	

Come riportato precedentemente, i risultati ottenuti hanno consentito di:

- determinare la differenza di temperatura massima  $\Delta T_{max}$  a cui sottoporre le due piastre dello strumento di misura per evitare che il flusso totale  $Q_{max}$  di calore trasmesso non superi il limite massimo consentito ( $Q_{max} \ll 800 \text{ W}$ ) attraverso la seguente formula:

$$\Delta T_{max} = \frac{Q_{max} \times t}{A_{instr} \times \lambda_{eq}} \quad (8)$$

dove:

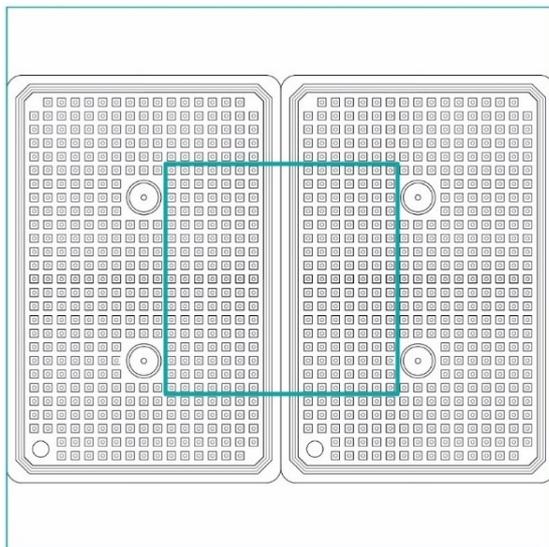
$Q_{max}$  è il flusso massimo di calore trasmesso ( $Q_{max} = 800 \text{ W}$ );

$t$  è lo spessore del pannello;

$A_{instr}$  è l'area interna del termo-flussimetro ( $A_{instr} = 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} = 0.36 \text{ m}^2$ );

$\lambda_{eq}$  è la conducibilità termica equivalente del pannello, determinata con l'equazione (8)

- di verificare quale fosse la porzione di pannello ottimale da collocare in corrispondenza dell'area di misura del dispositivo al fine di ottenere un valore di conducibilità termica del pannello non influenzata da potenziali ponti termici dati dalle cavità d'aria. Ciò è stato possibile ipotizzando 4 differenti disposizioni e calcolando per ciascuna di essa la conducibilità termica corrispondente. Infine, è stata scelta la configurazione la cui conducibilità termica si avvicinasse maggiormente al valore di conducibilità termica equivalente precedentemente calcolata per il pannello (equazione 7).

Configurazione 1

La configurazione 1 è caratterizzata da due pannelli accostati e centrati rispetto alle piastre dello strumento. La conducibilità termica corrispondente all'area di misura 1 è data da:

$$\lambda_1 = \frac{Q_1 \times t}{A_{meas} \times \Delta T} \quad (9)$$

dove:

$Q_1$  è il flusso di calore trasmesso attraverso l'area di misura 1 e si calcola come:

$$Q_1 = \frac{Q_{tot} \times A_{meas}}{A_{panel}} + 2 \times (\psi_3 \times L_3 \times \Delta T)$$

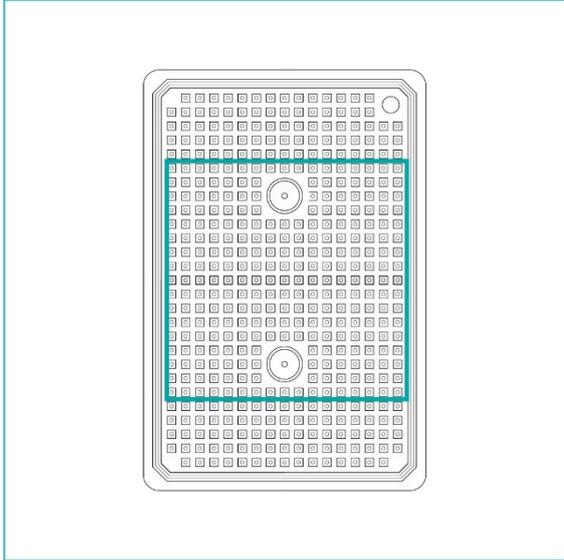
$t$  è lo spessore del pannello;

$A_{meas}$  è l'area di misura dello strumento;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

LEGENDA

- Area interna dello strumento ( $A_{instr} = 0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,36 \text{ m}^2$ )
- Area di misura dello strumento ( $A_{meas} = 0,254 \text{ m} \times 0,254 \text{ m} = 0,065 \text{ m}^2$ )

Configurazione 2

La configurazione 2, invece, è costituita da un solo pannello centrato rispetto l'area interna del dispositivo e l'area di misura, la cui conducibilità termica può essere calcolata come segue:

$$\lambda_2 = \frac{Q_2 \times t}{A_{meas} \times \Delta T} \quad (10)$$

dove:

$Q_2$  è il flusso di calore trasmesso attraverso l'area di misura 2 e si calcolata come:

$$Q_2 = \frac{Q_{tot} \times A_{meas}}{A_{panel}} + (2 \times (\psi_2 \times L_2 \times \Delta T));$$

$t$  è lo spessore del pannello;

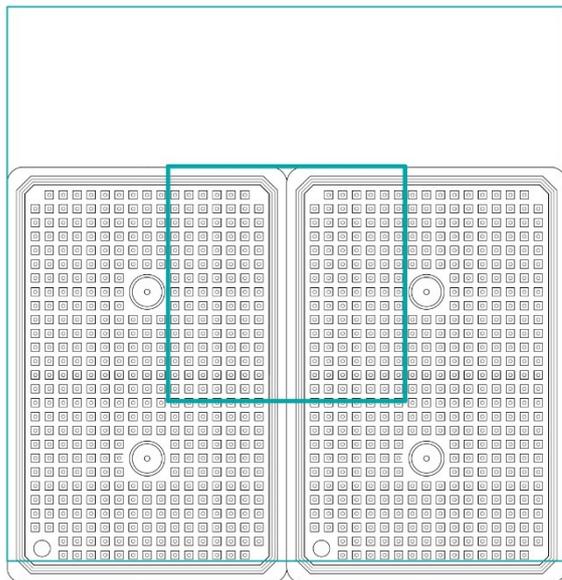
$A_{meas}$  è l'area di misura dello strumento;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

LEGENDA

- Area interna dello strumento ( $A_{instr} = 0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,36 \text{ m}^2$ )
- Area di misura dello strumento ( $A_{meas} = 0,254 \text{ m} \times 0,254 \text{ m} = 0,065 \text{ m}^2$ )

### Configurazione 3



La terza configurazione consta di due pannelli accostati e decentrati rispetto all'area di misura con l'obiettivo di effettuare le misure sulla parte più periferica del campione (cavità 3). Ne consegue che una piccola parte dei provini fuoriesca dallo strumento rendendo necessario l'isolamento della parte che sporge e impendendo la chiusura della porta anteriore del dispositivo. La conducibilità termica corrispondente all'area di misura 3 è data da:

$$\lambda_3 = \frac{Q_3 \times t}{A_{meas} \times \Delta T} \quad (11)$$

dove:

$Q_3$  è il flusso di calore trasmesso attraverso l'area di misura 3 e si calcola come:

$$Q_3 = \frac{Q_{tot} \times A_{meas}}{A_{panel}} + 2 \times (\psi_3 \times L_3 \times \Delta T);$$

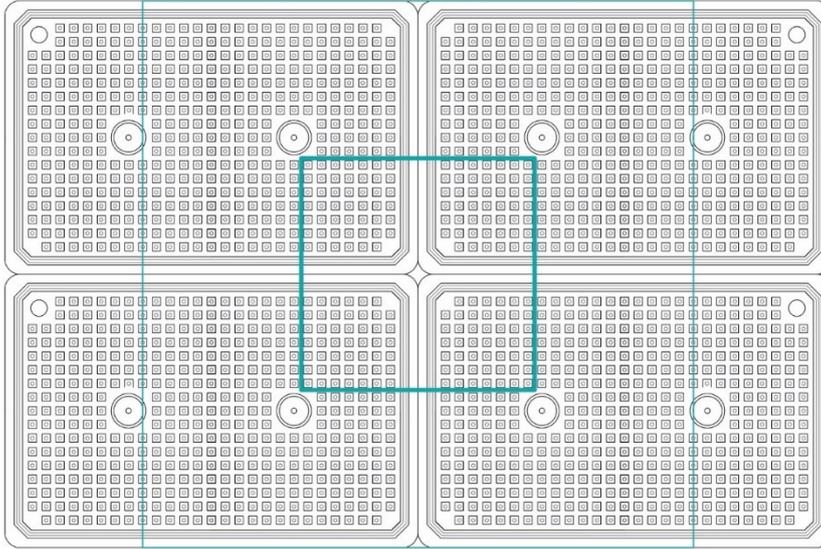
$t$  è lo spessore del pannello;

$A_{meas}$  è l'area di misura dello strumento;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

### LEGENDA

- Area interna dello strumento ( $A_{instr} = 0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,36 \text{ m}^2$ )
- Area di misura dello strumento ( $A_{meas} = 0,254 \text{ m} \times 0,254 \text{ m} = 0,065 \text{ m}^2$ )

Configurazione 4

Infine, l'ultima configurazione ipotizzata ha previsto la presenza di quattro pannelli accostati e disposti in modo centrato rispetto al termo-flussimetro. Anche in questo caso non sarà possibile chiudere le porte dello strumento e si dovrà opportunamente isolare le parti che ne fuoriescono. La conducibilità termica corrispondente all'area di misura 4 si calcola come con la seguente equazione:

$$\lambda_4 = \frac{Q_4 \times t}{A_{meas} \times \Delta T} \quad (12)$$

dove:

$Q_4$  è il flusso di calore trasmesso attraverso l'area di misura 2 e si calcola come:

$$Q_4 = \frac{Q_{tot} \times A_{meas}}{A_{panel}} + 4 \times (\psi_3 \times L_3 \times \Delta T);$$

$t$  è lo spessore del pannello;

$A_{meas}$  è l'area di misura dello strumento;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra le due condizioni al contorno imposte.

LEGENDA

- Area interna dello strumento ( $A_{instr} = 0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,36 \text{ m}^2$ )
- Area di misura dello strumento ( $A_{meas} = 0,254 \text{ m} \times 0,254 \text{ m} = 0,065 \text{ m}^2$ )

Nell'appendice 1 si riportano le tabelle con i dati di input delle simulazioni sul software Therm, i dati di output e i risultati delle equazioni riportate precedentemente in questo paragrafo. Dopo averli analizzati nel dettaglio si è giunti alle seguenti osservazioni:

- la differenza di temperatura massima  $\Delta T_{max}$  tra la piastra superiore e quella inferiore del dispositivo sperimentale può essere anche elevata, di conseguenza, sarà possibile condurre i test con un  $\Delta T_{max}$  previsto di  $10^{\circ}\text{C}$ ;
- la configurazione che consente di ottenere una conducibilità termica che si avvicina maggiormente al valore di conducibilità termica equivalente del pannello è la n°2, dunque la porzione di CSM ottimale da collocare in corrispondenza dell'area di misura è quella centrale che include le due cavità di tipo 2 disponendo un solo provino centrato rispetto alla superficie interna dello strumento. Questo vale per entrambi i pannelli CSM da 10 mm e da 15 mm sia per i PCM organici RT, sia per quelli inorganici SP.
- i dati di output dei test C, D e talvolta B, caratterizzati rispettivamente da resistenze aggiuntive  $R_i + R_e$  pari a  $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;  $1 \text{ m}^2\text{K/W}$  e  $0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$  presentano dei valori negativi di trasmittanza termica lineica  $\psi_2$  e  $\psi_3$  dei potenziali ponti termici relativi alle cavità 2 e 3. Da un punto di vista puramente matematico, ciò è dovuto dal fatto che i valori di flusso termico bidimensionale  $Q_{2D-2}$  e  $Q_{2D-3}$  riferiti alle sezioni 2 e 3 siano inferiori al flusso termico monodimensionale  $Q_{1D}$  riferito alla sezione 1. Di conseguenza, se i flussi bidimensionali sono più bassi di quello monodimensionale allora le cavità 2 e 3 saranno più isolanti rispetto al pannello stesso, motivo per cui non sono da considerarsi dei potenziali ponti termici.

Pertanto, dopo aver constatato che le cavità d'aria che caratterizzano il pannello non sono in realtà dei ponti termici e non influenzano affatto i risultati di conducibilità termica, si è deciso di non adottare questa analisi preliminare perché è troppo complessa e non porta ad una misura più accurata della conducibilità termica.

Dopo esser giunti a queste conclusioni si è passati all'effettuare i test di misura della conducibilità termica  $\lambda$  dei pannelli CSM in laboratorio, la cui esecuzione verrà descritta nel paragrafo successivo.

Dopo aver effettuato la prova sul PCM\_aluminium case\_a si è proceduto alla validazione dello stesso modello realizzato su Therm. Questa verifica è stata effettuata andando a leggere le temperature di ciascuna termocoppia sia sul file di output dello strumento di misura, sia sul modello creato sul software Therm, al quale è stato chiesto di simulare il comportamento termico del pannello imponendo le stesse condizioni della prova sperimentale. In questo modo è stato possibile confrontare i valori misurati (riportati lungo l'asse delle ascisse) con quelli simulati (sull'asse delle ordinate) all'interno di grafici

nei quali sono state tracciate la bisettrice  $y = x$  e le loro rette parallele  $y = x + 0,2$  e  $y = x - 0,2$  che rappresentano il range di incertezza delle termocoppie utilizzate [Grafico 33]. Se i punti ottenuti rientrano all'interno del range di incertezza selezionato, o si avvicinano molto, il modello può considerarsi validato.

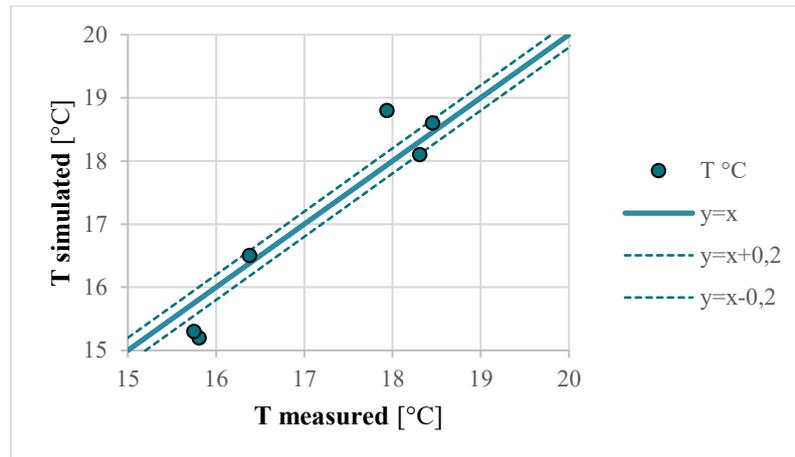


Grafico 33: grafico temperature misurate e simulate - PCM\_aluminium case\_a

Nell'Appendice si riportano le tabelle dei valori di temperatura confrontati con i rispettivi grafici.

In particolare, analizzando i dati così elaborati e plottati si può sostenere che il modello creato con il software Therm può considerarsi validato poiché alcuni punti rientrano all'interno del range di incertezza selezionato e gli altri si avvicinano molto.

## PCM\_aluminium case\_a

**Campione:** PCM organico a base di paraffina macro-incapsulato in un pannello CMS di 10 mm

**N° provini:** 2 pannelli accoppiati e fissati tra loro con del nastro isolante [Fig. 23]

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini para gialla [Tabella 8], fibra di poliestere ai lati del campione

**Termocoppie:** 3 sul lato superiore ( $t/c1_{up}$ ,  $t/c2_{up}$ ,  $t/c3_{up}$ ), 3 sul lato inferiore ( $t/c1_{low}$ ,  $t/c2_{low}$ ,  $t/c3_{low}$ ) secondo lo schema riportato in Fig. 24

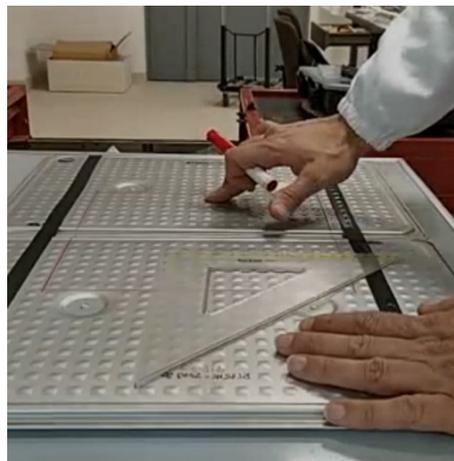


Fig. 23 Accoppiamento di due pannelli e tracciamento dell'area di misura

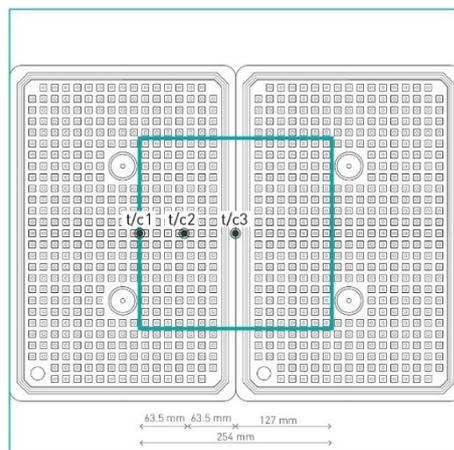


Fig. 24 Schema della posizione dei pannelli e delle termocoppie

---

**Tabella 11: Temperature setpoint –  $\lambda$  - PCM\_aluminium case\_a**


---

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	$T_{average}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
Setpoint 1	19	14	16.5	5
Setpoint 2	24	14	19	10
Setpoint 3	14	24	19	10
Setpoint 4	40	30	35	10
Setpoint 5	30	40	35	10

---

### PCM\_aluminium case\_c

---

Per la misura dei due pannelli, da 10 mm e da 15 mm, sono state utilizzate le modalità leggermente differenti, descritte nel paragrafo 6.1.1.1.1. A causa del malfunzionamento del chiller, infatti, sono stati effettuati quattro test, due su materiale solido e due su materiale allo stato liquido successivamente a raggiungimento della fusione all'interno della teca di condizionamento creata appositamente [Fig. 25].

**Campione:** PCM inorganico a base di sali idrati macro-incapsulato in pannelli CMS di 10 mm e 15 mm

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** fibra di poliestere ai lati del campione

**Termocoppie:** -



Fig. 25 Campione di PCM\_aluminium case\_c all'interno della teca di condizionamento



Fig. 26 Campione di PCM\_aluminium case\_c in piastra calda

---

---

**Tabella 12: Temperature setpoint –  $\lambda$  - PCM\_aluminium case c**


---

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	$T_{average}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1 – setpoint 1	14	24	19	10
Test 2 – setpoint 1	27	37	32	10
Test 3 – setpoint 1	14	24	19	10
Test 4 – setpoint 1	27	37	32	10

---

### PCM\_plastic film bags

---

**Campione:** PCM inorganico a base di Sali idrati incapsulato in un film plastico di dimensioni 55 x 55 mm, spessore 6 mm e costituito da 50 sacchette contenenti PCM fuso.

N° provini: 1

Posizione provino/i all'interno dello strumento: centrale

Materiali isolanti aggiuntivi: -

Termocoppie: -

**Tabella 13: Temperature setpoint –  $\lambda$  – PCM\_plastic film bags**


---

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	$T_{average}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
Setpoint 1	14	24	19	10
Setpoint 2	24	14	19	10
Setpoint 3	30	40	35	10
Setpoint 4	40	30	35	10

---

## PCM\_plastic container

Analogamente alle prove sperimentali sul PCM\_aluminium case\_c sono stati effettuati due esperimenti: uno con materiale solido ed uno con materiale liquido. Anche in questo caso, per poter effettuare la prova di conducibilità termica con materiale fuso, il pannello, nelle sue dimensioni originali, è stato portato ad una temperatura di 29°C grazie all'utilizzo di un tappetino termo-riscaldante. Quest'ultimo, affinché non fosse influenzato dalla temperatura del pavimento, è stato collocato sopra un sottile strato di legno. Sopra il tappetino è stato riportato il PCM interposto tra due strati di para rossa [Fig. 27].

**Campione:** PCM inorganico incapsulato in un case plastico di dimensioni 603 x 603cm e spessore 7.41 mm. Si tratta di un pannello rigido con 4 celle quadrate contenenti il materiale a cambiamento di fase [ Fig. 28]

**N° provini:** 1/4. Nonostante il pannello entrasse all'interno dello strumento, tuttavia l'area di misura sarebbe ricaduta al centro del campione nel quale non è contenuto del PCM sfuso bensì vi è la suddivisione delle quattro celle. Per questo motivo si è deciso di tagliare il pannello in modo da effettuare il test su una singola cella [ Fig. 29]

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** fibra di poliestere ai lati del campione

**Termocoppie:** -



Fig. 27 Condizionamento pannello grazie all'utilizzo di un tappetino termo-riscaldante.



Fig. 28 Pannello di PCM\_plastic container



Fig. 29 Utilizzo di una sola cella per il test



Fig. 30 Campione di PCM\_plastic container in piastra calda

Tabella 14: Temperature setpoint –  $\lambda$  - PCM\_plastic container

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	$T_{average}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1 – setpoint 1	11	21	16	10
Test 2 – setpoint 1	27	37	32	10

## PCM\_plastic case

I PCM\_plastic case sono materiali a cambiamento di fase inorganici a base di sali idrati, macro-incapsulati in case plastici di diverse dimensioni. In particolare, durante l'attività sperimentale condotta sono stati testati i seguenti PCM [Tabella 15]:

**Tabella 15: Temperature di fusione dei PCM\_plastic case testati**

Product	T <sub>melting</sub> [°C]
PCM_plastic case_a	23
PCM_plastic case_b	26
PCM_plastic case_c	32

Anche per questi PCM sono stati condotti due test, uno su materiale solido ed uno su materiale portato a fusione all'interno della teca di condizionamento precedentemente descritta.

## PCM\_plastic case\_a

**Campione:** PCM inorganico a base di Sali idrati incapsulato in un case plastico di dimensioni 580 x 280 mm e spessore 13.22 mm. Temperatura di fusione: 23°C

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** -

**Termocoppie:** -



Fig. 31 Campione di PCM\_plastic case\_a all'interno del termo-flussimetro

**Tabella 16: Temperature setpoint – λ - PCM\_plastic case\_a**

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	T <sub>average</sub> [°C]	ΔT [°C]
Test 1 – Setpoint 1	12.50	22.50	17.50	10
Test 2 – Setpoint 1	25	35	30	10

## PCM\_plastic case\_b

**Campione:** PCM inorganico a base di sali idrati incapsulato in un case plastico di dimensioni 580 x 200 mm e spessore 12.87 mm. Temperatura di fusione: 26°C

N° provini: 2

Posizione provino/i all'interno dello strumento:  
centrale

Materiali isolanti aggiuntivi: -

Termocoppie: -

Tabella 17: Temperature setpoint –  $\lambda$  - PCM\_plastic case\_b

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	T <sub>average</sub> [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1 – Setpoint 1	15	25	20	10
Test 2 – Setpoint 1	28	38	33	10

## PCM\_plastic case\_c

**Campione:** PCM inorganico a base di sali idrati incapsulato in un case plastico di dimensioni 580 x 150 mm e spessore 12.86 mm. Temperatura di fusione: 32°C

N° provini: 2

Posizione provino/i all'interno dello strumento: centrale

Materiali isolanti aggiuntivi: -

Termocoppie: -



Fig. 32 Due campione di PCM\_plastic case\_c in piastra calda.

Tabella 18: Temperature setpoint –  $\lambda$  - PCM\_plastic case\_b

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	T <sub>average</sub> [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1 – Setpoint 1	15	25	20	10
Test 2 – Setpoint 1	34	44	39	10

### 7.1.1.1.2 Entalpia in funzione della temperatura

La metodologia con la quale sono stati condotti i test di misura dell'entalpia in funzione della temperatura è molto simile a quella utilizzata per la misura della conducibilità termica ed è stata scandita dalle seguenti fasi:

- preparazione del campione ed inserimento dello stesso all'interno del termo-flussimetro;
- eventuale aggiunta di tappetini di gomma naturale gialla [Tabella 8] o rossa ( i cui sono noti i dati riportati in Tabella 19). e di termocoppie esterne sia sul lato superiore sia sul lato inferiore, utili alla lettura della temperatura sulle due interfacce;
- eventuale addizione di strisce di fibra di poliestere ai lati del campione per ridurre gli effetti di trasmissione del calore bidimensionale dei bordi;
- accensione del chiller per il corretto raffreddamento dello strumento di misura durante le prove sperimentali;
- Definizione delle impostazioni del software *WinTherm32v3* connesso al termo-flussimetro per l'avvio delle prove. In questo caso, a differenza delle prove di misura della conducibilità termica, sono stati definiti due test, uno in fase di riscaldamento (heating) ed un in fase di raffreddamento (cooling). Per ciascun test sono stati fissati 18 setpoint indicando la temperatura iniziale, quella finale, dunque la differenza di temperatura  $\Delta T$ . Inoltre, per alcuni PCM, per ogni fase testata (riscaldamento, raffreddamento) le prove sono state settate sia con una differenza di temperatura  $\Delta T$  di  $1^\circ\text{C}$  sia di  $0.5^\circ\text{C}$ . Nel secondo caso ( $\Delta T=0.5^\circ\text{C}$ ) il test è caratterizzato da una velocità minore, poiché se nel test con  $\Delta T=1^\circ\text{C}$  lo strumento impiega  $x$  secondi per salire/scendere di  $1^\circ\text{C}$ , nel test con  $\Delta T=0.5^\circ\text{C}$  impiega circa lo stesso tempo per aumentare/diminuire la temperatura di  $0.5^\circ\text{C}$ . Questo garantisce, da un lato, la possibilità di operare un confronto tra i due andamenti di entalpia e di verificare quanto la velocità del test possa influenzare i risultati della prova, dall'altro di disporre di risultati caratterizzati da una maggiore accuratezza (poiché il test con  $\Delta T=1^\circ\text{C}$  tende a sovrastimare la capacità termica globale del materiale).
- Infine lo step finale consiste nella definizione dei parametri relativi ai criteri di equilibrio, alle modalità di restituzione dei dati di output, al file di calibrazione da utilizzare e nell'avvio della prova sperimentale.

Tabella 19: Tappetini di para rossa 10 mm

<b>t</b> [m]	<b><math>\lambda</math></b> [W/mK]	<b>R</b> [m <sup>2</sup> K/W]	<b>m</b> [kg]	<b>V</b> [m <sup>3</sup> ]	<b><math>\rho</math></b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>c</b> [J/kgK]
0.009735	0.1991	0.049	2.822	0.00242	1164.180	1541.598

## PCM\_aluminium case\_a

**Campione:** PCM organico a base di paraffina macro-incapsulato in un pannello CMS di 10 mm

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** strisce di fibra di poliestere ai lati del campione

**Termocoppie:** 1 sul lato superiore (t/c1) ed 1 sul lato inferiore (t/c2)

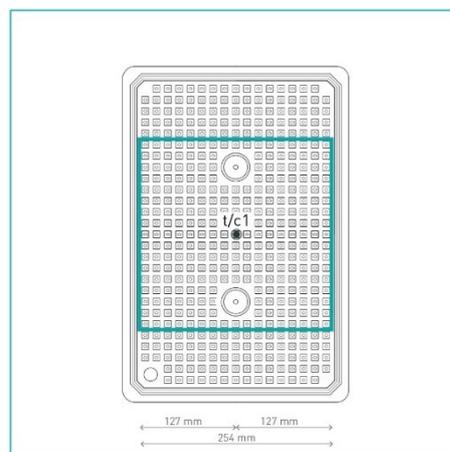


Fig. 33 Schema della posizione del pannello e delle termocoppie

Tabella 20: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_aluminium case\_a

	<b>Phase</b>	<b>N° of setpoint</b>	<b>T range</b> [°C]	<b><math>\Delta T</math></b> [°C]
Test 1	Heating	18	15-32	1
Test 2	Cooling	18	32-15	1
Test 3	Heating	18	20-28.5	0.5
Test 4	Cooling	18	28-20	0.5

## PCM\_aluminium case\_c

**Campione:** PCM inorganico a base di sali idrati macro-incapsulato in un pannello CMS di 15 mm

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para gialla [Tabella 8], strisce di fibra di poliestere

**Termocoppie:** -



Fig. 34 Campione di PCM\_aluminium case-c in piastra calda

**Tabella 21: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_aluminium case\_c**

	Phase	N° of setpoint	T range [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1	Heating	18	16-32	1
Test 2	Cooling	18	32-16	1

Dal momento che i dati ottenuti si sono ritenuti poco convincenti, le prove sono state ripetute utilizzando le stesse caratteristiche sopra descritte, ma senza l'aggiunta dei tappetini di para gialla [Tabella 8].

## PCM\_plastic film bags

**Campione:** PCM inorganico a base di Sali idrati incapsulato in un film plastico di dimensioni 55 x 55 mm, spessore 6 mm e costituito da 50 sacchette contenenti PCM sfuso.

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** -

**Termocoppie:** -

Tabella 22: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_plastic film bags

	Phase	N° of setpoint	T range [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1	Heating	18	16-32	1
Test 2	Cooling	18	32-16	1
Test 3	Heating	18	21.50-32.50	0.5
Test 4	Cooling	18	32.50-21.50	0.5

In un secondo momento, dopo aver analizzato i dati dei test, è stata osservata una notevole differenza tra le curve di entalpia in fase di raffreddamento ottenute dai rispettivi test con  $\Delta T=1^\circ\text{C}$  e  $\Delta T=0.5^\circ\text{C}$ . Questa differenza può essere parzialmente giustificata dalla velocità con cui l'esperimento è stato condotto, tuttavia, per poter disporre di dati caratterizzati da una maggiore accuratezza, si è deciso di ripetere i test riponendo la giusta attenzione sulla questione velocità. Per poter ridurre ulteriormente la velocità del test, dunque ottenere risultati maggiormente precisi ed accurati, si possono utilizzare tre diversi accorgimenti:

- Diminuzione della differenza di temperatura  $\Delta T$  ad un valore minore di  $0.5^\circ\text{C}$  (per esempio  $\Delta T=0.25^\circ\text{C}$ ). In questo caso, tuttavia, si finisce con l'utilizzare un range di temperatura molto limitato (dal momento che si può definire un massimo di 18 setpoint), che rischia di non essere quello di interesse per l'esperimento condotto;
- Inserimento di materiali isolanti, quali tappetini di gomma naturale;
- Riduzione del *gain level*<sup>9</sup> nelle impostazioni del software dello strumento.

In seguito a queste considerazioni, si è deciso di ripetere i test di entalpia interponendo il pannello di PCM tra due tappetini di para rossa da 10 mm [Tabella 19] ed utilizzando una differenza di temperatura  $\Delta T$  pari a  $1^\circ\text{C}$ . I dati specifici sono riportati in Tabella 23:

Tabella 23: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_plastic film bags

	Phase	N° of setpoint	T range [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1	Heating	18	16-32	1
Test 2	Cooling	18	34-17	1

## PCM\_plastic container

**Campione:** PCM inorganico incapsulato in un case plastico di dimensioni 603 x 603cm e spessore 7.41 mm. Si tratta di un pannello

<sup>9</sup> Il gain level è un fattore di guadagno, più specificatamente un fattore moltiplicativo del segnale elettrico del termo-flussimetro. Per questa ragione, più viene amplificato il flusso termico dello strumento, tanto più alto saranno il gain level e la velocità della prova.

rigido con 4 celle quadrate contenenti il materiale a cambiamento di fase [ Fig. 28]

**N° provini:** 1/4. Nonostante il pannello entrasse all'interno dello strumento, tuttavia l'area di misura sarebbe ricaduta al centro del campione nel quale non è contenuto del PCM sfuso bensì vi è la suddivisione delle quattro celle. Per questo motivo si è deciso di tagliare il pannello in modo da effettuare il test su una singola cella [ Fig. 29]

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** -

**Termocoppie:** -

**Tabella 24: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_plastic container**

	Phase	N° of setpoint	T range [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1	Heating	18	16-32	1
Test 2	Cooling	18	32-16	1

### PCM\_plastic case\_b

**Campione:** PCM inorganico a base di sali idrati incapsulato in un case plastico di dimensioni 580 x 200 mm e spessore 12.87 mm.

**N° provini:** 2

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** -

**Termocoppie:** -



Fig. 35 Campioni di PCM\_plastic case\_b in piastra calda

Tabella 25: Prove di entalpia vs. temperatura – PCM\_plastic case\_b

	Phase	N° of setpoint	T range [°C]	$\Delta T$ [°C]
Test 1	Heating	18	16-32	1
Test 2	Cooling	18	32-16	1

### 7.1.1.1.3 Risposta sinusoidale

Le prove di risposta sinusoidale sono state effettuate con lo stesso apparecchio di misura le cui impostazioni sono state definite come **test dinamici** al fine di valutare la risposta dei PCM ad una differenza di temperatura sinusoidale. Le prove dinamiche simulano verosimilmente le condizioni al contorno dell'involucro edilizio poiché internamente l'edificio è caratterizzato da una temperatura pressoché costante, mentre esternamente da fluttuazioni di temperatura che possono essere descritte da funzioni sinusoidali [39].

Questi test prevedono che la temperatura di un piatto dello strumento sia fissa (tendenzialmente pari alla temperatura di fusione del materiale da testare) mentre la temperatura della piastra restante sia caratterizzata da un andamento sinusoidale per il quale bisogna stabilire una **semi-ampiezza**. Pertanto, prima di procedere con gli esperimenti veri e propri è stato effettuato un **design dell'esperimento** con l'obiettivo di valutare più possibili sinusoidi per poter scegliere quale sia quella più appropriata affinché durante la prova sperimentale il materiale non fosse né troppo fuso né troppo congelato. Per fare ciò sono state effettuate delle simulazioni con WUFI®PRO, un software che consente di simulare in maniera dinamica il comportamento energetico di componenti edilizi ed edifici [43]

Il programma è in grado di generare l'andamento sinusoidale della temperatura su determinati punti di controllo inseriti sulle interfacce del materiale oggetto di analisi, assegnando come dati di ingresso:

- Le proprietà del/i materiale/i (densità, calore specifico, conducibilità termica, entalpia in funzione della temperatura);
- I valori o l'andamento della temperatura ai due lati del/i materiale/i;
- Lo step temporale con cui si desiderano i dati di output ( $t=3$  min).

Il design dell'esperimento è stato effettuato per due PCM: il PCM\_aluminium case-a incapsulato nel pannello di CSM da 10mm e il PCM\_aluminium case\_c incapsulato nel CSM da 15 mm. Inizialmente sono stati simulati entrambi senza l'aggiunta di ulteriori strati isolanti tuttavia le curve di output (in particolare quelle relative a lato sollecitato da un andamento sinusoidale della temperatura) erano caratterizzate da una scalettatura, probabilmente dovuta alla frequenza oraria dei dati in input della temperatura con andamento sinusoidale. Per questo motivo, per limitare maggiormente la scalettatura e rendere più leggibili i risultati, le simulazioni sono state rilanciate nuovamente su un pacchetto che prevede lo strato di PCM interposto tra due tappetini di para rossa da 10mm. Questo tipo di configurazione consente non solo di

smorzare le sollecitazioni e limitare la scalettatura delle curve di output, ma anche di simulare delle soluzioni multistrato più vicine a quelle applicate nella realtà nelle facciate avanzate degli edifici.

Nell'*Appendice capitolo 6* si riportano i risultati delle simulazioni effettuate: per ciascuno dei due PCM simulati sono state utilizzate sei differenti semi-ampiezze ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $\pm 4^\circ\text{C}$ ,  $\pm 6^\circ\text{C}$ ,  $\pm 8^\circ\text{C}$ ,  $\pm 10^\circ\text{C}$ ,  $\pm 12^\circ\text{C}$ ) delle sinusoidi di partenza. In ogni grafico si possono leggere tre temperature [ $^\circ\text{C}$ ]:

- $T_{,low}$ : temperatura dell'interfaccia più vicina al lato caratterizzato da un andamento sinusoidale;
- $T_{,up}$ : temperatura dell'interfaccia più vicina al lato caratterizzato da una temperatura costante ( $T_{,const}$ );
- $T_{, const}$ : temperatura costante e pari alla temperatura di fusione del materiale analizzato.

Inoltre, osservando e analizzando gli andamenti della risposta sinusoidale ( $T_{,up}$ ) ottenuti con le diverse semi-ampiezze riportati nel Grafico 34 e Grafico 35, si può affermare che:

- Per entrambi i PCM nelle curve con semi-ampiezza  $\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $\pm 4^\circ\text{C}$  è meno leggibile il passaggio di stato, mentre la curva maggiormente rappresentativa del comportamento dei materiali da testare è quella con semi-ampiezza  $\pm 6^\circ\text{C}$  poiché in essa si può osservare come essi fondano e solidifichino completamente;
- Il PCM organico PCM\_aluminium case\_a [Grafico 34] è caratterizzato da un cambio di pendenza più repentino dunque il passaggio di stato è netto, mentre nel PCM inorganico PCM\_aluminium case\_c [Grafico 35] il profilo del cambiamento di fase è meno netto ma ha un picco di temperatura più alto.

Pertanto, la curva scelta per entrambi i PCM da testare affinché, durante la prova, il materiale non sia né troppo fuso né troppo congelato è quella con semi-ampiezza di  $6^\circ\text{C}$ .

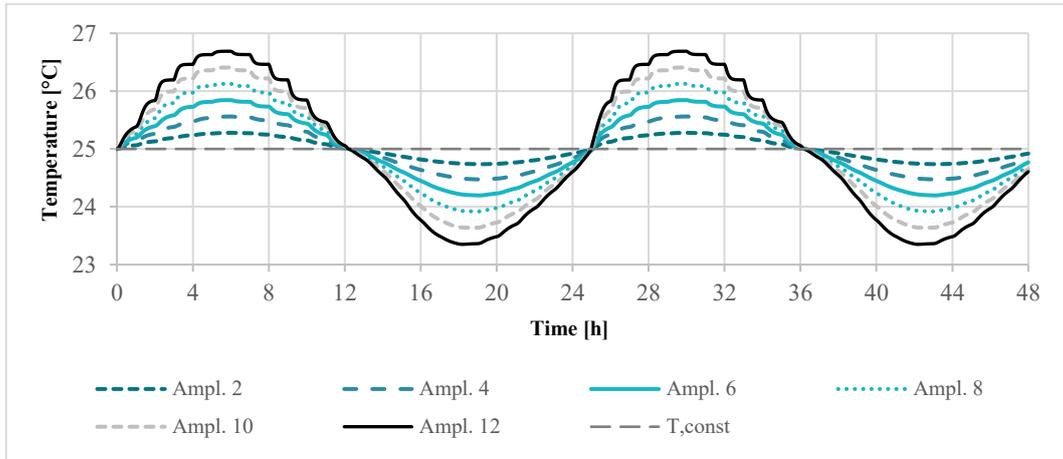


Grafico 34: Risposta sinusoidale CSM 10 mm – PCM\_aluminium case\_a

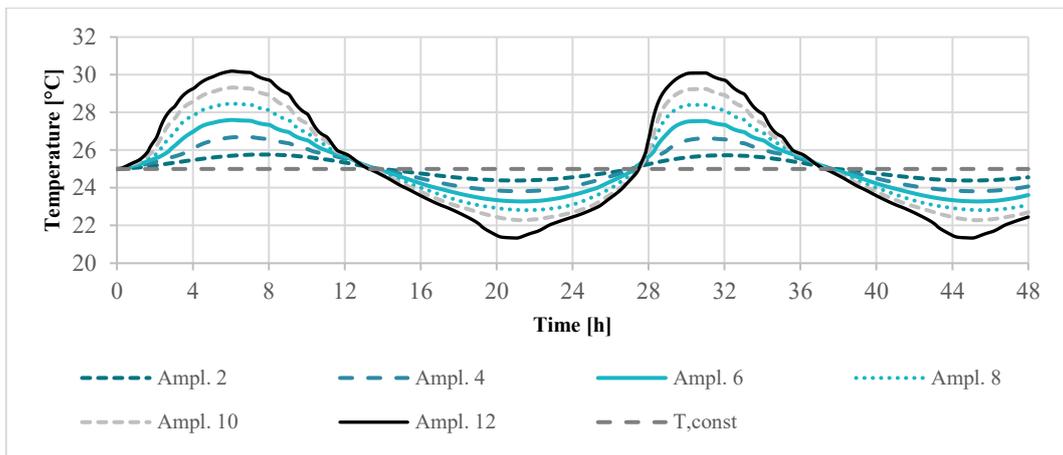


Grafico 35: Risposta sinusoidale CSM 15 mm – PCM\_aluminium cae\_c

La metodologia delle prove sperimentali per la misura della risposta sinusoidale non varia molto da quelle descritte nei paragrafi precedenti per la misura della conducibilità termica e dell'entalpia (7.1.1.1.1 *Conducibilità termica*, 7.1.1.1.2 *Entalpia in funzione della temperatura*): infatti, la preparazione del campione e la sua interposizione tra due materassini di para rossa da 10 mm (di cui sono noti i dati e sono riportati in Tabella 19), l'aggiunta di termocoppie necessarie per la lettura della temperatura sulle interfacce tra il pannello contenente PCM e lo strato di gomma naturale utilizzato seguono le stesse modalità. Ciò che si distingue è la definizione delle impostazioni di avvio dei test sul software *WinTherm32v3* connesso al termo-flussimetro. In particolare, scegliendo l'opzione 'dynamic test', sono state stabilite:

- la **temperatura del piatto superiore** come valore costante e pari alla temperatura di fusione del materiale;
- la **temperatura del piatto inferiore** pari a quella del piatto superiore caratterizzata però da un **andamento sinusoidale** con una determinata semi-ampiezza. Inizialmente, si è scelto di utilizzare una semi-ampiezza di  $\pm 6^\circ$  poiché era risultata quella maggiormente significativa dall'analisi preliminare di design dell'esperimento. Tuttavia, in un secondo momento, si è rimasti poco soddisfatti della curva ottenuta poiché poco efficace se si vuole osservare il reale comportamento del materiale a cambiamento di fase. Di conseguenza, si è deciso di effettuare le prove successive variando però la semi-ampiezza della sinusoide e definendola pari a  $\pm 10^\circ\text{C}$ ;
- la **durata della prova**. Nello specifico si è scelto di far compiere alla prova due cicli da 24 ore ciascuno, che equivalgono in termini di funzione sinusoidale a due sinusoidi complete con periodo pari a 24h. Questa scelta è giustificata dal fatto che, normalmente, il materiale in analisi non viene inserito all'interno dello strumento con una temperatura pari alla sua temperatura di fusione, ma con una temperatura pari a quella dell'ambiente in cui si trova. Di conseguenza le prime ore della prova servono per raggiungere la temperatura di equilibrio. Pertanto, è stato richiesto allo strumento un numero di sinusoidi tali per cui la sinusoide da selezionare, per l'analisi dei dati, fosse la prima a non essere influenzata dalle condizioni iniziali.

Infine, in seguito e alla definizione dei criteri di equilibrio e del file di calibrazione i test sono stati avviati.

### PCM\_aluminium case\_a

---

**Campione:** PCM organico a base di paraffina  
macro-incapsulato in un pannello CMS di 10 mm

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:**  
centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para  
rossa [Tabella 19]

---

**Termocoppie:** 2 termocoppie al centro del pannello, 1 sul lato superiore (t/c1) e una sul lato inferiore t/c2.

**Tabella 26: Temperature piastre test di risposta sinusoidale – PCM\_aluminium case\_a**

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	Test duration [h]
Test 1	25 ± 6	25	2 x 24h

Dopo circa 30h il test si interrotto senza portare a termine il secondo ciclo, tuttavia, i dati a disposizione, dei quali sono stati scartati quelli relativi alle prime 6h e considerati quelli relativi alle ultime 24h, sono stati ritenuti sufficienti per valutare il comportamento di risposta sinusoidale del PCM analizzato.

### PCM\_aluminium case\_c

**Campione:** PCM organico a base di Sali idrati macro-incapsulato in un pannello CMS di 15 mm

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:**  
centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para rossa [Tabella 19]

**Termocoppie:** 2 termocoppie al centro del pannello, 1 sul lato superiore (t/c1) e una sul lato inferiore t/c2.

**Tabella 27: Temperature piastre test di risposta sinusoidale – PCM\_aluminium case\_c**

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	Test duration [h]
Test 1	25 ± 6	25	2 x 24h
Test 2	25 ± 10	25	2 x 24h

Anche in questo caso, il test si è arrestato prima del dovuto, dopo 47h. Di queste sono stati considerati i dati relativi alle ultime 24h e dopo averli plottati si è rimasti poco soddisfatti della curva ottenuta poiché poco efficace se si vuole osservare il reale comportamento del materiale a cambiamento di fase. Di conseguenza, si è deciso di ripetere la prova variando però la semi-ampiezza della sinusoide e definendola pari a ± 10°C. La prova si è nuovamente interrotta dopo 41h, ma si è ritenuto sufficiente il numero di dati a disposizione per l'analisi del comportamento termico del PCM.

## PCM\_plastic film bags

**Campione:** PCM inorganico a base di Sali idrati incapsulato in un film plastico di dimensioni 55 x 55 mm, spessore 6 mm e costituito da 50 sacchette contenenti PCM sfuso.

**N° provini:** 1

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para rossa [Tabella 19]

**Termocoppie:** 6 termocoppie, 3 sul lato superiore, ciascuno su una sacchetta diversa del pannello (t/c2, t/c4, t/c6) e 3 sul lato inferiore in corrispondenza di quelle sull'altro lato [ Fig. 37]



Fig. 36 Posizionamento del campione di PCM\_plastic film bags e dei tappetini di para rossa



Fig. 37 Collocazione delle tre termocoppie per lato

**Tabella 28: Temperature piastre test di risposta sinusoidale – PCM\_plastic film bags**

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	Test duration [h]
Test 1	26 ± 6	26	2 x 24h
Test 2	26 ± 10	26	2 x 24h

Nonostante la temperatura di fusione dichiarata dal produttore fosse 25°C, si è deciso di imporre come costante ( $T_{lower}$ ) una temperatura pari a 26°C poiché nei test di entalpia effettuati sul materiale in questione si è osservato un picco in corrispondenza di questo valore di temperatura.

## PCM\_plastic container

**Campione:** PCM inorganico incapsulato in un case plastico di dimensioni 603 x 603cm e spessore 7.41 mm. Si tratta di un pannello rigido con 4 celle quadrate contenenti il materiale a cambiamento di fase [ Fig. 28]

**N° provini:** ¼. Nonostante il pannello entrasse all'interno dello strumento, tuttavia l'area di misura sarebbe ricaduta al centro del campione nel quale non è contenuto del PCM sfuso bensì vi è la suddivisione delle quattro celle. Per questo motivo si è deciso di tagliare il pannello in modo da effettuare il test su una singola cella [ Fig. 29]. Nello specifico per questo test sono state utilizzate due celle sovrapposte [Fig. 38]

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para rossa [Tabella 19], strisce di fibra di poliestere ai lati dei campioni [Fig. 39]

**Termocoppie:** 3 termocoppie, una (t/c1) tra il foglio di para inferiore e il provino di PCM inferiore, una (t/c2) tra i due provini di PCM, una (t/c3) tra il foglio di para superiore e il provino di PCM superiore



Fig. 38 Inserimento di due provini di PCM\_plastic container sovrapposti e di due tappetini di para rossa



Fig. 39 Aggiunta di strisce di fibra di poliestere ai lati dei campioni

**Tabella 29: Temperature piastre test di risposta sinusoidale – PCM\_plastic container**

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	Test duration [h]
Test 1	24 ± 10	24	2 x 24h

## PCM\_plastic case b

**Campione:** PCM inorganico a base di Sali idrati incapsulato in un case plastico di dimensioni 580 x 200 mm e spessore 12.87 mm

**N° provini:** 2

**Posizione provino/i all'interno dello strumento:** centrale

**Materiali isolanti aggiuntivi:** 2 tappetini di para rossa [Tabella 19]

**Termocoppie:** 4 termocoppie, 2 sul lato inferiore rispettivamente sul provino di sinistra e di destra (t/c1, t/c3) e 2 sul lato superiore in corrispondenza di quelle inferiori (t/c2, t/c4).

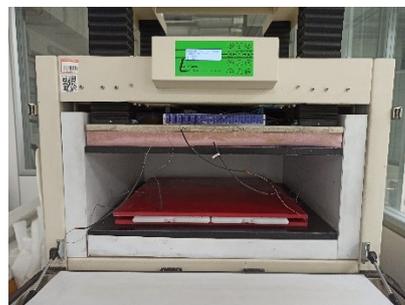


Fig. 40 Inserimento di due provini di PCM\_plastic case\_b sovrapposti e di due tappetini di para rossa

**Tabella 30: Temperature piastre test di risposta sinusoidale – PCM\_plastic case\_b**

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	Test duration [h]
Test 1	$26 \pm 10$	26	2 x 24h

## 7.1.1.2 Risultati sperimentali

### 7.1.1.2.1 Conducibilità termica

I test condotti sui PCM hanno permesso di determinare i valori di conducibilità termica dei materiali e di confrontarli con quelli dichiarati dai produttori nelle relative schede tecniche.

Tra i risultati ottenuti, riportati in *Appendice capitolo 6*, quelli relativi ai PCM\_aluminium case sono stati confrontati con i valori ottenuti dalle simulazioni condotte con Therm, software utilizzato per il design degli esperimenti stessi; mentre i risultati dei materiali restanti non sono stati sottoposti a questo tipo di verifica ulteriore.

#### PCM\_aluminium case\_a

La verifica numerica a cui si è accennato consiste nel confronto tra i valori di conducibilità termica equivalente ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti dalle simulazioni [Tabella 31] condotte nell'ambito di un'analisi preliminare di design dell'esperimento [riportato nel paragrafo 7.1.1.1.1 *Conducibilità termica*].

Tabella 31: Confronto dati simulati e sperimentali –PCM\_

Simulati		
Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,avg}$ [W/mK]	$\lambda_{eq,cop}$ [W/mK]
0	0.777	1.125
0.01	0.363	0.463
0.1	0.0625	0.0635
1	0.00944	0.00924
Misurati		
0.0298	-	0.1402

Poiché, preliminarmente, erano state effettuate più simulazioni con diverse resistenze addizionali, i valori di conducibilità termica equivalente (valore medio  $\lambda_{eq,avg}$  e valore calcolato al centro del pannello  $\lambda_{eq,cop}$ ) sono stati riportati in due grafici [Grafico 36, Grafico 37] in funzione della resistenza termica aggiuntiva. In essi, è stato individuato il valore di conducibilità  $\lambda$  in corrispondenza di quello di resistenza termica dei tappetini di para gialla ( $R_i + R_e = 0.0298 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) utilizzati durante la prova sperimentale. I valori

ottenuti sono:  $\lambda_{eq,avg} = 0.15 \text{ W/mK}$  nel primo caso e  $\lambda_{eq,cop} = 0.19 \text{ W/mK}$  nel secondo caso.

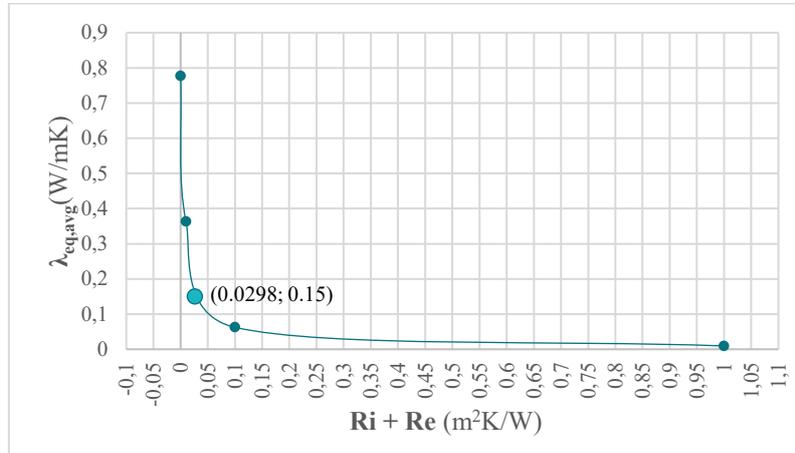


Grafico 36: Conducibilità equivalente media – resistenze aggiuntive

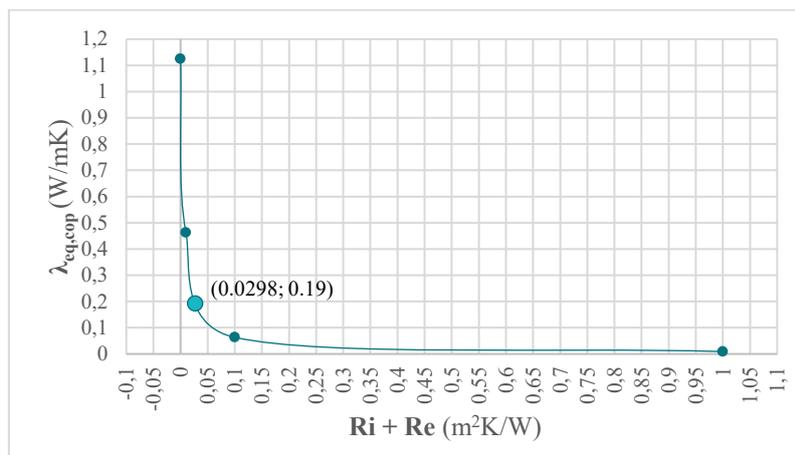


Grafico 37: Conducibilità equivalente al centro dei pannelli – resistenze aggiuntive

Dal momento che le simulazioni erano state condotte con temperature pari a 10°C e 20°C, per poter operare un confronto più accurato è stato preso in considerazione il valore medio sperimentale di conducibilità termica riferito al materiale allo stato solido ( $\lambda_{eq,avg} = 0.1402 \text{ W/mK}$ ) e sono state calcolate le rispettive differenze percentuali:

$$\text{Differenza percentuale, } \lambda_{eq,avg} = \frac{0.15 - 0.1402}{0.1402} = 0.07 = 7\%$$

$$\text{Differenza percentuale, } \lambda_{eq, cop} = \frac{0.19 - 0.1402}{0.1402} = 0.36 = 36\%$$

Pertanto, si hanno due differenze dell'ordine del 7%, nel primo caso, e del 36% nel secondo caso, tra il valore simulato e quello ottenuto sperimentalmente. Non si sa se questi errori derivino da un'inesattezza di simulazione o di misura o da entrambe, tuttavia risultano accettabili. Di conseguenza, tenendo conto che il dato di conducibilità termica da cui si è partiti è quello dichiarato dal produttore e riferito al solo materiale puro, si può sostenere che i risultati sperimentali sono da considerarsi validati.

### PCM\_aluminium case\_c

Anche in questo caso è stato effettuato un confronto tra i valori simulativi calcolati nell'ambito del design dell'esperimento con quelli sperimentali [Tabella 32,

Tabella 33]. In particolare si è tenuto conto dei soli valori sperimentali riferiti alle sole prove con materiale allo stato solido. Leggendo ed analizzando i dati, è evidente come, a differenza del PCM\_aluminium case\_a, questa volta, i risultati ottenuti dai test in laboratorio differiscano da quelli calcolati in fase di preliminare di un intero ordine di grandezza. Questo errore elevato può comunque considerarsi accettabile se si considera l'elevato grado di incertezza delle ipotesi iniziali. Inoltre i valori sperimentali si avvicinano più ai dati dichiarati dal produttore ( $\lambda=0.5$  W/mK) che a quelli calcolati in fase di design dell'esperimento. Di conseguenza i risultati sperimentali possono considerarsi validati.

Tabella 32: Confronto dati simulativi e sperimentali – SP25E2 -10 mm

Simulati		
Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,avg}$ [W/mK]	$\lambda_{eq,cop}$ [W/mK]
0	1.0579	1.0849
Misurati		
0	-	0.1378

Tabella 33: Confronto dati simulativi e sperimentali – SP25E2 -15mm

Simulati		
Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,avg}$ [W/mK]	$\lambda_{eq,cop}$ [W/mK]
0	1.0925	1.1052
Misurati		

---

0	-	0.1817
---	---	--------

### Confronto valori di conducibilità termica

Ponendo complessivamente a confronto i materiali a cambiamento di fase testati si può sostenere che:

- In ogni PCM la differenza tra i valori di conducibilità riferiti al materiale solido e quelli inerenti al materiale fuso non è particolarmente evidente. Questa disparità, talvolta più accentuata, è propria dei PCM nei quali la conducibilità termica dipende dalla fase in cui i materiali si trovano e dalla direzione del flusso termico [39]. In particolare, tra i materiali testati, la discordanza più evidente la si riscontra nel PCM\_aluminium case\_c incapsulato nel CSM da 15 mm nel quale la differenza tra i valori  $\lambda$  nelle due fasi è pari a 0,1065 W/mK. Inoltre, se si confronta quest'ultima con la stessa differenza riferita al medesimo PCM da 10 mm ( $\lambda_{liquid} - \lambda_{solid} = 0.0318$  W/mK) ci si rende conto di come sia superiore di un ordine di grandezza. Ciò può essere giustificato dalla geometria stessa del pannello che nella versione da 15 mm è caratterizzato da una cavità d'aria centrale di dimensioni maggiori rispetto quello da 10 mm, rendendo il pannello più conduttivo.
- Come riportato nello stato dell'arte, i PCM organici a base di paraffina sono caratterizzati da valori di conducibilità termica minori rispetto a quelli inorganici a base di sale idrati. Infatti il valore più basso è quello riferito al PCM\_aluminium case\_a, il quale risulta essere il materiale maggiormente isolante tra i PCM testati;
- Tra i PCM inorganici, quelli maggiormente conduttivi sono i PCM\_plastic case, mentre gli altri sono caratterizzati da valori che si aggirano sui 0.20 W/mK. Infine il PCM meno conduttivo è il PCM\_aluminium case\_c da 10mm.

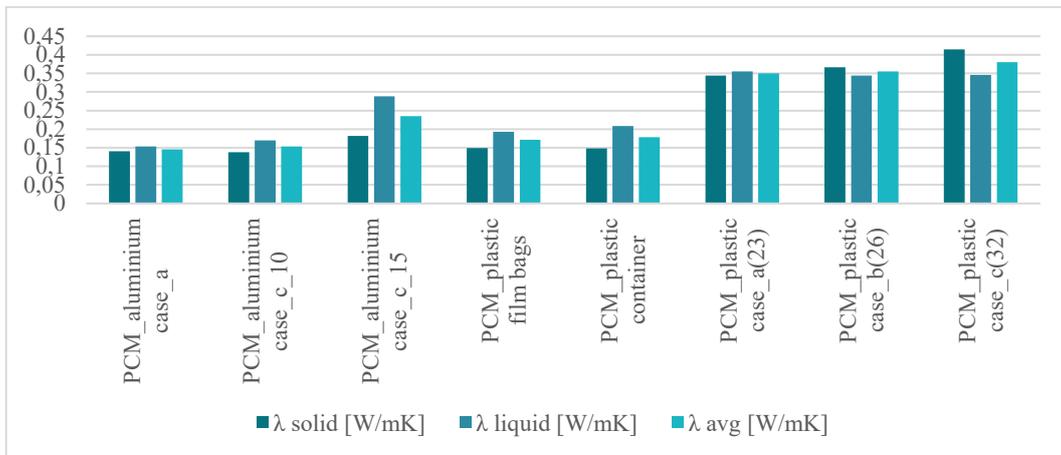


Grafico 38: Confronto valori di conducibilità termica dei PCM testati

Tabella 34: Conducibilità termica PCM testati

PCM Type	Code	$\lambda$ solid [W/mK]	$\lambda$ liquid [W/mK]	$\lambda$ avg [W/mK]	$\lambda$ ,datasheet [W/mK]
Organic (Paraffine)	PCM_aluminium case_a	0.1402	0.1537	<b>0.1456</b>	0.2
Inorganic (Salt hydrates)	PCM_aluminium case_c_10	0.1378	0.1696	<b>0.1537</b>	0.5
	PCM_aluminium case_c_15	0.1817	0.2882	<b>0.2350</b>	0.5
	PCM_plastic film bags	0.1495	0.1932	<b>0.1713</b>	$\lambda$ solid = 1.09 $\lambda$ liquid = 0.54
	PCM_plastic container	0.1484	0.2082	<b>0.1783</b>	-
	PCM_plastic case_a(23)	0.3441	0.3558	<b>0.3500</b>	-
	PCM_plastic case_b(26)	0.3662	0.3440	<b>0.3551</b>	-
	PCM_plastic case_c(32)	0.4151	0.3459	<b>0.3805</b>	-

### 7.1.1.2.2 Entalpia in funzione della temperatura

I test di misura dell'entalpia in funzione della temperatura condotti sui PCM hanno permesso di valutare la curva di entalpia di ciascun materiale e, nel caso dei PCM\_aluminium case, di confrontare quest'ultima con quella fornita dal produttore stesso.

Prima di analizzare i dati forniti dal software dello strumento di misura, questi sono stati elaborati al fine di determinare dei dati confrontabili, in termini di grandezze fisiche e dunque di unità di misura, con quelli dichiarati dai produttori.

L'elaborazione è avvenuta a partire da dati di **entalpia cumulata** espressa in  $J/m^2$  e di **calore specifico cumulato** espresso in  $J/m^3K$ . Entrambi i valori sono riportati nei file di output per ciascun setpoint stabilito in fase di avvio del test.

Gli obiettivi sono stati quelli di trasformare entrambe le grandezze in valori espressi in  $kJ/kgK$  in modo da plottare i dati ottenuti in funzione della temperatura, valutarne l'andamento e di calcolare, per entrambe le fasi dei PCM, la **capacità termica superficiale**, espressa in  $kJ/m^2$  e la **capacità termica superficiale normalizzata** rispetto allo spessore dei singoli pannelli ( $kJ \cdot mm/m^2$ ).

In questo modo è possibile creare un quadro abbastanza completo delle proprietà termiche legate all'accumulo di calore dei materiali testati al fine di indirizzarne la scelta su uno solo.

I risultati dei singoli test, riportati in *Appendice capitolo 6*, sono stati elaborati come segue:

- In primo luogo, si è proceduto nel trasformare l'**entalpia cumulata** [ $J/m^2$ ] in **entalpia parziale** [ $J/m^2$ ] andando a sottrarre ad ogni valore di entalpia cumulata quello precedente:

$$Partial\ Enthalpy, n = Enthalpy, n - Enthalpy, n - 1 \quad (1)$$

- Successivamente, l'entalpia parziale, espressa in  $J/m^2$  è stata trasformata in  $J/kgK$ :

$$Partial\ Enthalpy \left[ \frac{J}{kgK} \right] = \frac{PartialEnthalpy \left[ \frac{J}{m^2} \right]}{\rho_{eq,m}^{10} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot t [m]} \quad (2)$$

---

<sup>10</sup> Per i pannelli CSM dei PCM\_aluminium case, caratterizzati da una particolare geometria e dalla presenza di numerose e piccole cavità d'aria, è stato utilizzato un valore di densità equivalente media riferito alla sola area di misura. Per fare ciò, è stato necessario modellare il volume netto riferito all'area di 254 mm x 254 mm nelle due componenti (volume contenitore di alluminio, volume PCM puro) con il software SkcheUp. In questo modo, una volta noti i

Nei test in cui sono stati utilizzati degli strati aggiuntivi (para rossa da 10mm), prima di risolvere l'equazione precedente (2), è stato necessario sottrarre preventivamente la **capacità termica** [J/m<sup>2</sup>] dei **tappetini di para** all'entalpia parziale [J/m<sup>2</sup>]:

$$Partial\ Enthalpy_{NO\ PARA} \left[ \frac{J}{m^2} \right] = Partial\ Enthalpy \left[ \frac{J}{m^2} \right] - C_{PARA} \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (3)$$

- Infine, il valore ottenuto è stato suddiviso per 1000 al fine di avere un valore di entalpia espresso in kJ/kgK:

$$Partial\ Enthalpy \left[ \frac{kJ}{kgK} \right] = \frac{Partial\ Enthalpy \left[ \frac{J}{m^2} \right]}{1000} \quad (4)$$

Un processo simile è stato effettuato per il dato di output relativo al **calore specifico**, espresso in J/m<sup>3</sup>K:

- In primo luogo, si è proceduto nel trasformare il **calore specifico** [J/m<sup>3</sup>K] in un valore espresso in J/kgK andando a dividere il dato per la densità equivalente media:

$$Spc\ Heat \left[ \frac{J}{kgK} \right] = \frac{Spc\ heat \left[ \frac{J}{m^3K} \right]}{\rho_{eq,m} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad (5)$$

Anche in questo caso, i dati relativi ai test nei quali sono stati inseriti i tappetini di gomma naturale sono stati elaborati come segue, al fine di escludere la parte relativa agli strati aggiuntivi:

$$Specific\ Heat_{NO\ PARA} \left[ \frac{J}{kgK} \right] = \frac{Spc\ Heat \left[ \frac{J}{kgK} \right] * m_{TOT} - Spc\ Heat_{PARA} * m_{PARA}}{m_{panel,NO\ PARA}} \quad (6)$$

- Infine, il valore ottenuto è stato suddiviso per 1000 al fine di avere un valore di entalpia espresso in kJ/kgK:

$$Spc\ Heat \left[ \frac{kJ}{kgK} \right] = \frac{Spc\ Heat \left[ \frac{J}{kgK} \right]}{1000} \quad (7)$$

I valori derivati dalle equazioni 4 e 7 sono risultati pressochè identici nei test con differenza di temperatura  $\Delta T$  pari a 1°C. Al contrario, nelle prove sperimentali caratterizzate da  $\Delta T$  uguale a 0.5°C il calore specifico è risultato circa doppio rispetto al

---

rispettivi volumi netti e le densità sono state calcolate le masse ed infine il valore ponderato di densità equivalente.

corrispondete valore di entalpia. Questo è giustificato dal fatto che il calore specifico, per definizione, è una grandezza fisica strettamente connessa alla variazione di temperatura mentre l'entalpia è una funzione di stato che dipende dall'energia interna, dalla pressione e dal volume del sistema. Per questa ragione, per poter confrontare i dati riferiti allo stesso materiale e sottoposti a test con diversi  $\Delta T$  sono stati utilizzati i valori di entalpia per i test con i  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  ed i valori di calore specifico per i test con  $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$ .

Un altro aspetto importante della metodologia di elaborazione dei dati appena descritta è la **verifica dei flussi termici** di ciascun setpoint. Dal momento che, talvolta, i dati ottenuti dal software del termoflussimetro sono risultati poco convincenti dando dei valori di entalpia parziale negativi, questi sono stati sottoposti ad un ulteriore controllo. Nello specifico, i valori di entalpia parziale sono stati confrontati con quelli calcolati manualmente a partire dal file di output caratterizzato dall'estensione .bin. Quest'ultimo fornisce un valore di flusso termico per entrambe le piastre ogni 1.3 secondi, andando ad effettuare la sommatoria dei suddetti valori, opportunamente trasformati in  $\text{J/m}^2$ , si otterrà un valore corrispondente a quello dell'entalpia. Ciò che, tuttavia, occorre sottolineare è che la sommatoria non deve tener conto di tutti i valori forniti dal file poiché graficando quest'ultimi ci si renderà conto che il materiale è caratterizzato da una fase in cui il suo flusso termico globale cresce, dopodiché, in seguito al raggiungimento del valore massimo, inizia ad asintotizzarsi. Questo è dovuto al fatto che i piatti dello strumento continuano a fornire calore per mantenere l'equilibrio. Di conseguenza, considerando tutti i valori si terrebbe conto di quelle dispersioni laterali che non sono importanti per il fine di questa verifica numerica.

### Confronto valori di capacità termica

Per poter opportunamente analizzare i dati così elaborati si è deciso di confrontare le curve ottenute dai test condotti con una differenza di temperatura  $\Delta T$  pari a  $1^\circ\text{C}$ . Nel grafici riportati in Appendice è possibile osservare come la maggiore variazione di entalpia si verifichi in corrispondenza della transizione di fase dei PCM, la temperatura in corrispondenza della quale si ha un picco di entalpia in fase di riscaldamento coinciderà con la temperatura di fusione del PCM, analogamente, la temperatura in corrispondenza della quale si ha un picco di entalpia in fase di raffreddamento coinciderà con la temperatura di solidificazione del materiale a cambiamento di fase. Nei Grafico 39 e Grafico 40 si riporta a titolo esemplificativo l'andamento di entalpie dei PCM\_plastic film bags e PCM\_aluminium case\_c. Nel primo caso il PCM presenta un andamento abbastanza costante, un picco di entalpia in fase di heating a  $27^\circ\text{C}$  ed un picco di entalpia in fase di cooling a  $26^\circ\text{C}$ . Pertanto entrambe le variazioni di entalpia si osservano in corrispondenza di valori di temperatura vicini tra loro. Ciò non accade nel PCM\_aluminium case\_c, nel quale i due picchi di entalpia (in fase di raffreddamento

e di riscaldamento) si registrano a 21°C e 28°C. Questo significa che il materiale in questione è caratterizzato da un'elevata isteresi.

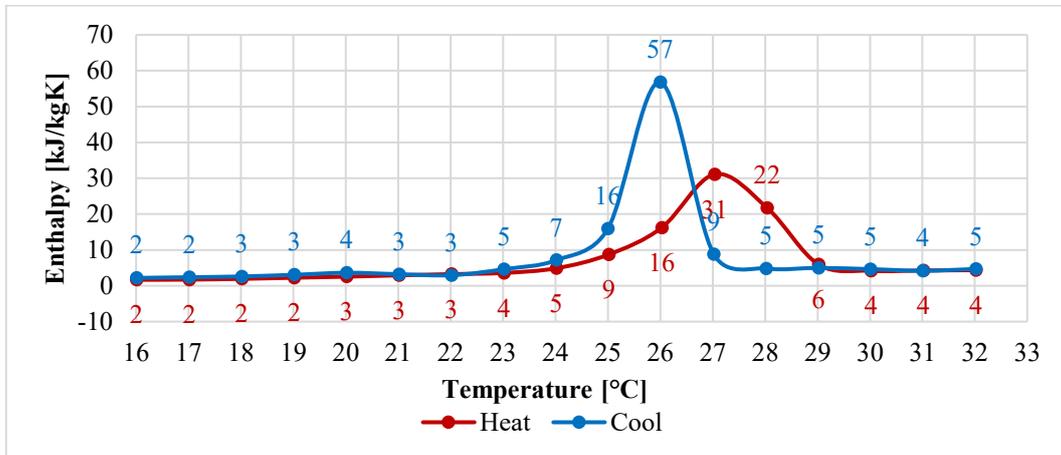


Grafico 39: PCM\_plastic film bags - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

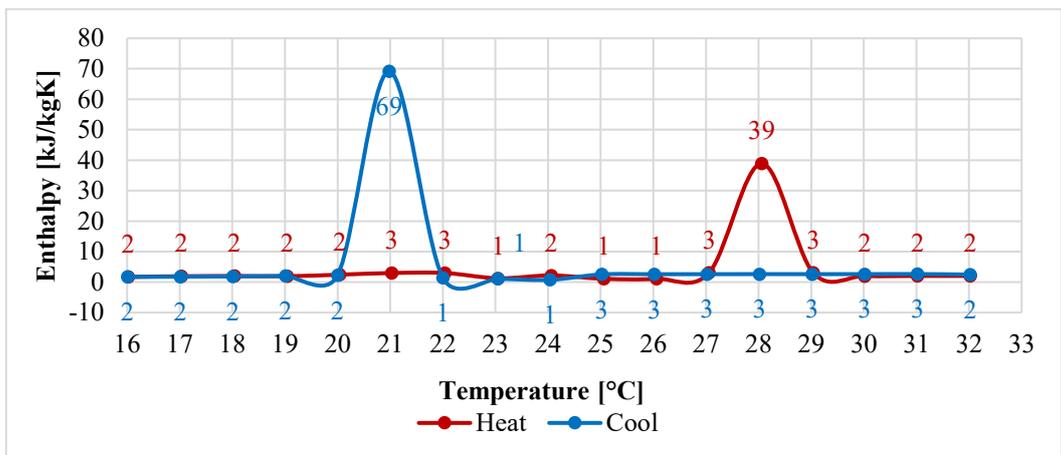


Grafico 40: PCM\_aluminium case\_c - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$

Per una lettura immediata dei valori di entalpia che caratterizzano ciascun materiale a cambiamento di fase sono stati calcolati i valori di **capacità termica** (ottenuta come sommatoria dei valori di entalpia parziale espressa in  $\text{J}/\text{m}^2$ ) e **capacità termica normalizzata rispetto lo spessore**<sup>11</sup> dei pannelli relative ai soli **range di transizione di fase**. In particolare, in **fase di riscaldamento** l'intervallo di temperatura selezionato per

<sup>11</sup> Ottenuta dividendo il valore di capacità termica precedentemente calcolata ed espressa in  $\text{kJ}/\text{m}^2$  per lo spessore del pannello espresso in mm.

tutti i PCM è 24°C-29°C ed in fase di raffreddamento è 21°C-26°C.

Tali valori, riportati in Tabella 35, consentono di valutare quale dei tre PCM sia quello maggiormente capacitivo. In particolare osservando il Grafico 41 si può notare come il PCM caratterizzato da una più elevata capacità termica superficiale sia in fase di riscaldamento sia in fase di raffreddamento sia il PCM\_plastic case\_b, seguito dal PCM\_aluminium case\_c, entrambi inorganici. Quest'ultimo però, se si analizzano i valori di capacità termica normalizzata rispetto allo spessore, rappresentati Grafico 42, presenta un valore inferiore rispetto al vicino PCM\_plastic film bags. Con questa osservazione si vuole sottolineare quanto lo spessore dei pannelli possa influire sulle proprietà termiche dei materiali: infatti il PCM\_aluminium case\_c presenta un valore medio di capacità termica quasi doppio rispetto a quello del PCM\_plastic film bags, ma se si confrontano i valori normalizzati rispetto allo spessore dei rispettivi pannelli si può notare come il secondo PCM risulti maggiormente capacitivo. Questo è ragionevole considerando che il primo PCM in questione presenta uno spessore due volte maggiore.

Tabella 35: Capacità termica PCM testati

PCM code	t [mm]	Heating phase (24°-29°)		Cooling phase (21°-26°)		Mean values	
		C [kJ/m <sup>2</sup> ]	C <sub>norm</sub> [kJ*mm/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/m <sup>2</sup> ]	C <sub>norm</sub> [kJ*mm/m <sup>2</sup> ]	C [kJ/m <sup>2</sup> ]	C <sub>norm</sub> [kJ*mm/m <sup>2</sup> ]
PCM_aluminum case_a	10	237	24	579	58	408	41
PCM_aluminium case_c	15	692	46	1084	72	888	59
PCM_plastic film bags	6.8	475	70	486	71	481	71
PCM_plastic container	7.3	264	36	199	27	232	32
PCM_plastic case	12.8	1085	85	1942	152	1514	119

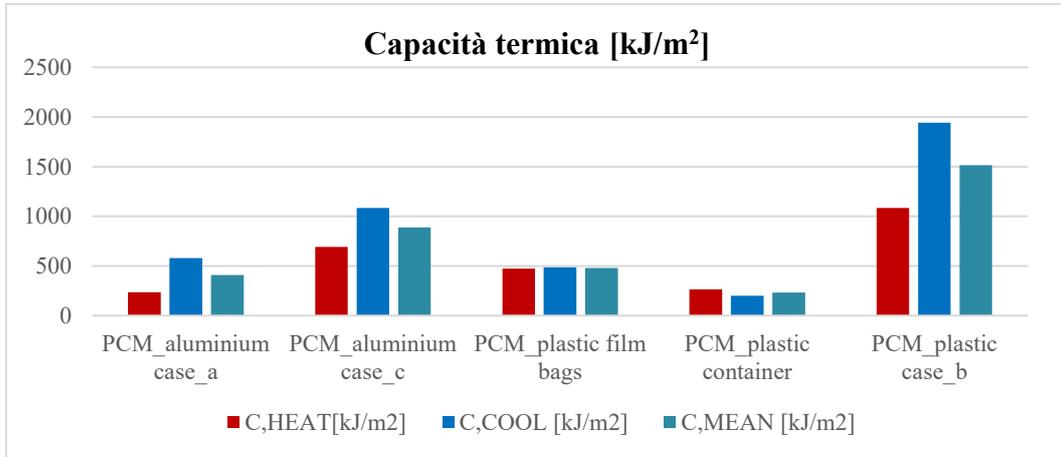


Grafico 41: Capacità termica PCM testati

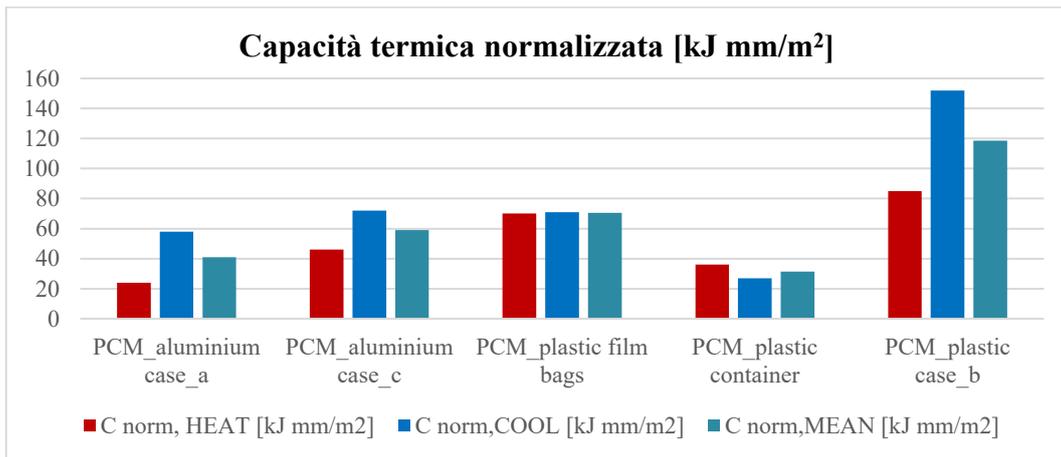


Grafico 42: Capacità termica normalizzata rispetto allo spessore dei PCM testati

### Confronto con le curve dichiarate dal produttore dei PCM\_aluminium case

Poiché il produttore dei PCM\_aluminium case fornisce nella scheda tecnica di ogni PCM la curva di entalpia in funzione della temperatura del materiale puro è stato possibile operare un ulteriore confronto con i dati ottenuti sperimentalmente. Ciò che è importante sottolineare è che i dati dichiarati non sono riferiti all'intero pannello CMS contenente il materiale a cambiamento di fase bensì al solo PCM puro. Per questa ragione, a partire dai dati di output opportunamente elaborati è stata calcolata l'entalpia parziale (o l'equivalente **calore specifico**) del solo PCM con la seguente formula:

$$spc\ heat_{panel} * m_{panel} = (spc\ heat_{PCM} * m_{PCM}) + (spc\ heat_{AL} * m_{AL}) \quad (8)$$

da cui si ottiene:

$$spc\ heat_{PCM} = \frac{(spc\ heat_{panel} * m_{panel}) - (spc\ heat_{AL} * m_{AL})}{m_{PCM}} \quad (9)$$

dove:

$spc\ heat_{panel}$  è il calore specifico dell'intero pannello ed è pari all'entalpia parziale calcolata con l'equazione 4 [kJ/kgK];

$m_{panel}$  è la massa dell'intero pannello [kg], composto dal contenitore in alluminio e dal PCM incapsulato all'interno, riferita alla sola area di misura 254 mm x 254 mm;

$spc\ heat_{AL}$  è il calore specifico del solo pannello CSM in alluminio [kJ/kgK];

$m_{AL}$  è la massa del solo pannello CSM in alluminio [kg], riferita all'area 254 mm x 254 mm;

$m_{PCM}$  è la massa del solo PCM puro contenuto all'interno del CSM [kg], anch'essa riferita all'area 254 mm x 254 mm.

Le curve generate dai valori così ottenuti si possono mettere a confronto con quelle delle schede tecniche.

In particolare, nel Grafico 43 si può osservare come l'andamento delle due curve sia pressoché simile a quello della Fig. 41 poiché i valori di entalpia in termini di ordine di grandezza sono gli stessi ed in entrambi i grafici i picchi, sia in fase di *heating* che in fase di *cooling*, si registrano a 24°C e 25°C.

Per quanto concerne il secondo PCM, al contrario, non vi è corrispondenza tra i due grafici: nel Grafico 44 si può osservare come entrambe le curve abbiano un andamento molto diverso rispetto a quelle riportate in Fig. 42, soprattutto nel range di temperatura tra 21°C e 28°C. Anche per questo motivo il test di entalpia relativo a questo PCM è

stato ripetuto al fine di ottenere valori maggiormente validabili, tuttavia i risultati ottenuti non si discostano molto da quelli della prova precedente: infatti l'andamento è pressoché simile, le uniche differenze emergono in corrispondenza dei picchi di entalpia.

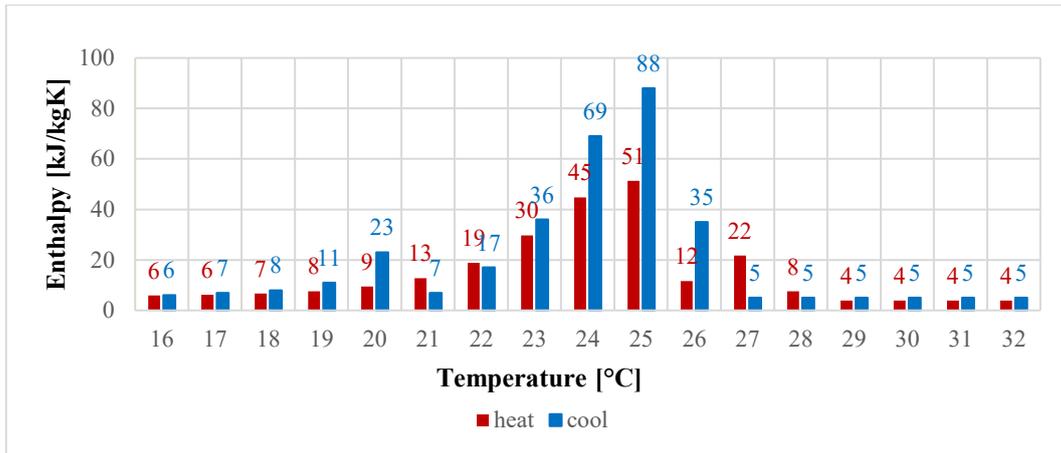
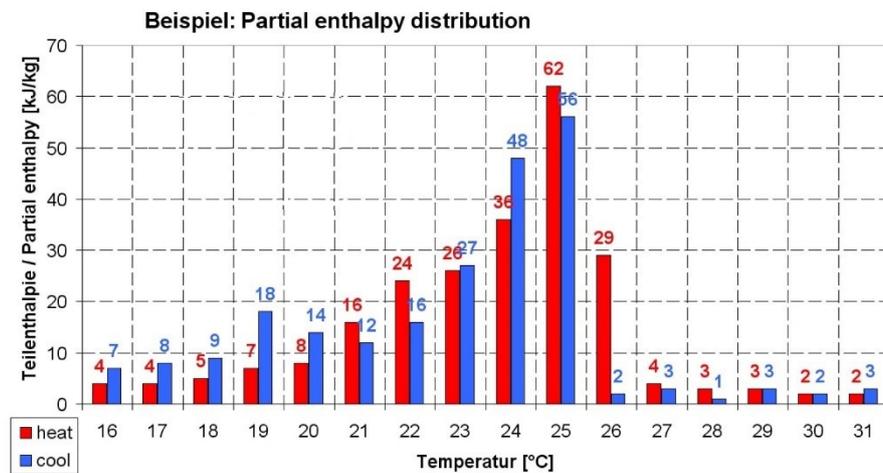


Grafico 43: PCM\_aluminium case\_a - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$



\*Measured with 3-layer-calorimeter.

Fig. 41: PCM\_aluminium case\_a - Entalpia vs temperatura - Scheda tecnica

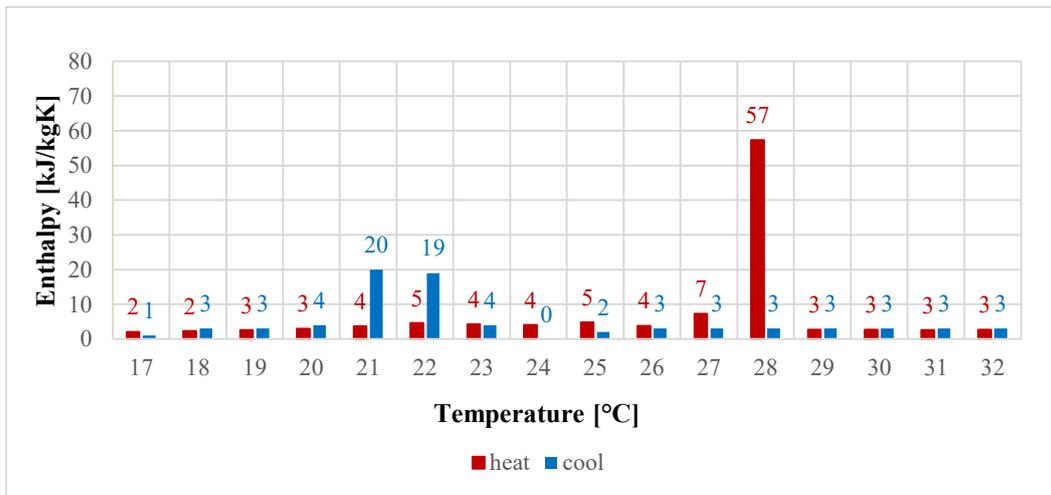


Grafico 44: PCM\_aluminium case\_c - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  - Test 1

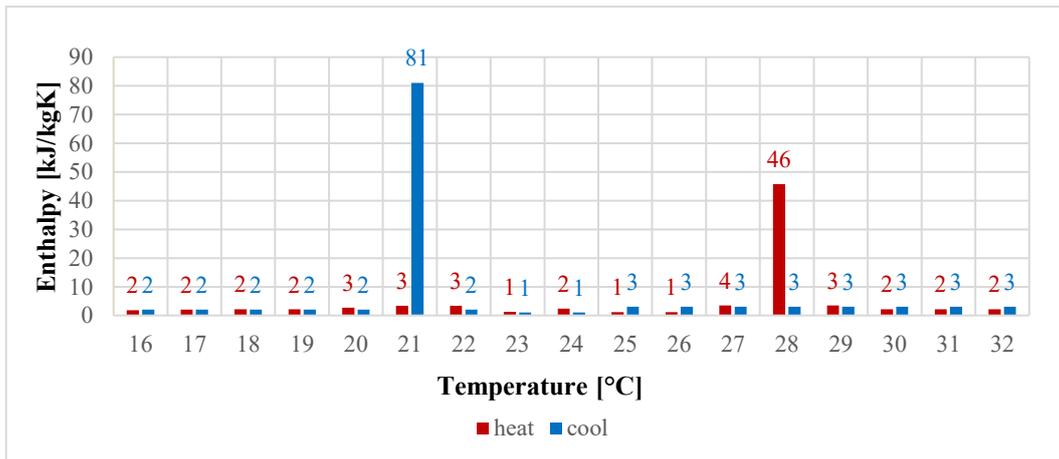


Grafico 45: PCM\_aluminium case\_c - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  - Test 2

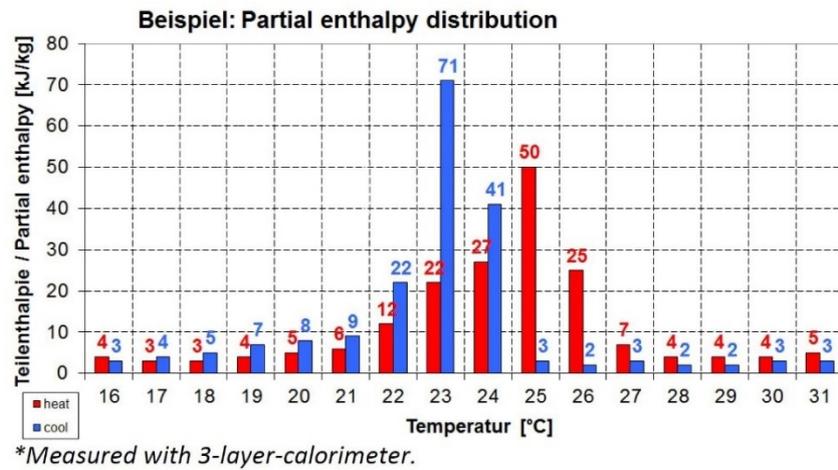


Fig. 42 PCM\_aluminium case\_c - Entalpia vs temperatura -  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  - Scheda tecnica

### 7.1.1.2.3 Risposta sinusoidale

I dati di output delle prove di risposta sinusoidale consistono in una serie di temperature rilevate in corrispondenza delle termocoppie utilizzate con un timestep che dipende dal *gain level* scelto. Nel nostro caso si tratta del gain level 6 il quale permette di ottenere un dato di temperatura ogni 166 secondi.

I dati così ottenuti sono stati plottati, e riportati in Appendice, per poter valutare ed analizzare il comportamento dei PCM ed infine sottoporli ad un processo di validazione.

Questo processo ha inizialmente previsto l'utilizzo di **WUFI®PRO**, software già utilizzato nell'ambito del design degli esperimenti di risposta sinusoidale [7.1.1.1.3 Risposta sinusoidale]. Tuttavia, esso presenta un limite in quanto non è in grado di replicare gli effetti dovuti all'isteresi termica dei PCM. Pertanto, per poter disporre di un modello che si avvicinasse maggiormente al comportamento reale dei materiali a cambiamento di fase, si è deciso di utilizzare un altro software, **EnergyPlus TM**.

Quest'ultimo è uno dei principali strumenti BPS per la simulazione energetica in regime dinamico di edifici e componenti edilizi ed in esso è implementato un algoritmo in grado di simulare le diverse curve entalpiche di riscaldamento e raffreddamento dei PCM. Questo algoritmo – analizzato nel dettaglio nell'articolo "*Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components*" [46]– si avvale del gruppo Energy Management System (EMS), uno dei metodi di controllo di alto livello disponibili in EnergyPlus TM.

Tra i dati di input da inserire affinché la simulazione venga lanciata correttamente è importante definire i seguenti parametri:

- **TIMESTEP**: il passo temporale con cui si richiede al software di restituire il dato di temperatura. In realtà, il modello, dal momento che viene discretizzato in una serie di punti attraverso l'opzione "*conduction finite difference*", ha la necessità di avere un buon numero di dati per poter effettuare correttamente il controllo dunque un timestep molto piccolo. In questo caso è stato utilizzato un timestep di 3 minuti;
- **RUN PERIOD**: il periodo dell'anno in cui la simulazione viene effettuata;
- **SCHEDULE DAY LIST**: elenco delle temperature di input sulla superficie interna ed esterna. In particolare, per poter simulare delle condizioni il più possibile vicine a quelle reali, sono stati definiti due diversi andamenti: uno costante e pari alla temperatura di fusione dei PCM sul lato interno; uno caratterizzato da un andamento sinusoidale con una determinata semi-ampiezza ( $\pm 6^{\circ}\text{C}$  o  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ) sul lato esterno;
- **MATERIAL**: in questa sezione sono stati inseriti i materiali che compongono la stratigrafia da simulare e per ciascuno di essi sono state riportate le

seguenti proprietà termiche: spessore, conducibilità termica, densità, calore specifico. Ciò che è importante evidenziare è che il PCM compare due volte, poiché si ha la possibilità di specificare le proprietà termiche nelle due fasi di riscaldamento (PCMH) e di raffreddamento (PCMC). Inoltre, per poter validare correttamente il modello creato sono stati inseriti i dati ottenuti sperimentalmente;

- **MATERIAL PROPERTY - PHASE CHANGE:** a differenza di WUFI®PRO nel quale si era costretti ad inserire i dati di una sola curva entalpica, calcolata come media tra le curve di entalpia di heating e di cooling, in questo caso è stato possibile inserire entrambe le curve riportando sedici coppie di valori entalpici di temperatura. Analogamente al punto precedente, i valori inseriti in questa sezione sono quelli restituiti dai test in laboratorio ed opportunamente elaborati;
- **CONSTRUCTION:** sezione nella quale viene indicata la corretta collocazione dei singoli layer che compongono la stratigrafia.

Infine, prima di procedere all'avvio delle simulazioni, sono stati controllati una serie di parametri riferiti all'EMS, metodo di controllo del software in questione di cui si serve l'algoritmo per la simulazione dei processi di isteresi dei PCM. "Gli oggetti ed i programmi dll' EMS sono in grado di valutare lo stato del processo di accumulo del calore, controllando la temperatura di un nodo all'interno del PCM in un determinato istante di tempo, con la temperatura dello stesso nodo nell'istante di tempo precedente (scandito dal timestep selezionato): se la temperatura è maggiore, il PCM sta aumentando la propria energia interna, pertanto sta avvenendo un processo di riscaldamento (fusione); se la temperatura è inferiore a quella dell'istante precedente, il PCM si sta raffreddando (solidificando). Conseguentemente, il software potendo selezionare la curva di entalpia vs. temperatura coerente con la direzione del processo di accumulo di calore, è in grado di lanciare la simulazione"[33].

Dalle simulazioni, le quali sono state impostate secondo quanto precedentemente descritto, sono state ricavate le temperature superiore  $T_{,PCMup}$  e inferiore  $T_{,PCMlow}$  ogni 3 minuti per 48 ore ed è stata calcolata la temperatura media  $T_{,PCMmedium}$ . Queste sono state plottate in funzione del tempo espresso in ore all'interno di grafici; riportati in Appendice, e confrontate con le stesse curve ottenute sperimentalmente.

A titolo esemplificativo si riportano i grafici Grafico 46 e Grafico 47 del PCM\_plastic film bags di cui si rappresentano solamente le ultime 24 ore, test poiché non sono influenzate dalle condizioni iniziali dell'ambiente in cui il dispositivo sperimentale è collocato:

- Il primo [Grafico 46] riporta una sovrapposizione delle due curve ottenute rispettivamente dalle misurazioni effettuate dal termoflussimetro e dalla simulazione con EnergyPlus TM. Esse risultano per lo più sovrapponibili di conseguenza da un punto di vista qualitativo il modello simulativo creato può considerarsi validato in quanto è in grado di replicare il comportamento termico del materiale. Tuttavia, per poter affermare ciò con più precisione e da un punto di vista matematico è stato calcolato l'RMSE (Root Mean Square Error) ovvero la deviazione standard degli errori di previsione. Nello specifico l'RMSE si calcola come segue [46]:

$$RMSE = \sqrt{\overline{(f - o)^2}} \quad (1)$$

dove:

$f$  sono i valori attesi quindi i valori simulati;

$o$  sono i valori osservati ovvero quelli misurati;

la barra sopra il simbolo della radice quadrata rappresenta la media.

Nello specifico, l'indice di errore è stato calcolato applicando la seguente formula

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,simulated} - x_{i,measured})^2}{N}} \quad (2)$$

dove:

$x_{i,simulated}$  sono i valori di temperatura ottenuti dal modello simulativo di EnergyPlus TM ed espressi in °C;

$x_{i,measured}$  sono i valori di temperatura ottenuti sperimentalmente, anch'essi espressi in °C;

$N$  è il numero del campione ovvero il numero totale dei dati simulati/misurati che sono stati presi in considerazione.

Di conseguenza, il valore finale che si ottiene non è altro che un indicatore dell'errore medio, espresso in °C, che esprime quanto i valori simulati si discostino da quelli misurati.

Nel caso del PCM\_plastic film bags l'RMSE è pari a 0.72°C, un valore assolutamente accettabile per poter considerare validato il modello simulativo utilizzato.

- Il secondo grafico [Grafico 47], invece, è caratterizzato dalla presenza di tre curve: la curva ottenuta dai dati misurati e le due curve delle sollecitazioni imposte allo strumento di misura, in particolare le condizioni

a cui sono state sottoposte la piastra superiore, caratterizzata un andamento sinusoidale (in questo caso  $26 \pm 10^\circ\text{C}$ ) e la piastra inferiore caratterizzata da una temperatura costante pari alla temperatura di fusione del materiale ( $26^\circ\text{C}$ ). Questo tipo di rappresentazione consente una lettura della risposta che il materiale a cambiamento di fase è in grado generare quando è sottoposto a delle sollecitazioni esterne.

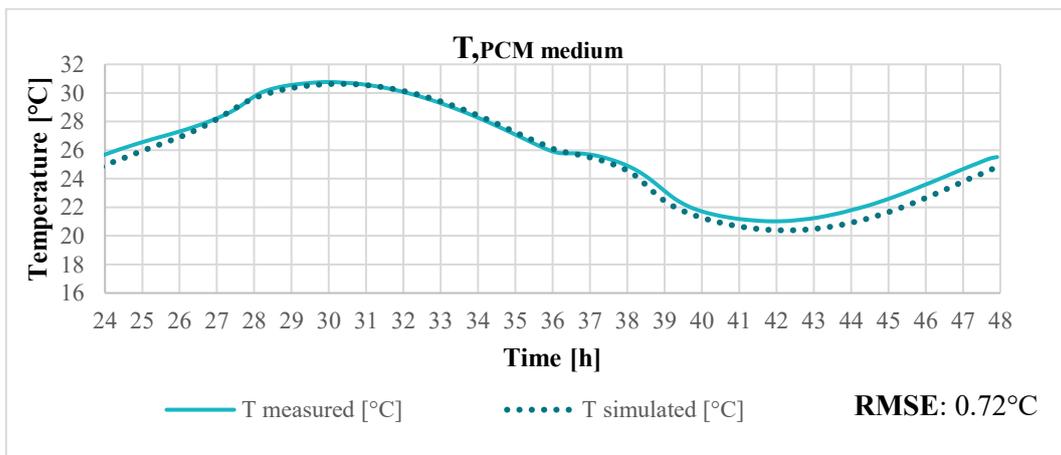


Grafico 46: PCM\_plastic film bags – Risposta sinusoidale – Confronto curva misurata e simulata

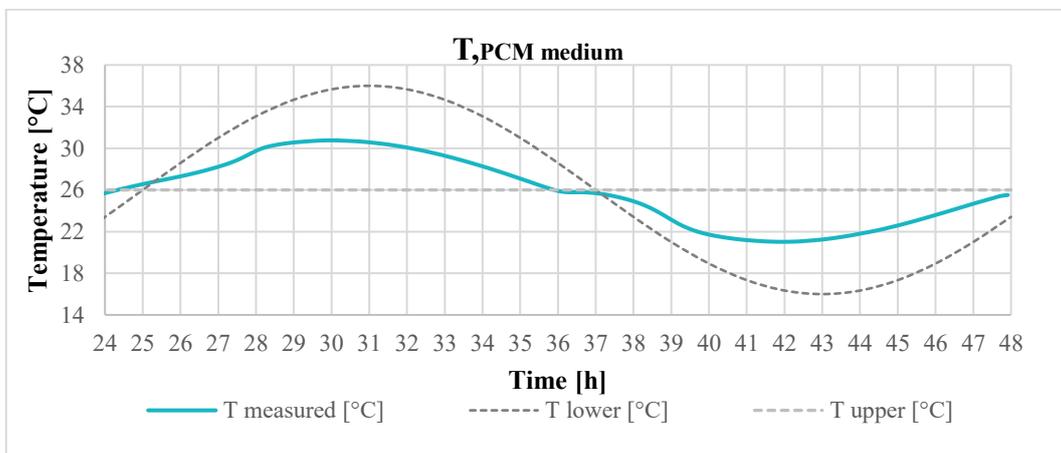


Grafico 47: PCM\_plastic film bags – Risposta sinusoidale – Confronto curva misurata e sollecitazioni

Questi grafici, riportati in Appendice per ogni PCM testato, permettono di analizzare il reale comportamento termico dei materiali a cambiamento di fase.

In particolare, nel caso del PCM\_plastic film bags, si può evidenziare come il cambiamento di pendenza (temperamento del PCM), dovuto alla totale fusione e solidificazione del PCM sia molto evidente: infatti a  $27/28^\circ\text{C}$  circa si può osservare la

transizione dallo stato solido a quello liquido, viceversa il passaggio di stato opposto si verifica a 26°C.

Per quanto riguarda i fenomeni del sotto-raffreddamento e dell'isteresi, essi non sono così evidenti ed in termini generali hanno un significato limitato. Pertanto, il PCM in questione è caratterizzato da un comportamento termico ottimale dal momento che i fenomeni di sotto-raffreddamento e di isteresi hanno effetti modesti ed il materiale è in grado di attenuare i picchi di temperatura, come si può osservare dal confronto tra le curve di sollecitazione e quella di risposta.

Quest'analisi è stata effettuata per ciascun materiale a cambiamento di fase testato ed ha consentito di giungere alle seguenti conclusioni:

- I PCM caratterizzati da un miglior comportamento termico sono il PCM organico PCM\_aluminium case\_a e il PCM inorganico PCM\_plastic film bags. In entrambi i materiali si verifica la completa fusione e solidificazione e gli effetti del sotto-raffreddamento e dell'isteresi sono modesti o pressoché nulli;
- Il PCM\_aluminium case\_C a base di Sali idrati è caratterizzato da una elevata isteresi, quest'ultima è osservabile non solo dal grafico di risposta sinusoidale [Appendice capitolo 6] ma anche da quello di entalpia in funzione della temperatura [Appendice capitolo 6]. In quest'ultimo infatti vi è un picco in fase di raffreddamento a 21°C ed uno in fase di riscaldamento a 28°C. Questo importante scarto mette in evidenza questo fenomeno che potrebbe andar bene in estate ma non in inverno, durante il quale si raggiungono temperature elevate con più difficoltà. Inoltre, la caratterizzazione di questo materiale ha incontrato alcune difficoltà dal momento che i risultati ottenuti sperimentalmente non sono stati convincenti: le curve di risposta sinusoidale ottenute dai dati sperimentali e da quelli simulati non risultano sufficientemente sovrapposte [Grafico 48]. Dal momento che nemmeno i risultati del test di entalpia in funzione della temperatura sono sembrati soddisfacenti e si distaccano molto da quelli riportati nella scheda tecnica del prodotto, si è provato a ripetere la simulazione di risposta sinusoidale con EnergyPlus TM sostituendo i dati entalpici sperimentali con quelli dichiarati dal produttore. La curva simulativa così ottenuta, visibile nel Grafico 49, si avvicina maggiormente a quella sperimentale tuttavia non a sufficienza. Di conseguenza il test di misura di entalpia vs. temperatura è stato ripetuto nuovamente ma i risultati ottenuti non si allontanano molto da quelli precedenti.

- I PCM\_plastic container e PCM\_plastic case\_b sono caratterizzati da un comportamento termico discreto e poco soddisfacente, in quanto nel primo caso il passaggio di stato non è evidente pertanto il materiale non fonde/solidifica completamente. Inoltre entrambi i materiali presentano in maniera accentuata in fenomeno dell'isteresi.

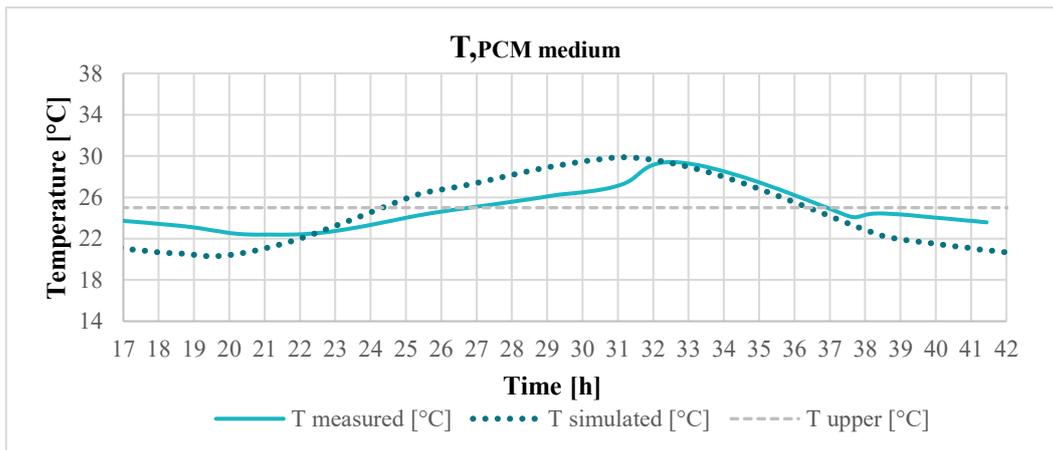


Grafico 48: PCM\_aluminium case\_c – Risposta sinusoidale – Confronto curva misurata e simulata

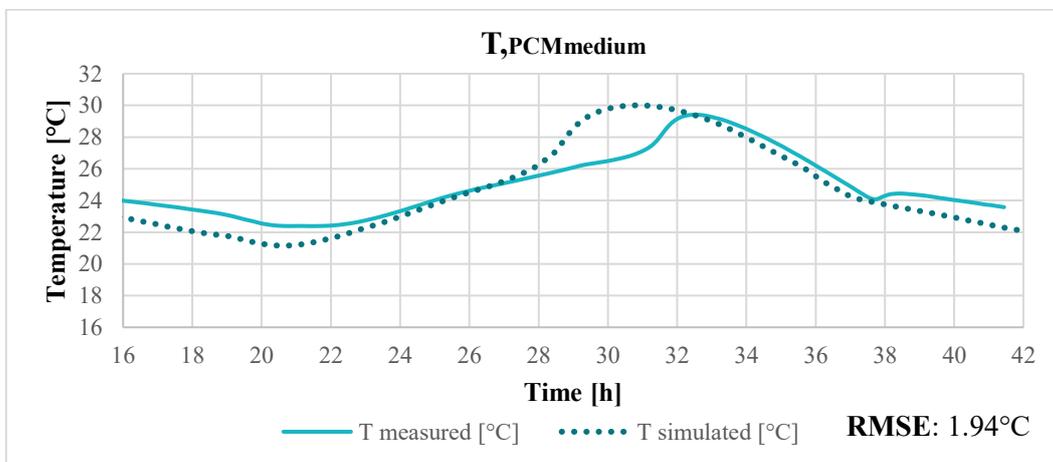


Grafico 49: PCM\_aluminium case\_c – Risposta sinusoidale – Confronto curva misurata e simulata – dati di entalpia da scheda tecnica

#### 7.1.1.2.4 Caratterizzazione completa e definizione di un benchmark

I test di misura della conducibilità termica, di entalpia in funzione della temperatura e di risposta sinusoidale hanno permesso di ottenere una caratterizzazione completa di alcuni PCM selezionati.

In si riportano le proprietà termiche e fisiche dei PCM testati in maniera completa al fine di operare una valutazione finale su quale possa essere il materiale a cambiamento di fase con le caratteristiche migliori.

In linea generale, come riportato nell'articolo scientifico "*Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*" [21], un materiale a cambiamento di fase, in termini di accumulo di calore, dovrebbe essere caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- Proprietà termiche:
  - Temperatura di fusione nel range di temperatura di esercizio desiderato;
  - Elevata variazione di entalpia in prossimità delle temperature di utilizzo;
  - Elevata conducibilità termica;
  - Elevata capacità termica e calore specifico.
- Proprietà fisiche:
  - Elevata densità;
  - Fenomeno del sottoraffreddamento nullo o con effetti modesti.
- Proprietà chimiche:
  - Stabilità;
  - No separazione di fase;
  - Compatibilità con i materiali dei contenitori in cui sono incapsulati;
  - No tossici, no infiammabili e no inquinanti;
- Proprietà economiche:
  - Economico;
  - Disponibile in quantità abbondanti.

Tabella 36: Caratterizzazione completa dei PCM testati

PCM type	PCM code	thickness [mm]	sizes [m]	n° panels/m <sup>2</sup>	cost [€/m <sup>2</sup> ]	density [kg/m <sup>3</sup> ]	thermal conductivity [W/mK]	Heat capacity [kJ/m <sup>2</sup> ]	Heat capacity normalized for 1mm thickness [kJ mm/m <sup>2</sup> ]	cost [€/kJ mm]
Organic (Paraffine)	PCM_aluminium case_a	10	0.30 x 0.45	8	129	414.13	0.1456	408	41	3.15
	PCM_aluminium case_c	15	0.30 x 0.45	8	125	1031.88	0.2350	888	59	2.12
Inorganic (Salt hydrates)	PCM_plastic film bags	6.8	0.55 x 0.55	4	45	784.96	0.1713	481	71	0.64
	PCM_plastic container	7.3	0.60 x 0.60	3	-	1314.24	0.1783	232	32	-
	PCM_plastic case_b	12.8	0.58 x 0.20	9	90	1126.79	0.3551	1514	119	0.76

Pertanto, osservando quanto riportato in Tabella 36 e limitandoci ad un commento riferito alle sole caratteristiche termiche e fisiche, si può sostenere che i materiali a cambiamento di fase con le caratteristiche più auspicabili siano il PCM\_plastic case\_b, il quale, tra tutti i PCM testati, presenta i più alti valori di densità, conducibilità e capacità termica (sia superficiale sia normalizzata rispetto allo spessore) e a seguire il PCM\_plastic film bags. In entrambi i casi si tratta di PCM inorganici a base di sali idrati. Inoltre, è possibile fare un'ulteriore considerazione dal punto di vista dei costi: in particolare sono stati calcolati il prezzo per unità di superficie ed quello per 1 kJ mm, che tiene conto della capacità termica dei PCM normalizzata rispetto allo spessore (calcolata nei range di temperatura relativi alle transizioni di fase).

Tra i PCM di cui sono noti i costi, quello più conveniente è senza dubbio il PCM\_plastic film bags il quale risulta decisamente più economico rispetto i due PCM\_aluminium case, seguito dal PCM\_plastic case\_b.

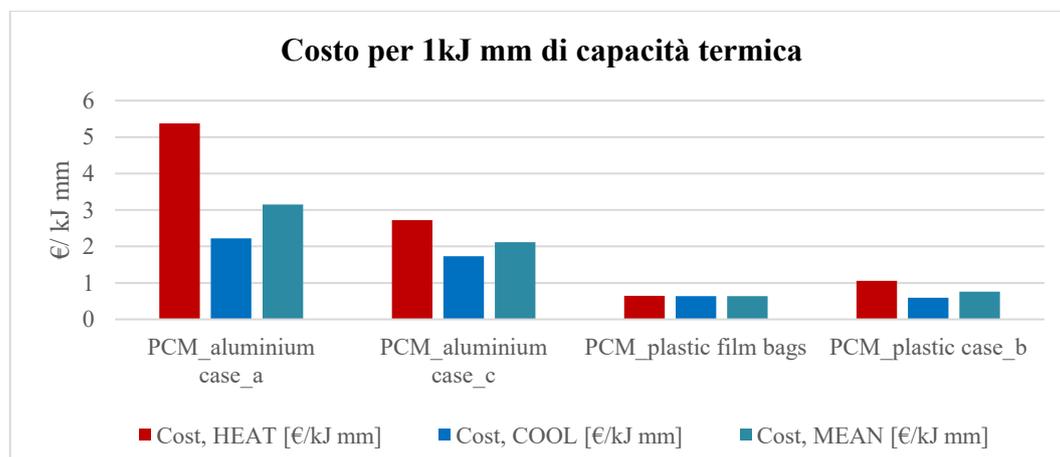


Grafico 50: Costo capacità termica PCM testati

Infine confrontando tra loro i due PCM migliori tra quelli testati è possibile sottolineare quali siano i pro e i contro di questi materiali:

<u>PCM_plastic film bags</u>	<u>PCM_plastic case b</u>
<b><u>Pro</u></b>	<b><u>Pro</u></b>
Versatilità del pannello che garantisce la possibilità di tagliarlo a seconda delle esigenze	Maggiore capacità termica
Spessore del pannello (6.8 mm) tale per cui può essere utilizzato sottoforma di singolo strato o doppio (6.8 mm + 6.8 mm)	Maggiore conducibilità termica
È più economico	
<b><u>Contro</u></b>	<b><u>Contro</u></b>
È più delicato	Impossibilità di tagliare il pannello poiché rigido (unica dimensione 580 x 200 mm)
Proprietà di accumulo leggermente peggiori	Spessore del pannello (12.8 m) poco idoneo poiché se si necessita di spessori inferiori non si può utilizzare

## 7.1.2 VIP

I VIP (Vacuum Insulation Panels) sono pannelli isolanti sottovuoto che rientrano tra la categoria dei materiali superisolanti SIM (Super Insulating Materials) e sono caratterizzati da una conducibilità termica molto bassa, circa cinque volte inferiore rispetto ai tradizionali materiali da costruzione [44]. Per questo motivo, negli ultimi anni la loro adozione negli involucri edilizi è diventata sempre più diffusa. In questa campagna sperimentale l'obiettivo principale è stato quello di misurare la conducibilità termica dei VIP a disposizione per poter confrontare i dati ottenuti con quelli forniti dal produttore e quindi verificarne il potenziale deterioramento nel tempo. Per queste misurazioni la normativa di riferimento è la UNI EN 12667:2001[35].

### 7.1.2.1 Metodologia (conducibilità termica)

Sono state effettuate diverse prove per misurare la conducibilità termica al centro del pannello di sei campioni di glass fiber VIP. Si tratta di pannelli di dimensioni 600 x 750 mm e spessore 14 mm, i quali sono stati inseriti all'interno dello strumento di misura senza l'aggiunta di ulteriori materiali isolanti. Dal momento che la dimensione in lunghezza dei campioni superava quella del dispositivo [ Fig. 43, a sinistra], una piccola parte dei provini fuoriusciva dalla piastra rendendo impossibile la chiusura completa della porta anteriore del dispositivo. Di conseguenza, per ciascun provino testato, è stata opportunamente isolata con della fibra di poliestere e del nastro adesivo la parte che sporgeva [ Fig. 43, a destra].

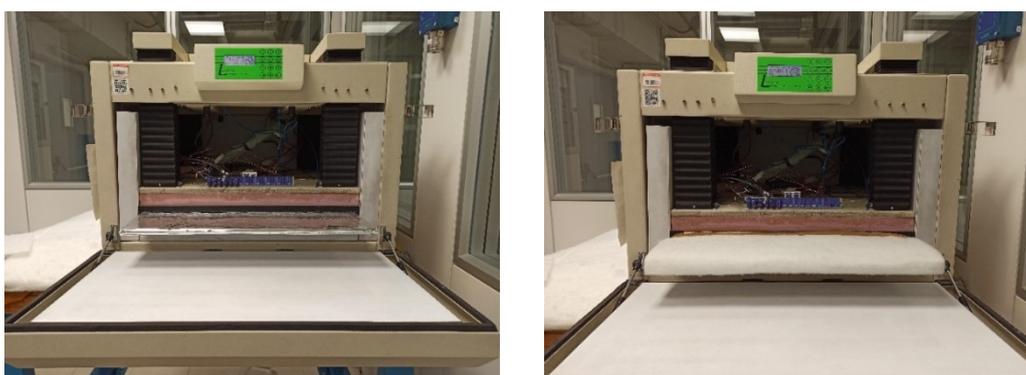


Fig. 43 Campione di VIP in piastra calda (a sinistra). Isolamento della parte di VIP che fuoriesce (a destra).

Infine, prima dell'avvio di ciascun test, sono state impostate le temperature delle due piastre (riportate in Tabella 37), i criteri di equilibrio ed è stato definito il file di

calibrazione (150b NIST SRM). Poiché i campioni da testare sono sei, il numero delle prove sono state sei, ognuna delle quali è stata settata secondo le stesse modalità.

**Tabella 37: Temperature setpoint test**

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	T <sub>average</sub> [°C]	ΔT [°C]
Setpoint 1	10	30	20	20

### 7.1.2.2 Risultato sperimentali

Osservando quanto riportato in Tabella 38 si può evidenziare come i valori si aggirino tutti intorno ai 0.00155 W/mK, risultato coerente con quanto dichiarato dal produttore. Fa eccezione il dato relativo al campione n. 02 il quale è caratterizzato da un valore di conducibilità termica pari a 0.008537 W/mK dovuto ad un probabile deterioramento del pannello.

**Tabella 38: Conducibilità termica glass fiber VIP**

N° sample	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	T <sub>average</sub> [°C]	ΔT [°C]	λ [W/mK]
01	10	30	20	20	0.001603
02	10	30	20	20	0.008537
04	10	30	20	20	0.001530
05	10	30	20	20	0.001621
07	10	30	20	20	0.001621
08	10	30	20	20	0.001535
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.001573<sup>12</sup></b>

## 7.2 Analisi a scala di componente

L'analisi sperimentale non si è limitata a misurazioni a scala di materiale ma anche a scala di componente. Al fine di valutare in modo completo il comportamento termico dei materiali analizzati all'interno delle configurazioni ipotizzate, sono state effettuate misurazioni in regime dinamico di due pacchetti multistrato. In particolare, sono stati creati due prototipi con l'obiettivo di testare due differenti stratigrafie (Configurazione 3.3 e Configurazione 3.2) riportate ed analizzate dal punto di vista simulativo nei capitoli precedenti. In entrambi i casi si tratta di porzioni di facciata attiva caratterizzate dalla presenza di un pannello fotovoltaico integrato sotto forma di un foglio di Perovskite, il quale, nel periodo invernale, alimenta un tappetino termo-riscaldante. Non disponendo del foglio di Perovskite, il test si è limitato al solo inserimento all'interno delle stratigrafie

<sup>12</sup> Il valore medio di conducibilità termica dei VIP testati non tiene conto del dato riferito al sample n° 2 poiché errato.

del tappetino termo-riscaldante alimentato, in questo caso, dalla corrente elettrica. Inoltre, in entrambe le configurazioni testate sono presenti materiali quali PCM, VIP, lastre di vetro ed altri materiali isolanti (PEX: polietilene reticolato, materiale riflettente multistrato). In Tabella 39 si riportano le stratigrafie riprodotte nei prototipi testati:

Tabella 39: Stratigrafia prototipi

Prototype	n°	Layer	Thickness [mm]
1	1	Glass	5
	2	Air cavity (unventilated)	20
	3	Multilayer reflective insulation	9
	4	VIP glass fiber	15
	5	PEX	3
	6	Heating foil	0.4
	7	PCM_plastic film bags	7
	8	Glass	5
2	1	Glass	5
	2	PCM_aluminium case_b	15
	3	PEX	3
	4	VIP glass fiber	15
	5	PEX	3
	6	Heating foil	0.4
	7	PCM_plastic film bags	7
	8	Glass	5

### 7.2.1 Metodologia

Prima di procedere all'esperimento vero e proprio è stato necessario fare una serie di considerazioni relative alle condizioni esterne a cui sottoporre i prototipi:

- In primo luogo, è stato analizzato l'andamento annuo dell'irradianza solare a Torino (con esposizione sud) al fine di individuare i due giorni consecutivi dell'anno (sia in condizione invernali, sia in condizioni estive) di cui riprodurre le condizioni di temperatura esterna con lo strumento di misura. Per quanto riguarda le **condizioni invernali**, dal momento che il prototipo è dotato di un tappetino termo-riscaldante che in condizioni reali, nella stagione invernale, è alimentato dal pannello fotovoltaico integrato, è stato scelto il giorno caratterizzato dalla massima radiazione solare incidente. Come si può osservare nel Grafico 51 tale giorno è l'1Marzo. Pertanto, a

partire dai valori di irradianza solare, ottenuti dal software WUFI®PRO<sup>13</sup> con una scansione temporale di 15 minuti, e considerando una efficienza del pannello fotovoltaico del 10%, sono stati calcolati i valori di irradianza [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] e di potenza [W] che il tappetino termo-riscaldante deve erogare durante la prova sperimentale [Grafico 52], la cui durata è stata di 48 ore. Per la scelta del giorno del periodo estivo sono stati selezionati due giorni consecutivi caratterizzati da un'irradianza solare pressoché identica e tra le più elevate della stagione: il 30 e 31 agosto.

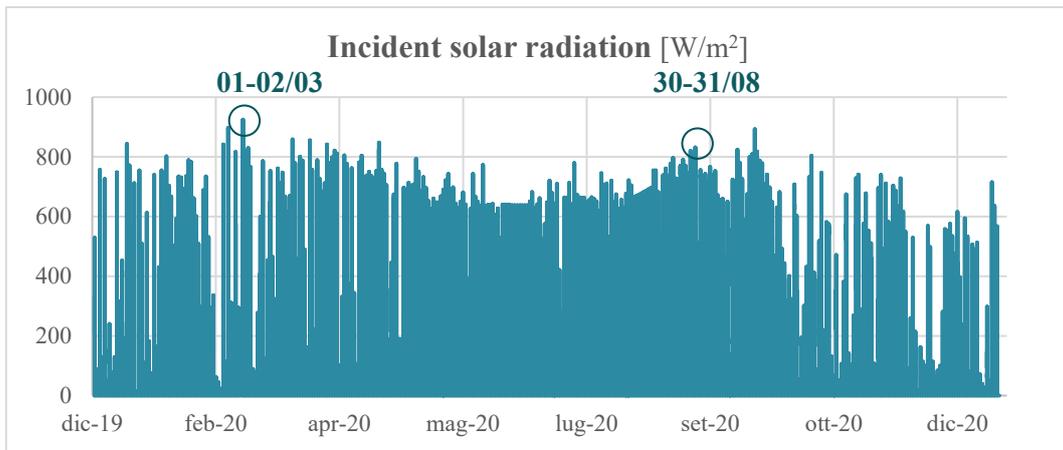


Grafico 51: Andamento annuo dell'irradianza solare, Torino, esposizione sud.

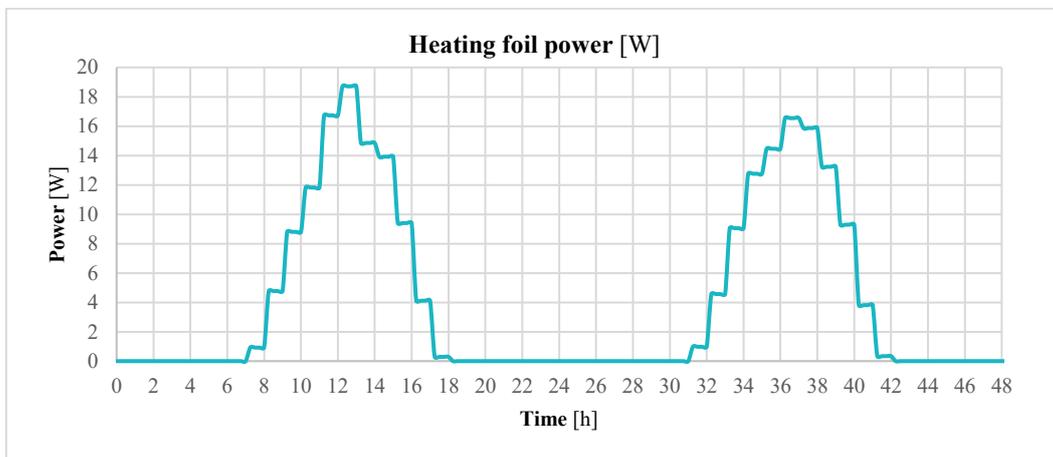


Grafico 52: Potenza tappetino termo-riscaldante

<sup>13</sup> I valori di irradianza solare sono stati ottenuti simulando il comportamento termico di un foglio di alluminio verticale, di spessore 1 mm e con un coefficiente di assorbimento pressoché nullo (0.0001), localizzato a Torino e con esposizione sud.

- In secondo luogo, è stata effettuata una simulazione preliminare della configurazione da testare con il software WUFI®PRO al fine di ottenere l'andamento della temperatura superficiale esterna *Text surface*, la quale, come si può osservare dal Grafico 53 e dal Grafico 54, presenta un andamento pressoché sinusoidale. Per poter riprodurre all'interno dello strumento una condizione al contorno quanto più vicina possibile a quella reale, è stata generata una sinusoide, espressa dalla curva *T sinusoidal*, che avesse con una temperatura media *T mean* pari alla media tra valore massimo e quello minimo di temperatura superficiale esterna *Text surface* e semi-ampiezza pari alla differenza tra la temperatura superficiale esterna massima (o minima) e la temperatura media *T mean*.

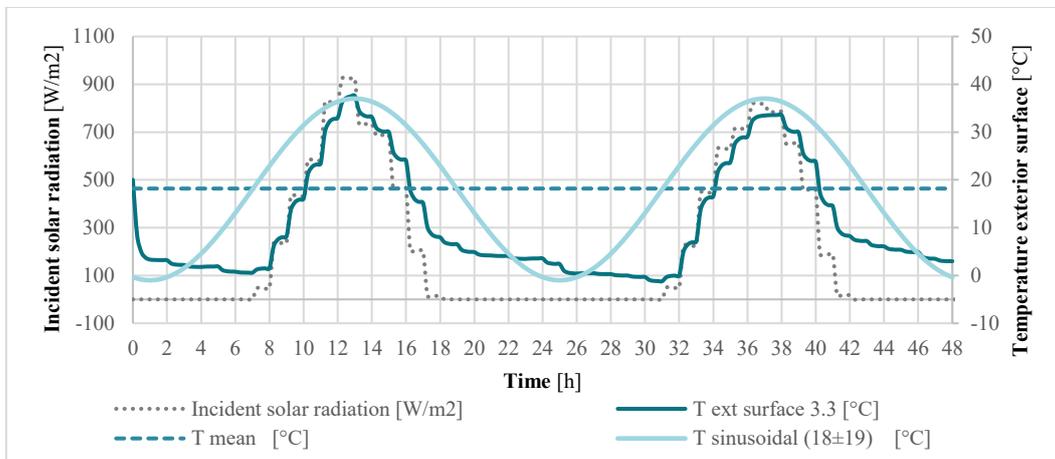


Grafico 53: Andamenti della temperatura superficiale esterna e dell'irradianza solare - Prototipo 1

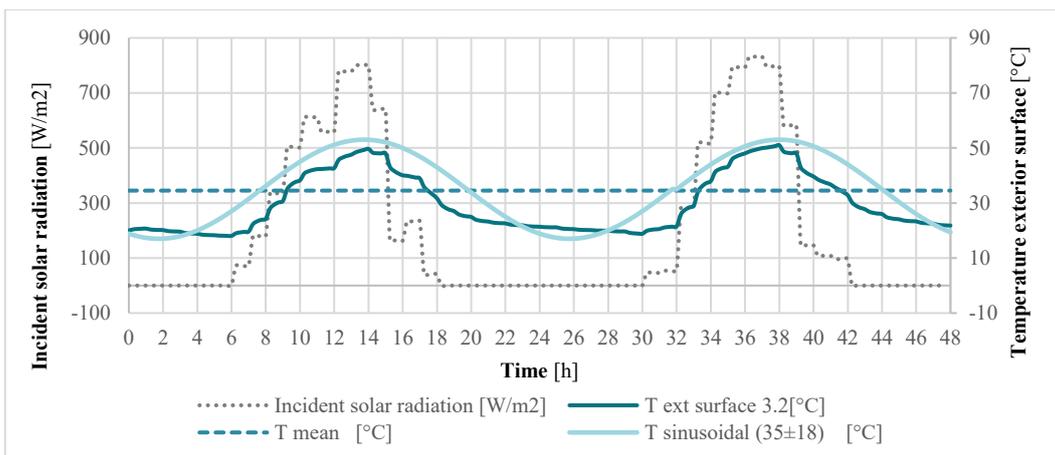


Grafico 54: Andamenti della temperatura superficiale esterna e dell'irradianza solare - Prototipo 2

Pertanto, una volta noti i due giorni dei quali riprodurre le condizioni esterne all'interno dello strumento di misura, l'andamento sinusoidale della temperatura esterna che la piastra deve riprodurre ed i valori di potenza che il tappetino termo-riscaldante deve erogare durante il test, si è proceduto alla predisposizione della prova sperimentale.

### 7.2.1.1 Prototipo 1

Inizialmente è stato composto il campione, sovrapponendo l'uno sopra l'altro i materiali della stratigrafia prevista [Tabella 39] e interponendo una o due termocoppie su ogni interfaccia, come in mostrato in figura Fig. 45.

Inoltre, per ricreare le stesse resistenze liminari esterne ed interne sono stati inseriti dei tappetini di polietilene reticolato, in particolare uno da 2 mm sul lato esterno ( $R \approx 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) e due da 3 mm sul lato interno [ $R_{\text{tot}} \approx 0.125 \text{ m}^2\text{K/W}$ ].

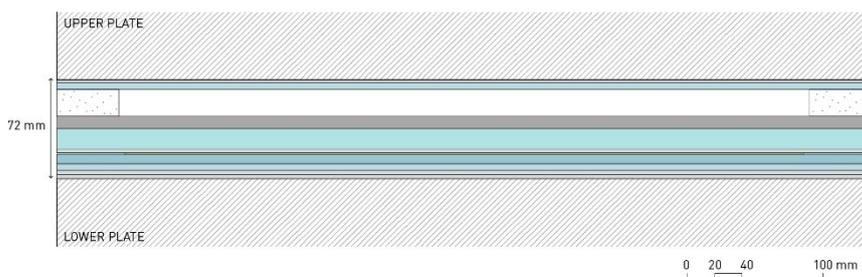


Fig. 44 Stratigrafia prototipo 1

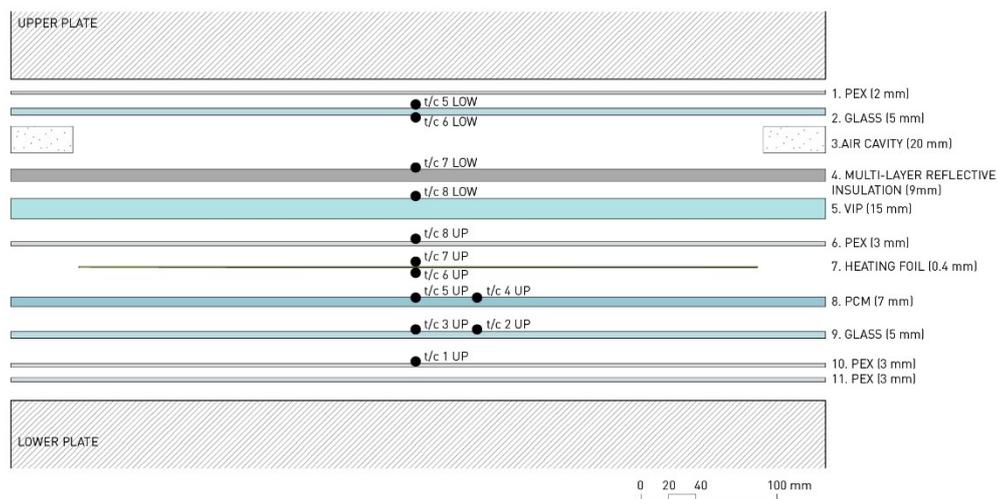


Fig. 45 Stratigrafia esplosa prototipo 1

Dopo aver predisposto l'intero prototipo [Fig. 47, Fig. 48], quest'ultimo è stato inserito all'interno dello strumento di misura e le singole termocoppie sono state collegate al dispositivo in corrispondenza delle rispettive morsette.

Sono poi state definite le impostazioni di avvio del test. In particolare, scegliendo l'opzione 'dynamic test', sono state stabilite:

- la temperatura del piatto inferiore come valore costante e pari alla temperatura dell'ambiente interno;
- la temperatura del piatto superiore caratterizzata da un andamento sinusoidale definito in fase di design dell'esperimento.

**Tabella 40: Temperature piastre test dinamico - Prototipo 1**

	$T_{upper}$ [°C]	$T_{lower}$ [°C]	Test duration [h]
Test 1_winter cond.	18 ± 19	20	2 x 24h
Test 2_summer cond.	36 ± 20	20	2 x 24h

Infine, in seguito e alla definizione dei criteri di equilibrio e del file di calibrazione i test sono stati avviati.

La porta posteriore del termo-flussimetro non è stata chiusa poiché parte del campione (in particolare il pannello di glass fiber VIP) fuoriusciva. Pertanto, si è provveduto ad isolare opportunamente la parte in oggetto con del pluriball e del nastro adesivo. Inoltre, è stato inserito all'interno dello strumento un piccolo tubo connesso ad una bombola di azoto secco [Fig. 46]. Quest'ultimo è necessario al fine di limitare la formazione di condensa all'interno dello strumento quando questo raggiunge basse temperature. L'azoto secco, infatti, è in grado di abbassare il punto di rugiada e dunque ridurre l'umidità relativa.

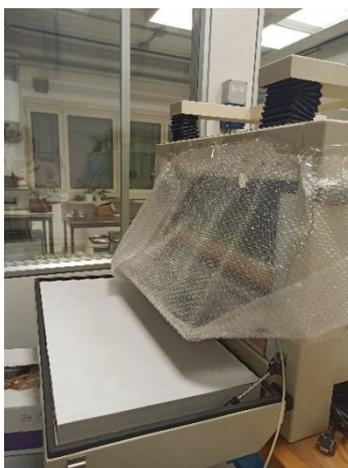
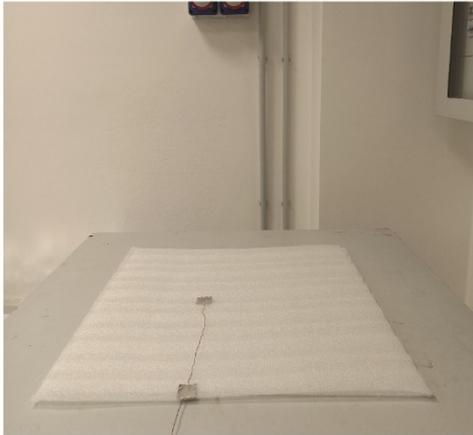
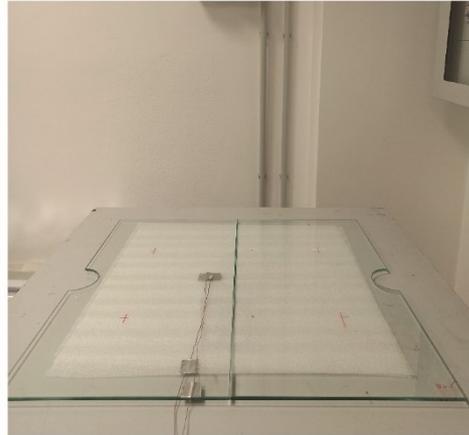


Fig. 46: Isolamento della parte posteriore ed inserimento dell'azoto secco



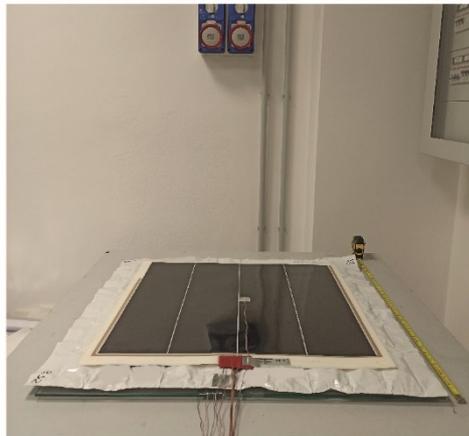
1. 2 tappetini di PEX



2. Lastra di vetro



3. PCM



4. Tappetino termo-riscaldante

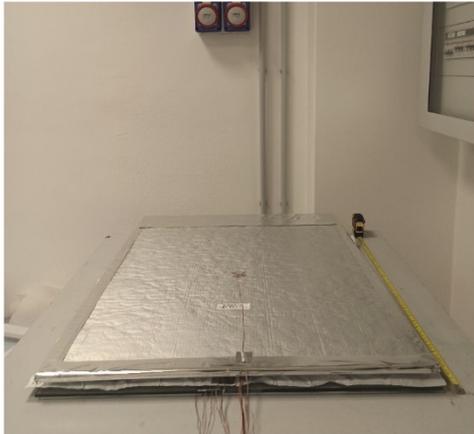


5. Tappetino termo-riscaldante con lato caldo rivolto verso il PCM



6. Tappetino di PEX

Fig. 47 Assemblaggio prototipo 1



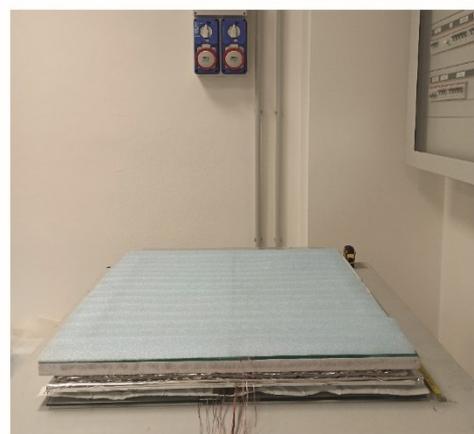
7. VIP



8. Materiale multi-strato riflettente



9. Intercapedine d'aria non ventilata sostenuta da una struttura in polistirene -lastra di vetro



10. Tappetino di PEX



11. Stratigrafia completa



12. Inserimento del campione all'interno del termo-flussimetro

Fig. 48 Assemblaggio prototipo 2

Durante il Test 1, settato secondo le condizioni invernali stabilite, la potenza del tappetino termo-riscaldante è stata regolata al fine di generare delle condizioni il più possibile vicine a quelle reali. Pertanto, seguendo i dati riportati nel Grafico 52 ogni 15 minuti la potenza dell'elemento riscaldante è stata variata grazie ad un regolatore di tensione [Fig. 49] connesso al tappetino andando a leggere il valore della potenza erogata su un particolare lettore attaccato alla presa di corrente. Questa operazione è stata ripetuta in maniera analoga durante il secondo ciclo di 24h del test sperimentale.

Contrariamente, durante il test 2 che ha riprodotto le condizioni estive, il tappetino termo-riscaldante non è stato attivato di conseguenza la procedura appena descritta non è stata effettuata. Quest'ultimo test si interrotto dopo sole 24h completando un solo ciclo, tuttavia la quantità di dati risultanti è stata ritenuta accettabile.



Fig. 49 Regolatore di tensione (a sinistra). Lettore potenza elettrica (a destra).

### 7.2.1.2 Prototipo 2

L'assemblaggio del prototipo 2 non è avvenuto per strati ma attraverso la sostituzione degli ultimi strati del prototipo precedente con quelli previsti e riportati in Tabella 41. Pertanto, come emerge dalla Fig. 52, si è proceduto alla rimozione del materiale multistrato riflettente direttamente all'interno del termo-flussimetro e dall'inserimento degli elementi successivi, interponendo su ciascuna interfaccia una o due termocoppie [Fig. 51]. Dopo aver completato l'intera stratigrafia [Fig. 50], le singole termocoppie sono state collegate allo strumento di misura e sono state definite le impostazioni necessarie all'avvio della prova sperimentale.

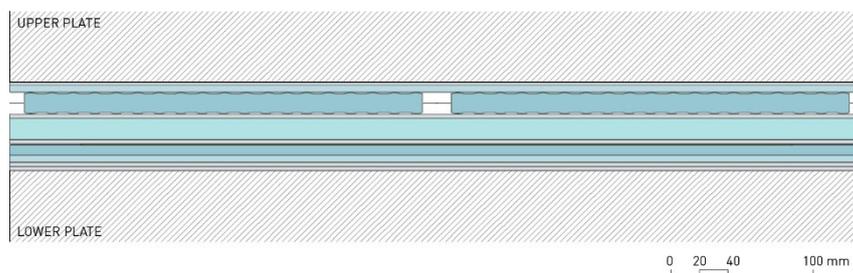


Fig. 50 Stratigrafia prototipo 2



Fig. 51 Stratigrafia esplosa prototipo 2



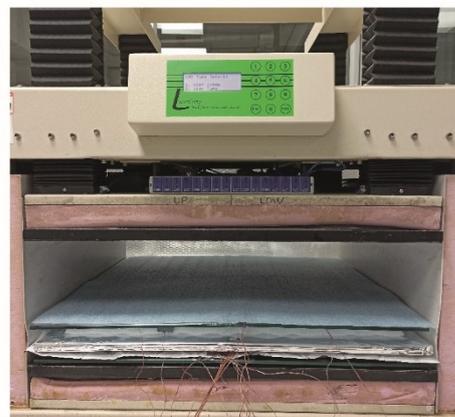
1. Rimozione del materiale multi-strato riflettente ed inserimento di un tappetino di PEX



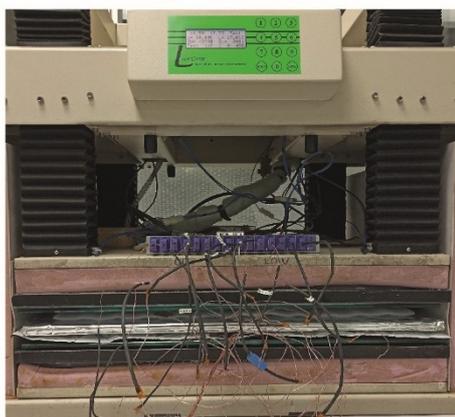
2. Due pannelli di PCM accostati



3. Lastra di vetro



4. Tappetino di PEX



5. Stratigrafia completa

Fig. 52 Assemblaggio prototipo 2

In particolare, si è deciso di effettuare una sola prova in condizioni estive, le cui temperature sono riportate in Tabella 41. Trattandosi temperature proprie della stagione estiva il tappetino termo-riscaldante non è stato attivato.

**Tabella 41: Temperature piastre test dinamico - Prototipo 2**

	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	Test duration [h]
Test 1_summer cond.	35 ± 18	20	2 x 24h

## 7.2.2 Risultati sperimentali

Analogamente ai dati ricavati dai test dinamici descritti nel paragrafo 7.1.1.2.3 *Risposta sinusoidale*, i risultati sperimentali ottenuti consistono in una serie di temperature rilevate in corrispondenza delle termocoppie e restituite con un timestep di 166 secondi. Questi dati sono stati plottati al fine di rappresentare graficamente l'andamento della temperatura su ciascuna interfaccia del pacchetto multistrato e in un secondo momento sono stati confrontati quelli ottenuti dalle simulazioni condotte con WUFI®PRO. Il software, le cui funzionalità sono approfonditamente descritte nei capitoli precedenti, ha permesso di costruire un modello identico a quello reale e di definire le stesse condizioni della prova sperimentale. In questo modo è stato possibile operare un confronto tra i valori misurati e quelli simulati con i quali è stato calcolato l'RMSE<sup>14</sup> (Root Mean Square Error), parametro che ha permesso la validazione del modello simulativo.

### 7.2.2.1 Prototipo 1

Per questo prototipo sono stati effettuati due test, uno in condizioni invernali con il tappetino termo-riscaldante acceso la cui potenza è stata opportunamente regolata al fine di simulare il reale comportamento dell'elemento riscaldante, il quale nella configurazione 3.3 [paragrafo 4.2 *Configurazioni*] è alimentato direttamente dal foglio di Perovskite (fotovoltaico integrato nella facciata); ed uno in condizioni estive.

#### Test 1 – Condizioni invernali

Nel primo caso, osservando i grafici riportati in Appendice, si può osservare come l'andamento sinusoidale che si legge in corrispondenza delle termocoppie collocate verso l'ambiente esterno (piastra superiore dello strumento, T= 18±19°C) rimanga pressoché costante fino al **VIP** [Grafico 55]. Proseguendo nella lettura dei grafici degli

<sup>14</sup> La definizione dell'RMSE è riportata nel paragrafo 7.1.1.2.3 *Risposta sinusoidale*

strati più interni si passa a quello relativo al **tappetino termo-riscaldante** [Grafico 56] il quale è stato attivato nelle prime 10 ore (24-34 h – asse del tempo [h]) in corrispondenza delle quali è possibile notare un progressivo aumento della temperatura. Essa raggiunge il valore massimo tra le ore 31 e 32 e successivamente inizia a diminuire, coerentemente all'erogazione di potenza da parte del tappetino.

Ma ciò che è importante guardare è l'andamento della lastra di vetro interna verso l'ambiente interno. Nel Grafico 57 alle curve relative alle temperature simulate e misurate è stata sovrapposta quella della potenza del tappetino termo-riscaldante. In questo modo è possibile intuire dopo quante ore si esaurisce l'energia fornita dal sistema. Pertanto, il PCM, collocato al di sopra dell'elemento termo-riscaldante [Fig. 45], è stato in grado di accumulare calore nelle ore in cui è stato erogato e di rilasciarlo per ulteriori 6 ore rispetto allo spegnimento dello stesso.

### Test 2 – Condizioni estive

Nel secondo test, durante il quale il tappetino termo-riscaldante non è stato attivato, l'andamento sinusoidale della temperatura [Grafico 58] è leggibile fino all'interfaccia su cui è collocato il **pannello isolante sottovuoto** (VIP) [Grafico 60], il quale, anche in questo caso, provoca un notevole appiattimento della curva: infatti la temperatura si stabilizza a 20°C e questo andamento si ripete in modo costante negli strati successivi fino alla lastra di vetro interna.

Inoltre, ciò che va sottolineato è come il **materiale multistrato riflettente** [Grafico 59], a differenza di quanto ci si poteva immaginare in fase di definizione della stratigrafia del prototipo da testare, non eserciti un'azione isolante rilevante. D'altra parte, però, questo comportamento non emerge nemmeno dalla curva delle temperature simulate, la quale riproduce lo stesso andamento ottenuto sperimentalmente.

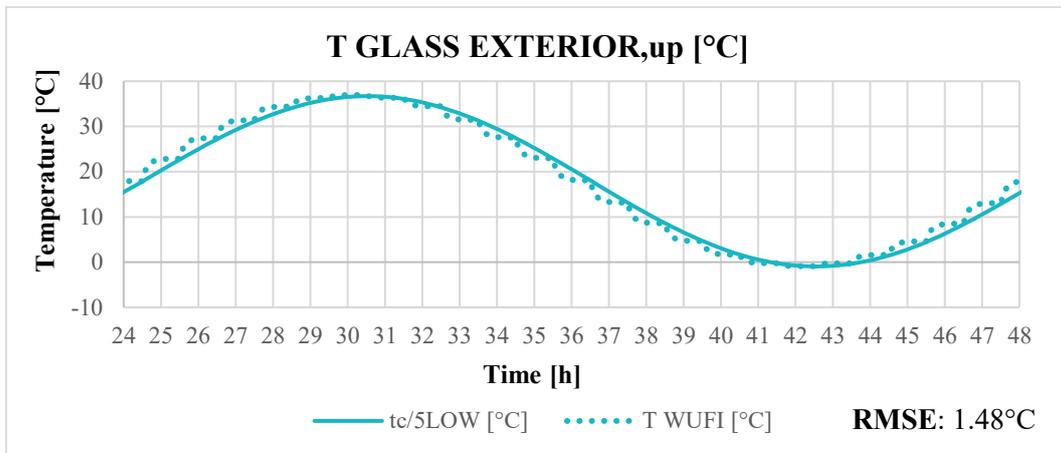


Grafico 55: Temperatura interna della lastra di vetro esterna – P1 - Test 1

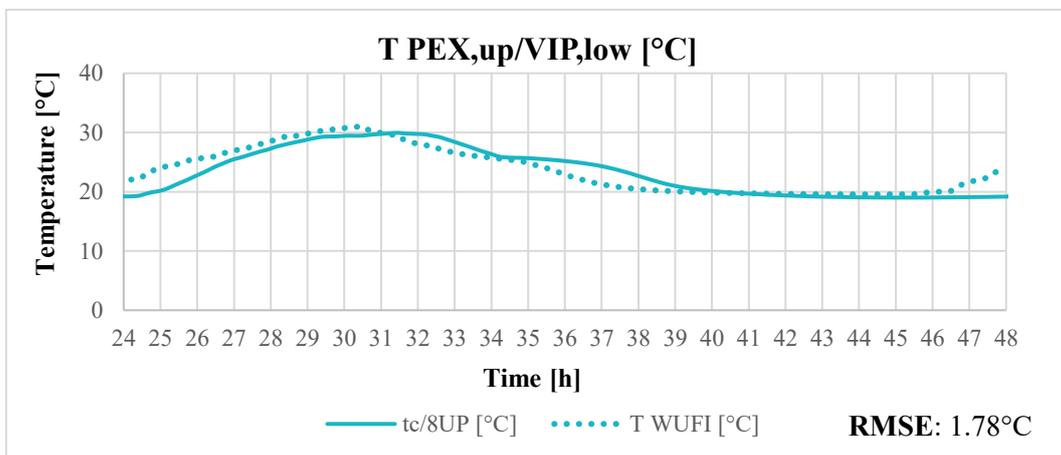


Grafico 56: Temperatura superficiale del VIP verso l'ambiente esterno – P1 – Test 1

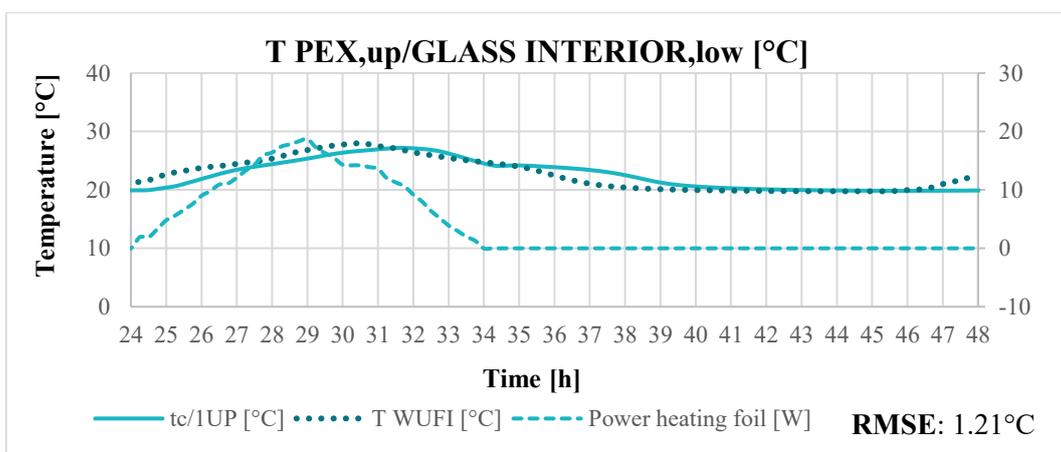


Grafico 57: Temperatura interna della lastra di vetro interna – P1 – Test1

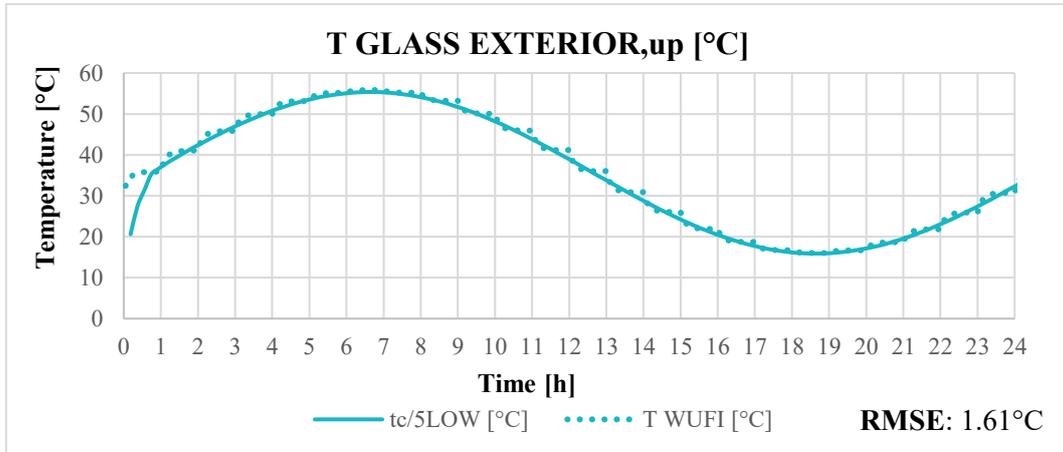


Grafico 58: Temperatura interna della lastra di vetro esterna – P1 - Test 2

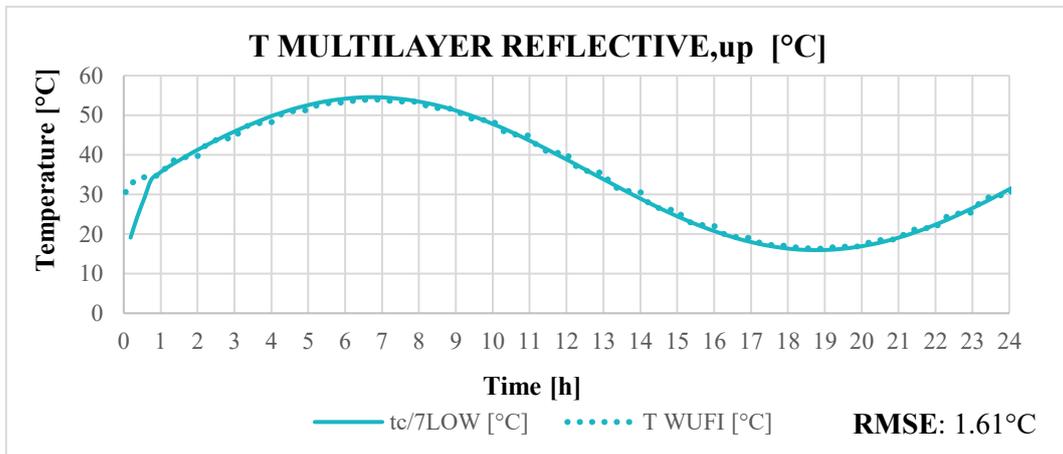


Grafico 59: Temperatura materiale multistrato riflettente - P1 – Test 2

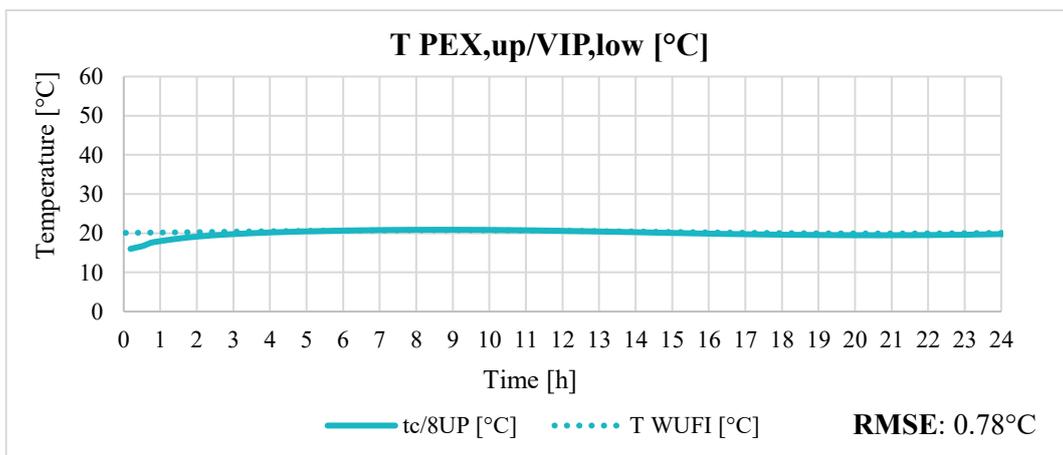


Grafico 60: Temperatura superficiale del VIP verso l'ambiente interno – P1 – Test 2

### 7.2.2.2 Prototipo 2

Il prototipo 2 si differenzia da quello precedente per la presenza di un secondo strato di materiale a cambiamento di fase sul lato esterno quindi caratterizzato da una temperatura di fusione decisamente più elevata ( $T=47^{\circ}\text{C}$  rispetto al PCM collocato verso l'ambiente interno ( $T=26^{\circ}\text{C}$ ). In particolare, è stato effettuato un solo test in condizioni estive per il quale si possono osservare degli andamenti di temperatura simili a quelli del test precedente: pertanto è possibile notare un andamento pressoché sinusoidale sulle interfacce più esterne [Grafico 61] che subisce un notevole appiattimento (di circa  $30^{\circ}\text{C}$ ) in corrispondenza del VIP [Grafico 63].

Tuttavia, ciò che richiama l'attenzione è l'andamento della temperatura del PCM riportato nel Grafico 62, nel quale è possibile osservare una particolare variazione della curva simulata tra le ore 31 e 34. Questa piccola curva ha un significato ben preciso: il PCM ha esaurito la sua capacità di accumulo in quanto la sua entalpia ha raggiunto il valore massimo e dopo essersi fuso completamente passa da un valore molto elevato ( $21\text{ kJ/kg}$ ) al suo valore minimo, equivalente a quello del suo calore specifico ( $2\text{ kJ/kg}$ ). Pertanto, non avendo più capacità termica, il PCM, il quale continua ad essere surriscaldato, provoca un repentino aumento della temperatura, in corrispondenza della quale si trova completamente allo stato liquido. In questo caso, ciò si verifica solamente nella curva ottenuta dalla simulazione. Questo significa che, con buone probabilità, nella realtà il PCM ha una capacità termica tale per cui il materiale raggiunga il proprio picco leggermente più avanti senza esaurirsi del tutto. Non è possibile stabilire ciò con estrema certezza in quanto le prove di entalpia in funzione della temperatura non sono state effettuate per il PCM in questione (PCM\_aluminium case). Dunque, sulla base dei risultati di questo test è possibile affermare che il PCM\_aluminium case\_b sia caratterizzato da una migliore efficienza, negli intervalli di temperatura stabiliti, nella realtà piuttosto che nel modello creato con WUFI®PRO a partire dai dati dichiarati dal produttore.

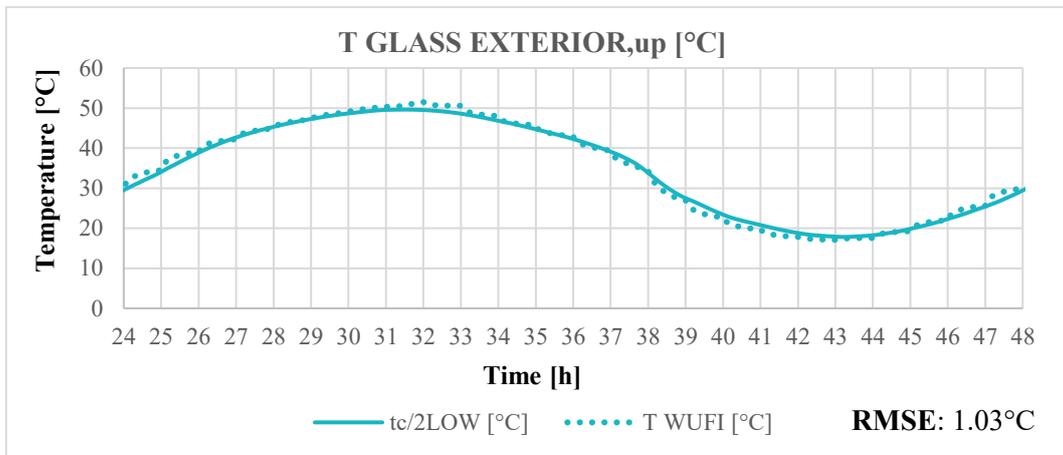


Grafico 61: Temperatura interna della lastra di vetro esterna – P2

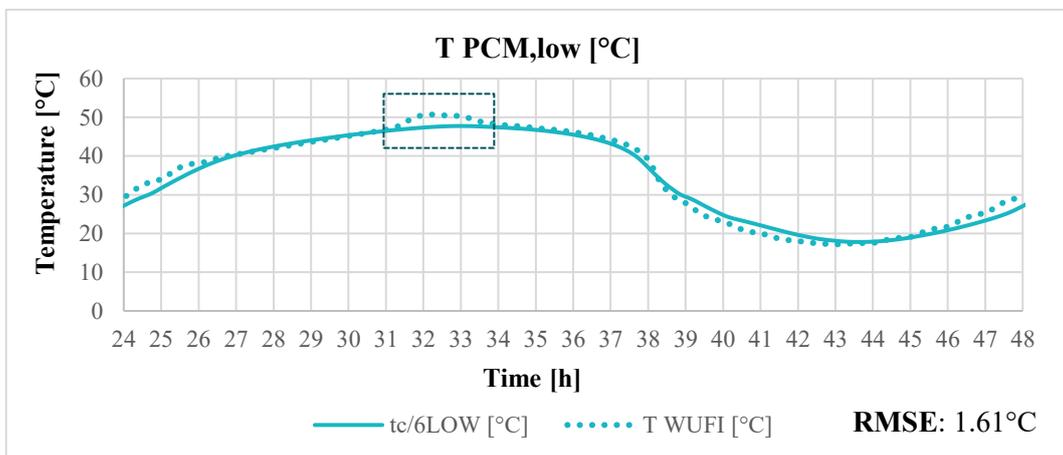


Grafico 62: Temperatura PCM esterno– P2

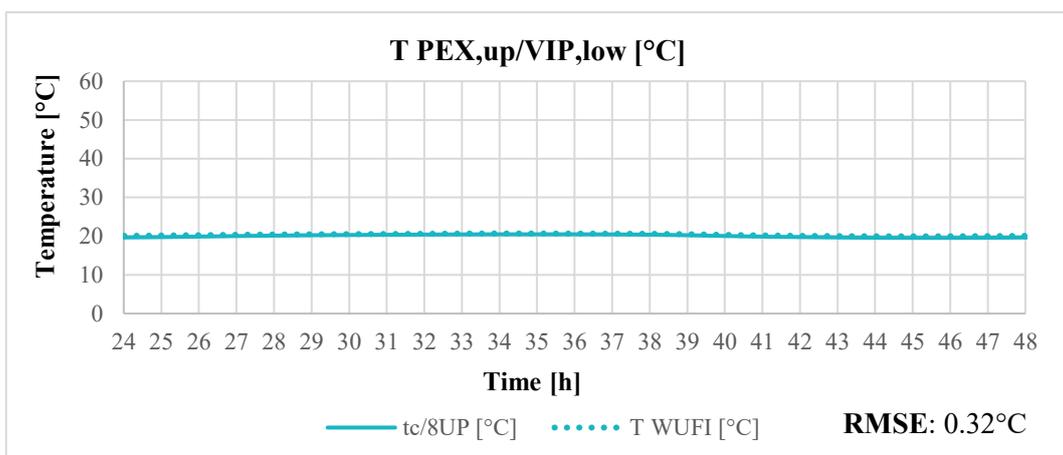


Grafico 63: Temperatura superficiale del VIP verso l'ambiente interno – P2

## 8. Analisi WWR di facciata

### 8.1 Obiettivo

L'obiettivo del calcolo del WWR, trattato in questo capitolo, è quello di poter comprendere come la variazione di questo rapporto incida sulle prestazioni termiche dei componenti, al fine di individuare la configurazione più promettente tra quelle simulate

Un valore di WWR ottimale è quello che riesce a ridurre al minimo i consumi di energia per il riscaldamento, il raffreddamento e l'illuminazione.

Questo tipo di parametro ha una profonda influenza sul bilancio energetico dell'edificio, anche se spesso ne determina le scelte estetiche. [47]

### 8.2 Metodologia

Il *Window to Wall Ratio* (WWR) è il rapporto percentuale tra l'area finestrata totale (m<sup>2</sup>) e la superficie complessiva della parete esterna (m<sup>2</sup>).

$$\text{WWR} = \frac{\text{Area finestrata (m}^2\text{)}}{\text{Area facciata (m}^2\text{)}}$$

Si tratta di un fattore determinante della progettazione dell'edificio; è infatti una grandezza che influenza in modo determinante la trasmissione della radiazione solare all'interno di un edificio.

### 8.3 Caso studio

L'ufficio simulato è situato circa a metà dei piani totali di un ipotetico edificio per uffici; in modo tale di avere tutte le pareti confinanti con altri ambienti chiusi e riscaldati, ad eccezione della facciata esterna.

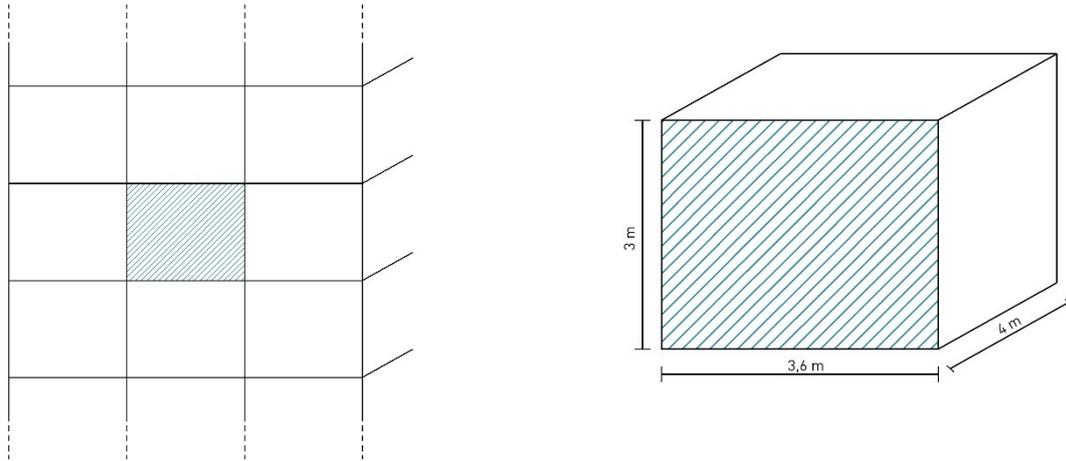


Fig. 53: Schema edificio tipo (a sinistra). Schema volume ufficio tipo (a destra)

L'ufficio presenta una pianta tipo di forma rettangolare, con tre pareti adiabatiche ed una confinante con l'esterno.

Le dimensioni dell'ufficio sono 3.60 m x 4 m x 3 m (h).

In questo modo si ottiene un ufficio con una superficie di 14.4 m<sup>2</sup>.

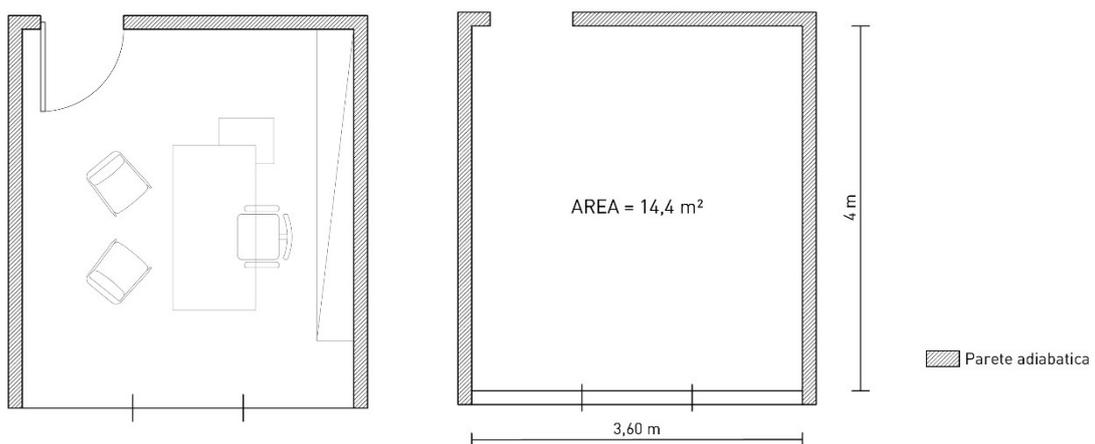


Fig. 54: Pianta dell'ufficio tipo

Per quanto riguarda la facciata, questa è caratterizzata da materiali e sistemi ad alte prestazioni (Configurazione 3.3, 1.2, 2.3, Benchmark) e presenta delle dimensioni di 3.60m x 3m di altezza, in modo da ottenere una superficie di parete pari a 10,8 m<sup>2</sup>. Come si evince dal disegno sottostante, avere una parete da 3.60 m, ci permette di tripartirla in modo semplice, così da avere e studiare più tipologie di facciata.

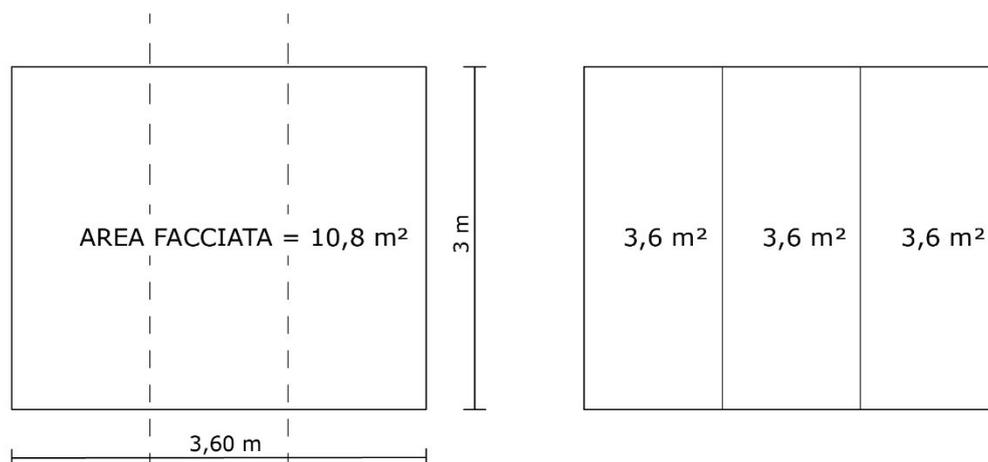


Fig. 55: Dimensioni e scansione della facciata dell'ufficio tipo

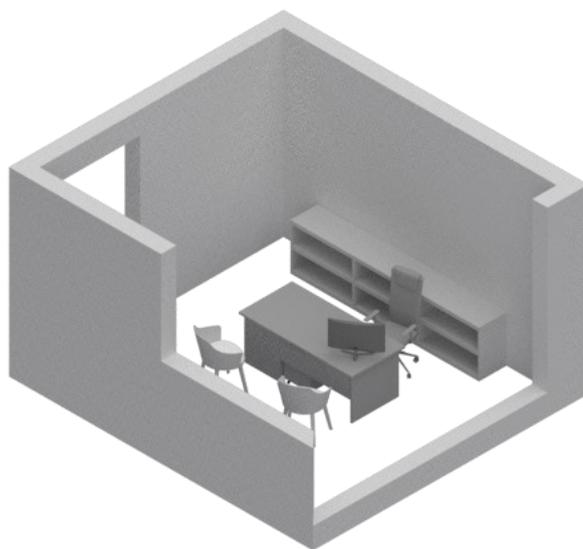


Fig. 56: Assonometria dell'ufficio tipo

Le tipologie ipotizzate, differiscono per la percentuale di opaco e trasparente, presente in facciata.

Sono state selezionate cinque diverse tipologie di facciata in base a 4 diversi valori di WWR (0.16; 0.33; 0.5; 0.66; 1) quindi l'area trasparente varia dal 16.66% al 100% dell'area della facciata.

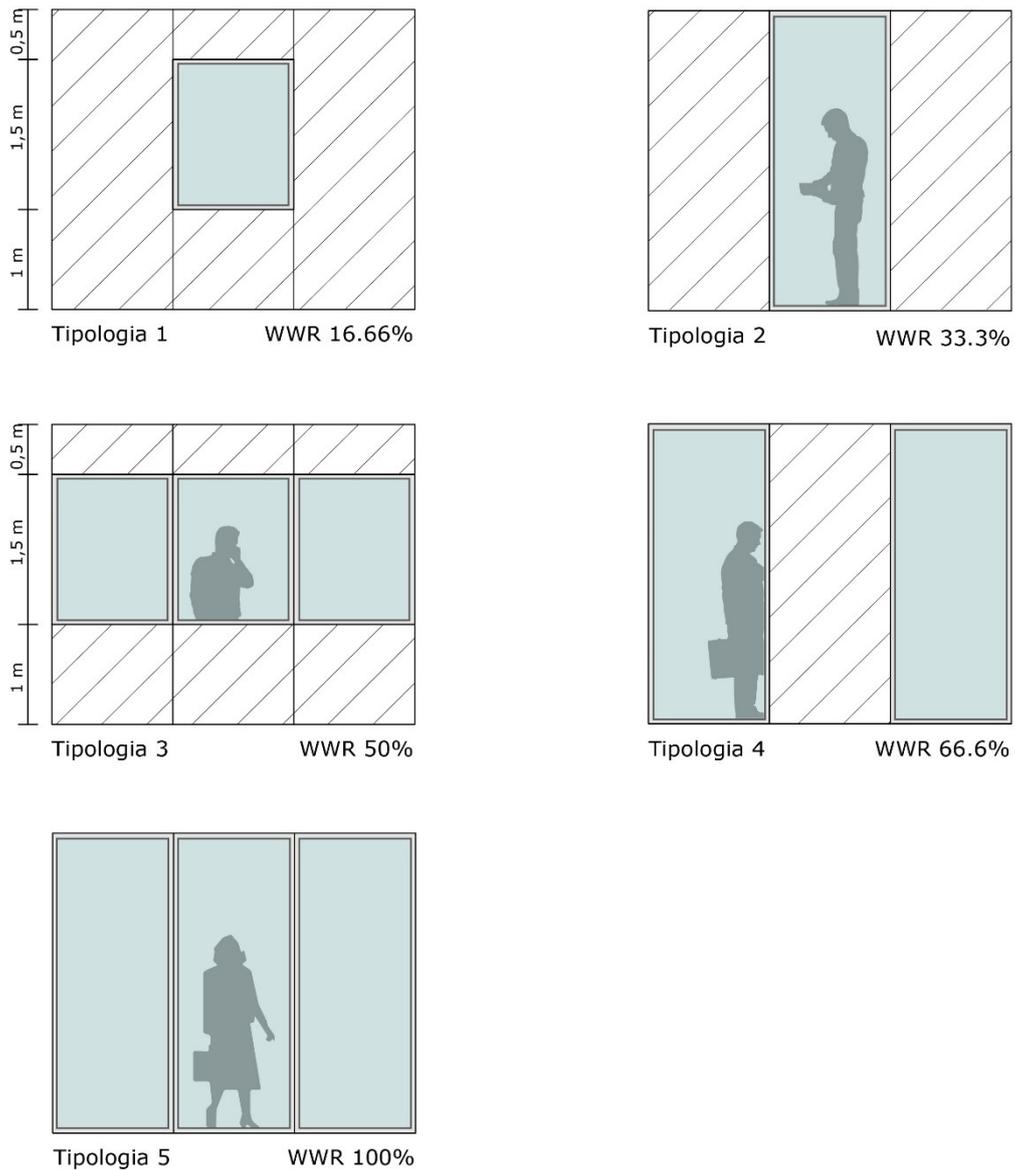


Fig. 57: Tipologie di facciata in relazione al WWR

La vetrata è caratterizzata da un triplo vetro, con una trasmittanza termica ( $U_g$ ) di  $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$  ed uno spessore totale di  $41.4 \text{ mm}$ .

La configurazione del vetro è così composta:

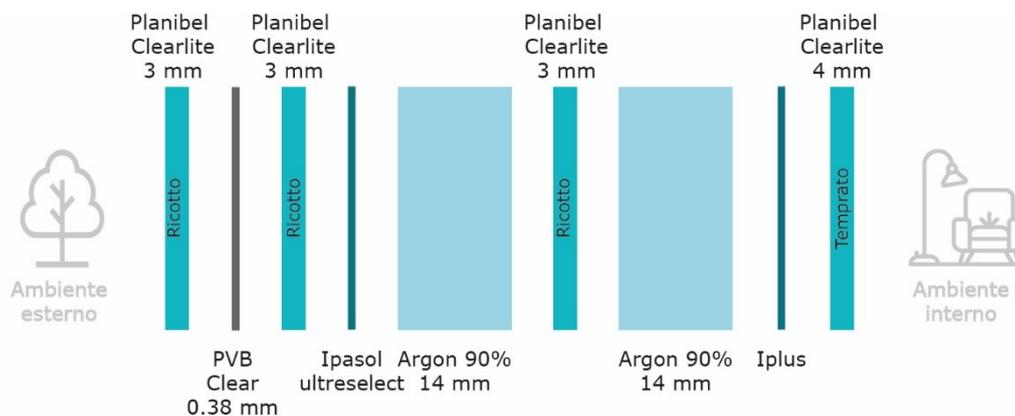


Fig. 58: Stratigrafia triplo vetro

In particolare, il vetro *planibel clarlite* è stato scelto in quanto garantisce elevate prestazioni luminose, infatti con una trasmissione luminosa del 91% garantisce più luce naturale all'interno dell'ambiente ed inoltre, offre delle migliori prestazioni energetiche, in quanto il suo basso assorbimento energetico del 5% riduce i rischi connessi allo shock termico.

Verso l'ambiente esterno è stato scelto un vetro laminato di sicurezza, ovvero un vetro stratificato composto da due lastre di planibel clarlite (3+3 mm) con interposto uno strato di PVB.

Verso l'ambiente interno, invece, il vetro utilizzato è temperato, proprio perché più resistente rispetto ad una lastra di vetro comune[48].

Internamente alla lastra esterna ed interna, è stata interposto uno strato di rivestimento differente. Sul vetro laminato (esterno) è stato inserito uno strato *Ipasol ultraselect*, un particolare rivestimento a controllo solare che con una trasmissione del 62% e un fattore solare del 29% garantisce un'elevata selettività [48].

Mentre, sulla lastra interna è stato inserito uno strato *Iplus*, un rivestimento con un buon isolamento termico ed un'elevata trasmissione solare[48][Appendice capitolo 8].

Per quanto riguarda il telaio, si è scelto di utilizzarne uno in alluminio con una trasmittanza termica ( $U_f$ ) di  $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  che può contenere uno spessore del vetro massimo di  $62 \text{ mm}$  [48].

Questo spessore permette di impiegare il telaio in questione anche per l'inserimento dei moduli opachi di facciata in modo tale da utilizzare la stessa tecnologia costruttiva e di ottenere una continuità di facciata sia internamente che esternamente.

Si tratta pertanto di un sistema che consente di avere un involucro ad alte prestazioni sia per quanto riguarda la parte opaca che quella trasparente.

## 8.4 Analisi simulativa

L'analisi simulativa è stata condotta utilizzando il software WUFI ® Plus.

Questo permette di simulare le condizioni igrotermiche nei componenti edilizi in regime dinamico e quelle relative all'ambiente interno.

Tramite questa tipologia di simulazione è stato possibile calcolare il fabbisogno energetico necessario a garantire delle condizioni di comfort termico all'interno dell'ambiente, in base alle diverse tipologie di WWR e alle diverse configurazioni. Sono stati considerati diversi fattori, tra cui il clima esterno, gli elementi dell'involucro (opaco e trasparente), carichi interni, ventilazione, l'aspetto impiantistico e altre situazioni interne tra cui PVM e PPD.<sup>15</sup>

### 8.4.1 Modellazione

La geometria dell'ambiente è stata modellata direttamente sul software, in base alle dimensioni della Fig. 54

Successivamente sono state definite alcune proprietà dell'involucro tra cui:

- Natura degli elementi (quale parte è opaca e quale trasparente)
- Localizzazione climatica a cui appartiene l'ambiente (nel nostro caso è stato impostato Torino)
- La zona con cui confina l'elemento dell'involucro (terreno, altra zona termica, esterno). Come si vede in Fig. 54: Pianta dell'ufficio tipo alcuni elementi sono stati considerati adiabatici, poiché non vi è alcun scambio termico con l'esterno
- Orientamento del flusso termico (per convenzione, il software ipotizza una situazione invernale in regime stazionario)

### 8.4.2 Dati di input

Il programma inoltre richiede la definizione di una serie di impostazioni per l'avvio dell'analisi, tra cui:

- Data di inizio e fine del calcolo
- Orientamento e località
- Condizioni di temperatura e umidità interne (l'aspetto igrotermico non è stato preso in considerazione)

---

<sup>15</sup> PMV: voto medio previsto (*Predicted Mean Vote*) adottato dalla norma UNI EN ISO 7730, è un indice che valuta lo stato di benessere dell'individuo all'interno di un ambiente e tiene conto di variabili soggettive e ambientali. Il valore varia da una scala di -3 (sensazione di troppo freddo) a +3 (troppo caldo) e lo zero rappresenta lo stato di benessere termico. PPD: esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente in inglese (*Percentage of Person Dissatisfied*).

Il PPD è funzione del PMV, con PMV molto vicini allo zero si avrà sicuramente una percentuale minima di insoddisfatti.

- Stratigrafia, spessore e proprietà dei materiali che compongono gli elementi dell'involucro (opaco e trasparente)
- Carichi interni
- Ventilazione

### Data inizio e fine del calcolo

Il periodo di calcolo impostato è pari ad 1 anno, a partire dal 01/01/2020 fino al 31/12/2020. Il time step è pari a 1 ora.

### Orientamento e località

L'ambiente analizzato presenta la parete disperdente con esposizione a sud.

Mentre per quanto riguarda la località, all'interno del software è presente un database con i file climatici di diverse città mondiali, tra queste c'è quella di Torino che è stata utilizzata per i calcoli dinamici del presente lavoro.

### Condizioni di temperatura

È stato impostato un setpoint di temperatura interna pari ad un minimo di 20°C ed un massimo di 26°C, in particolare durante periodo invernale la temperatura minima cambia nelle ore notturne: dalle ore 7 alle 18 (orario di ufficio) la temperatura minima è di 20°C, mentre nel resto delle ore è pari a 16°C.

### Stratigrafia, spessore e proprietà dei materiali

Un altro aspetto importante nell'inserimento dei dati di input è la definizione delle stratigrafie degli elementi dell'involucro. Il programma suddivide gli elementi del modello in base alla loro inclinazione e alla loro natura (Soffitto, solaio, pareti adiabatiche, parete esposta a sud e finestra) [Fig. 59].

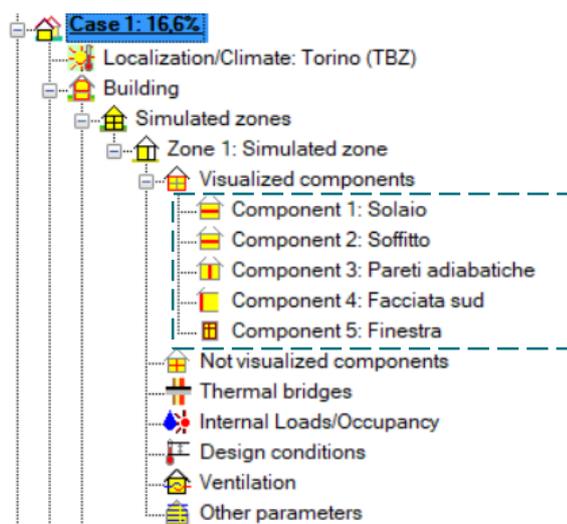


Fig. 59: Schermata software WUFI PLUS

Le stratigrafie degli elementi sono state modellate come nell'analisi dinamica precedente (capitolo 6).

Dato che non si conoscevano alcuni valori dei materiali usati (come la porosità  $\epsilon$  e il fattore di resistenza al vapore  $\mu$ ), sono stati presi, dal database del *Fraunhofer IBP* presente nel software, elementi simili. Di questi, sono state poi modificate le caratteristiche termiche di conducibilità  $\lambda$  [W/mK], densità  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] e calore specifico  $c$  [J/kgK].

Sono state simulate le seguenti configurazioni [paragrafo 4.2 *Configurazioni*], tutte con esposizione sud:

- Benchmark
- 1.2\_light
- 2.3\_passive
- 3.3\_active

### Carichi interni

Il software richiede inoltre, di inserire i carichi interni legati agli occupanti dell'ambiente. Essendo un ufficio singolo, con un solo dipendente all'interno, l'attività umana all'interno dell'ambiente è stata definita in un range temporale tra le ore 7 e le ore 18. In particolare, al fine di avere precisi risultati di PMV e PPD, è stato modificato il vestiario (clo), impostando questo valore pari a 1 nel periodo invernale e pari a 0.7 nel periodo estivo.

Questi valori sono stati presi dalla norma UNI EN ISO 7730:2006 [48].

### Ventilazione

Per quanto riguarda la ventilazione, dapprima sono stati calcolati quanti ricambi orari sono necessari all'ambiente per garantire un adeguato comfort.

Secondo la norma UNI 10339 [53] un ufficio singolo deve avere:

- una portata d'aria pari a  $11 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s
- 0.06 persone al m<sup>2</sup> (indice di affollamento)

Essendo le dimensioni dell'ufficio di 14.4 m<sup>2</sup> ne deriva che:

$$14.4 \text{ m}^2 \times 0.06 \text{ (persone al m}^2\text{)} = \text{circa } 1 \text{ persona}$$

Se all'interno dell'ambiente può stare una persona sola, allora deve esserci un solo ricambio d'aria che corrisponde a  $11 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s ovvero:

$$11 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 3600 \text{ s} = 39.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Essendo il volume dell'ambiente pari a  $38.8 \text{ m}^3$

$$39.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / 38.8 \text{ m}^3 = 1.019 \frac{\text{vol}}{\text{h}} > 1 \text{ vol/h di ricambio d'aria}$$

Pertanto, occorre garantire 1 ricambio d'aria ogni ora per tutti i giorni del periodo estivo (15/05 - 14/10).

In aggiunta, per garantire un adeguato comfort termico agli utenti che occuperanno l'ambiente nelle ore lavoro, è stata incrementata la ventilazione impostando un ricambio di 6 vol/h (valore cautelativo) dalle ore 0 alle 9.

Per il restante periodo dell'anno, la ventilazione è uguale per tutte le ore ed è pari a 0.5 vol/h, con un'infiltrazione di 0.1 vol/h.

### 8.4.3 Risultati

Tra i dati di output delle simulazioni effettuate sono stati presi in considerazione alcuni parametri al fine di elaborare una serie di considerazioni legate al comfort termico degli utenti all'interno dell'ambiente analizzato. Nello specifico:

- **Fabbisogno energetico di riscaldamento e di raffrescamento.** Esso consiste nella quantità di energia necessaria per garantire condizioni di benessere agli occupanti e fornire loro la climatizzazione invernale ed estiva. In particolare, i dati ottenuti dalle simulazioni sono stati plottati in modo da disporre sia dell'andamento annuale, espresso in kWh, sia di quello mensile, espresso in kWh/m<sup>2</sup> quindi riferito alla superficie pavimentata dell'ambiente oggetto di analisi. Nel secondo caso è stato possibile quantificare con precisione il fabbisogno energetico mese per mese e, nel caso di un'eccessiva domanda di riscaldamento/raffrescamento, di ipotizzare specifici sistemi di controllo con tecnologie avanzate;
- **Andamento della temperatura interna.** Questo è stato valutato sia in presenza, sia in assenza di impianti di riscaldamento/raffrescamento. Nello specifico sono state presi in considerazione due giornate tipo: una nel periodo invernale (21 dicembre) ed una nel periodo estivo (21 luglio). A titolo esemplificativo, di seguito, si riportano i grafici relativi alla configurazione 3.3 con PCM\_plastic film bags e WWR 33%. In essi si può notare come nella stagione invernale [Grafico 64, Grafico 65] la differenza tra i due andamenti (con e senza impianti) non sia notevole. Al contrario, durante il periodo estivo [Grafico 66, Grafico 67], il divario tra i due andamenti è più evidente, in quanto in assenza di impianti di raffrescamento la temperatura dell'aria interna raggiunge valori eccessivamente elevati ( $\approx 31^{\circ}\text{C}$ ). Pertanto, in questo caso, in assenza di impianti, la ventilazione meccanica non è sufficiente a garantire l'adeguato comfort termico degli utenti.

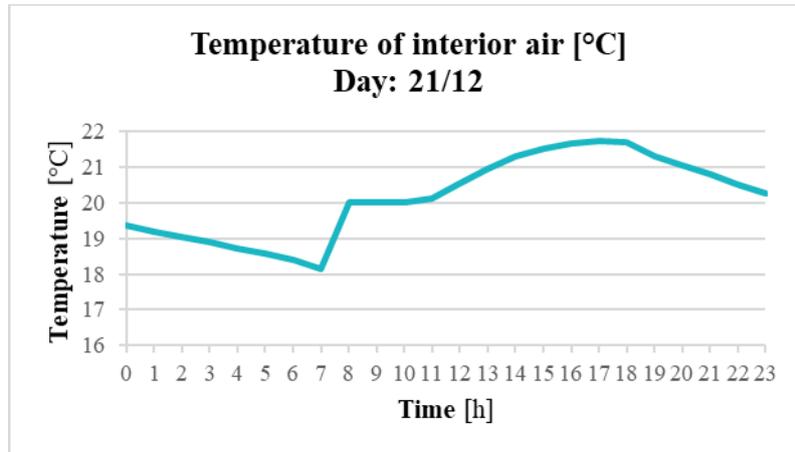


Grafico 64: Temperatura dell'aria interna\_ 21/12\_Conf. 3.3\_PCM\_plastic film bags\_WWR 33%

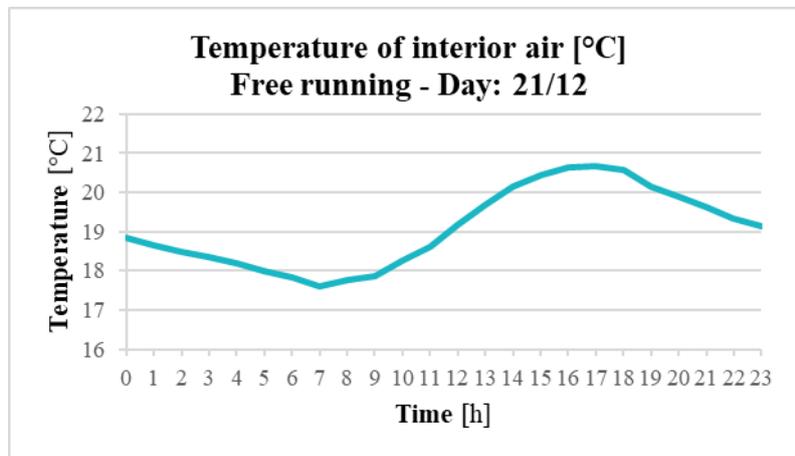


Grafico 65: Temperatura dell'aria interna\_ 21/12\_free running\_Conf. 3.3\_PCM\_plastic film bags\_WWR 33%

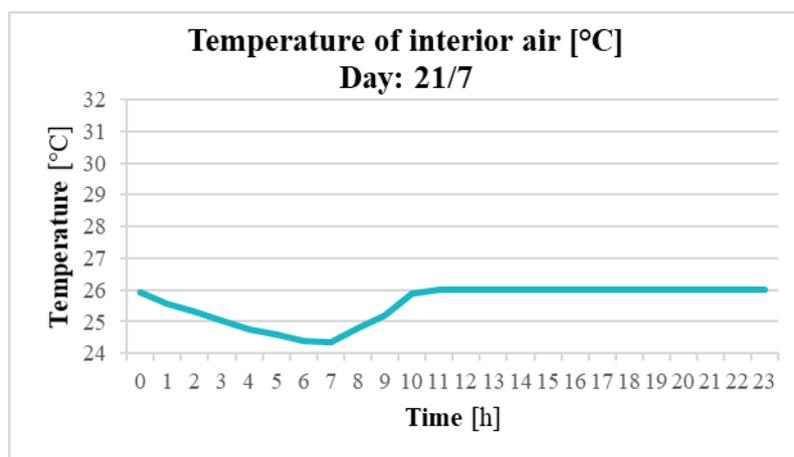


Grafico 66: Temperatura dell'aria interna\_ 21/7\_Conf. 3.3\_PCM\_plastic film bags\_WWR 33%

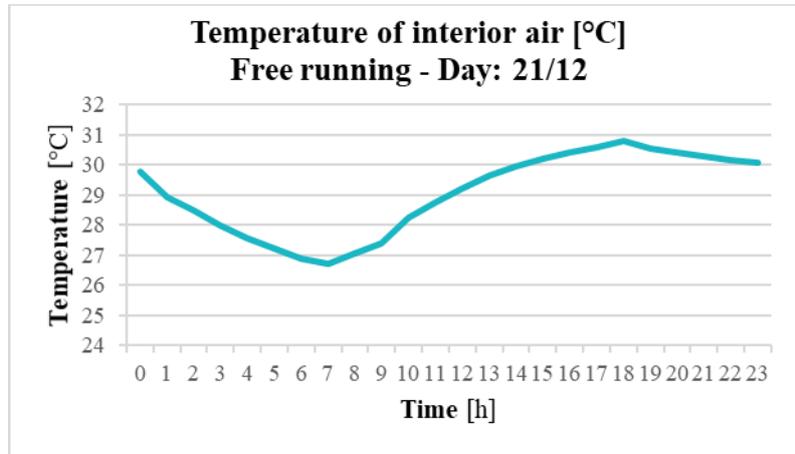


Grafico 67: Temperatura dell'aria interna\_ 21/7\_free running\_Conf. 3.3\_PCM\_plastic film bags\_WWR 33%

## Configurazione Benchmark

Le prime simulazioni sono state effettuate utilizzando la stratigrafia del Benchmark [la cui composizione è riportata nel paragrafo 4.2 *Configurazioni*] in corrispondenza della parete disperdente del modulo in esame. In particolare, come si può osservare dai grafici presenti in *Appendice capitolo 8*, sono state effettuate cinque diverse simulazioni con cinque rispettivi valori di WWR. In ciascun grafico relativo all'analisi mensile del fabbisogno energetico sono stati presi in considerazione i mesi da ottobre a marzo per quanto riguarda la domanda di riscaldamento ed i mesi da aprile a settembre per quanto riguarda quella di raffreddamento. Nonostante si tratti di una configurazione molto semplice costituita da materiali convenzionali (doppia lastra di vetro laminato, cavità d'aria, PIR, lastra di cartongesso) e privi di particolari proprietà termiche, essa non genera un fabbisogno energetico notevole: i valori variano da un minimo di 8.042 kWh/m<sup>2</sup> e 4.97 kWh/m<sup>2</sup> con WWR del 16% ad un massimo di 14.54 kWh/m<sup>2</sup> e di 16.25 kWh/m<sup>2</sup> con WWR del 66%.

Questo aumento progressivo delle domande di riscaldamento e di raffreddamento man mano che la percentuale di superficie trasparente aumenta a discapito di quella opaca è ancora più evidente nel Grafico 68, nel quale si riporta il fabbisogno stagionale per a ciascun valore di WWR ottenuto sommando in valore assoluto le due componenti di *heating* e *cooling*.

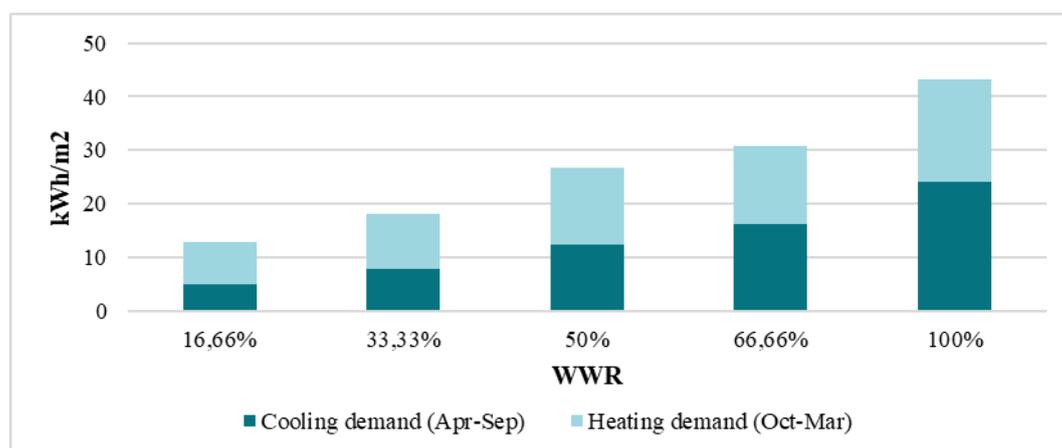


Grafico 68: Fabbisogno stagionale\_Benchmark

## Configurazione 1.2

La configurazione 1.2 rientra all'interno della categoria *Light* ed è caratterizzata dalla presenza di materiali convenzionali e innovativi (policarbonato alveolare, VIP, materiale isolante multistrato riflettente).

Analogamente alle simulazioni effettuate utilizzando il Benchmark, i mesi presi in considerazione nell'analisi mensile del fabbisogno energetico sono gli stessi: per la domanda di riscaldamento si è tenuto conto dell'arco temporale da ottobre a marzo; mentre per la domanda di raffrescamento è stato considerato il periodo che intercorre tra aprile e settembre.

Dopo un'attenta lettura dei grafici presenti in *Appendice capitolo 8*, si può sostenere che anche in questo caso i valori ottenuti dalle simulazioni riportano dei valori accettabili in i termini di kWh/m<sup>2</sup>. In particolare, si passa da 5.84 kWh/m<sup>2</sup> e 5.52 kWh/m<sup>2</sup> con un WWR del 16.66% a 13.35 kWh/m<sup>2</sup> e 16.96 kWh/m<sup>2</sup> con un WWR del 66.66%. Pertanto, si tratta di risultati molto prossimi a quelli ottenuti dalla configurazione precedente (Benchmark) nonostante vengano utilizzati anche materiali più innovativi come il VIP ed il materiale isolante multistrato riflettente.

Inoltre, come si può osservare dal Grafico 69, le domande di riscaldamento e di raffrescamento aumentano coerentemente al crescere del *Window to Wall Ratio*.

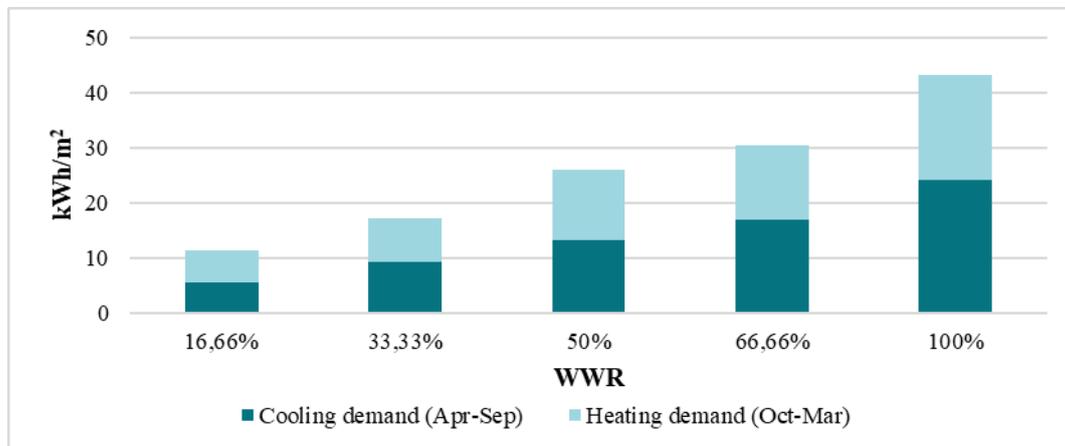


Grafico 69: Fabbisogno stagionale\_Configurazione 1.2

## Configurazioni con PCM

Prima di procedere alle simulazioni delle configurazioni con il PCM integrato è stato operato un confronto tra i vari materiali a cambiamento di fase testati in laboratorio. In particolare, ciò è stato fatto avviando le simulazioni della configurazione 3.3 e sostituendo di volta in volta i vari PCM, al fine di stabilire quale possa essere il migliore in termini di prestazioni energetiche e di riduzione della domanda di fabbisogno di riscaldamento e di raffreddamento.

Per avere un termine di confronto comune, si è scelto di eseguire l'analisi esclusivamente con un WWR del 16.66%, dal momento che si tratta della configurazione caratterizzata prevalentemente dalla componente opaca rispetto alla superficie trasparente, pertanto risulta più semplice capire l'effettiva influenza dei diversi PCM sull'intera stratigrafia e sull'ambiente interno.

I vari PCM testati sono:

- PCM\_aluminium case\_a (10 mm)
- PCM\_aluminium case\_c (15 mm)
- PCM\_plastic case\_b (12.83 mm)
- PCM\_plastic container (12.8 mm)
- PCM\_plastic film bags (6.8 mm)
- PCM\_plastic film bags (6.8 mm+6.8 mm)<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> Il *plastic film bags* è stato simulato in due diverse versioni: con uno strato singolo (6.8 mm) e con uno strato doppio (13.6 mm) poiché rispetto agli altri PCM è caratterizzato da uno spessore inferiore.

Per ciascun PCM è stato calcolato il fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento stagionale in kWh/m<sup>2</sup>.

Per effettuare questo calcolo, sono stati considerati esclusivamente i mesi da maggio a settembre per la domanda di raffrescamento ed i mesi di gennaio e dicembre per quella di riscaldamento.

Questo, poiché, durante l'anno viene prodotta più energia di quella necessaria al riscaldamento dell'ambiente, quindi sarebbe opportuno inserire dei sistemi a controllo avanzato che impediscano all'ambiente di surriscaldarsi e far attivare il sistema di raffrescamento; viceversa in condizioni estive, questi sistemi potrebbero aiutare a non avere una temperatura eccessivamente bassa e quindi attivare gli impianti di riscaldamento.

In questo modo, superata la temperatura di comfort, tutta l'energia in eccesso prodotta dal fotovoltaico e trasmessa al tappetino termo-riscaldante verrà accumulata, ad esempio, in batterie o in rete.

Mettendo a confronto su un unico grafico i risultati ottenuti:

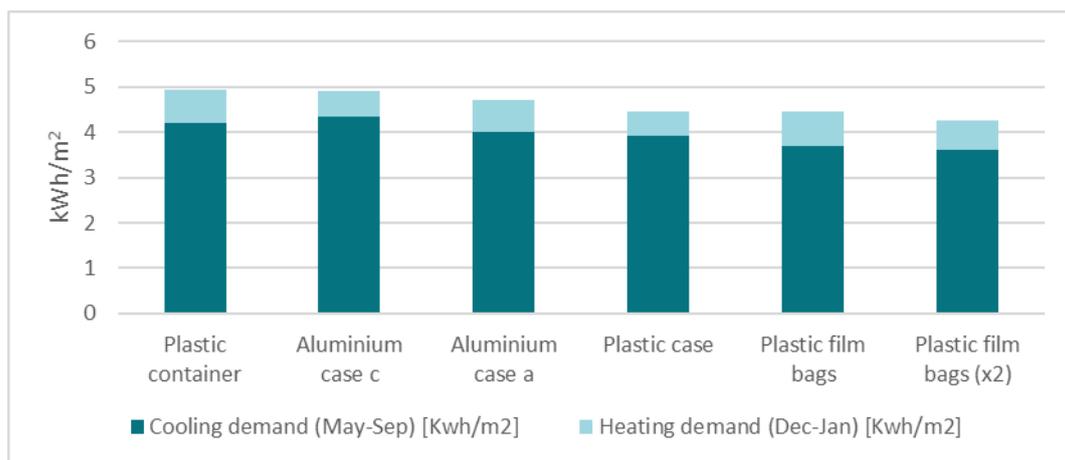


Grafico 70: Fabbisogno stagionale\_Config. 3.3\_WWR 16.66%

I risultati ottenuti sono stati messi a confronto nel Grafico 70, nel quale si può notare come in base al tipo di PCM utilizzato, il fabbisogno stagionale vari, sia per quanto riguarda il carico di raffrescamento sia per quello di riscaldamento.

In particolare, da questa analisi emerge come il PCM ottimale sia il PCM *plastic film bags* doppio, ovvero caratterizzato dall'accoppiamenti di due layer di materiale che insieme raggiungono uno spessore complessivo di 13.6 mm, in quanto richiede i valori minori di fabbisogno: in particolare una domanda di *heating* pari a 0,645 kWh/m<sup>2</sup> ed una di *cooling* di 3.601 kWh/m<sup>2</sup> per un totale di 4.246 kWh/m<sup>2</sup> l'anno.

Successivamente ci si è chiesti quanto convenisse (in termini di fabbisogno) utilizzare il PCM e quali fossero i benefici apportati da quest'ultimo. Pertanto, è stata condotta una simulazione caratterizzata della stessa configurazione (3.3), ma rimuovendo il PCM.

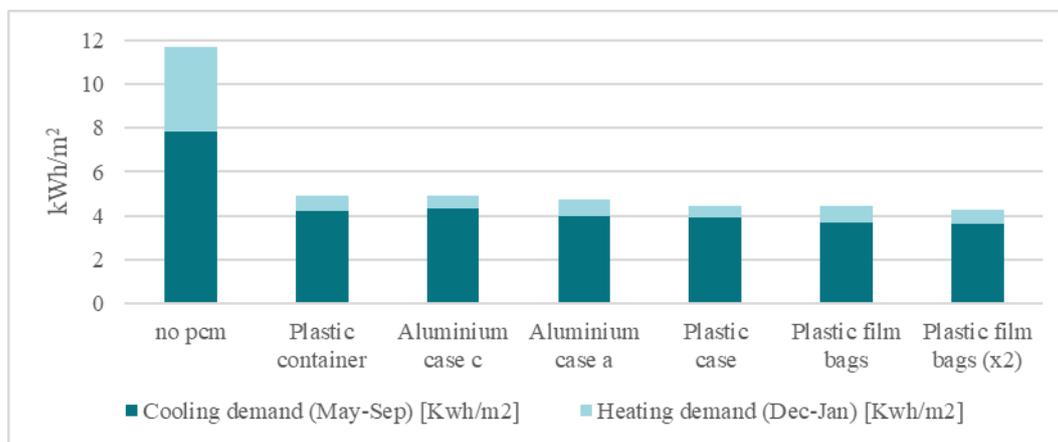


Grafico 71: Confronto fabbisogno stagionale con e senza PCM\_Config. 3.3\_WWR 16.66%

Ciò che è emerso è che, utilizzando il PCM all'interno della stratigrafia, il fabbisogno annuale di riscaldamento e raffrescamento risulta più che dimezzato, poiché si arriverebbe ad una domanda di 11.7 kWh/m<sup>2</sup> l'anno, rispetto ai 4.246 kWh/m<sup>2</sup> annui del *Plastic film bags* doppio.

In particolare, utilizzando quest'ultimo PCM, il fabbisogno di riscaldamento si è ridotto dell'83.3%, mentre il fabbisogno di raffrescamento è diminuito del 54.2%.

Infine, dopo aver selezionato il PCM ottimale, sono state eseguite le simulazioni delle configurazioni 3.2 (*passive*) e 3.3 (*active*) con tutte le diverse percentuali di WWR.

### Configurazione 2.3

La configurazione 2.3 rientra tra le stratigrafie ipotizzate di involucro passivo, pertanto è costituita da materiali convenzionali (doppia lastra di vetro laminato, polietilene reticolato, foglio di alluminio, lastra di cartongesso) ed innovativi (PCM, VIP) ma è priva di elementi in grado di produrre energia a partire dalla radiazione solare incidente (come il pannello fotovoltaico ed il tappetino termo-riscaldante).

Come nel caso delle configurazioni precedenti, per il calcolo del fabbisogno stagionale sono stati presi in considerazione tutti i mesi dell'anno, in particolare i mesi da ottobre a marzo per la domanda di *heating* e da aprile a settembre per la domanda di *cooling*. Osservando i grafici presenti in *Appendice capitolo 8*, si può notare come i valori ottenuti non si discostino molto da quelli della configurazione precedente, infatti si passa da valori pari a  $7.13 \text{ kWh/m}^2$  e  $3.34 \text{ kWh/m}^2$  con un WWR del 16.66% a valori di  $13.95 \text{ kWh/m}^2$  e  $15.51 \text{ kWh/m}^2$  con un WWR del 66.66%.

Infine, nel Grafico 72 è possibile leggere l'andamento del fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento al variare del valore di WWR. In esso si può notare come complessivamente la domanda di *heating* sia superiore a quella di *cooling* per i primi tre valori di WWR (16.66%, 33.33%, 50%), viceversa la necessità di raffrescare l'ambiente sia più evidente nelle configurazioni con una superficie finestrata prevalente (WWR del 66.66% e del 100%). Questo aspetto può essere giustificato dall'azione del PCM che nel periodo estivo, nelle configurazioni con una superficie trasparente fino al 50%, è in grado di limitare notevolmente i carichi di picco; mentre nel periodo invernale la sua azione non è sufficiente al miglioramento il comfort termico degli utenti per cui vi è la necessità di riscaldare l'ambiente interno.

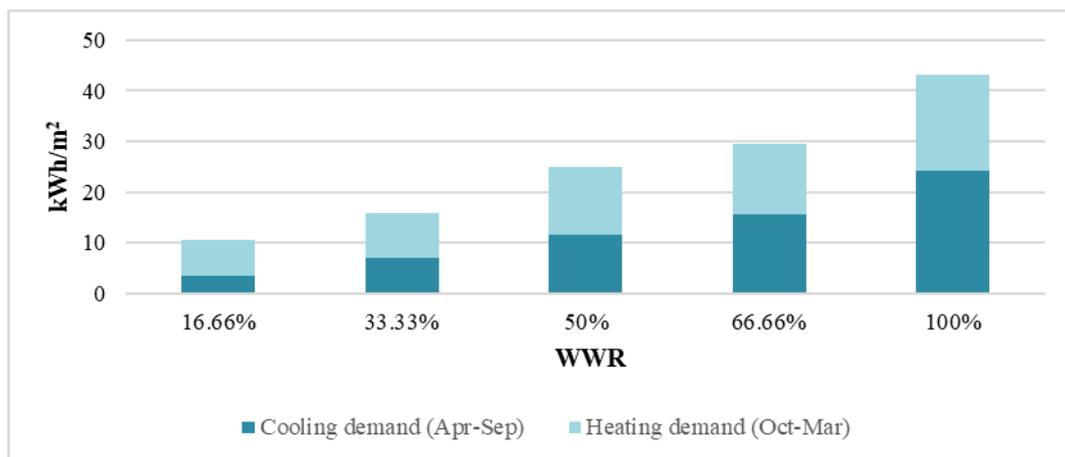


Grafico 72: Fabbisogno stagionale\_configurazione 2.3

### Configurazione 3.3

L'ultima configurazione simulata è la 3.3, la quale fa parte della categoria *Active* in quanto è caratterizzata dalla presenza di un pannello fotovoltaico integrato nel modulo di facciata, il quale alimenta un elemento radiante all'interno della stratigrafia.

Come ribadito nel sottoparagrafo *Confronto PCM*, in questo caso, sono stati esclusi alcuni mesi nel calcolo del fabbisogno energetico, riducendo l'intervallo temporale da dicembre a gennaio per il fabbisogno di riscaldamento e da maggio a settembre per quello di raffrescamento.

Dai grafici relativi alla configurazione in esame [Appendice capitolo 8] si possono leggere valori inferiori rispetto alle configurazioni precedenti, in particolare: valori minimi di 0.65 kWh/m<sup>2</sup> e 3.60 kWh/m<sup>2</sup> con un WWR del 16.66% kWh/ m<sup>2</sup> a valori di 6.41 e 14.99 kWh/ m<sup>2</sup> con un WWR del 66.66%. Da essi si evince come la domanda di fabbisogno di riscaldamento sia decisamente bassa rispetto quella di raffrescamento. Questo è chiaramente giustificato dalla presenza del tappetino termo-riscaldante che contribuisce notevolmente alla climatizzazione invernale dell'ambiente interno.

Questo aspetto emerge anche dal Grafico 73 nel quale si può osservare la domanda energetica complessiva, comprensiva della richiesta di heating e di cooling, per ciascun valore di WWR. In particolare, nelle prime configurazioni caratterizzate da un indice di WWR pari al 16.66% ed al 33.33% il fabbisogno di riscaldamento è molto basso ed aumenta progressivamente al crescere della superficie finestrata della parete esterna. Invece, il fabbisogno di raffrescamento è più alto in confronto al rispettivo fabbisogno di riscaldamento, ma è comunque caratterizzato da valori molto ridotti, i più bassi tra quelli ottenuti dalle simulazioni di tutte le configurazioni ipotizzate.

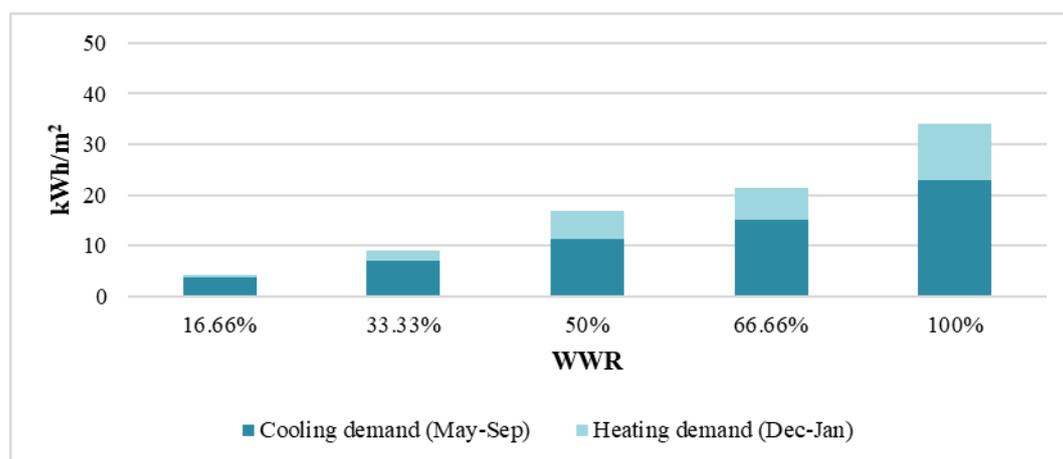


Grafico 73: Fabbisogno stagionale\_configurazione 3.3

## Confronto configurazioni

A seguito delle simulazioni effettuate, è stato operato un confronto generale tra le varie configurazioni, al fine di capire come variano le prestazioni energetiche in relazione al diverso rapporto di WWR.

Nei grafici sottostanti sono illustrati i risultati complessivi del risparmio di energia delle varie configurazioni simulate rispetto al benchmark.

Sono stati messe a confronto, quindi, le quattro configurazioni: il benchmark, la configurazione 1.2 (light), la configurazione 2.3 (passive, solo PCM) e la configurazione 3.3 (active, PCM + *heating foil* + fotovoltaico)

In particolare, il Grafico 74 riporta il risparmio energetico relativo al fabbisogno di riscaldamento rispetto alla configurazione benchmark. In esso si può osservare come la configurazione 3.3\_active sia quella che garantisce un minor consumo in quanto presenta delle percentuali di risparmio decisamente più elevate, per ciascun rapporto di WWR, rispetto alle configurazioni 1.2\_light e 2.3\_passive.

Il Grafico 75, invece, mostra la situazione di *energy saving* rispetto al fabbisogno di raffrescamento. In questo caso le configurazioni 3.3\_active e 2.3\_passive presentano andamenti di *energy saving* per lo più simili, tuttavia ciò emerge in modo evidente è il comportamento della configurazione 1.2\_light. Essa presenta valori negativi poiché non è caratterizzata da un risparmio energetico rispetto al Benchmark, ma al contrario da un consumo maggiore. Non si tratta di un risultato anomalo considerando che maggiore è l'isolamento della parete, maggiore sarà il fabbisogno di *cooling*.

Infine, il Grafico 76 illustra l'andamento totale del risparmio energetico, comprensivo del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento. Da esso emerge che utilizzando delle configurazioni costituite da materiali avanzati si ha un minor consumo in termini di fabbisogno rispetto alla configurazione del Benchmark. In particolare, la configurazione ottimale risulta la 3.3\_active, seguita poi dalla 2.3\_passive e dalla 1.2\_light.

Inoltre, si può osservare come in tutti e tre i grafici, all'aumentare del valore di WWR, non solo aumentino i consumi ma questi tendano ad asintotizzarsi. Questo significa che minore è la superficie opaca, minore sarà la differenza in termini di consumo tra le varie configurazioni. Tuttavia, valori troppo bassi di WWR, dall'altro lato, comportano un maggiore consumo per l'illuminazione artificiale dell'ambiente interno. Di conseguenza, se si volesse fare un'analisi ottimizzata, sarebbe opportuno calcolare il consumo per illuminazione, il quale andrebbe aggiunto ai fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento.

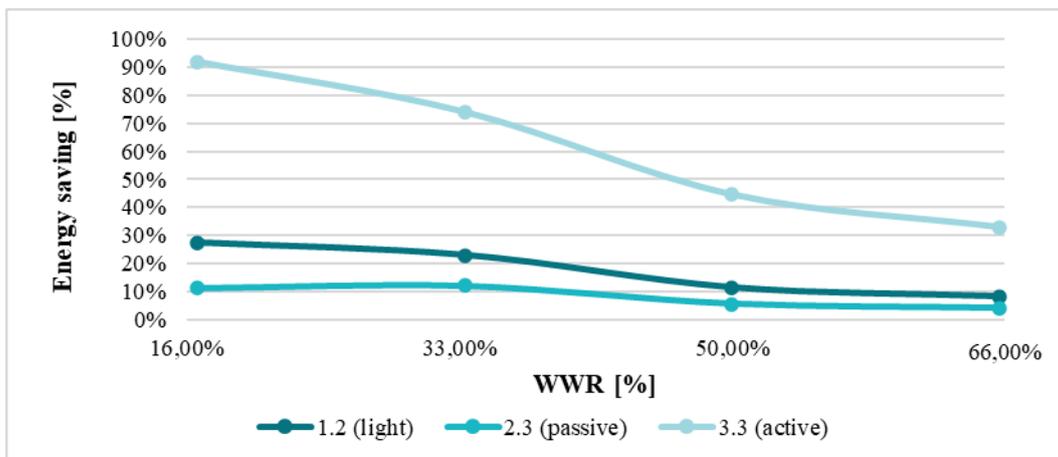


Grafico 74: Risparmio di energia relativo al fabbisogno di riscaldamento (heating energy saving)

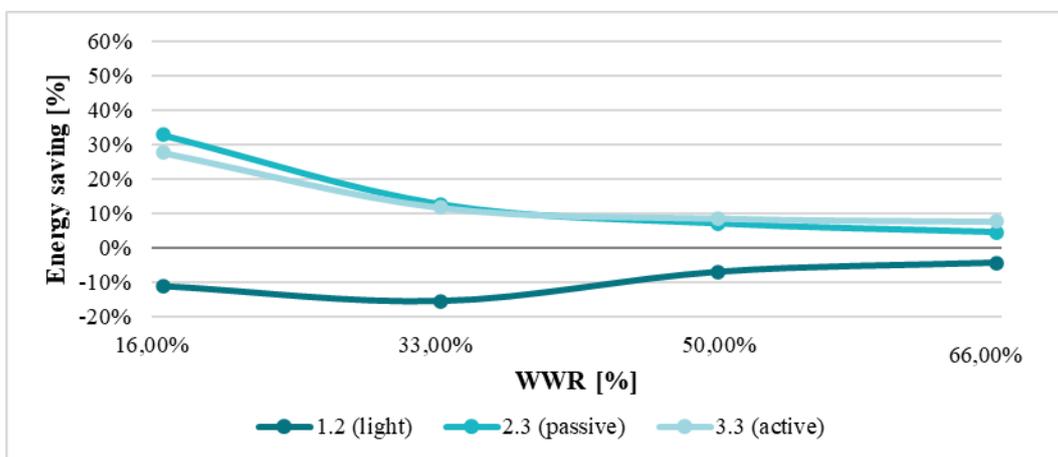


Grafico 75: Risparmio di energia relativo al fabbisogno di raffrescamento (cooling energy saving)

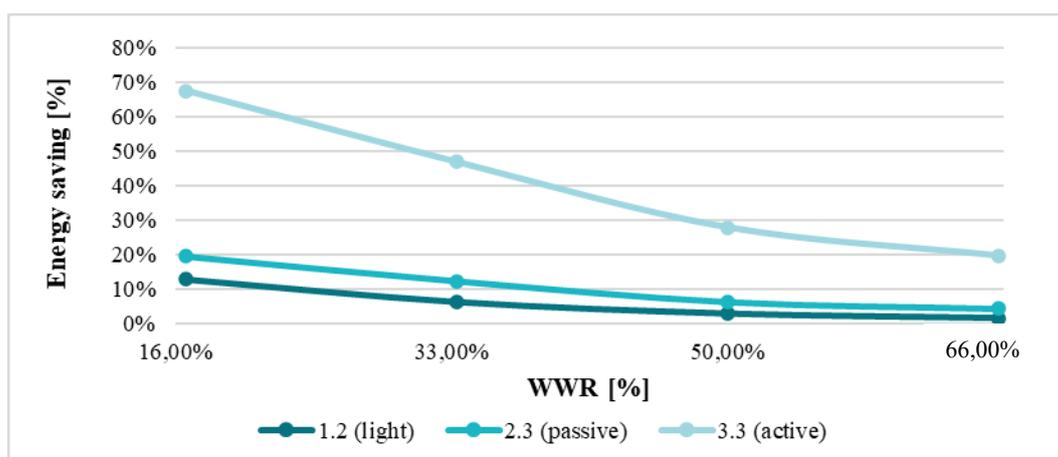


Grafico 76: Risparmio totale di energia (total energy saving)

## 9. Conclusioni

L'obiettivo di giungere, attraverso un processo per fasi, alla progettazione di moduli opachi per facciate avanzate è stato perseguito attraverso l'impiego di materiali avanzati i quali sono stati opportunamente analizzati e studiati sia dal punto di vista delle proprietà fisiche-termiche sia prestazionali.

Questo lavoro di ricerca è stato sviluppato attraverso diverse fasi, ognuna delle quali è stata caratterizzata da un determinato obiettivo.

L'analisi simulativa ha permesso di capire il comportamento dei materiali come il VIP e il PCM posti all'interno delle stratigrafie ed è emerso come questi, in base alla diversa composizione del modulo opaco, raggiungano temperature differenti. In particolare, il pannello VIP supera la sua temperatura limite nella maggior parte dei casi, mentre il PCM si mantiene sempre al di sotto del suo *heat stress*.

Tuttavia, queste problematiche possono essere ovviate attraverso opportune modifiche alla stratigrafia.

L'analisi sperimentale, effettuata attraverso delle misurazioni condotte con un termoflussimetro, ha avuto il duplice scopo di caratterizzare i materiali a cambiamento di fase (PCM) e di fornire dei dati sperimentali che consentano di validare i modelli simulativi dei BPS (Building Performance Simulation).

I valori ottenuti da quest'ultima analisi hanno permesso di selezionare il PCM migliore tra quelli testati in termine di proprietà fisiche, termiche e di costi.

Successivamente, l'analisi WWR di facciata, ha permesso una dilatazione della scala di indagine: dalla scala di componente a quella dell'ambiente, soffermandosi sulle prestazioni delle configurazioni precedentemente analizzate e sui conseguenti aspetti legati al comfort termico interno.

In particolare, la simulazione di un ambiente tipo ha consentito di comprendere come la variazione del rapporto WWR incida sulle prestazioni termiche dei componenti e di individuare la configurazione ottimale tra quelle simulate.

Pertanto, quello che è emerso dall'intero lavoro di ricerca è che è che la configurazione più promettente è sicuramente la 3.3\_active, questa è un esempio di parete radiante caratterizzata dalla presenza di un pannello fotovoltaico in perovskite integrato nel modulo di facciata e connesso ad un tappetino termo-riscaldante, il quale ha la duplice funzione di attivare il PCM adiacente e di riscaldare l'ambiente interno.

Sulla base dei risultati ottenuti, è possibile operare un confronto con i requisiti stabiliti preliminarmente dal progetto Powerskin+.

Nello specifico, lo spessore complessivo della configurazione è di 70 mm e risulta superiore di 10 mm rispetto al limite imposto (60mm).

Tuttavia, si tratta di un valore accettabile per un modulo applicabile con la tecnologia della facciata continua, il quale potrebbe essere ulteriormente ridotto, diminuendo gli spessori di alcuni materiali a discapito della trasmittanza termica della stratigrafia.

Una problematica legata a questa configurazione, emersa dall'analisi simulativa, è quella relativa all'*heat stress* del VIP, il quale supera il suo limite di temperatura di esercizio (60°C).

Per ovviare a tale problema, si potrebbe ridurre l'assorbimento del pannello fotovoltaico dall'85% al 54%. Questo comporterebbe, da un lato una diminuzione dell'efficienza del PV, dall'altra una riduzione della temperatura che raggiunge il VIP, che si mantiene al di sotto dei 60°C.

È possibile effettuare un'ulteriore considerazione riguardo al valore di WWR. Questo parametro, come espresso precedentemente, ha importanti ricadute sia a livello energetico che estetico-compositivo, in quanto determina il disegno di facciata di un edificio.

Tuttavia, poiché in quest'analisi non è stato preso in considerazione il contributo del consumo legato all'illuminazione artificiale, non è possibile stabilire con precisione il rapporto ottimale di WWR.

In conclusione, si può affermare che attraverso l'integrazione di materiali avanzati è possibile progettare moduli di facciata, caratterizzate non solo da elevate prestazioni termo-energetiche, ma anche da spessori ridotti paragonabili ad una vetrata con triplo vetro. Questa caratteristica consente una maggiore fruizione dello spazio interno, una continuità di facciata sia esternamente che internamente, una riduzione dell'impatto ambientale legato alla produzione e al trasporto dei componenti, un'elevata facilità di montaggio, trattandosi di sistemi prefabbricati ed una minimizzazione dei costi di costruzione e manutenzione.

## Bibliografia e sitografia

- [1] F. Favoino, F. Goia, M. Perino, V. Serra «The Actress Concept. A New Façade Module For Low Energy Buildings,» *Energy and Buildings*, n. 68, 2011;
- [2] F. Favoino, F. Goia, M. Perino, V. Serra, «Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade,» *Energy and Buildings*, n. 68, p. 647-659, 2014.
- [3] «ResearchItaly» [Online]. Available: <https://www.researchitaly.it/horizon-2020/> [Consultato il giorno 07 Febbraio 2021];
- [4] «Powerskin+» [Online]. Available: <https://powerskinplus.eu/>. [Consultato il giorno 12 Gennaio 2021];
- [5] C. Bedon, K. V. Machalická, M. Eliášová, M. Vokáč, M. Kozłowski, T. Wüest, F. Santos, N. Williams Portal, «Structural characterisation of adaptive facades in Europe – Part I: Insight on,» *Journal of Building Engineering*, n. 25, 2019.
- [6] R.C.G.M. Loonen, M. Trčka, D. Cóstola, J.L.M. Hensen, «Climate adaptive building shells: state-of-the-art and future challenges», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 25, pp. 483-493, 2013.
- [7] L. Aelenei, D. Aelenei, R. Romano, E. S. Mazzucchelli, M. Brzezick, J. M. Rico-Martinez, Case studies. Adaptive Facade Network, TU Delft Open, 2018.
- [8] J. Curpek, M. Cekon, «Climate response of a BiPV façade system enhanced with latent PCMBased,» *Renewable Energy*, n. 152, pp. 368 - 384, 2020.
- [9] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, «Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review,» *Energy and Buildings*, n. 42, pp. 1361-1368, 2010.
- [10] S. E. Kalnæs, B. P. Jelle, «Phase change materials and products for building applications: A,» *Energy and Buildings*, n. 94, pp. 150-176, 2015.
- [11] N. Zhu, Z. Ma, S. Wang, «Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review, » *Energy Conversion and Management*, n.50, pp. 3169-3181, 2009.
- [12] U. Heinemann, «Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components and Systems,» in Report of Subtask I: State of the Art and Case Studies , Würzburg, 2020.
- [13] R. Baetens, B. P. Jelle, J. V. Thue , M. J. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, «Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond,» *Energy and Buildings*, n. 42, pp. 147-172, 2010.
- [14] R. Baetens, B. P. Jelle , A. Gustavsen, S. Grynning , «Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review,» *Energy and Buildings*, n. 42, p. 1969-1975, 2010.
- [15] C. Tagliaferri, «Celle solare al perovskite: il minerale dalle mille proprietà,» [Fotovoltaicosulweb.it](http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/celle-solari-al-perovskite-il-minerale-dalle-mille-proprietati.html), [Online]. Available: <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/celle-solari-al-perovskite-il-minerale-dalle-mille-proprietati.html>. [Consultato il giorno 17 gennaio 2020].
- [16] C. Gerino, «Ecco la perovskite, il minerale che renderà più efficienti i pannelli fotovoltaici,» *la Repubblica*. [Online]. Available: [https://www.repubblica.it/green-and-blue/2020/11/07/news/pannelli\\_fotovoltaici\\_un\\_nuovo\\_materiale\\_potra\\_dare\\_efficienza\\_fino\\_al\\_40\\_per\\_cento-273334917](https://www.repubblica.it/green-and-blue/2020/11/07/news/pannelli_fotovoltaici_un_nuovo_materiale_potra_dare_efficienza_fino_al_40_per_cento-273334917). [Consultato il giorno 16 gennaio 2020].
- [17] M. B. Upama, Md A. Mahmud, H. Yi, N. K. Elumalai, G. Conibeer, D. Wang, C. Xu, A.Uddin, «Low-temperature processed efficient and colourful semitransparent,» *Organic Electronics*, n. 65, pp. 401-411, 2019.
- [18] Y. Yu, F. Zhang, H. Yu, «Self-healing perovskite solar cells,» *Solar Energy*, n. 209, pp. 408-414, 2020.
- [19] B.T. Griffith, D. Arasteh, D. Türler, «Gas-Filled Panels: An Update on Applications,» in BETEC Fall Symposium, Washington, 1995.

- [20] «Perovskites could revolutionize solar power,» CNN Business, 22 Ottobre 2020. [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/2020/10/14/energy/gallery/perovskites-solar-power-spc-intl/index.html>. [Consultato il giorno 16 Gennaio 2020].
- [21] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernándezb, «Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1675-1695, 2011.
- [22] E. Altunkeyik (2019), *Curtain Wall. Analysis of European Office Buildings with Design and Retrofitting Strategies of the Curtain Wall*, (Master Thesis at School of Architecture, Urban Planning, Construction Engineering, Politecnico di Milano, 2019);
- [23] Scott Murray, *Contemporary Curtain Wall Architecture*, New York: Princeton Architectural Press, 2009;
- [24] «EU Building Stock Observatory,» European Commission, [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu\\_bso\\_workshop.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_bso_workshop.pdf). [Consultato il giorno 05 Novembre 2020];
- [25] «Isolamento termico degli edifici,» GuidaConsumatore, [Online]. Available: <https://www.guidaconsumatore.com/casa/isolamento-termico-degli-edifici.html>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [26] «Certificazione energetica (parte 1): quadro normativo e glossario,» Biblus-net, [Online]. Available: [https://biblus.acca.it/focus/attestato-prestazione-energetica-ape/#La\\_leggen\\_3731976](https://biblus.acca.it/focus/attestato-prestazione-energetica-ape/#La_leggen_3731976). [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [27] H. Wallbaum, J. Kono, «Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components and Systems, » International Energy Agency, EBC Annex 65, 2020.
- [28] C. Anastasiou, «Thermal Breakage of Glass,» Delft University of Technology, 2016.
- [29] Apogee Advanced Glazing Group (AAGG), «'Shadow Box' Design Guidelines,» Technical Bulletin 505 , 2005.
- [30] Kragh, Mikkel, S. Yee, L. Carbary, «Performance of Shadows Boxes in Curtain Wall Assemblies,» Shanghai, 2014.
- [31] «Rubitherm. Phase change materials,» [Online]. Available: <https://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>. [Consultato il giorno 13 ottobre 2020].
- [32] «WUFIpro,» [Online]. Available: <https://www.wufi.it/content/infos/>. [Consultato il giorno 17 10 2020].
- [33] G. Chaudhary, S. Fantucci, Francesco Goia, «Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components,» *Energy and Buildings*, n. 174, p. 56, 2018.
- [34] ASTM C518-17, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania.
- [35] UNI EN 12667, Thermal Performance of Building Materials and Products - Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods - Products of High and Medium Thermal Resistance, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2001
- [36] ASTM C1784-14, Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania
- [37] G. Baldinelli, F. Bianchi, S. Gendelis, A. Jakovics, G. L. Morini, S. Falcioni, S. Fantucci, Valentina Serra, M.A. Navacerrada, C. Díaz, A. Libbra, A. Muscio, F. Asdrubali, «Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A Round Robin Test,» *International Journal of Thermal Sciences*, 2019.

- [38] E. Fenoglio (2017), *Intonaci termoisolanti di nuova generazione. Analisi teorico-sperimentale della prestazione termica in laboratorio e in opera*, (Tesi di laurea magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, Politecnico di Torino, 2017).
- [39] S. Fantucci, F. Goia, M. Perino, V. Serra, «Sinusoidal response measurement procedure for the thermal performance assessment of PCM by means of Dynamic Heat Flow Meter Apparatus,» *Energy & Buildings*, 2019.
- [40] F. Goia, G. Chaudhary, S. Fantucci, «Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components,» *Energy & Buildings*, 2018.
- [41] R. Berardi, «Metodologia DoE – Design of Experiment,» Ralph Dte, 14 Luglio 2010. [Online]. Available: <https://www.ralph-dte.eu/2011/07/14/metodologia-doe-design-of-experiment/>. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2020].
- [42] «THERM documentation,» Berkeley Lab. Window & Daylighting, [Online]. Available: <https://windows.lbl.gov/therm-documentation>. [Consultato il giorno 2020 Ottobre 6].
- [43] «WUFI® PRO,2D,PLUS-PASSIVE,» [Online]. Available: [wufi.it](http://wufi.it). [Consultato il giorno 26 ottobre 2020].
- [44] A. Lorenzati, S. Fantucci, A. Capozzoli, M. Perino, «VIPs thermal conductivity measurement: test methods, limits and uncertainty,» *Energy Procedia*, vol. 78, p. 418–423, 2015.
- [45] UNI-EN-ISO 6946:2008 *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*
- [46] «RMSE: Root Mean Square Error,» Statistics How To, 2020. [Online]. Available: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/regression-analysis/rmse-root-mean-square-error/>.
- [47] F. Goia, «Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential,» *Solar Energy*, n. 132, pp. 467-492, 2016.
- [48] «AGC-Glass Configurator» [Online]. Available. <https://www.agc-yourglass.com/it/it/products/planibel-clear/clearlite> [Consultato il giorno 21 12 2020]
- [49] «AGC-Glass Configurator» [Online]. Available. <https://www.agc-yourglass.com/nl/it/products/ipasol/ultraselect-6229> [Consultato il 21 12 2020]
- [50] «AGC-Glass Configurator» [Online]. Available. <https://www.agc-yourglass.com/gb/it/products/iplus/iplus-11t> [Consultato il 21 12 2020]
- [51] «Schuco-Facciate» [Online]. Available <https://www.schueco.com/web2/it/serramentisti/prodotti/facciate> [Consultato il 21 12 2020]
- [52] UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termo locale.
- [53] UNI 10339:1995 - Impianti aerulici a fini di benessere- Generalità, classificazione e requisiti - Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura..
- [54] «Powerskin+,» [Online]. Available:<https://powerskinplus.eu/>. [Consultato il giorno 12 Gennaio 2021].

## Bibliografia panoramica software

- [1] Maref W., Van De Bossche N., Armstrong M., (...), Elmahdy H., Glazer R., Laboratory tests of window-wall interface details to evaluate the risk of condensation on windows, *Journal of Testing and Evaluation* 39(4), 2011
- [2] J. Rose, A. Lahme, N.U. Christensen, P. Heiselberg, M. Hansen, K.Grau, «Numerical method for calculating latent heat storage in constructions containing phase change material», *IBPSA BS2009*, University of Strathclyde, Glasgow, (2009) 400-407.
- [3] M. Scarpa, K. Grau, B. W. Olesen, «Development and validation of a versatile method for the calculation of heat transfer in waterbased radiant systems», *IBPSA BS2009*, University of Strathclyde, Glasgow, (2009) 688-695.
- [4] O. Kalyanova, P. Heiselberg, C. Felsmann, H. Poirazis, P. Strachan, A. Wijsman, «An Empirical Validation of Building Simulation Software for Modelling of Double-Skin Facade», *IBPSA BS2009*, University of Strathclyde, Glasgow, (2009) 1107-1114.
- [5] C. Balocco, G. Petrone, «Numerical Modelling for the Thermal Performance Assessment of a Semi-Opaque Façade with a Multilayer of Nano-Structured and Phase Change Materials», *Buildings* (2017)
- [6] T. Srisamranrungruang, K. Hiyama, «Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF)», *Energy and Buildings*, Vol 210 (2020) Article number 109765
- [7] B. Paule, S. Pantet, J. Bouteiller, (...), M. Berges, R. Celaire, «Multi-layer facades: What happens behind?», *Energy Procedia* 122, (2017) 193-198
- [8] D.A. Chi, D. Moreno, J. Navarro, «Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance», *Building and Environment* 125 (2017) 383-400
- [9] I. Açam, Ö. Ceylan, «Analysis of daylight control in advanced façade systems for office module in ankara», *Lecture Notes in Civil Engineering* 6 (2018) 359-377
- [10] T. Srisamranrungruang, K. Hiyama, «Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF)», *Energy and Buildings* 210, 109765 (2020)
- [11] C. O.Pedersen, «Advanced Zone Simulation in EnergyPlus: Incorporation of Variable Properties and Phase Change Material (PCM) Capability», *Proceedings of Building Simulation* (2007), 1341-45. Beijing, China.
- [12] P. G. Ellis, P.A. Torcellini, D. B. Crawley, «Simulation of Energy Management Systems in EnergyPlus», *Proceedings of Building Simulation*, (2007) 1346-53.
- [13] D. W. Kim, C. S. Park, «Difficulties and Limitations in Performance Simulation of a Double Skin Façade with EnergyPlus», *Energy and Buildings*, 43 (12) (2011) 3635-45
- [14] P.C. Tabares-Velasco, C. Christensen, M. Bianchi, «Verification and Validation of EnergyPlus Phase Change Material Model for Opaque Wall Assemblies», *Building and Environment*, 54 (2012): 186-96
- [15] T. Nouidui, M. Wetter, W. Zuo, «Functional Mock-up Unit for Co-Simulation Import in EnergyPlus», *Journal of Building Performance Simulation*, 7 (2013): 192-202
- [16] N. M. Mateus, a. Pinto, G .Carrilho Da Graça, «Validation of EnergyPlus Thermal Simulation of a Double Skin Naturally and Mechanically Ventilated Test Cell», *Energy and Buildings*, 75 (2014) 511-22
- [17] F. Favoino, Y. Cascone, L. Bianco, F. Goia, M. Zinzi, M. Overend, V. Serra, M. Perino, «Simulating Switchable Glazing with EnergyPlus: An Empirical Validation and Calibration of a Thermotropic Glazing Model», *Proceedings of Building Simulation* (2015). Hyderabad, India.
- [18] C. Balocco, G. Petrone, «Numerical Modelling for the Thermal Performance Assessment of a Semi-Opaque Façade with a Multilayer of Nano-Structured and Phase Change Materials», *Buildings* (2017)

- [19] R.C.G.M Loonen, F. Favoino, J.L.M. Hensen, M. Overend, «Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades», *Journal of Building Performance Simulation*, Vol 10, No. 2 (2017) 205-223
- [20] F. Goia, G. Chaudhary, S. Fantucci, «Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components», *Energy and Buildings* 174 (2018) 54-67
- [21] H. H. Almutairi, A. Almutairi, J. H. Almutairi, «Influence of façade area on thermal performance of building for cooling purposes», ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE) 6A-144113 (2018)
- [22] D. Craciunescu, L. Fara, A.-M. Dabija, P. Sterian, S. Sara, «Intelligent Approach for Improvement of BIPV Systems Performance: Case Study», IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 471(11),112015, (2019)
- [23] P.Strachan, I. A Macdonald, G. Kokogiannakis, «History and development of validation with the ESP-r simulation program», *Building and Environment*, 43(4) (2008) 601-609
- [24] F. Frontini, T. E. Kuhn, S. Herkel, P. Strachan, G. Kokogiannakis, «Implementation and application of a new bi-directional solar modelling method for complex facades within the ESP-r building simulation program», *Building Simulation*, (2009)
- [25] B.A. Lomanowski, J.L. Wright, «The Complex Fenestration Construction: A Practical Approach for Modelling Windows with Shading Devices in ESP-R», *Journal of Building Performance Simulation* 5 (2012): 185-98.
- [26] I. Beausoleil-Morrison, M. Kummert, F. Macdonald, R. Jost, T. McDowell, A. Ferguson, «Demonstration of the new ESP-r and TRNSYS co-simulator for modelling solar buildings», *Energy Procedia*, Vol 30 (2012) 505-514
- [27] P. Hoes, R.C.G.M. Loonen, M. Trcka, J.L.M. Hensen, «Performance prediction of advanced building controls in the design phase using ESP-r, BCVTB and Matlab», Paper presented at the First IBPSA-England conference Building Simulation and Optimization(BSO12) 10-11 (2012), Loughborough, UK
- [28] D. Heim, D. Knera, E. Szczepańska-Rosiak, «Functionality of an active external wall - optimal glazing/BIPV ratio taking into account total indoor illuminance», 14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings (2015) 2639-2646
- [29] A. Wieprzkowicz, D. Heim, «Energy performance of dynamic thermal insulation built in the experimental façade system», *Management of Environmental Quality: An International Journal* 27(6) (2016) 681-694
- [30] S. Fantucci, C. Marinosci, V. Serra, C. Carbonaro, «Thermal Performance Assessment of an Opaque Ventilated Façade in the Summer Period: Calibration of a Simulation Model through in-field Measurements», *Energy Procedia* 111 (2017) 619-628
- [31] W. Su, J. Darkwa, G. Kokogiannakis, Y. Li, «Thermal Performance of Various Microencapsulated Phase Change Material Drywalls Integrated into Buildings: A Numerical Investigation by ESP-r», *Environmental Science and Engineering* (2020) 847-855
- [32] J. Erickson, «Envelope as Climate Negotiator: Evaluating Adaptive Building Envelope's Capacity to Moderate Indoor Climate and Energy», PhD Thesis (2013), Arizona State University
- [33] I. Plüss, P. Kräuchi, D. Bionda, M. Schröcker, S. Felsenstein, G. Zweifel, «Modellbildung Eines Phasenwechsel-Fassadenelements in IDA ICE», *Proceedings of BauSIM2014*, the Fifth German-Austrian IBPSA Conference, (2014) 374-78.
- [34] L. Karlsen, G. Grozman, P. Heiselberg, I. Bryn, «Integrated design of daylight, thermal comfort and energy demand with use of IDA ICE», *Proceedings of 7 (2017) Passivhus Norden | Sustainable Cities and Buildings*.

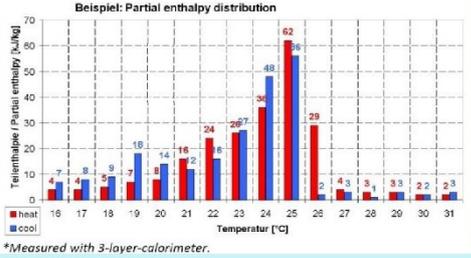
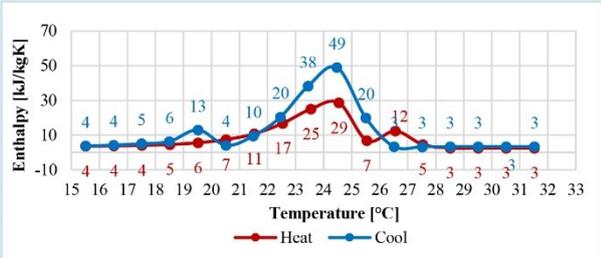
- 
- [35] R. Tällberg, B. P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, M. Hamdy, «Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies», *Solar Energy Materials and Solar Cells* 200,109828 (2019)
- [36] A. Aksamija, «Double-skin facades and daylight simulations: Comparative study of facade typologies and effects on natural light in different climates», *Simulation Series* 49(11), 2017, pp. 164-171
- [37] Pawłowski, K., Nakielska, M., Analysis of Physical Parameters for External Partition Wall Joints Insulated from the Inside, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245(8),082012, 2017
- [38] T.P. McDowell, D.E. Bradley, J.W. Thornton, M. Kummert., «Simulation Synergy: Expanding TRNSYS Capabilities and Usability», *Proceedings of SIMBUILD*, IBPSA-USA Conference on Building Sustainability and Performance Through Simulation, (2004) 1-6.
- [39] F. Kuznik , J. Virgone, K. Johannes, «Development and Validation of a New TRNSYS Type for the Simulation of External Building Walls Containing PCM», *Energy and Buildings*, 42 (7) (2010) 1004-9.
- [40] B.Delcroix, M. Kummert, A. Daoud, M. Hiller, «Conduction Transfer Functions in TRNSYS Multizone Building Model: Current Implementation, Limitations and Possible Improvements», *Proceedings of SimBuild 20102*, the Fifth National Conference of IBPSA-USA, (2012) 219-26. Madison, WI.
- [41] Diallo T. M.O., Zhao X. , Dugue A., Bonnamy P., Miguel F.J., Martinez A., Theodosiou T., Liu J., Brown N., Numerical investigation of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade system employing a smart modular heat recovery unit and a latent heat thermal energy system, *Applied Energy* 205 (2017) pp. 130-152
- [42] H. Elarga, A. Dal Monte, R. K. Andersen, E. Benini, «PV-PCM integration in glazed building. Co-simulation and genetic optimization study», *Building and Environment* 126 (2017) 161-175
- [43] J.-S. Yu, J.-H. Kim, S.-M. Kim, J.-T. Kim, «Thermal and energy performance of a building with PV-Applied double-skin façade», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability* 170(6) (2017) 345-353
- [44] T.M.O. Diallo, X. Zhao, A. Dugue, J.-S. Liu, N. Brown, «Numerical investigation of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade system employing a smart modular heat recovery unit and a latent heat thermal energy system», *Applied Energy* 205 (2017) 130-152
- [45] F. Goia, G. Chaudhary, S. Fantucci, «Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components», *Energy and Buildings* 174 (2018) 54-67

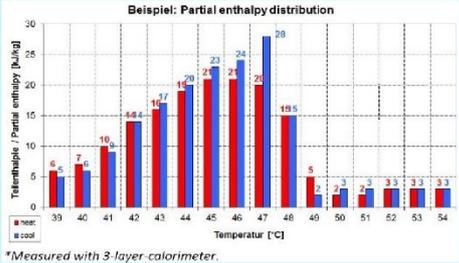
### Bibliografia tabella capitolo 3

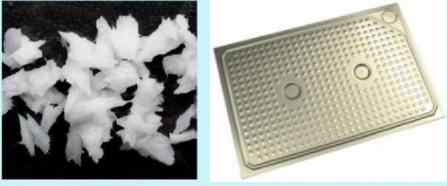
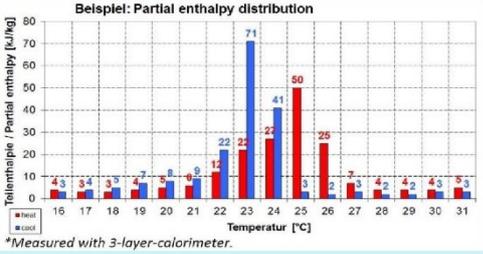
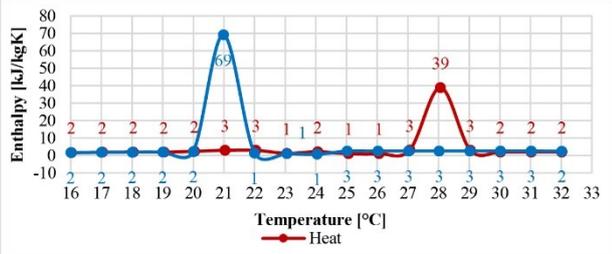
- [1] Politecnico di Torino. Dipartimento Casa Città, Beni culturali ambientali nel Comune di Torino, Vol.1, Società degli ingegneri e degli architetti di Torino, Torino 1984;
- [2] A. Frattini, C. Laterza (2015), *Torino: vivere le nuove vette*, (Tesi di laurea magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, Politecnico di Torino, 2015);
- [3] A. Magnaghi, M. Monge, L. Re, Guida all'architettura moderna di Torino, Torino: Designers riuniti, 1982.
- [4] M. Giusti, R. Tamborrino, Guida all'architettura del Novecento in Piemonte (1902.2006), Torino: Allemandi, 2008;
- [5] «Grattacielo Lancia,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/d13ffe07501b4082971880457cbe269b>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [6] «Ex centro direzionale RIV,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/1060baed9f7442c0b6775636d2808331>. [Consultato il giorno 30 Ottobre 2020];
- [7] «Architettura Insostenibile,» Wordpress, [Online].  
Available: <https://architetturainsostenibile.wordpress.com/tag/gino-becker/>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [8] «Palazzo Nuovo,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/a25ec7a743fb4156822929d8605a1127>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [9] «Grattacielo Rai,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/36ce37a6a4514c749268cd20d25399c2>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [10] «Camera di Commercio, Industria e Artigianato,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/47eb2247a01d48fba823989cc6a66b51>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [11] «Torre CTO,» Museo Torino, [Online].  
Available:  
[12] <http://www.museotorino.it/view/s/1d06128c90a948498e95600c23ed8101>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020];
- [13] «Palazzo sede della Provincia di Torino, già Telecom, Sip e Stipel,» Museo Torino, [Online].  
Available: <http://www.museotorino.it/view/s/f03282479aa2479fa0eef820206a43fe>. [Consultato il giorno 27 Ottobre 2020].

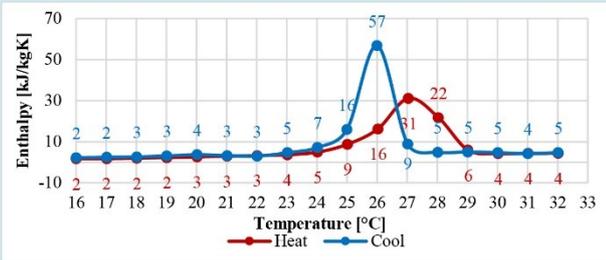


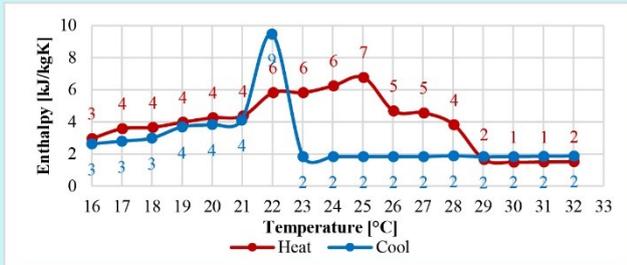
Appendice capitolo 2

PCM_aluminium case_a					
Organic PCM (paraffine) used as macroencapsulated material inside aluminium box CSM (compact storage modules).					
PCM tipology	Paraffine		Encapsulation	macroencapsulated in CSM	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	10	CSM sizes	-	
w	[mm]	450			
l	[mm]	300			
T <sub>melting</sub>	[°C]	22-26	main peak:25	-	
T <sub>solidification</sub>	[°C]	22-26	main peak:25	-	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		0.1402	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		0.1537	
λ <sub>d,both phases</sub>	[W/mK]	0.2		0.1456	
spc heat	[kJ/kgK]	2		-	
Surface heat capacity	[kJ/m <sup>2</sup> ]	-		237	heating phase ΔT=1 °C
				579	cooling phase ΔT=1°C
Heat capacity normalized for 1mm thickness	[kJ mm/m <sup>2</sup> ]	-		24	heating phase ΔT=1 °C
				58	cooling phase ΔT=1°C
ρ <sub>solid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	880		-	
ρ <sub>liquid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	770		-	
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	-		414	
Entalphy distribution	 <p>Beispiel: Partial enthalpy distribution</p> <p>*Measured with 3-layer-calorimeter.</p>				Curve shown in the data sheet
	 <p>Enthalpy [kJ/kgK]</p> <p>Temperature [°C]</p> <p>Heat Cool</p>				Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
Temperature ranges considered for the heat capacity calculations: 24°-29°C (heating p.), 21°C-26°C (cooling p.)					

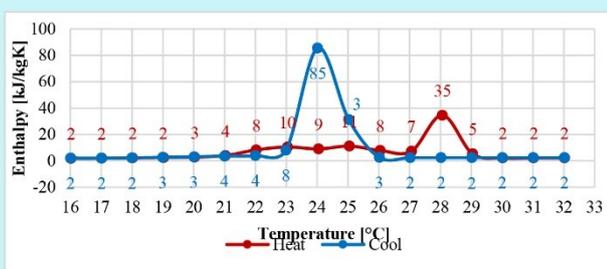
PCM_aluminium case_b					
Organic PCM (paraffine) used as macroencapsulated material inside aluminium box CSM (compact storage modules).					
<b>PCM tipology</b>	Salt hydrate	<b>Encapsulation</b>	macroencapsulated in CSM		
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	15	CSM sizes	-	
w	[mm]	450			
l	[mm]	300			
T <sub>melting</sub>	[°C]	41-48	main peak: 46	-	
T <sub>solidification</sub>	[°C]	48-41	main peak: 47	-	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		-	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		-	
λ <sub>d,both phases</sub>	[W/mK]	0.2		-	
spc heat	[kJ/kgK]	2000		-	
ρ <sub>solid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	880		-	
ρ <sub>liquid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	770		-	
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	-		617	
Entalphy distribution					Curve shown in the data sheet
					Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					

PCM_aluminium case_c					
Inorganic PCM (salt hydrate) used as macroencapsulated material inside aluminium box CSM (compact storage modules).					
PCM typology	Salt hydrate		Encapsulation	macroencapsulated in CSM	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	15	CSM sizes	-	
w	[mm]	450			
l	[mm]	300			
T <sub>melting</sub>	[°C]	24-26	main peak: 25	-	
T <sub>solidification</sub>	[°C]	24-23	main peak: 24	-	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		0.1817	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		0.2882	
λ <sub>d,both phases</sub>	[W/mK]	0.5		0.2350	
spc heat	[kJ/kgK]	2000		-	
Surface heat capacity	[kJ/m <sup>2</sup> ]	-		692	heating phase ΔT=1 °C
				1084	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm thickness	[kJ mm/m <sup>2</sup> ]	-		46	heating phase ΔT=1 °C
				72	cooling phase ΔT=1 °C
ρ <sub>solid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	1500		-	
ρ <sub>liquid</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	1400		-	
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	-		932	
Entalphy distribution	 <p>Beispiel: Partial enthalpy distribution</p> <p>Enthalpy [kJ/kg] vs Temperatur [°C]</p> <p>*Measured with 3-layer-calorimeter.</p>				Curve shown in the data sheet
	 <p>Enthalpy [kJ/kgK] vs Temperature [°C]</p> <p>Heat</p>				Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
Temperature ranges considered for the heat capacity calculations: 24°-29°C (heating p.), 21°C-26°C (cooling p.)					

PCM_plastic film bags					
PCM_bags plastic film is a mineral-based phase change material and it is encapsulated in panels made of a flame retardant plastic film.					
PCM typology	Salt hydrate		Encapsulation	Encapsulated in a plastic film bags	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	6		6.8	
w	[mm]	40x122, 61x122, 40x244, 61x244		55x55	
l	[mm]				
T <sub>range</sub>	[°C]	18 - 21 -23 - 25 - 29		26	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	1.09		0.1495	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	0.54		0.1932	
λ <sub>d,medium</sub>	[W/mK]	0.815		0.1713	
spc heat	[KJ/kgK]	3.14		-	
Latent heat capacity	[KJ/kg]	200		81	heating phase ΔT=1 °C
				86	cooling phase ΔT=1 °C
Surface heat capacity	[Wh/m2]	315		132	heating phase ΔT=1 °C
				135	cooling phase ΔT=1 °C
Surface heat capacity	[kJ/m2]	1134		475	heating phase ΔT=1 °C
				486	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm thickness	[kJ mm/m2]	-		70	heating phase ΔT=1 °C
				71	cooling phase ΔT=1 °C
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	815		784.96	
Entalphy distribution					Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
Temperature ranges considered for the heat capacity calculations: 24°-29°C (heating p.), 21°C-26°C (cooling p.)					

PCM_plastic container					
PCM_plastic container is a mineral-based phase change material and it is encapsulated in a PVC formed tray characterized by cells.					
PCM tipology	Salt hydrate		Encapsulation	Encapsulated in a PVC container	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	6.3		7.27	
w	[mm]	603 x 603, 603 x 406		603 x 603	
l	[mm]				
T <sub>range</sub>	[°C]	18, 21, 24, 25, 29		24	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	0.33	[W/ft/K]	0.1484	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	0.16	[W/ft/K]	0.2082	
λ <sub>d,medium</sub>	[W/mK]	0.25	[W/ft/K]	0.1783	
spc heat	[kJ/kgK]	3.14		-	
Surface heat capacity	[kJ/m2]	-		264	heating phase ΔT=1 °C
				199	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm	[kJ mm/m2]	-		36	heating phase ΔT=1 °C
				27	cooling phase ΔT=1 °C
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	904.76		1314.24	
Entalphy distribution					Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
Temperature ranges considered for the heat capacity calculations: 24°-29°C (heating p.), 21°C-26°C (cooling p.)					

PCM_plastic case_a					
PCM_plastic container is a mineral-based phase change material and it is encapsulated in a plastic case.					
<b>PCM tipology</b>	Salt hydrate		<b>Encapsulation</b>	Encapsulated in a plastic case	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	-		0.01323	
w	[mm]	-		0.58 x 0.28	
l	[mm]				
T <sub>range</sub>	[°C]	-		23	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		0.3441	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		0.3558	
λ <sub>d,medium</sub>	[W/mK]	-		0.3500	
spc heat	[kJ/kgK]	-		-	
Surface heat capacity	[kJ/m2]	-		-	heating phase ΔT=1 °C
				-	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm	[kJ mm/m2]	-		-	heating phase ΔT=1 °C
				-	cooling phase ΔT=1 °C
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	-		-	
Entalphy distribution					Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
-					

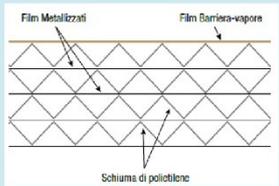
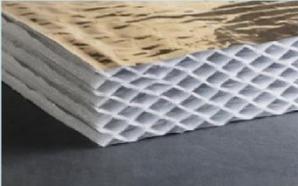
PCM_plastic case_b					
PCM_plastic container is a mineral-based phase change material and it is encapsulated in a plastic case.					
PCM typology	Salt hydrate		Encapsulation	Encapsulated in a plastic case	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	-		0.01283	
w	[mm]	-		0.58 x 0.20	
l	[mm]	-			
T <sub>range</sub>	[°C]	-		26	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		0.3662	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		0.3440	
λ <sub>d,medium</sub>	[W/mK]	-		0.3551	
spc heat	[kJ/kgK]	-		-	
Surface heat capacity	[kJ/m2]	-		1085	heating phase ΔT=1 °C
				1942	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm	[kJ mm/m2]	-		85	heating phase ΔT=1 °C
				152	cooling phase ΔT=1 °C
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	-		1126.79	
Enthalpy distribution					Curve obtained from experimental values
Reference/Note:					
Temperature ranges considered for the heat capacity calculations: 24°-29°C (heating p.), 21°C-26°C (cooling p.)					

PCM_plastic case_c					
PCM_plastic container is a mineral-based phase change material and it is encapsulated in a plastic case.					
<b>PCM tipology</b>	Salt hydrate		<b>Encapsulation</b>	Encapsulated in a plastic case	
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	-		0.01286	
w	[mm]	-		0.58 x 0.15	
l	[mm]	-			
T <sub>range</sub>	[°C]	-		32	
λ <sub>d,solid</sub>	[W/mK]	-		0.4151	
λ <sub>d,liquid</sub>	[W/mK]	-		0.3459	
λ <sub>d,medium</sub>	[W/mK]	-		0.3805	
spc heat	[kJ/kgK]	2.00		-	
Surface heat capacity	[kJ/m2]	-		-	heating phase ΔT=1 °C
				-	cooling phase ΔT=1 °C
Heat capacity normalized for 1mm	[kJ mm/m2]	-		-	heating phase ΔT=1 °C
				-	cooling phase ΔT=1 °C
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	1300		-	
Entalphy distribution				Curve obtained from experimental values	
Reference/Note:					
-					

VIP_fumed silica					
Fumed silica based VIP with other additions (opacifier and getters); it is heat sealed under vacuum in a multilayer vacuum metalised film					
<b>Core material</b>		Fumed silica		<b>Envelope material</b>	PET, Polyethylene, Aluminium
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	5 - 50		-	
w	[mm]	Maximum size 1650 x 960		-	
l	[mm]				
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	210 ± 30		-	
$\lambda$	[W/mK]	<0.0045 (at 20°C)		-	
Reference/Note:					
-					

VIP_glass fiber					
VIP_glass fiber is a vacuum insulation panel consist of a s glass mineral fiber core.					
<b>Core material</b>		Glass fiber		<b>Envelope material</b>	Al foil, Hybrid
Table of properties					
	Unit	Datasheet value	Note	Laboratory measurement value	Note
t	[mm]	(min/max) 6 - 20 mm (3/30 mm)		14.64	
w	[mm]	(min/max) 200-1000 (50/1050 mm)		600x750	
l	[mm]	(min/max) 200-1500 mm(100/2000 mm)			
$p_p$	[mbar]	no pressure regulation		-	
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	changes depending on the application)		-	
$\lambda$	[W/mK]	0.0021		0.0016	
Reference/Note:					
-					

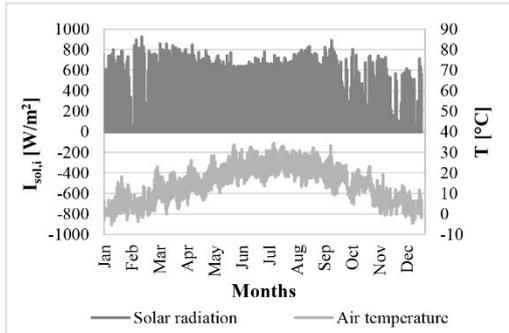
<b>GFP</b>					
<p>The product is composed of two external aluminum foil / polymer laminates and five internal aluminum metalized films. When expanded, the internal, low-emittance aluminum layers form a honeycomb structure.</p> <p>These sealed exterior aluminum foil barrier films provide thermal resistance, flammability protection, and properties to contain air or a low-conductivity inert gas.</p>					
<b>Table of properties</b>					
	Unit	value			Note
Panel	[cm]	40.64	60.96	60.96	
W x L (un-expanded)	[mm]	432 x 1680	635 x 1680	635 x 584	
W x L (expanded)	[mm]	381 x 1220	584 x 1220	584 x 584	
t (un-expanded)	[mm]	0.4	0.4	0.4	
t (expanded)	[mm]	38	38	38	
Weight (un-expanded)	[kg]	0.249	0.379	0.189	
Weight (expanded)	[kg]	0.252	0.383	0.191	
Weight/m2	[kg/m <sup>2</sup> ]	0.542	0.512	0.512	
Coverage	[m <sup>2</sup> ]	0.465	0.743	0.372	
R value (air)	[m <sup>2</sup> K/W]	1.31			[17]
R value (argon)	[m <sup>2</sup> K/W]	1.9			[17]
R value (Krypton)	[m <sup>2</sup> K/W]	3,16			[17]
<b>Reference/Note:</b>					
-					

<b>Multi-layer reflective insulation</b>					
<p>This material is a new generation of insulation formed by a honeycomb structure, made by complex layers of polyethylene foam on metallic films with very low emissivity.</p>					
<b>Table of properties</b>					
	Unit	value			Note
t	[mm]	40, 50, 60, 75, 90, 105, 125, 140			
w	[mm]	2650			
l	[mm]	1150			
λD	[W/mK]	0.033			
Rd	[m <sup>2</sup> K/W]	1.20, 1.50, 1.80, 2.25, 2.70, 3.15, 3.75, 4.20			Referred to the previously thickness
ε	[-]	0.06 - 0.10			
spe heat	[kJ/kgK]	2300			
ρ	kg/m <sup>3</sup>	9.5			
<b>Reference/Note:</b>					
-					

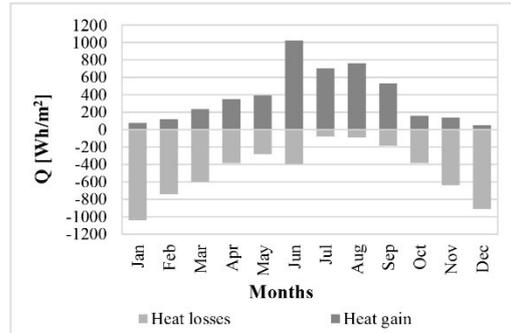
Appendice capitolo 6

Configurazione 1.1\_Sud

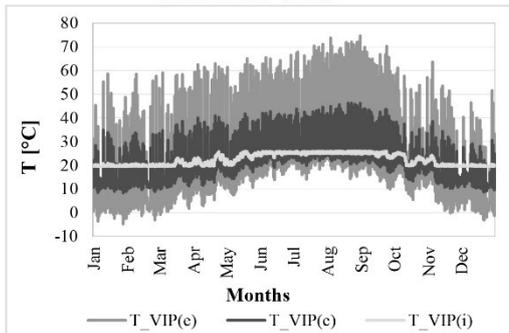
Boundary conditions



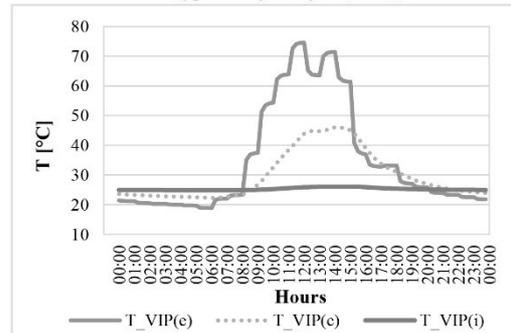
Monthly analysis (interior surface)



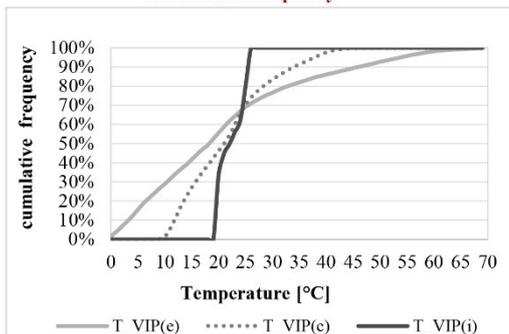
Time series  $T^{\circ}$  (VIP)



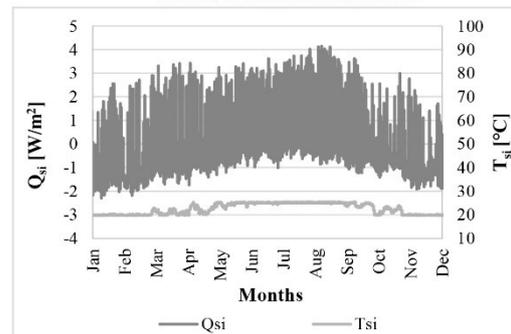
Typical day analysis (31/08)



Cumulative frequency

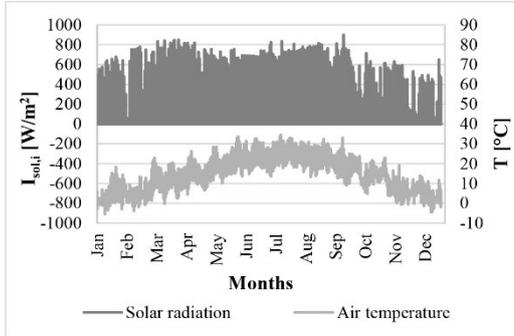


Time series of internal surface

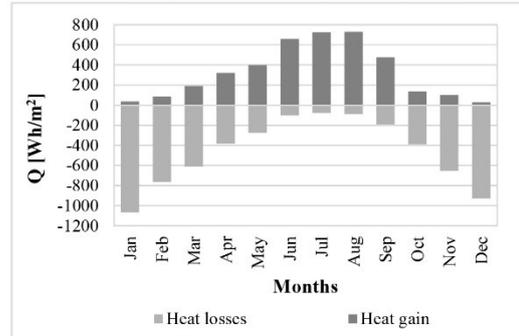


### Configurazione 1.1\_Sud Ovest

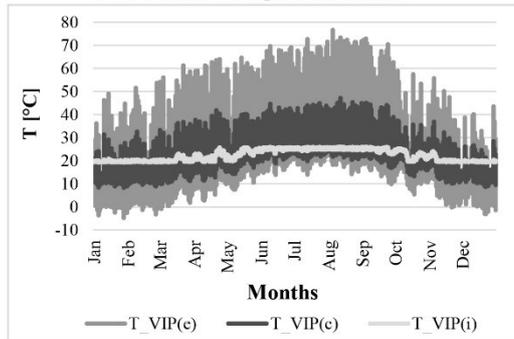
**Boundary conditions**



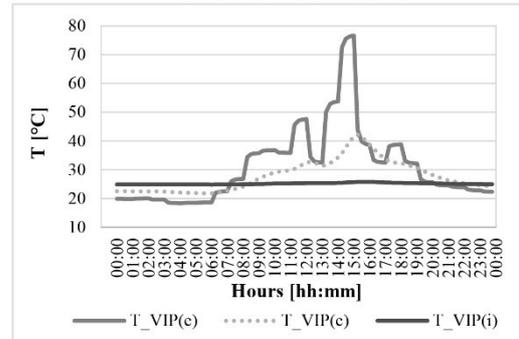
**Monthly analysis (interior surface)**



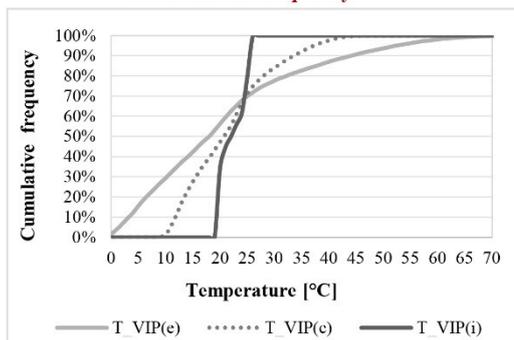
**Time series of temperature (VIP)**



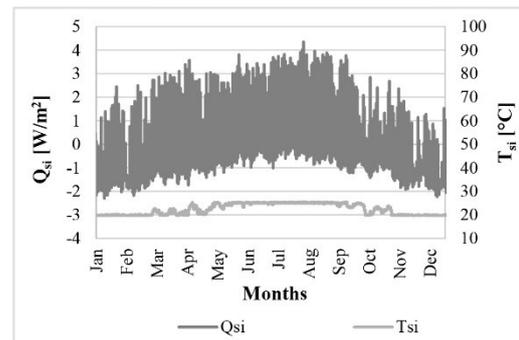
**Typical day analysis (05/08)**



**Cumulative frequency**

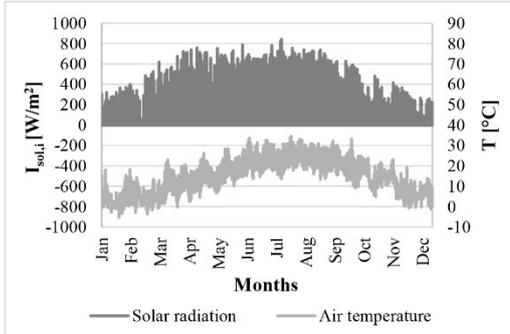


**Time series of internal surface**

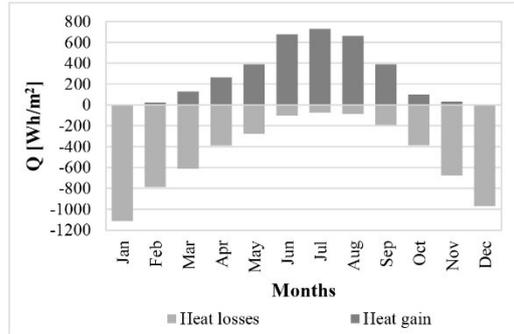


### Configurazione 1.1\_Ovest

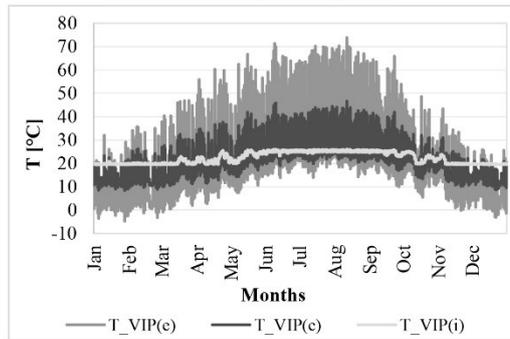
**Boundary conditions**



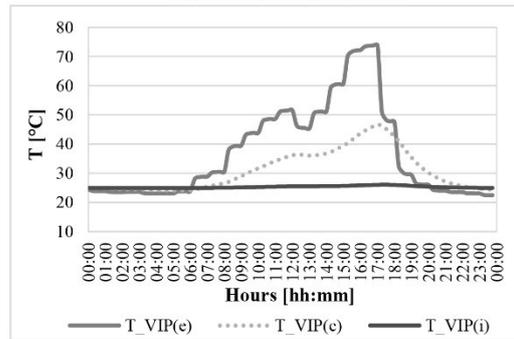
**Monthly analysis (interior surface)**



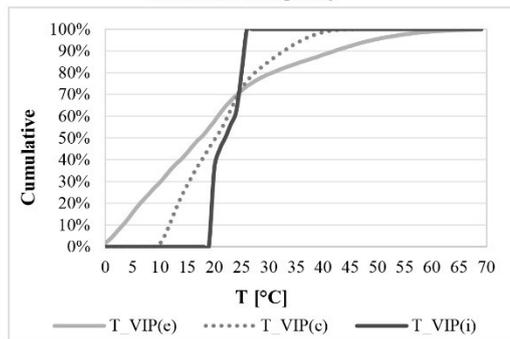
**Time series of temperature (VIP)**



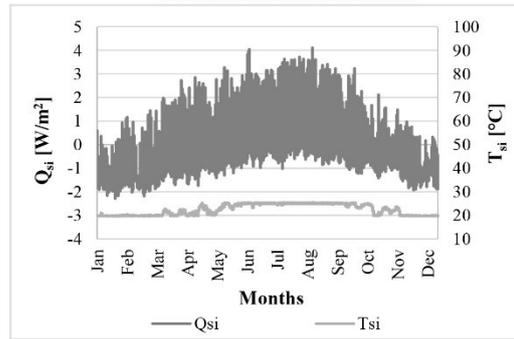
**Typical day analysis (12/08)**



**Cumulative frequency**

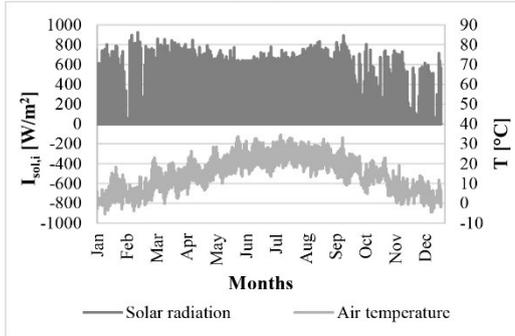


**Time series of internal surface**

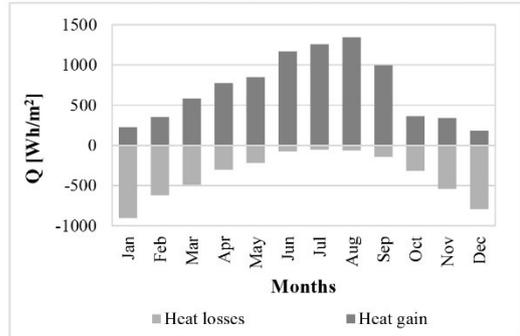


### Configurazione 1.2\_Sud

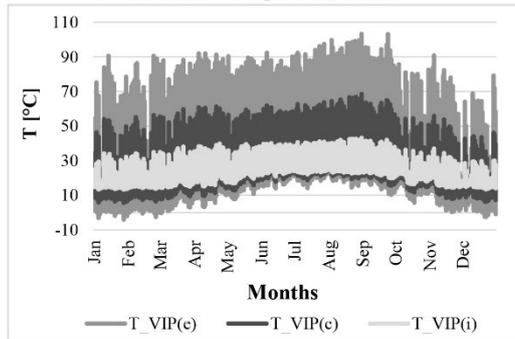
**Boundary conditions**



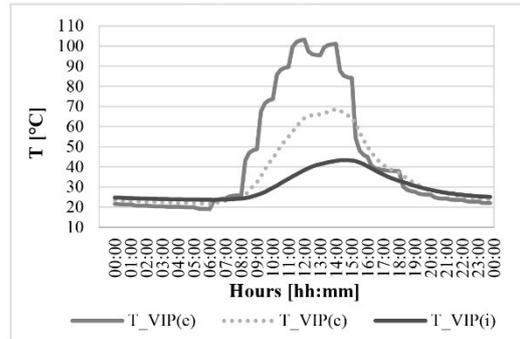
**Monthly analysis (interior surface)**



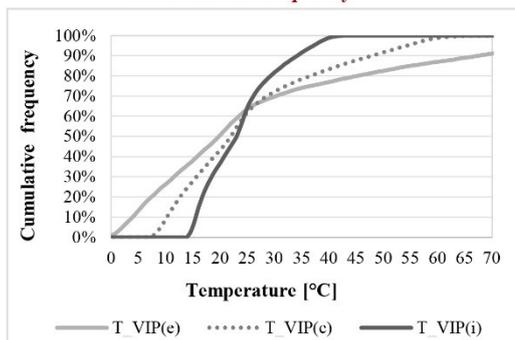
**Time series of temperature (VIP)**



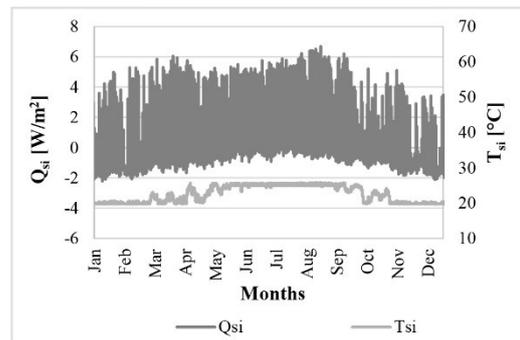
**Typical day analysis (31/08)**



**Cumulative frequency**

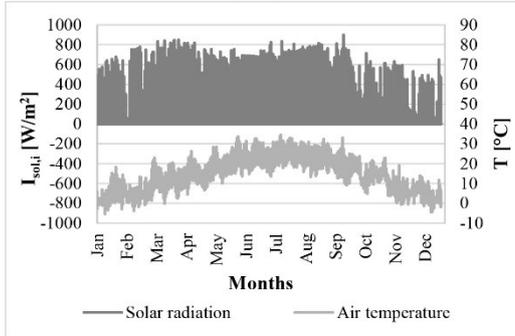


**Time series of internal surface**

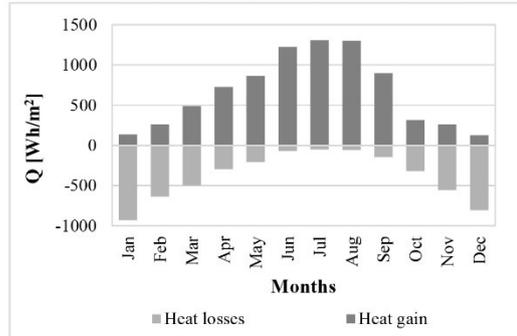


### Configurazione 1.2\_Sud Ovest

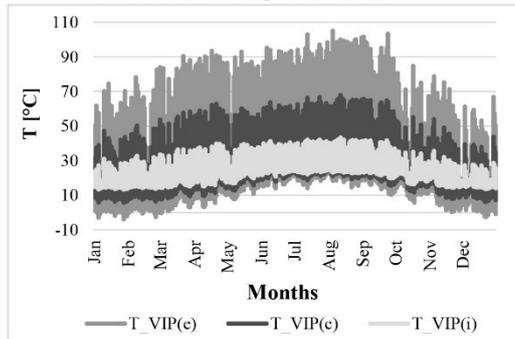
**Boundary conditions**



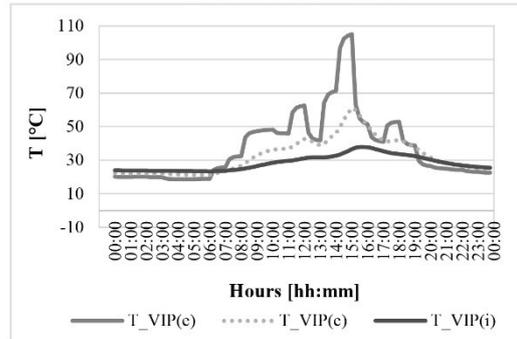
**Monthly analysis (interior surface)**



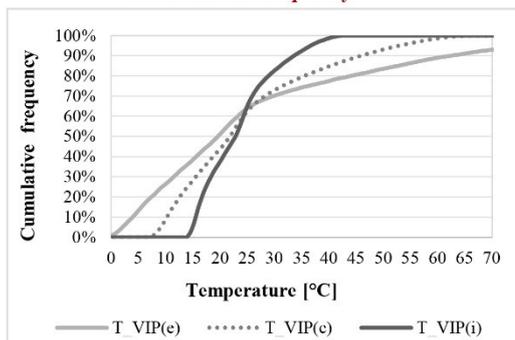
**Time series of temperature (VIP)**



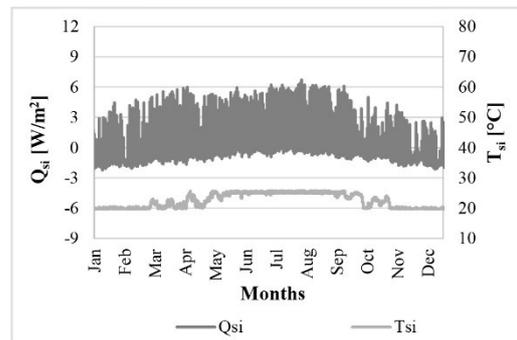
**Typical day analysis (05/08)**



**Cumulative frequency**

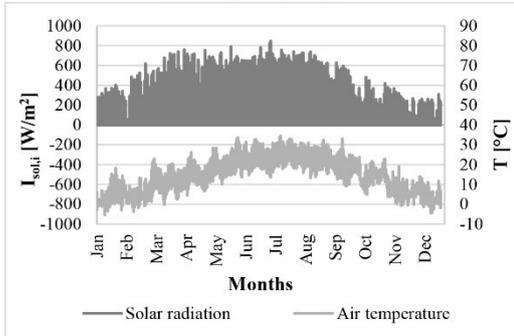


**Time series of internal surface**

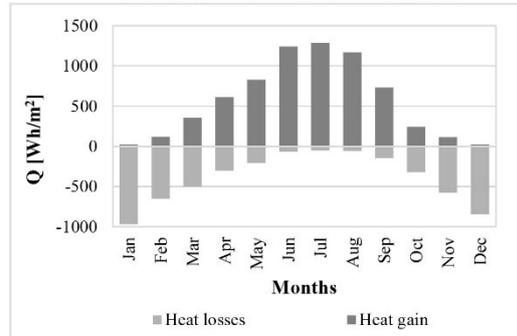


### Configurazione 1.2\_Ovest

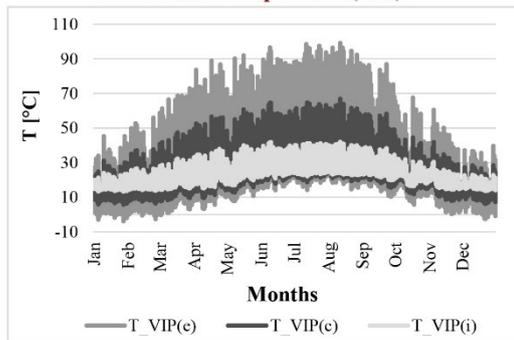
**Boundary conditions**



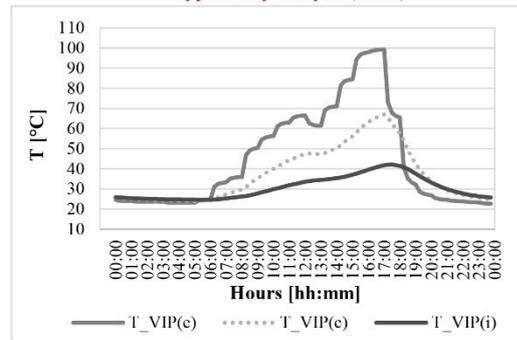
**Monthly analysis (interior surface)**



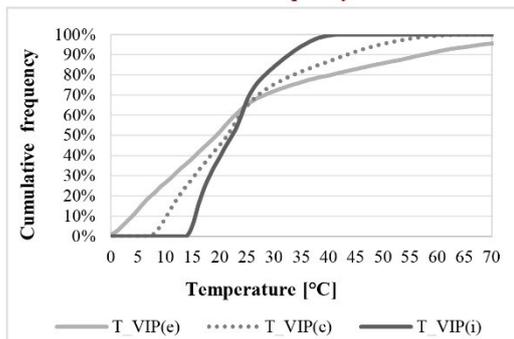
**Time series of temperature (VIP)**



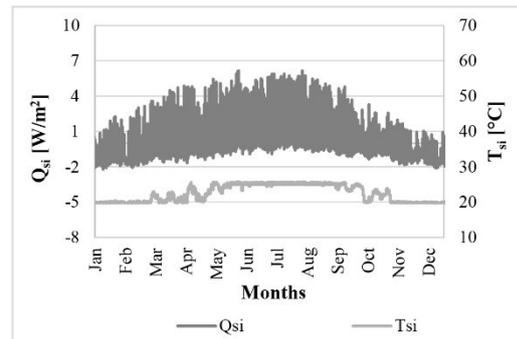
**Typical day analysis (12/08)**



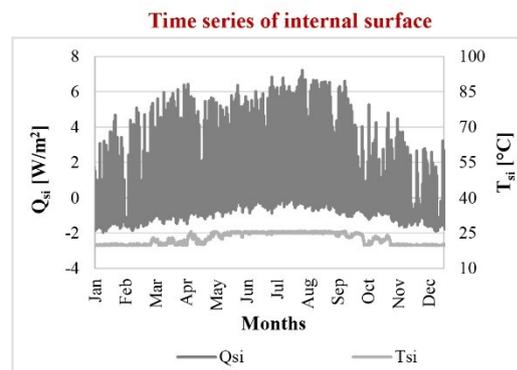
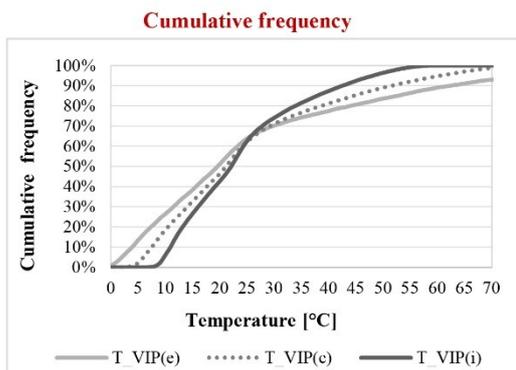
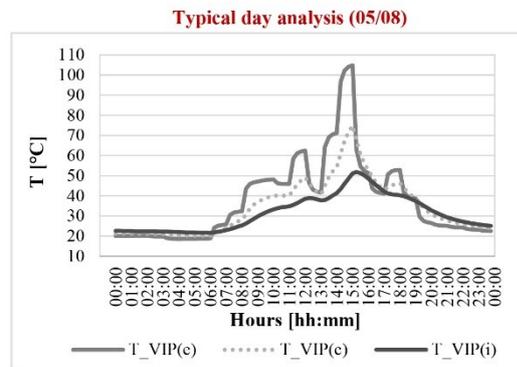
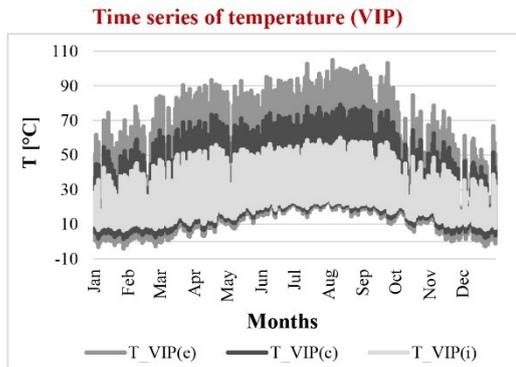
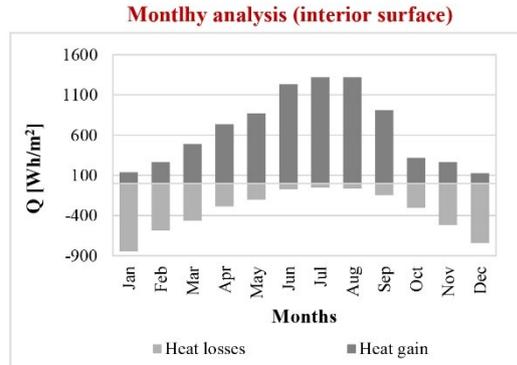
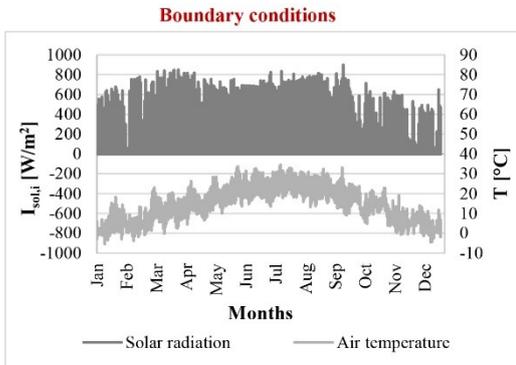
**Cumulative frequency**



**Time series of internal surface**

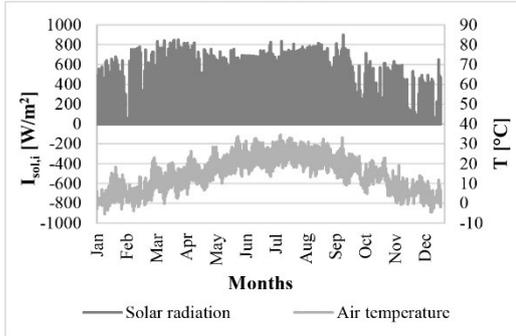


### Configurazione 1.3\_Sud Ovest

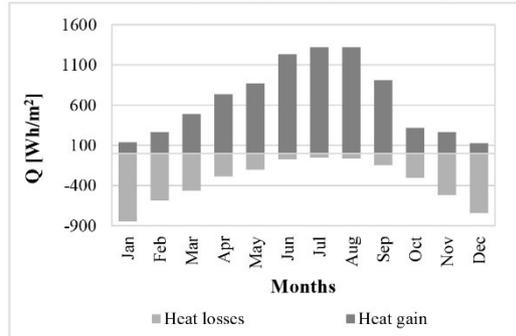


### Configurazione 1.3\_Sud

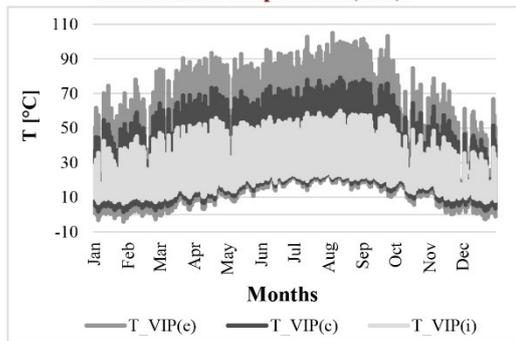
**Boundary conditions**



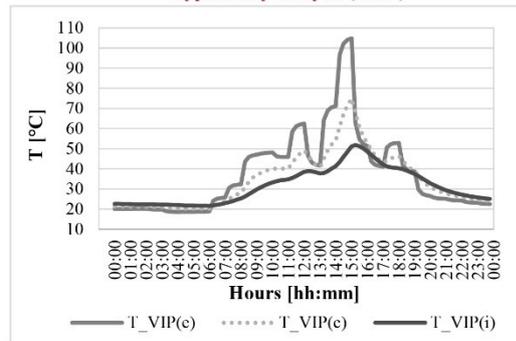
**Monthly analysis (interior surface)**



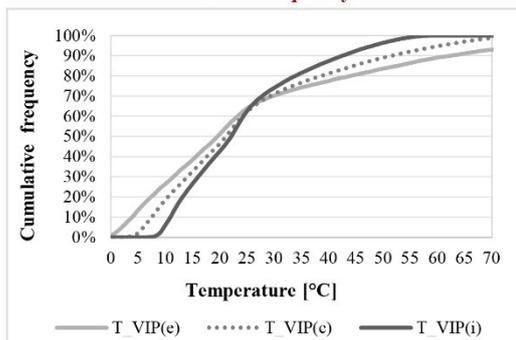
**Time series of temperature (VIP)**



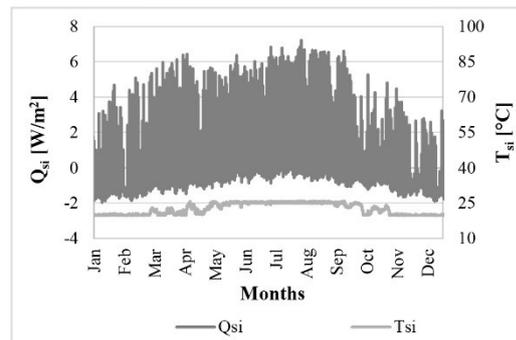
**Typical day analysis (05/08)**



**Cumulative frequency**

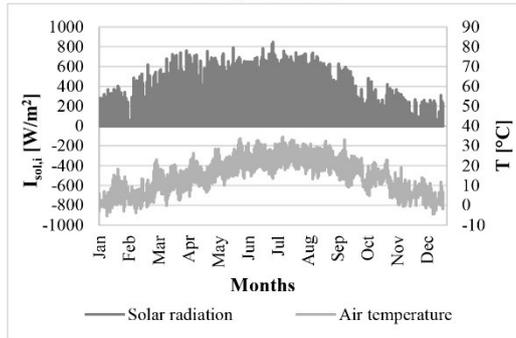


**Time series of internal surface**

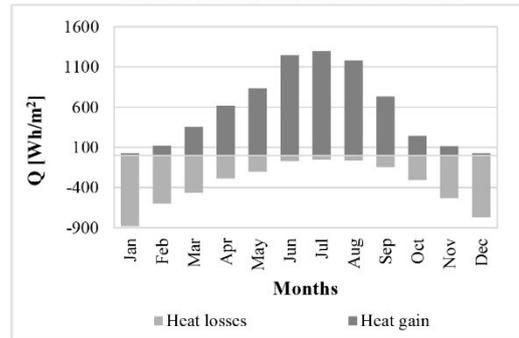


### Configurazione 1.3\_Ovest

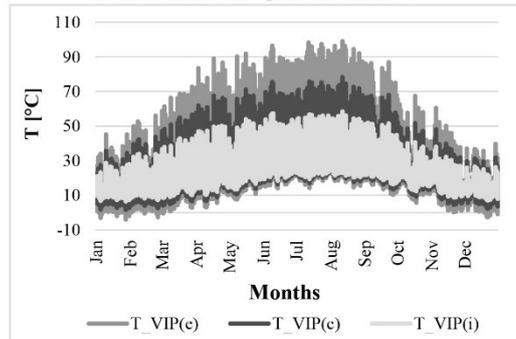
**Boundary conditions**



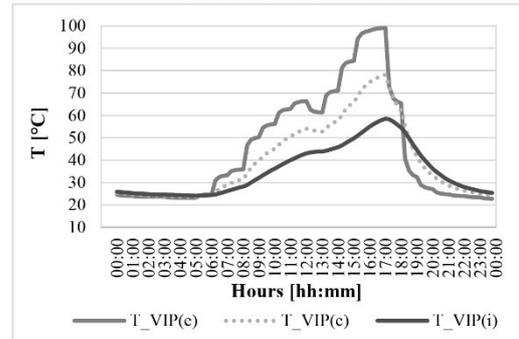
**Monthly analysis (interior surface)**



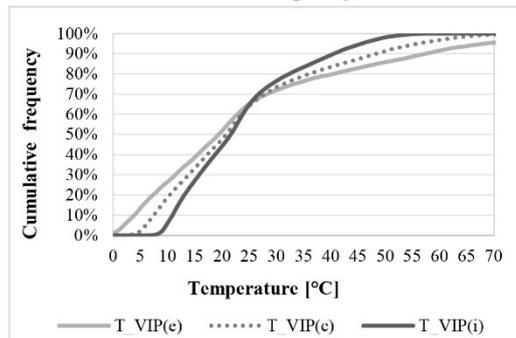
**Time series of temperature (VIP)**



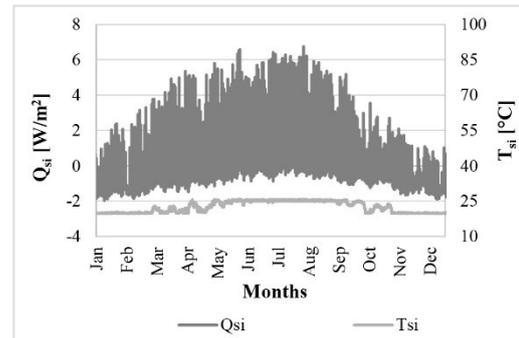
**Typical day analysis (12/08)**



**Cumulative frequency**

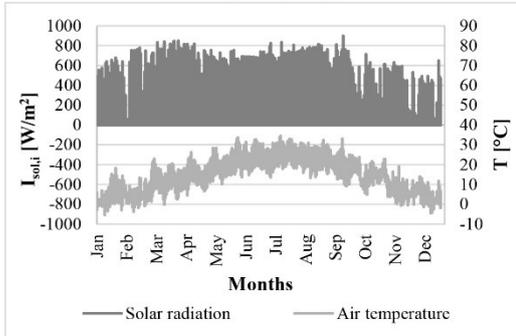


**Time series of internal surface**

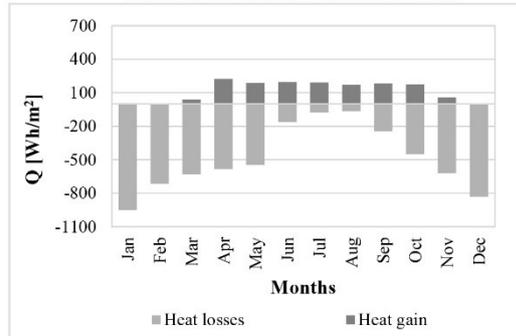


### Configurazione 2.1.1\_Sud Ovest

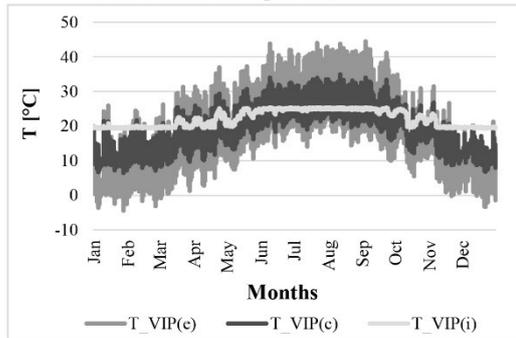
**Boundary conditions**



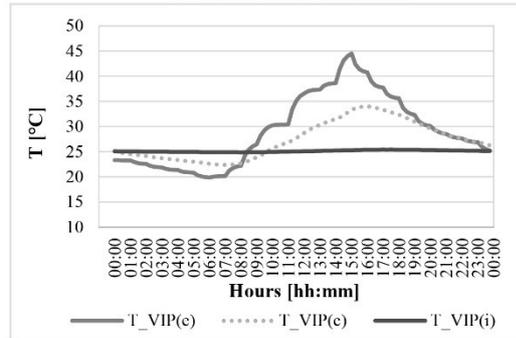
**Monthly analysis (interior surface)**



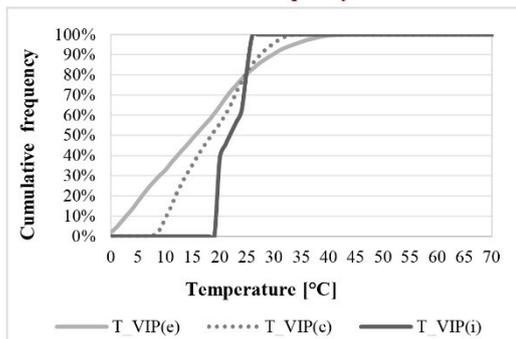
**Time series of temperature (VIP)**



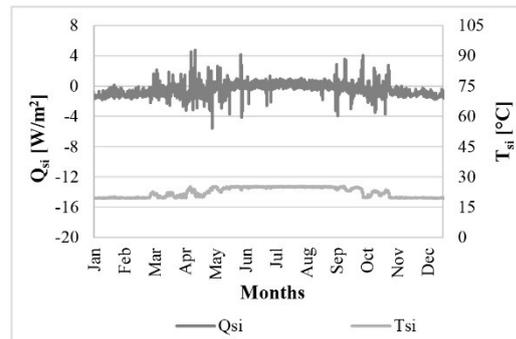
**Typical day analysis (04/09)**

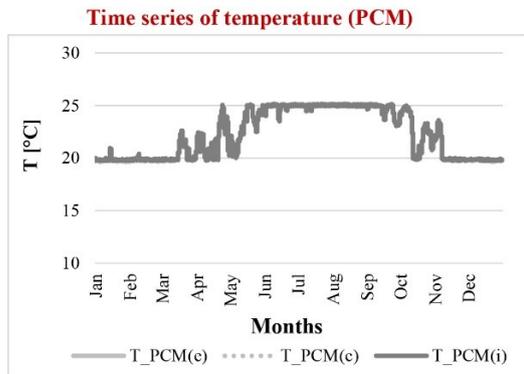


**Cumulative frequency**

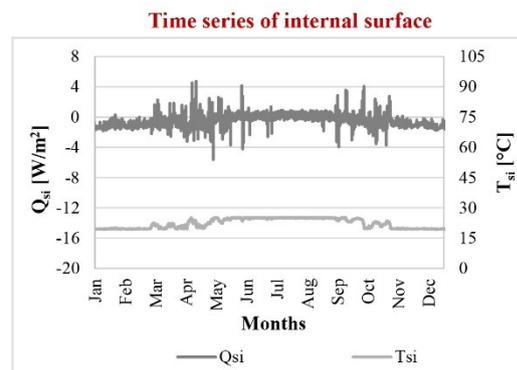
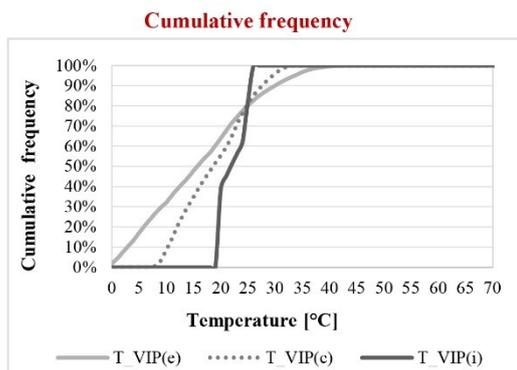
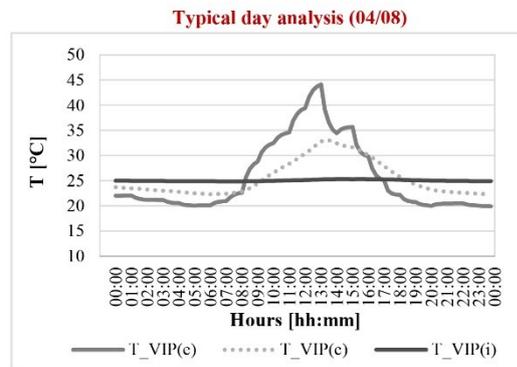
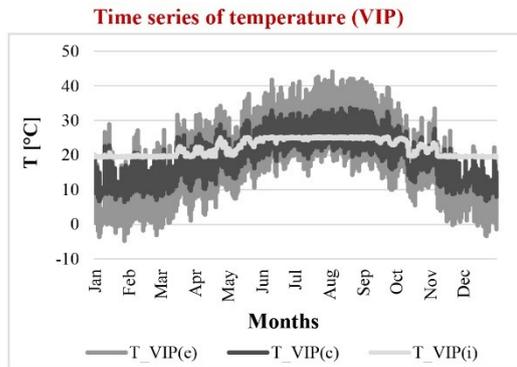
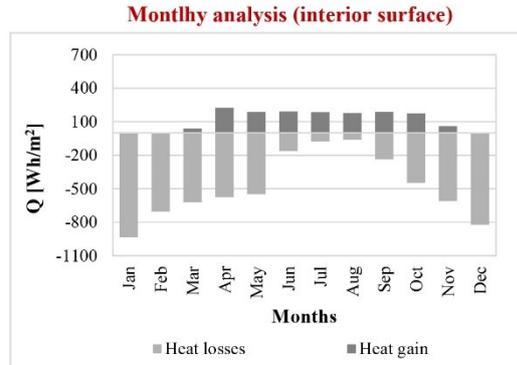
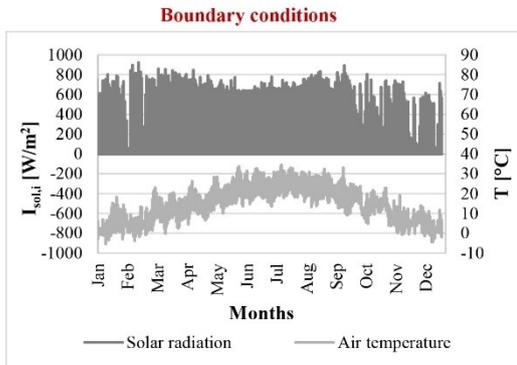


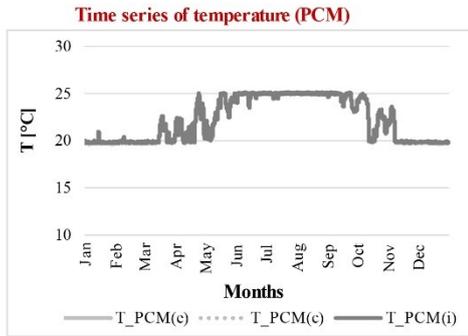
**Time series of internal surface**



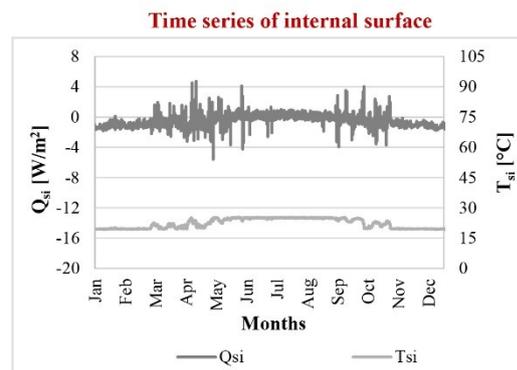
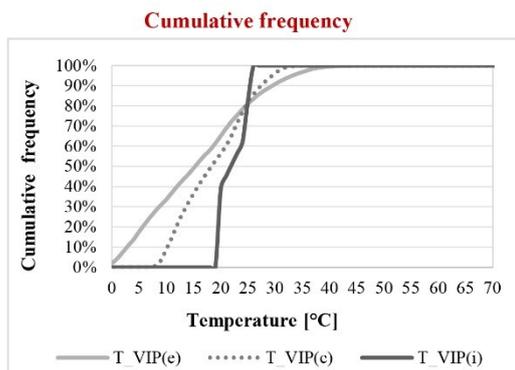
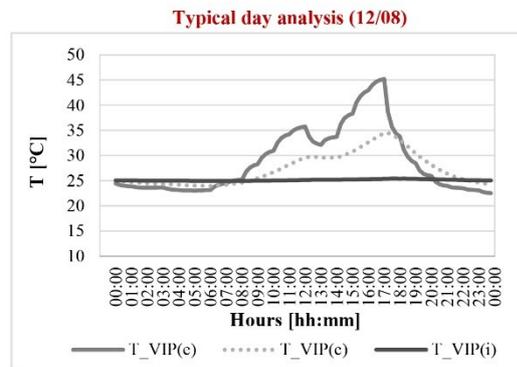
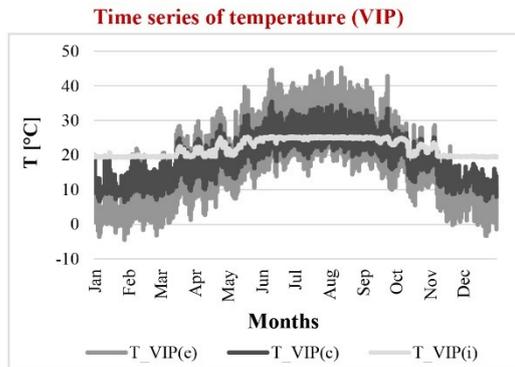
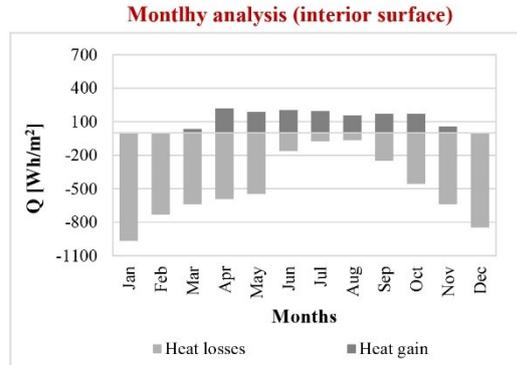
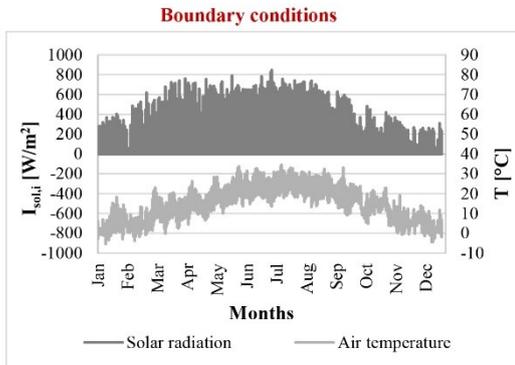


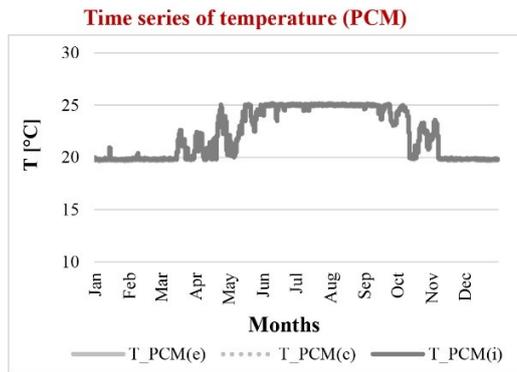
### Configurazione 2.1.1\_Sud



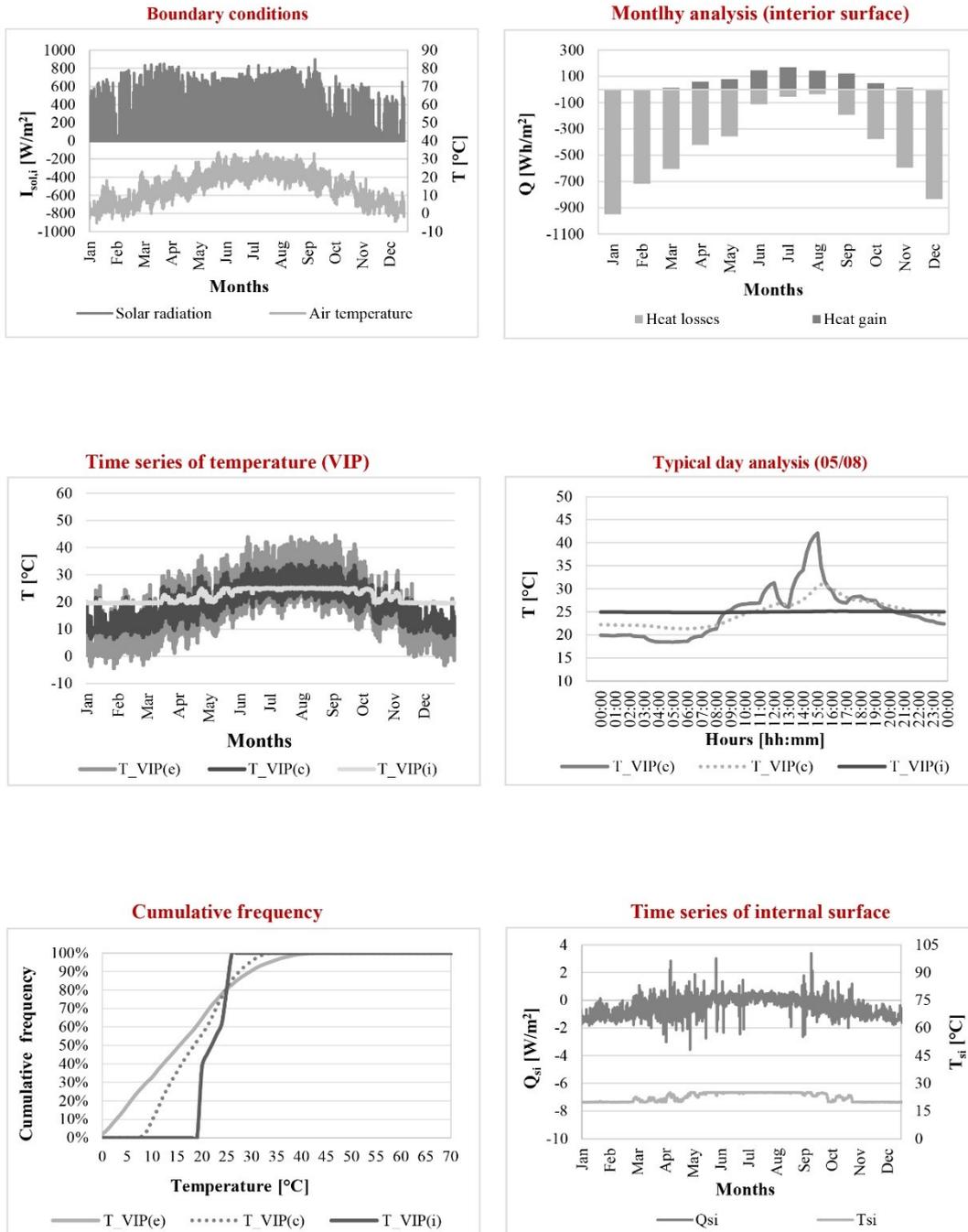


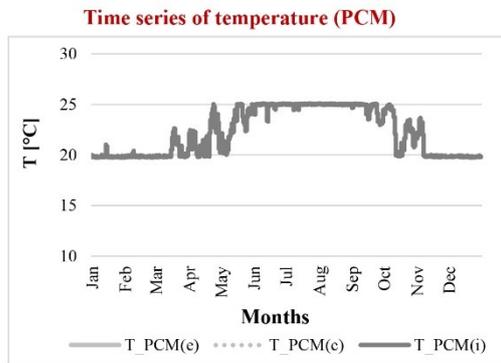
### Configurazione 2.1.1\_Ovest





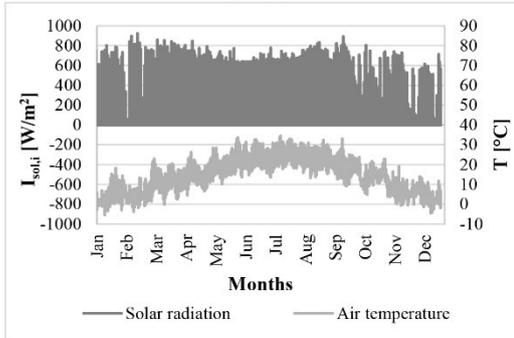
### Configurazione 2.1.2\_Sud Ovest



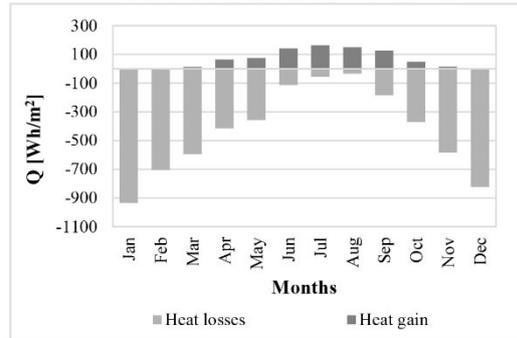


### Configurazione 2.1.2\_Sud

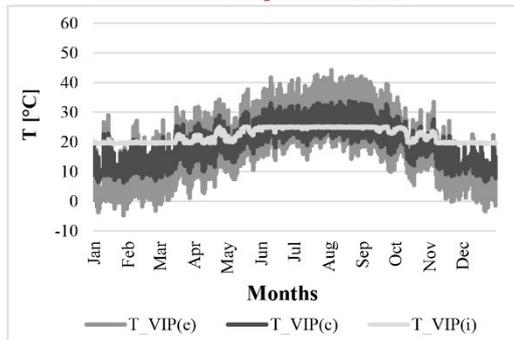
**Boundary conditions**



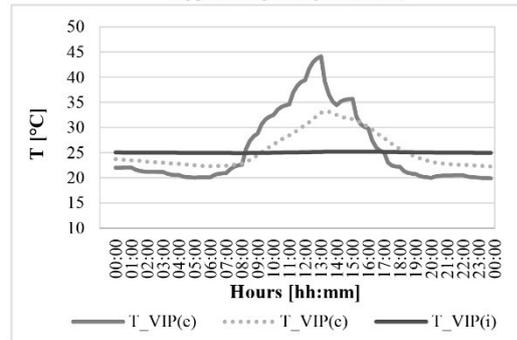
**Monthly analysis (interior surface)**



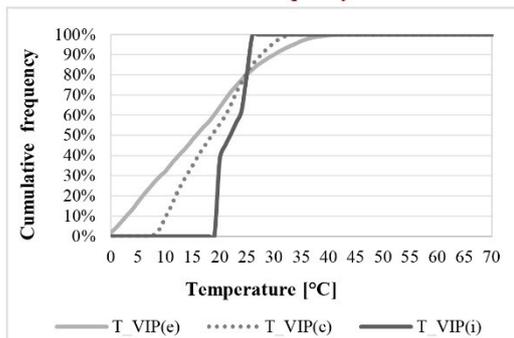
**Time series of temperature (VIP)**



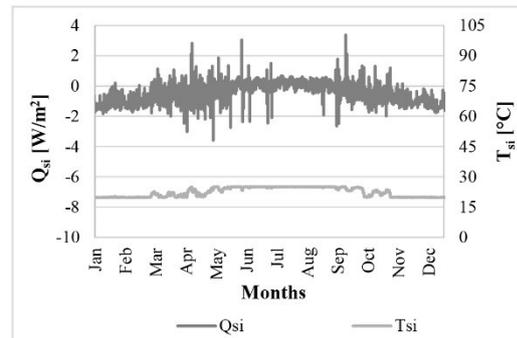
**Typical day analysis (04/08)**

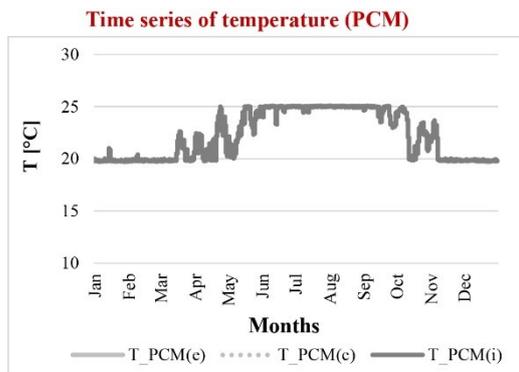


**Cumulative frequency**



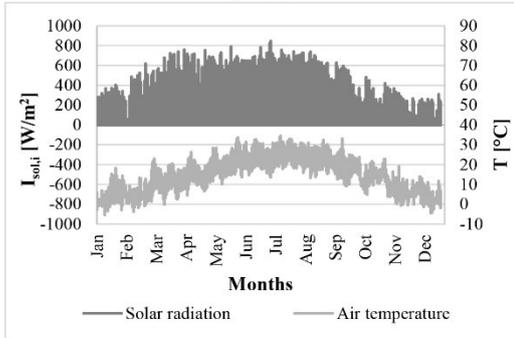
**Time series of internal surface**



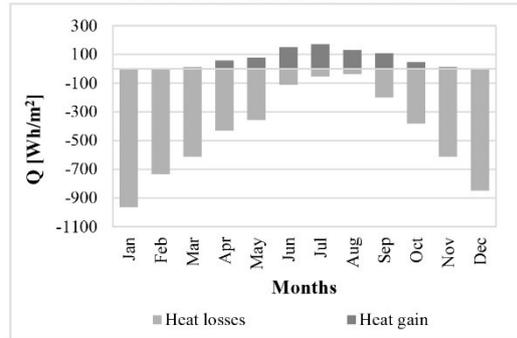


### Configurazione 2.1.2\_Ovest

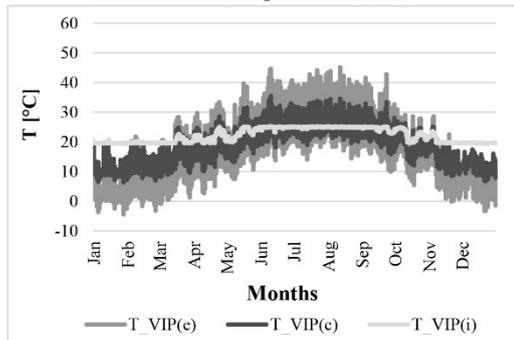
**Boundary conditions**



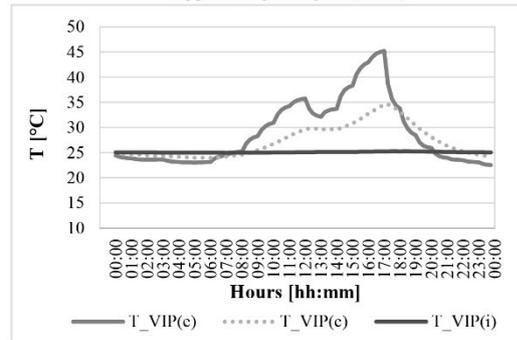
**Monthly analysis (interior surface)**



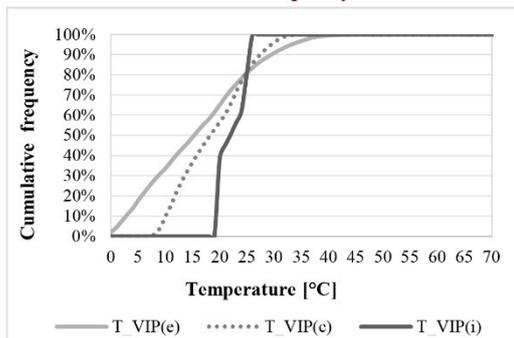
**Time series of temperature (VIP)**



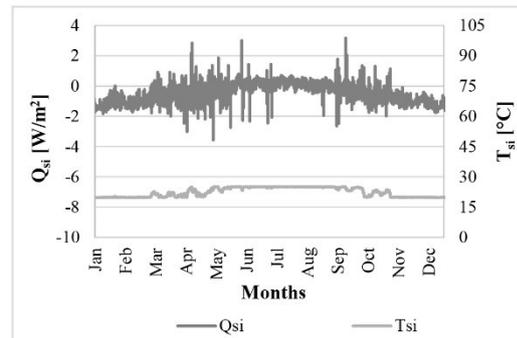
**Typical day analysis (12/08)**

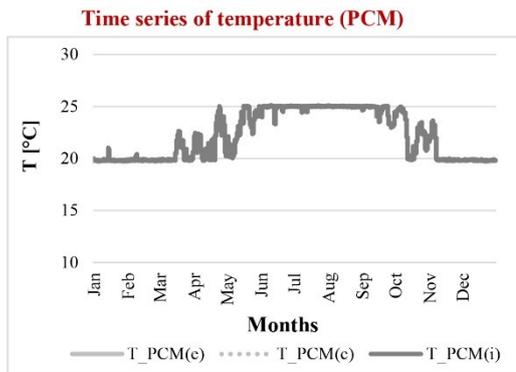


**Cumulative frequency**



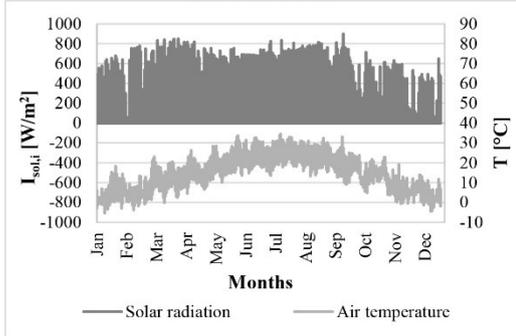
**Time series of internal surface**



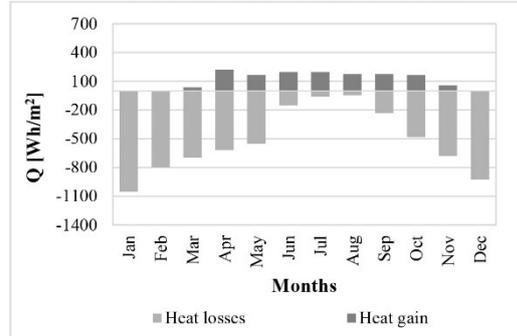


### Configurazione 2.2.1\_Sud Ovest

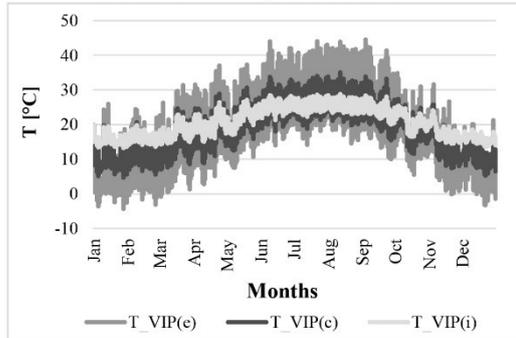
**Boundary conditions**



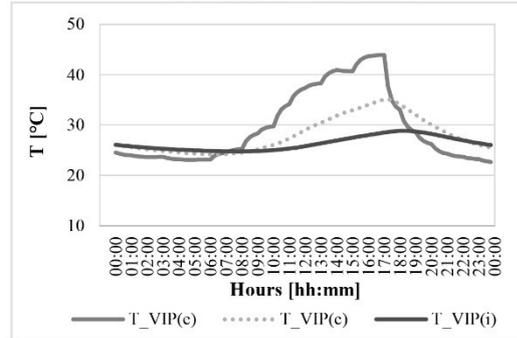
**Monthly analysis (interior surface)**



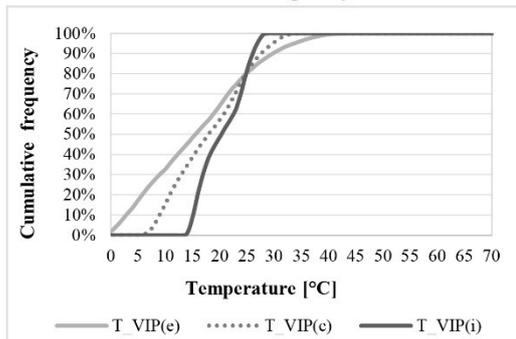
**Time series of temperature (VIP)**



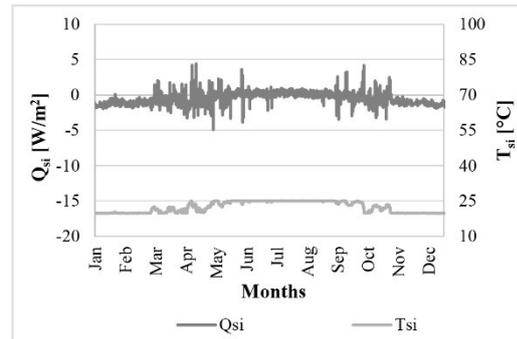
**Typical day analysis (12/08)**

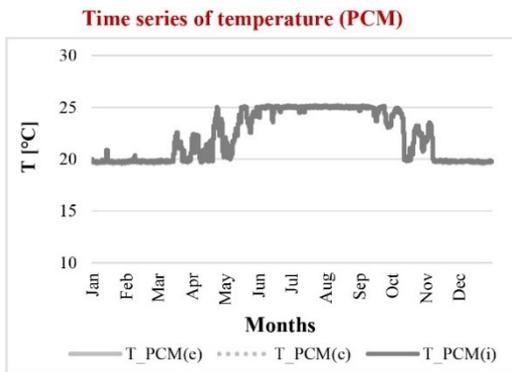


**Cumulative frequency**



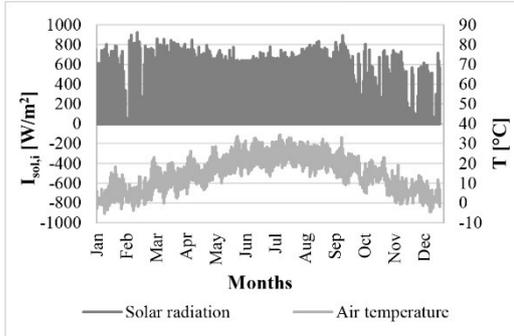
**Time series of internal surface**



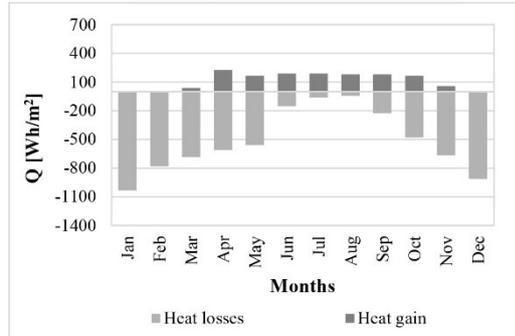


### Configurazione 2.2.1\_Sud

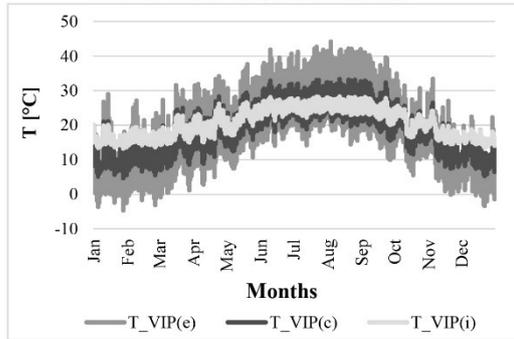
**Boundary conditions**



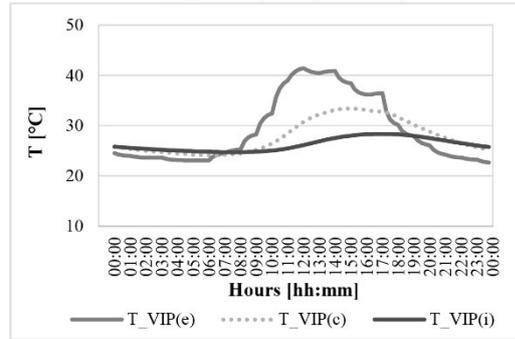
**Monthly analysis (interior surface)**



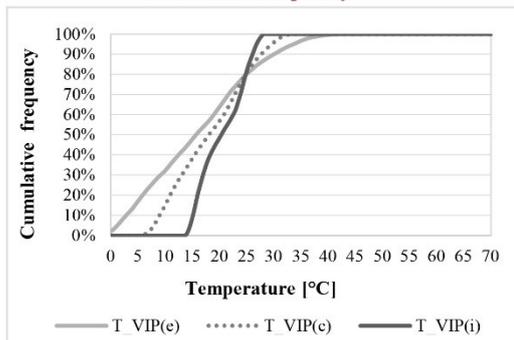
**Time series of temperature (VIP)**



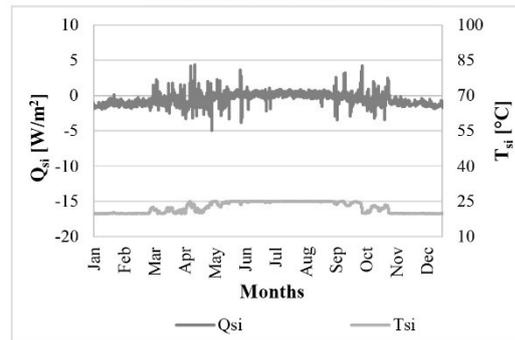
**Typical day analysis (12/08)**

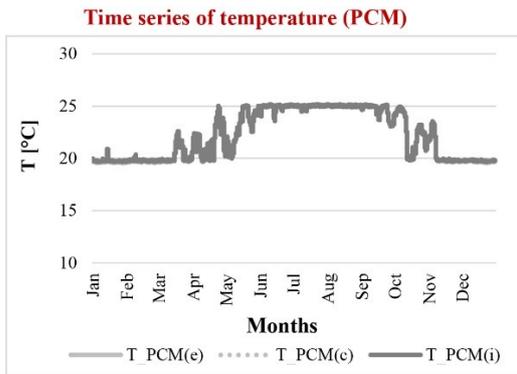


**Cumulative frequency**



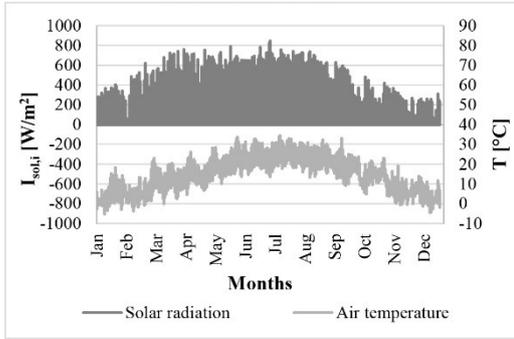
**Time series of internal surface**



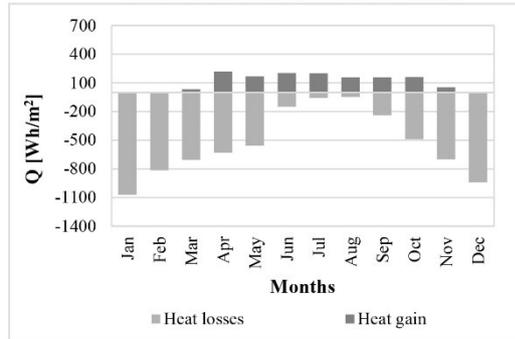


### Configurazione 2.2.1\_Ovest

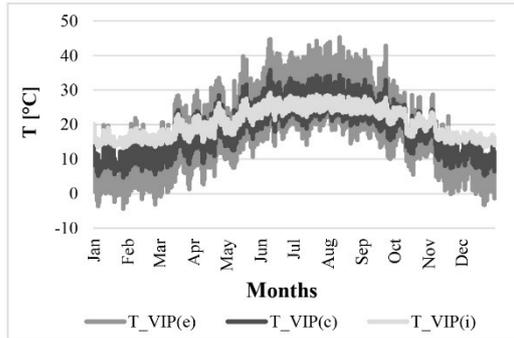
**Boundary conditions**



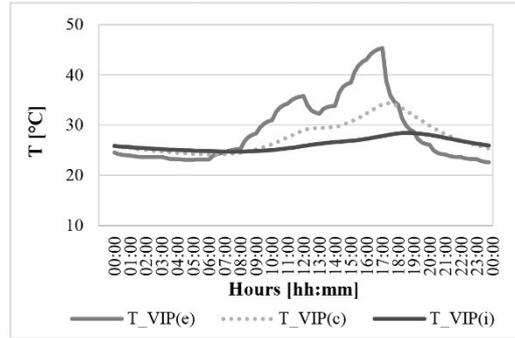
**Monthly analysis (interior surface)**



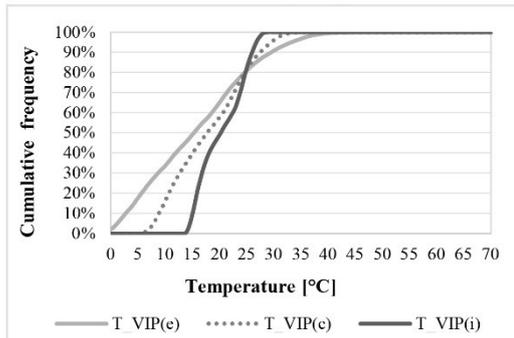
**Time series of temperature (VIP)**



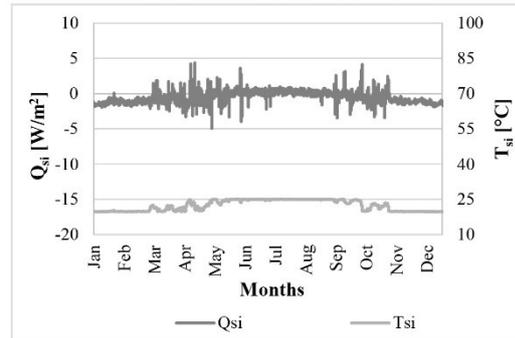
**Typical day analysis (12/08)**

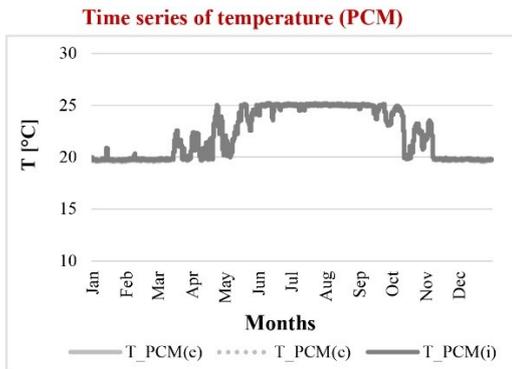


**Cumulative frequency**



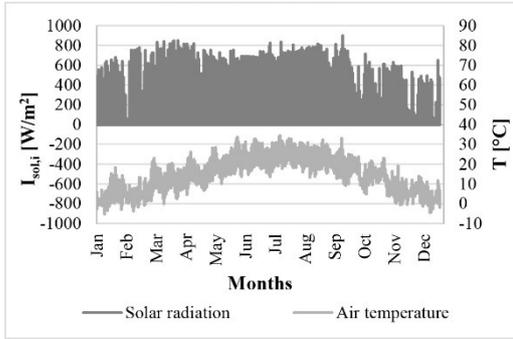
**Time series of internal surface**



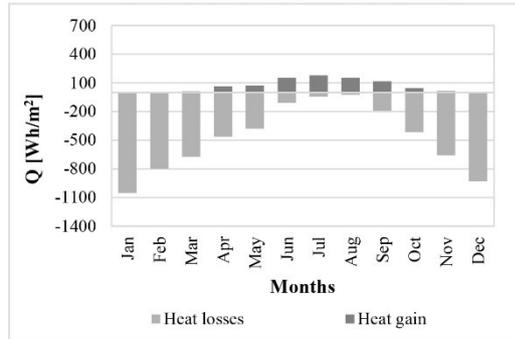


### Configurazione 2.2.2\_Sud Ovest

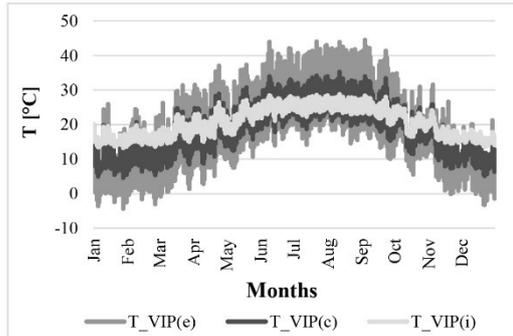
**Boundary conditions**



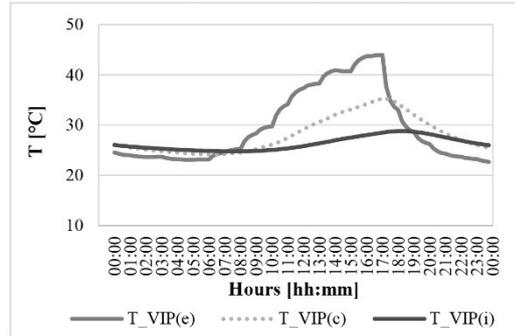
**Monthly analysis (interior surface)**



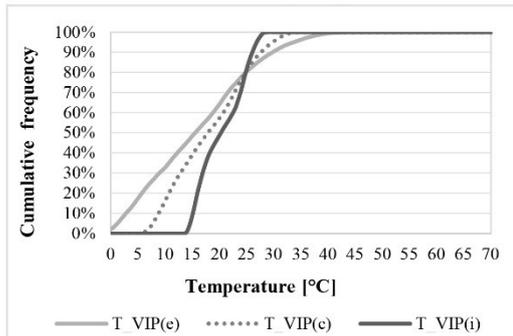
**Time series of temperature (VIP)**



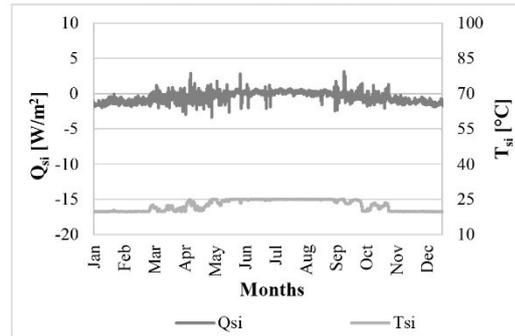
**Typical day analysis (12/08)**

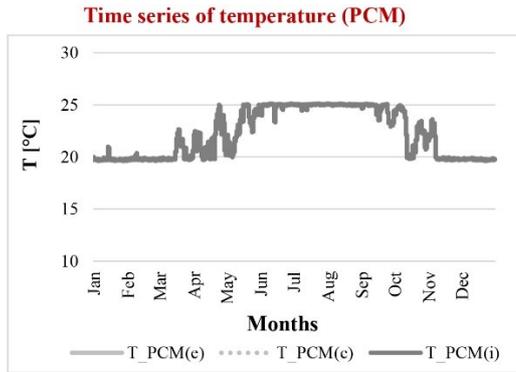


**Cumulative frequency**



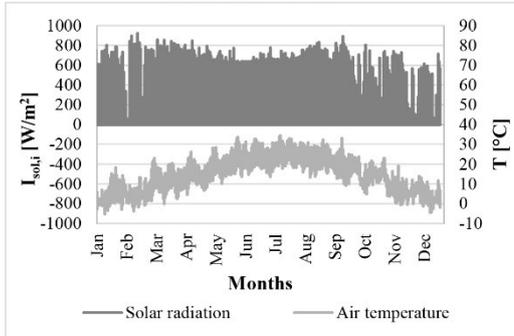
**Time series of internal surface**



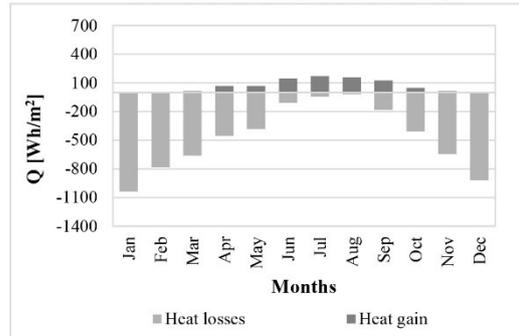


### Configurazione 2.2.2\_Sud

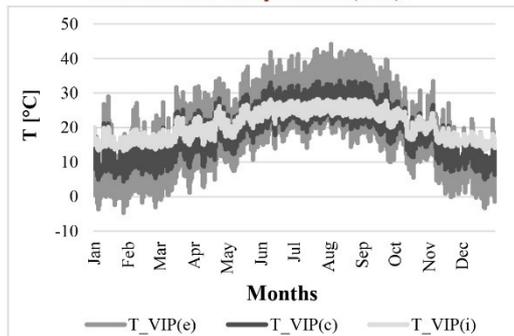
**Boundary conditions**



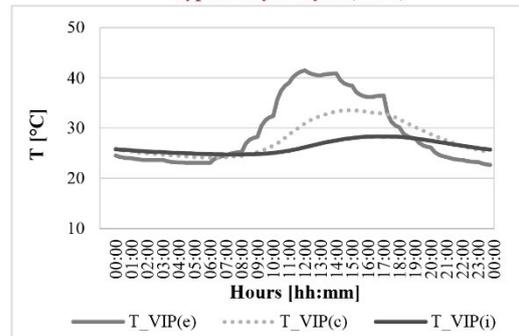
**Monthly analysis (interior surface)**



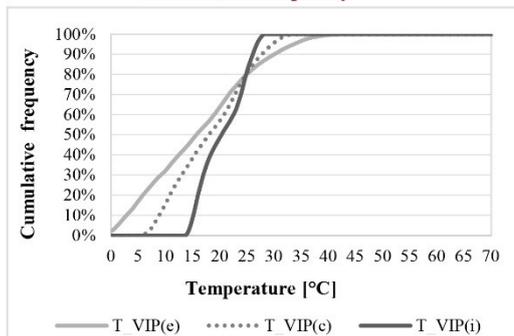
**Time series of temperature (VIP)**



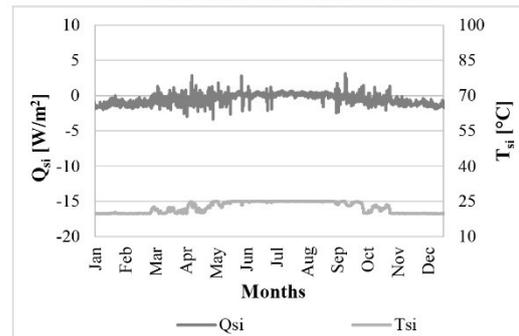
**Typical day analysis (12/08)**

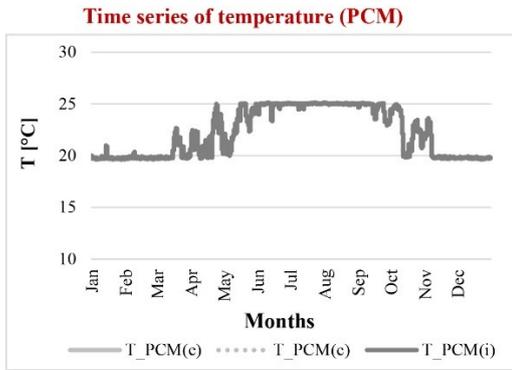


**Cumulative frequency**



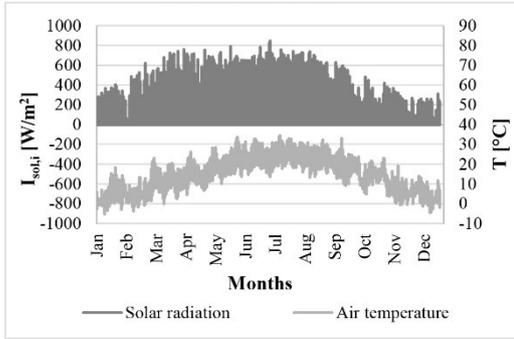
**Time series of internal surface**



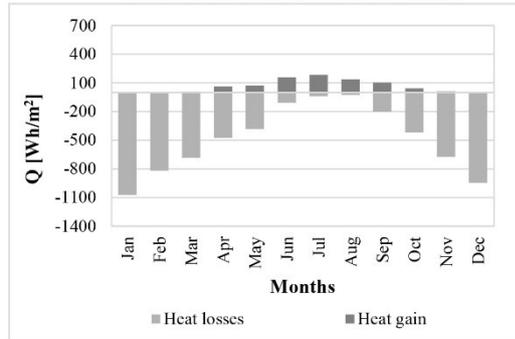


### Configurazione 2.2.2\_Ovest

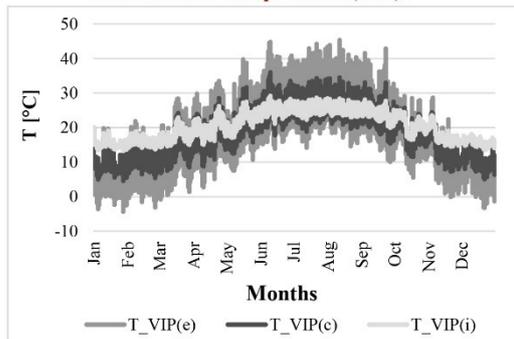
**Boundary conditions**



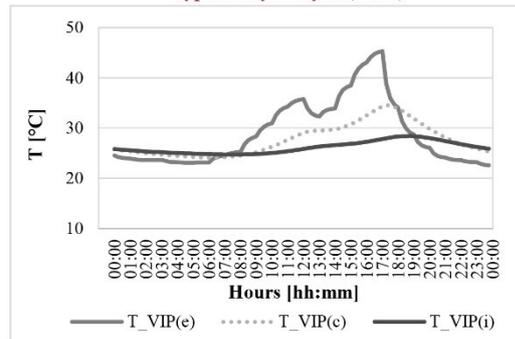
**Monthly analysis (interior surface)**



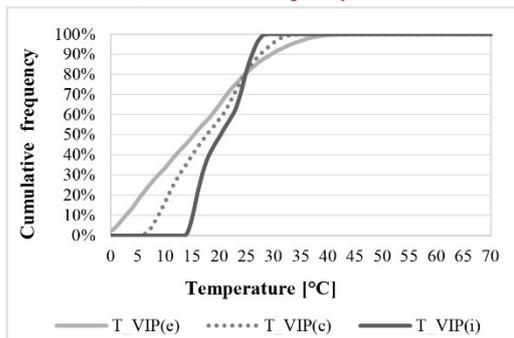
**Time series of temperature (VIP)**



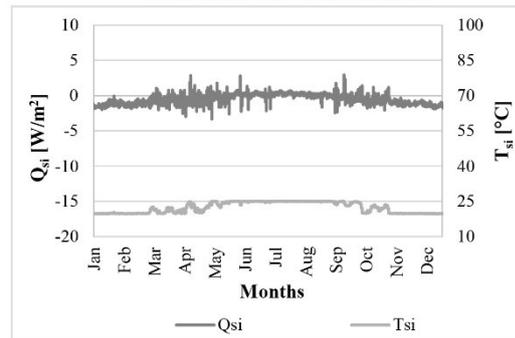
**Typical day analysis (12/08)**

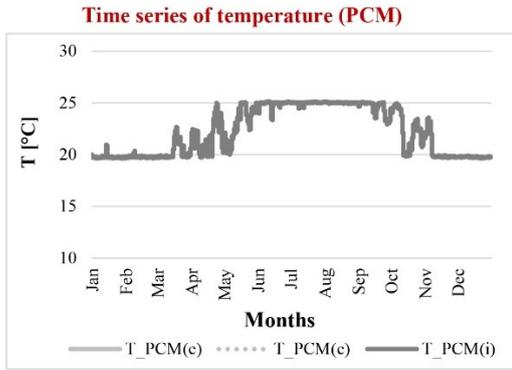


**Cumulative frequency**



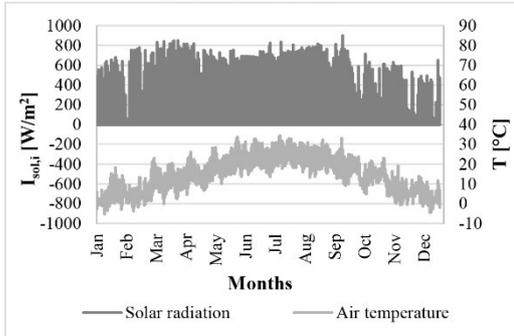
**Time series of internal surface**



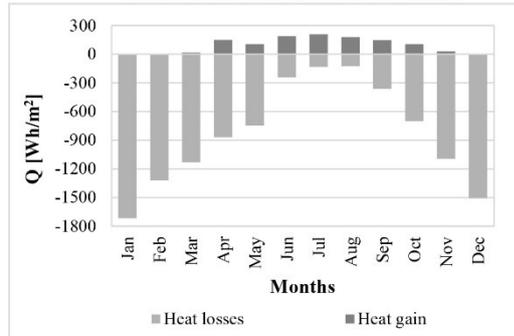


### Configurazione 2.3.1\_Sud Ovest

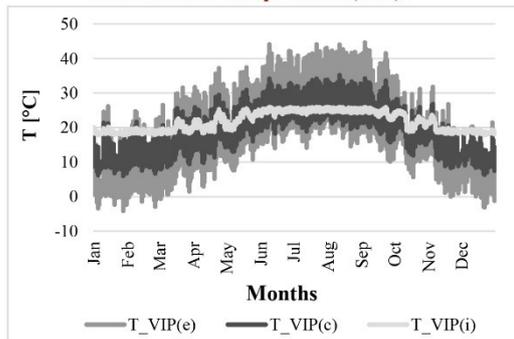
**Boundary conditions**



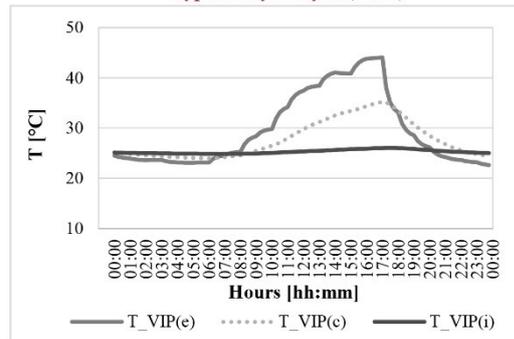
**Monthly analysis (interior surface)**



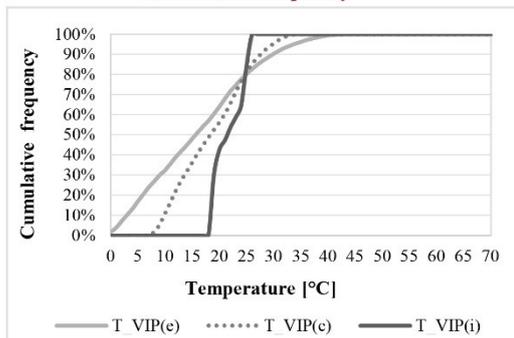
**Time series of temperature (VIP)**



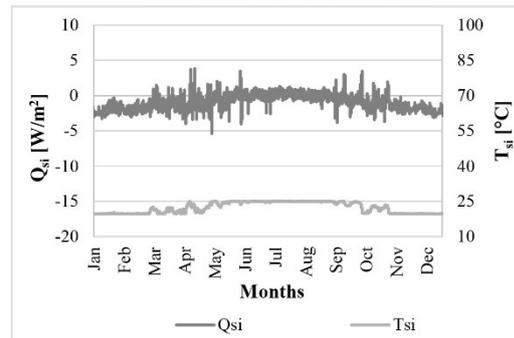
**Typical day analysis (12/08)**

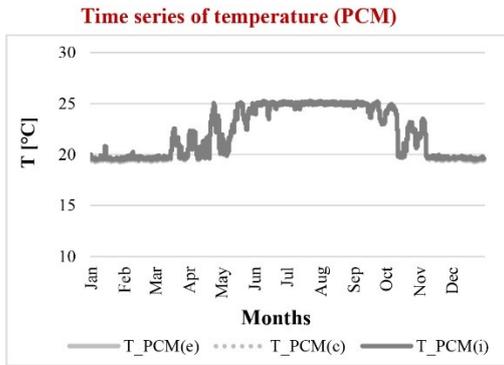


**Cumulative frequency**



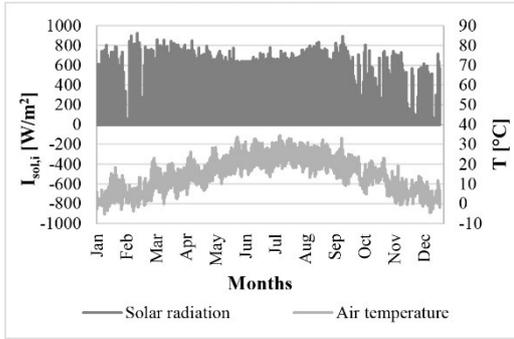
**Time series of internal surface**



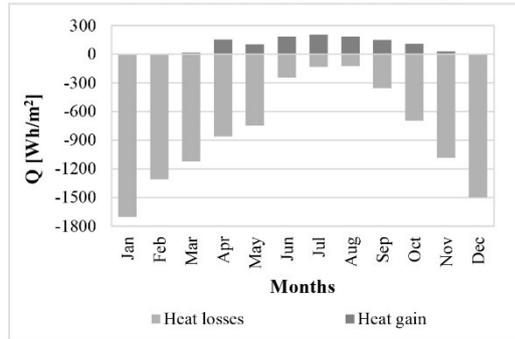


### Configurazione 2.3.1\_Sud

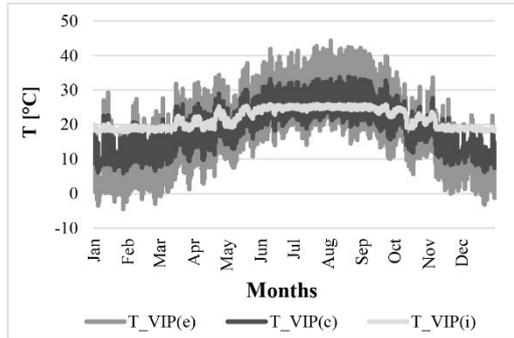
**Boundary conditions**



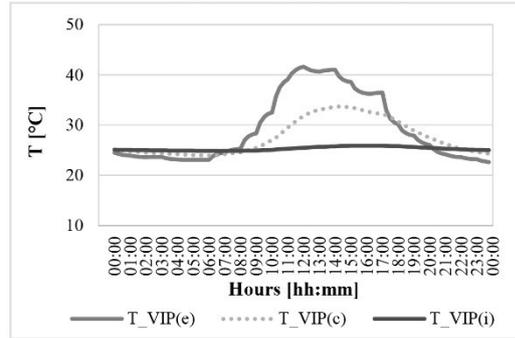
**Monthly analysis (interior surface)**



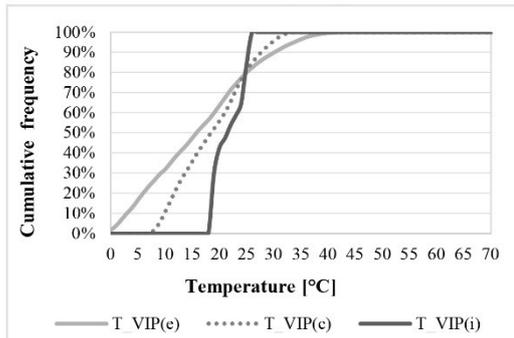
**Time series of temperature (VIP)**



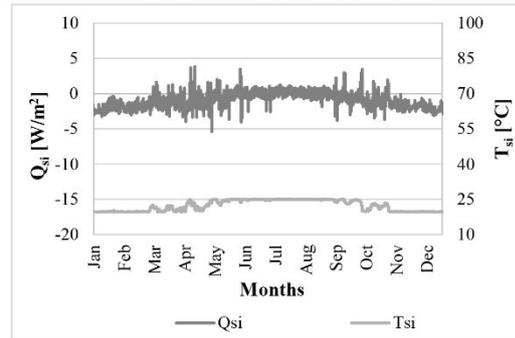
**Typical day analysis (12/08)**

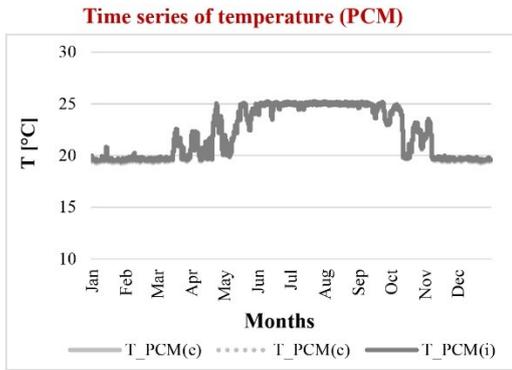


**Cumulative frequency**



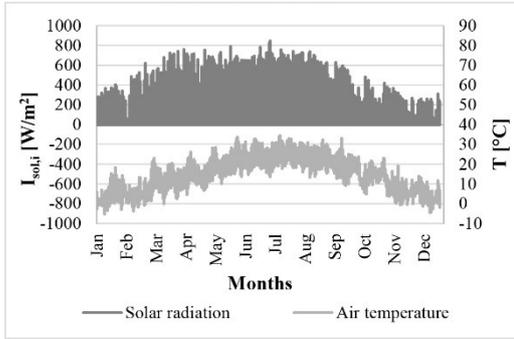
**Time series of internal surface**



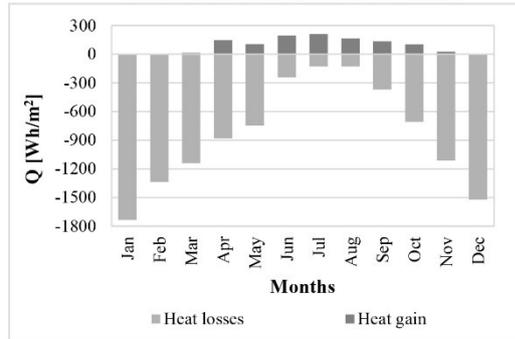


### Configurazione 2.3.1\_Ovest

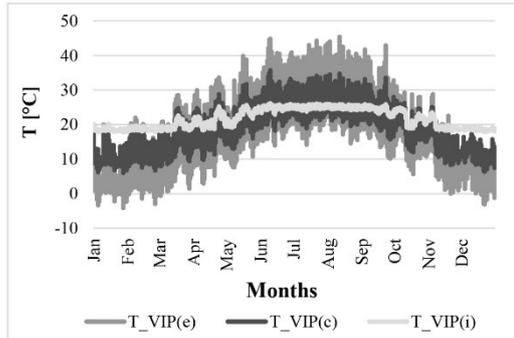
**Boundary conditions**



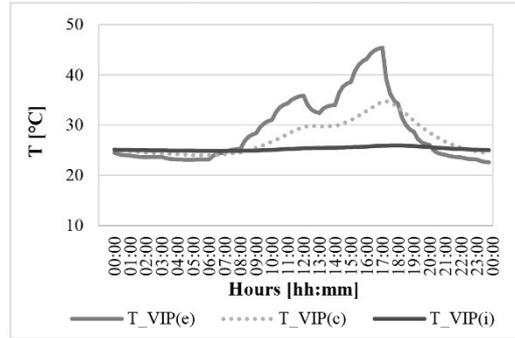
**Monthly analysis (interior surface)**



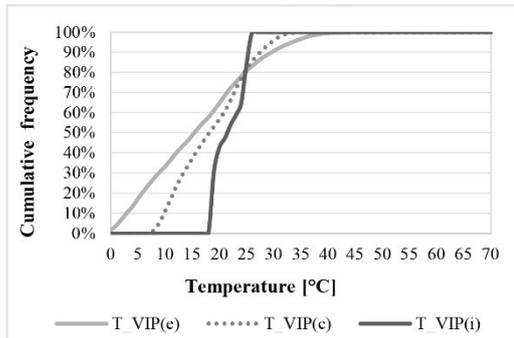
**Time series of temperature (VIP)**



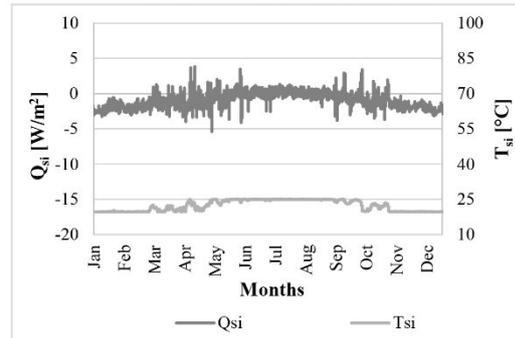
**Typical day analysis (12/08)**

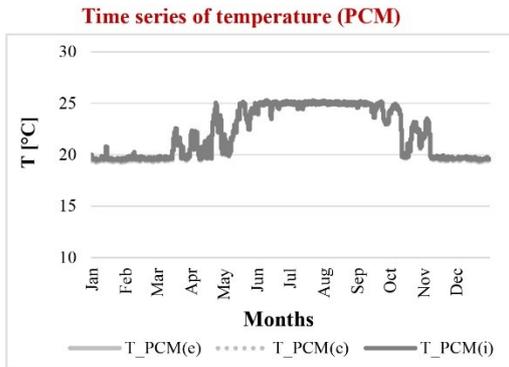


**Cumulative frequency**



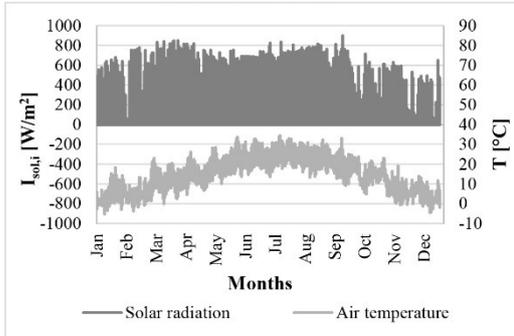
**Time series of internal surface**



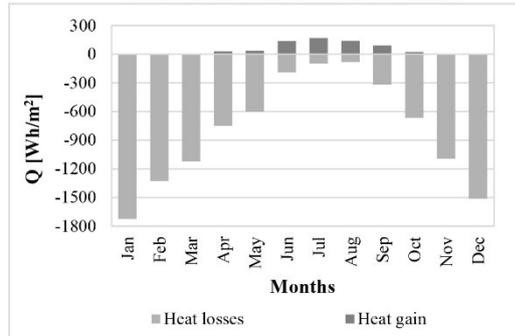


### Configurazione 2.3.2\_Sud Ovest

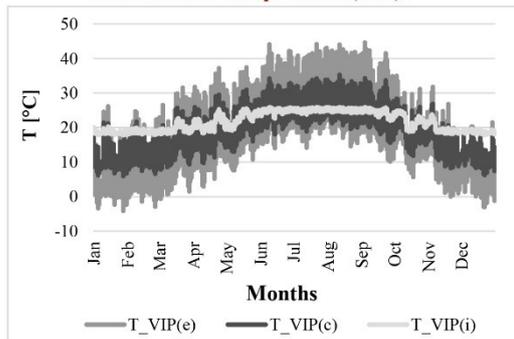
**Boundary conditions**



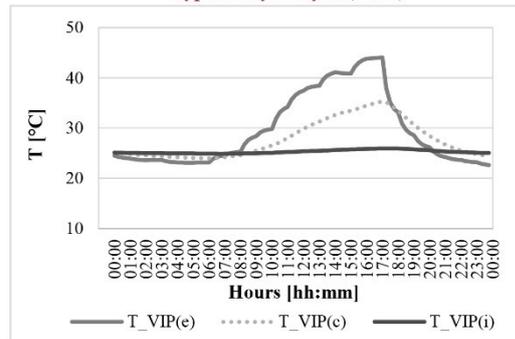
**Monthly analysis (interior surface)**



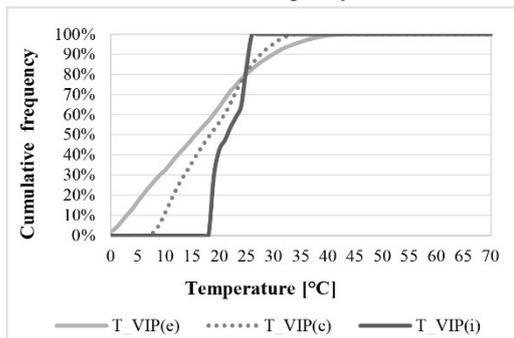
**Time series of temperature (VIP)**



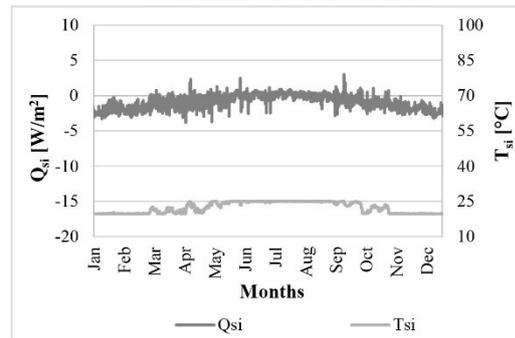
**Typical day analysis (12/08)**

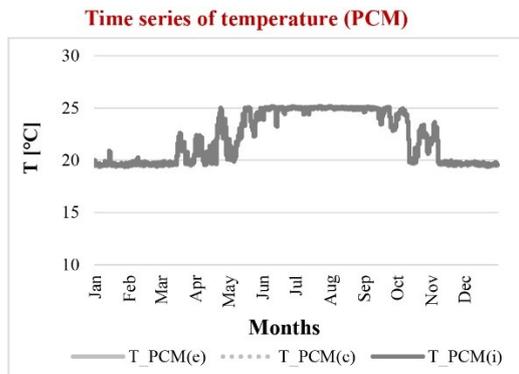


**Cumulative frequency**



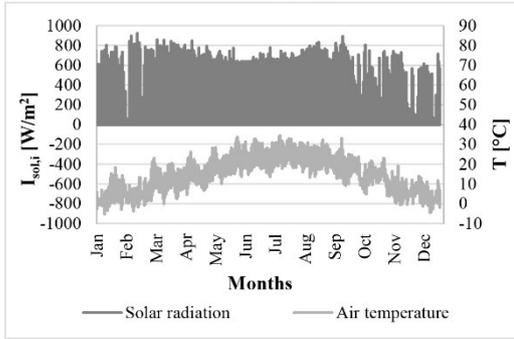
**Time series of internal surface**



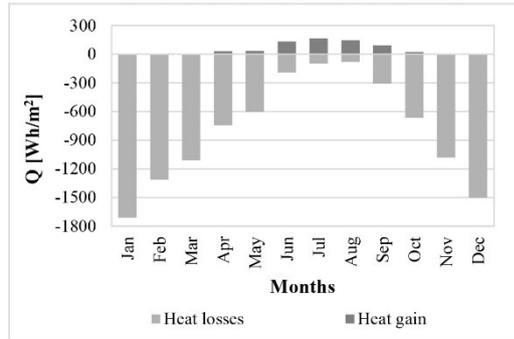


### Configurazione 2.3.2\_Sud

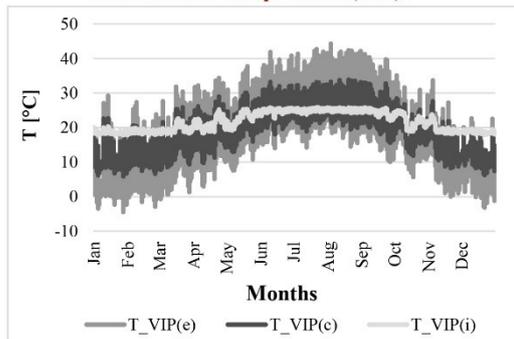
**Boundary conditions**



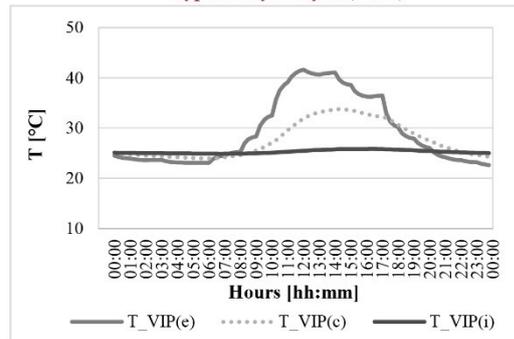
**Monthly analysis (interior surface)**



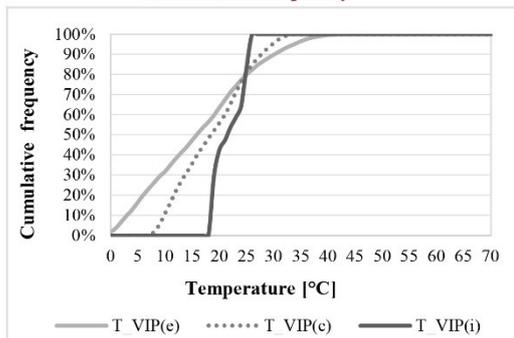
**Time series of temperature (VIP)**



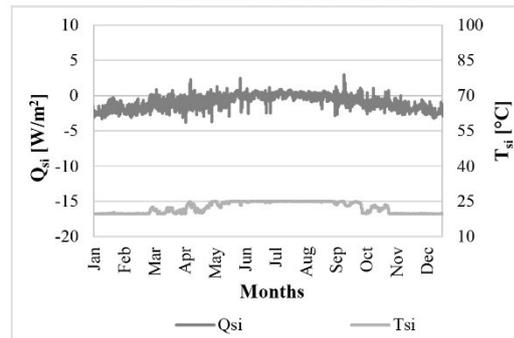
**Typical day analysis (12/08)**

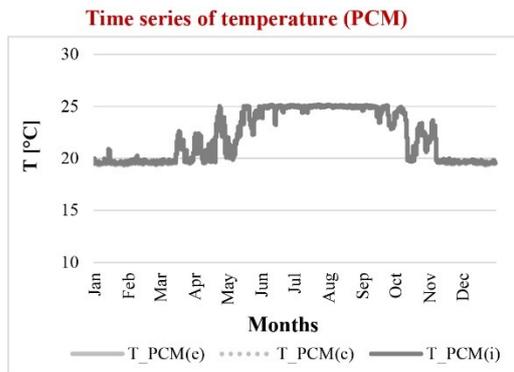


**Cumulative frequency**



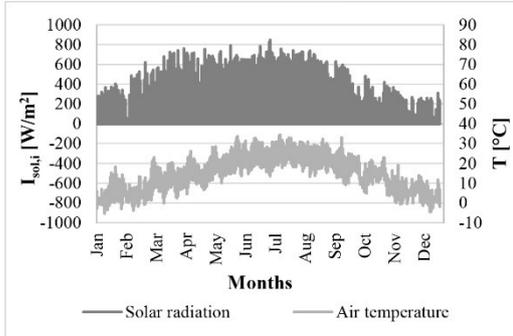
**Time series of internal surface**



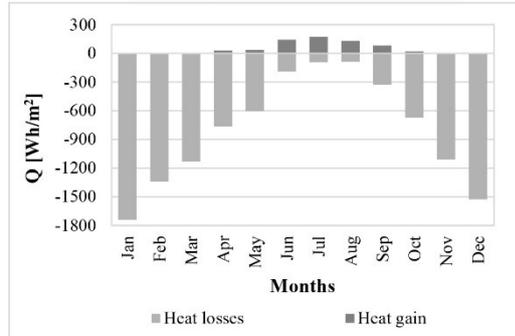


### Configurazione 2.3.2\_Ovest

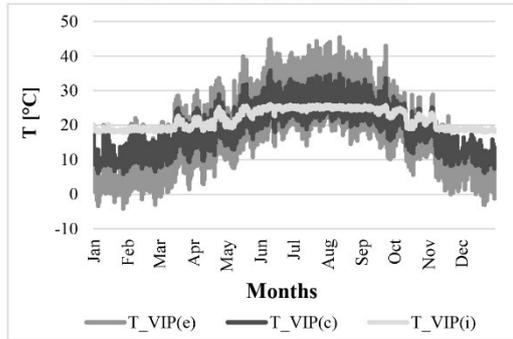
**Boundary conditions**



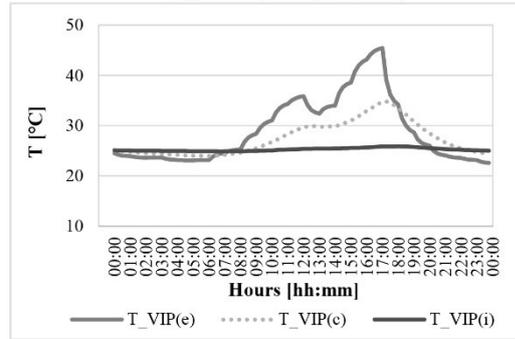
**Monthly analysis (interior surface)**



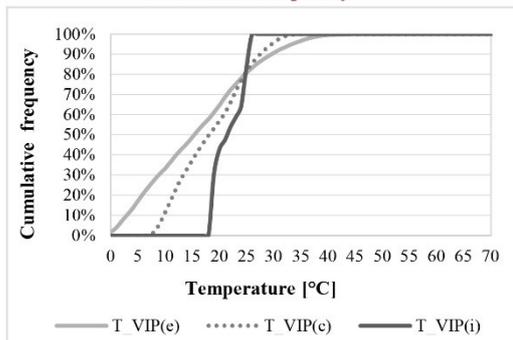
**Time series of temperature (VIP)**



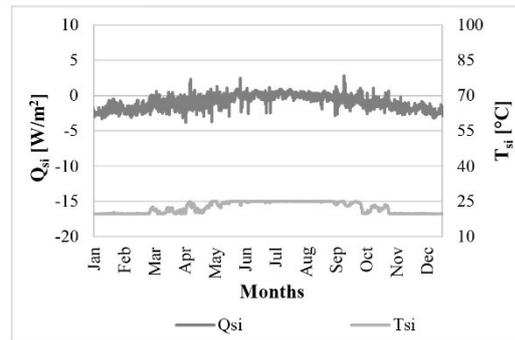
**Typical day analysis (12/08)**

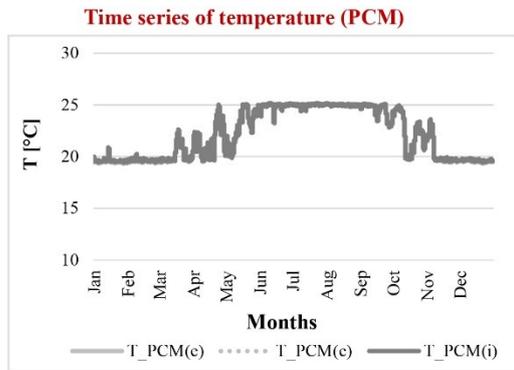


**Cumulative frequency**

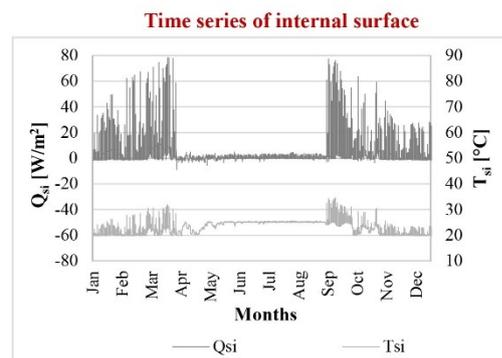
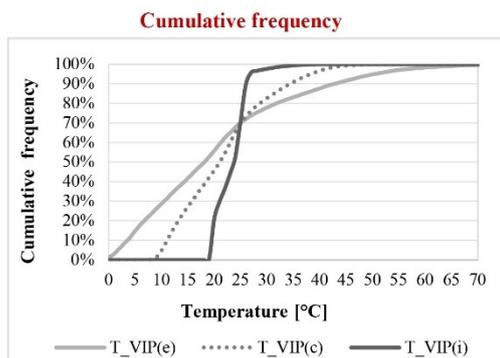
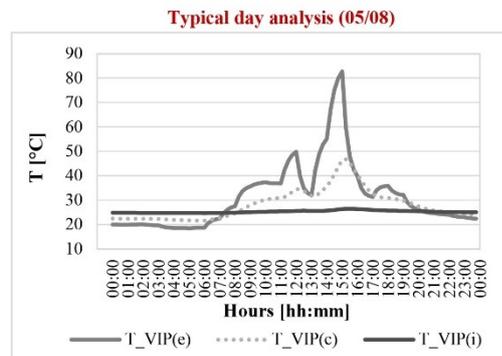
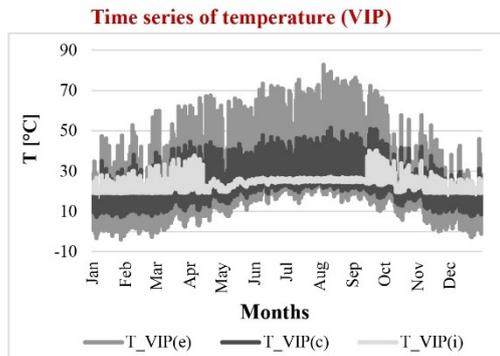
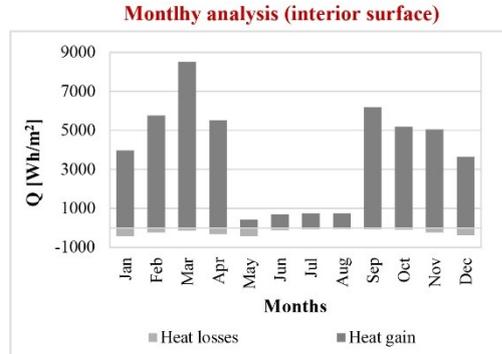
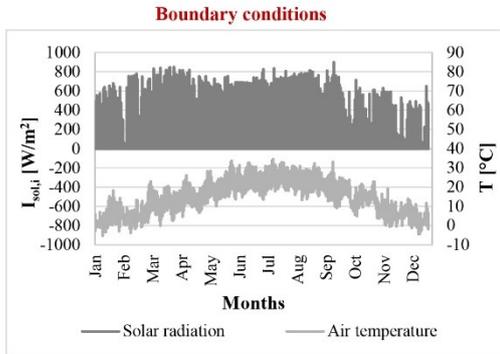


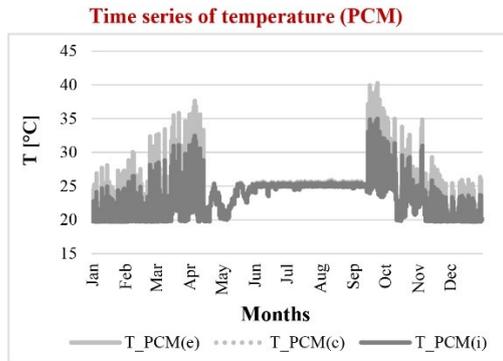
**Time series of internal surface**





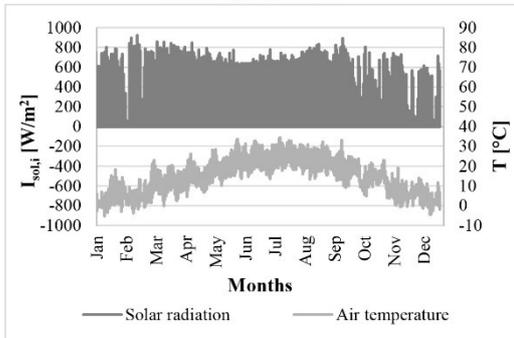
### Configurazione 3.1.1\_Sud Ovest



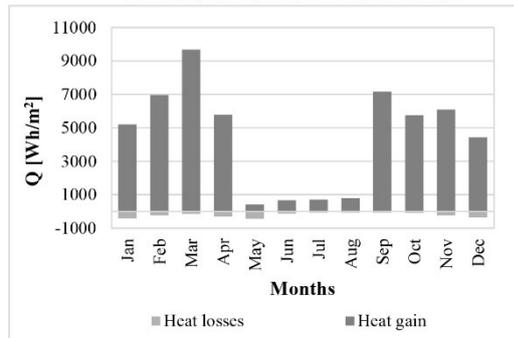


### Configurazione 3.1.1\_Sud

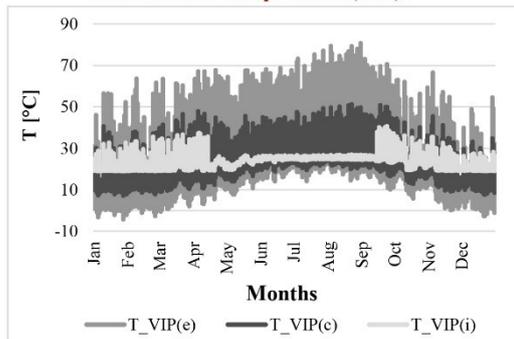
**Boundary conditions**



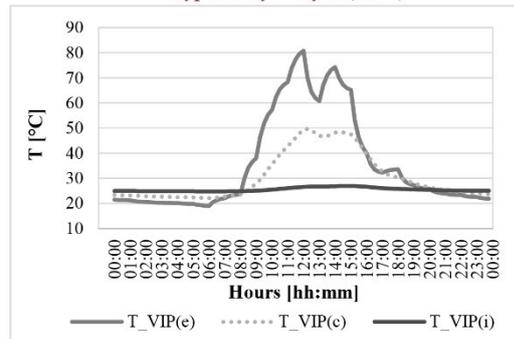
**Monthly analysis (interior surface)**



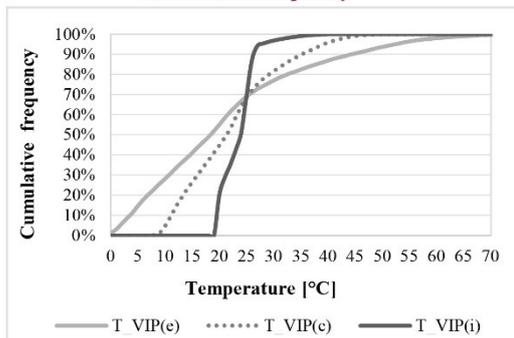
**Time series of temperature (VIP)**



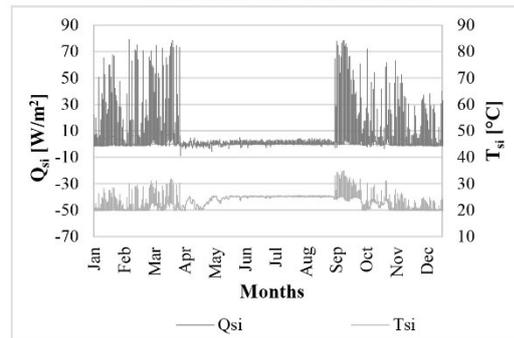
**Typical day analysis (31/08)**

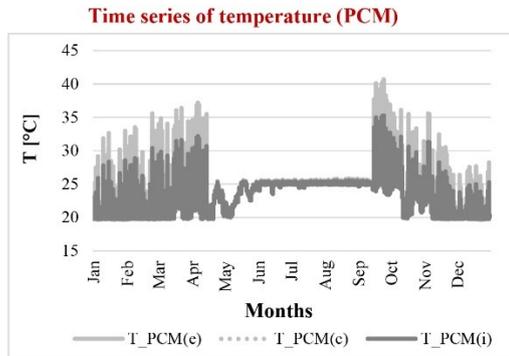


**Cumulative frequency**

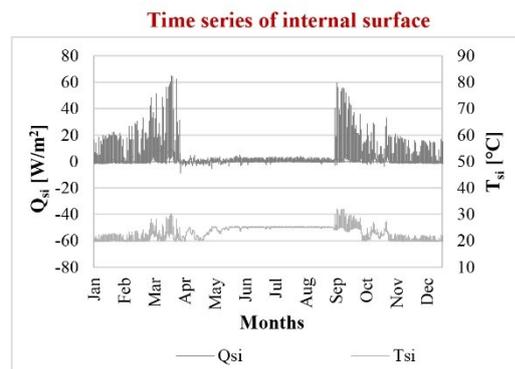
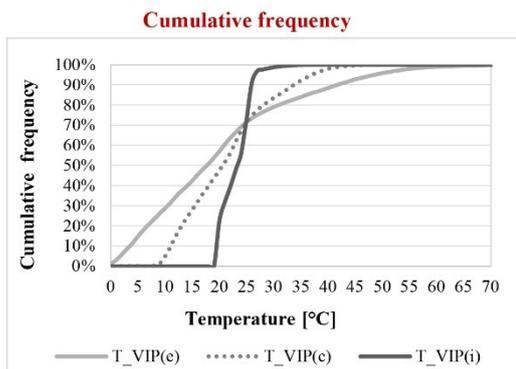
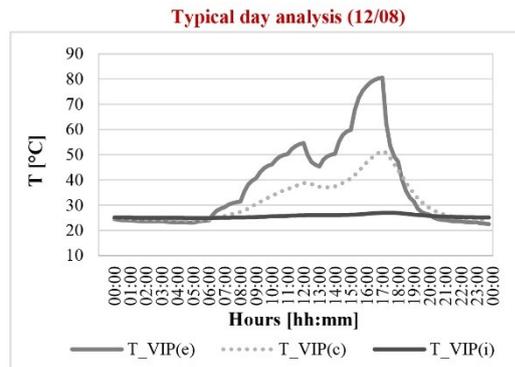
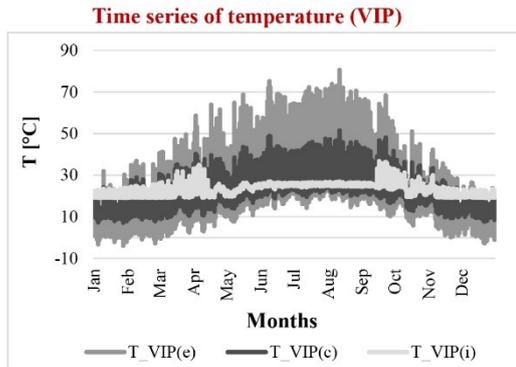
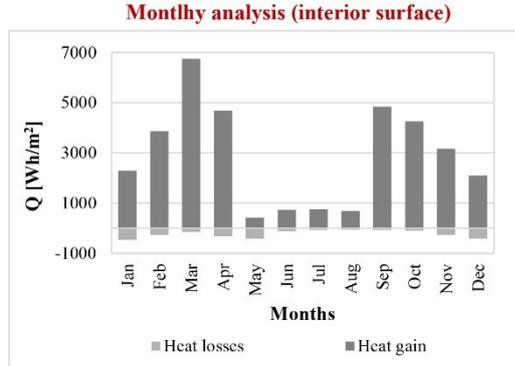
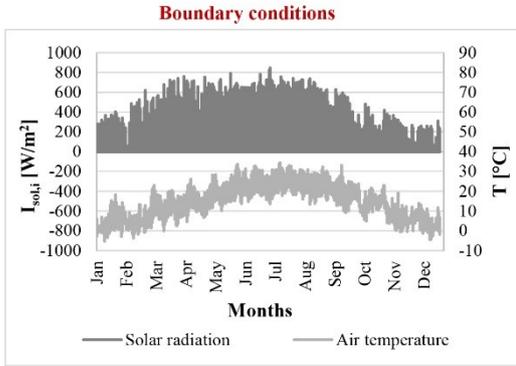


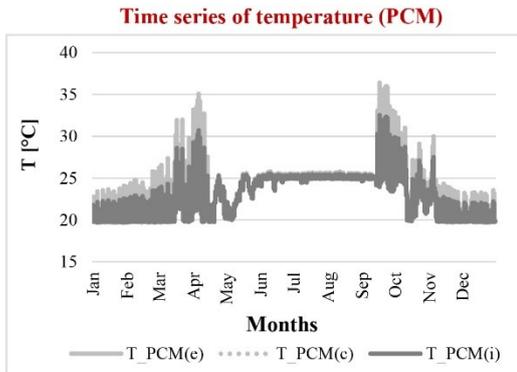
**Time series of internal surface**





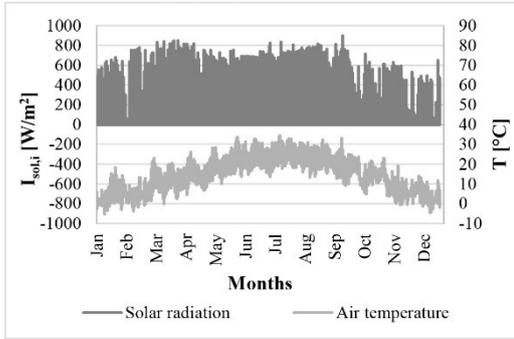
### Configurazione 3.1.1\_Sud



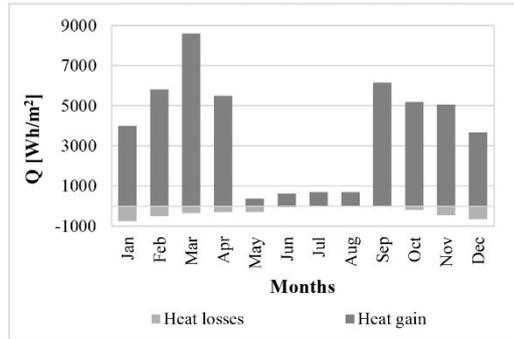


### Configurazione 3.1.2\_Sud Ovest

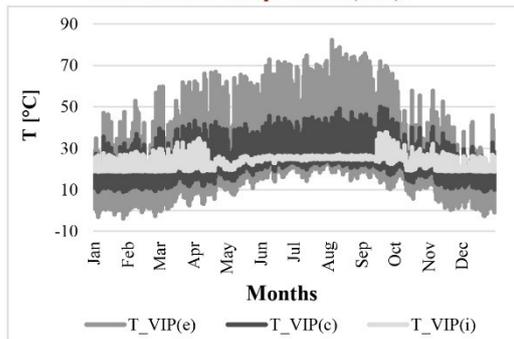
**Boundary conditions**



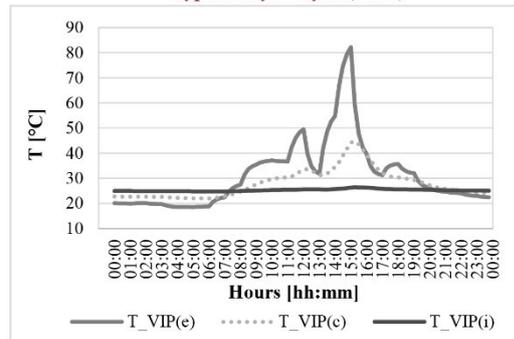
**Monthly analysis (interior surface)**



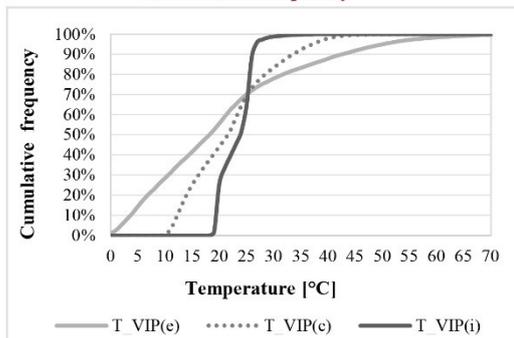
**Time series of temperature (VIP)**



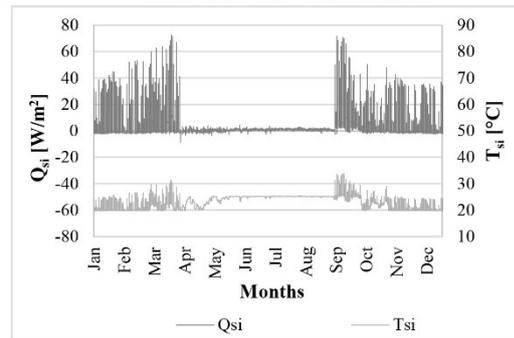
**Typical day analysis (05/08)**

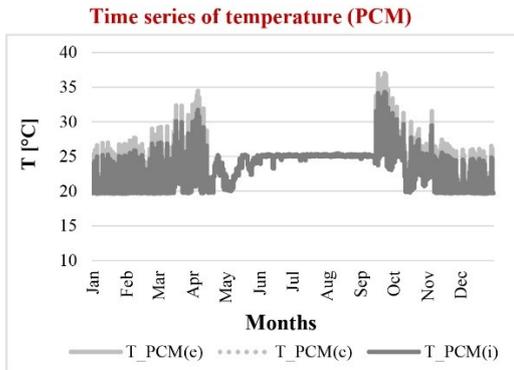


**Cumulative frequency**



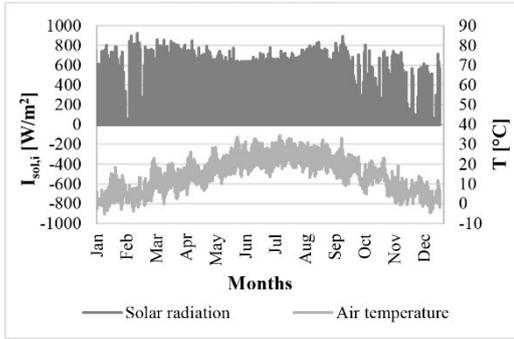
**Time series of internal surface**



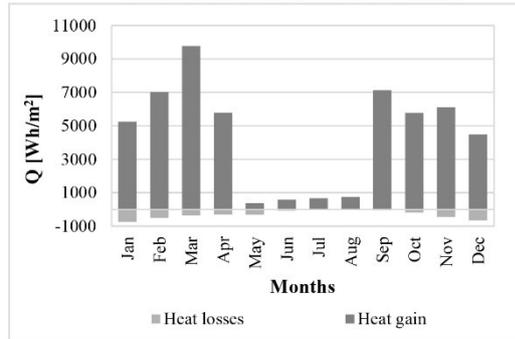


### Configurazione 3.1.2\_Sud

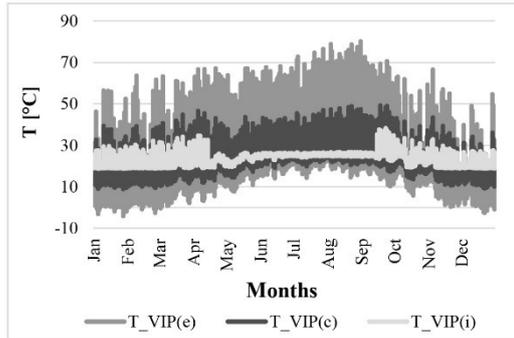
**Boundary conditions**



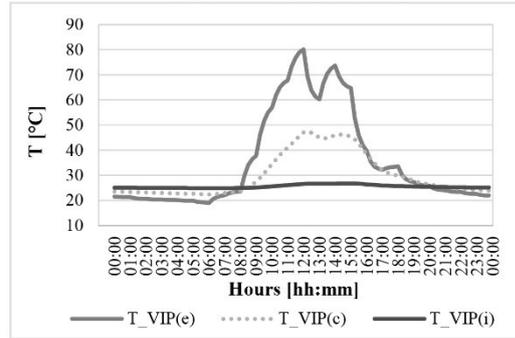
**Monthly analysis (interior surface)**



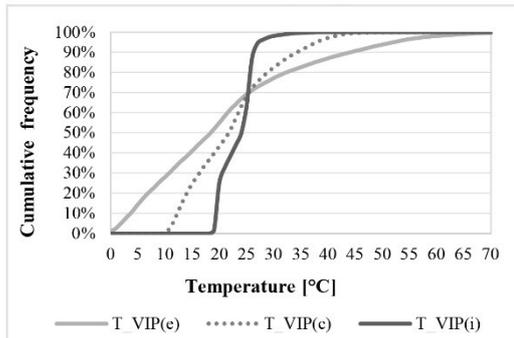
**Time series of temperature (VIP)**



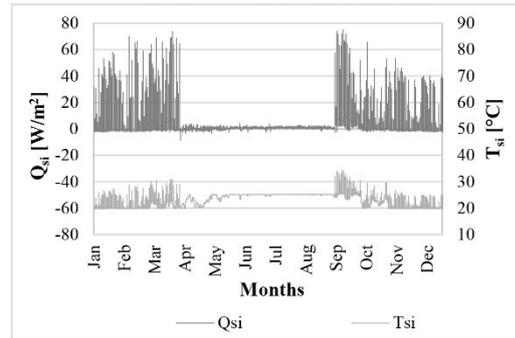
**Typical day analysis (31/08)**

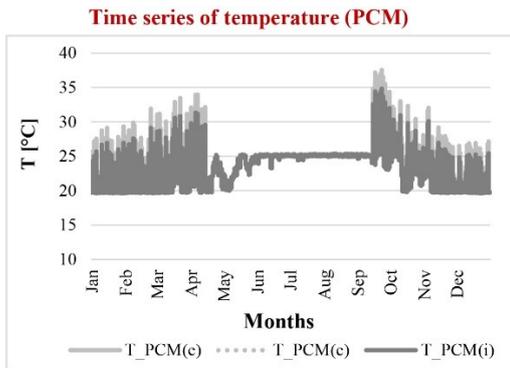


**Cumulative frequency**



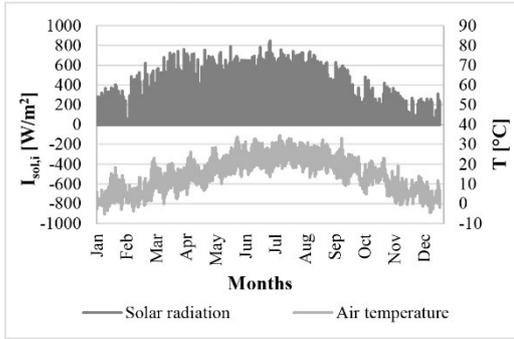
**Time series of internal surface**



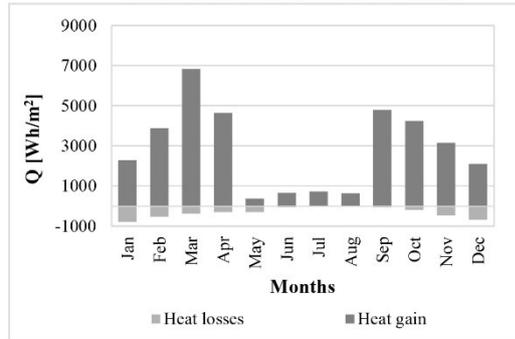


### Configurazione 3.1.2\_Ovest

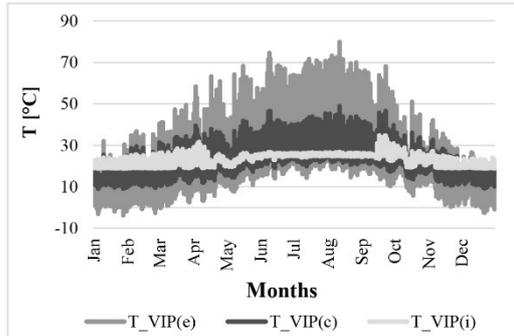
**Boundary conditions**



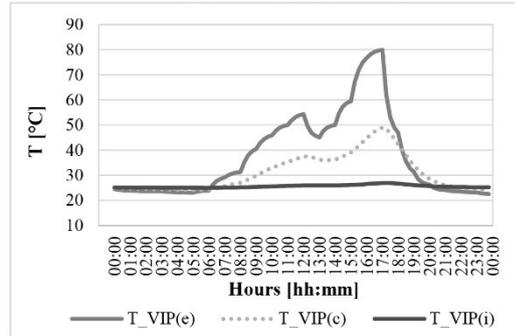
**Monthly analysis (interior surface)**



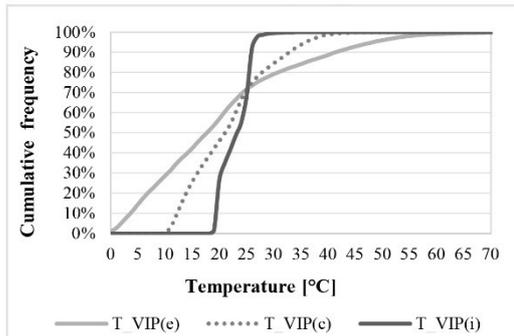
**Time series of temperature (VIP)**



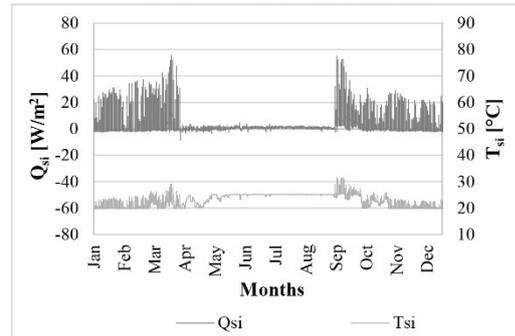
**Typical day analysis (12/08)**

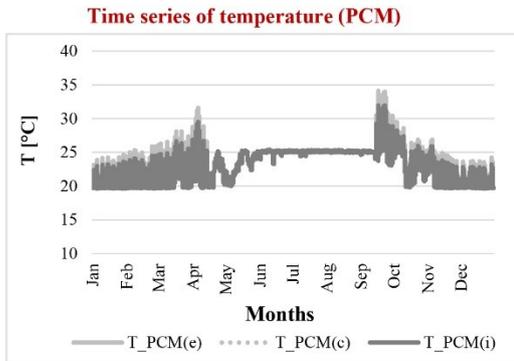


**Cumulative frequency**



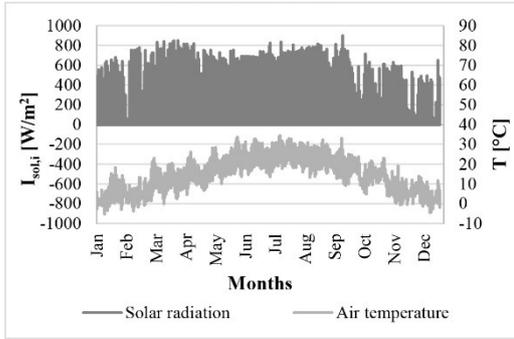
**Time series of internal surface**



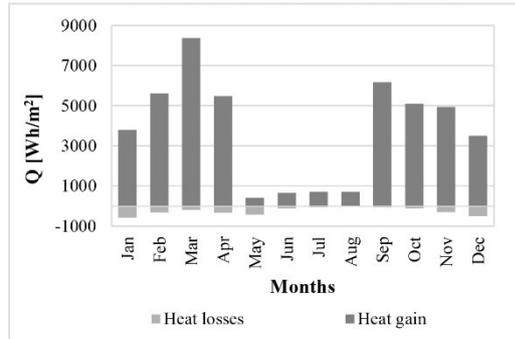


### Configurazione 3.2.1\_Sud Ovest

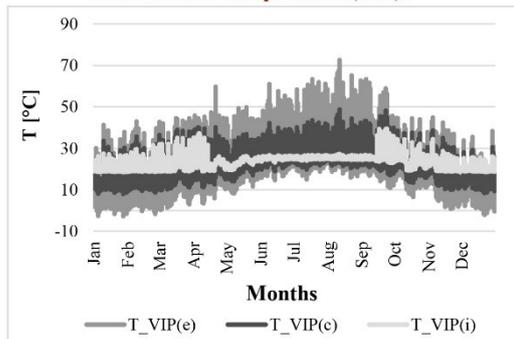
**Boundary conditions**



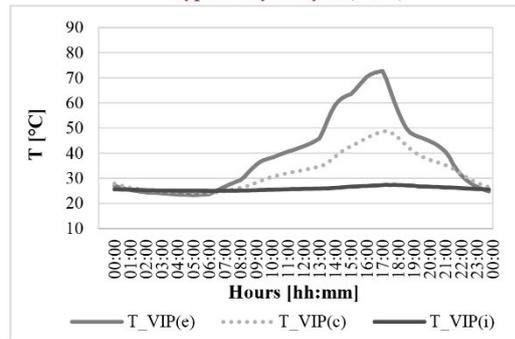
**Monthly analysis (interior surface)**



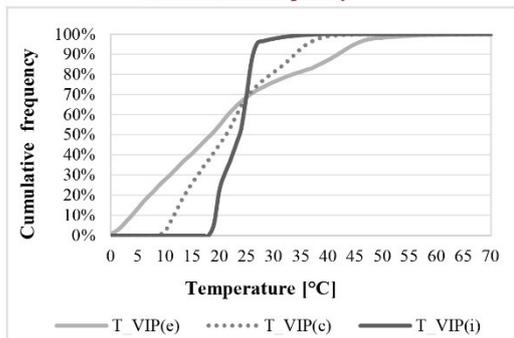
**Time series of temperature (VIP)**



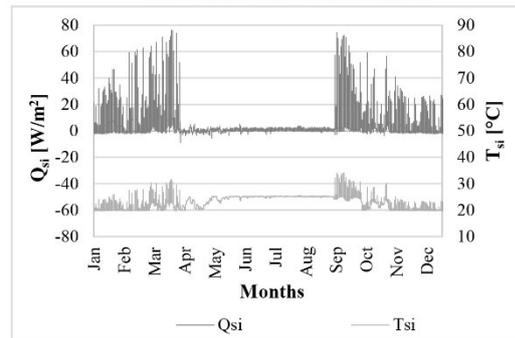
**Typical day analysis (12/08)**

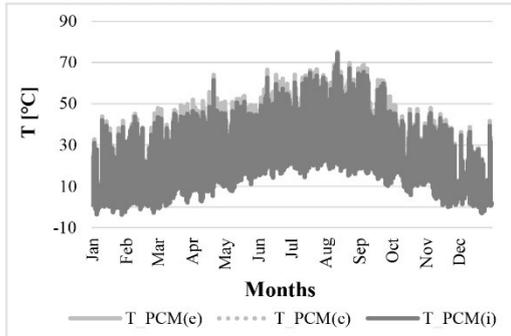
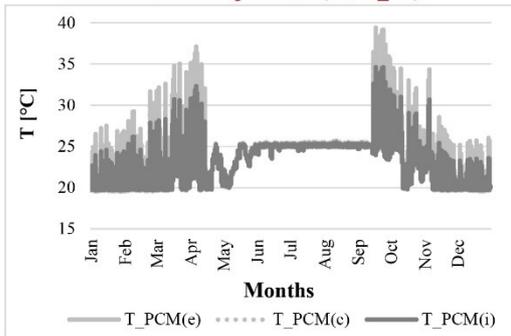


**Cumulative frequency**



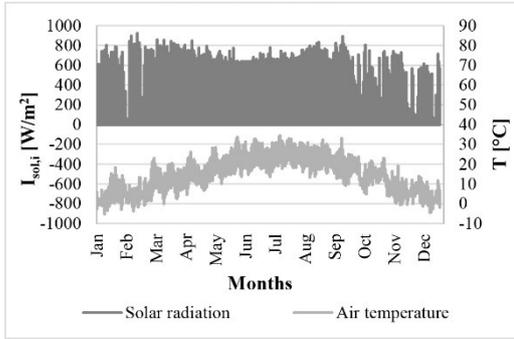
**Time series of internal surface**



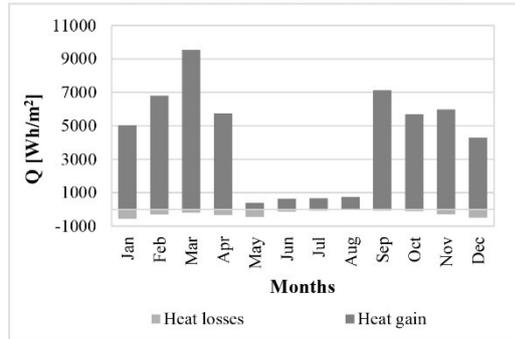
**Time series of temperature (PCM\_ext)****Time series of temperature (PCM\_int)**

### Configurazione 3.2.1\_Sud

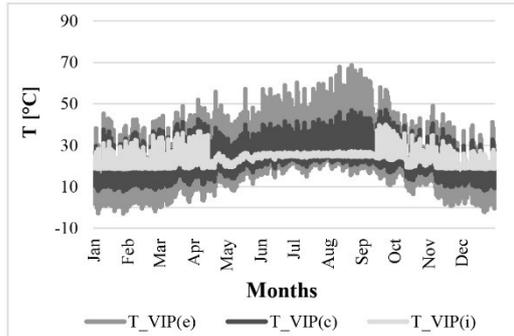
**Boundary conditions**



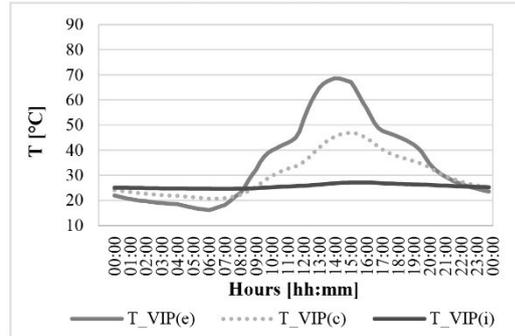
**Monthly analysis (interior surface)**



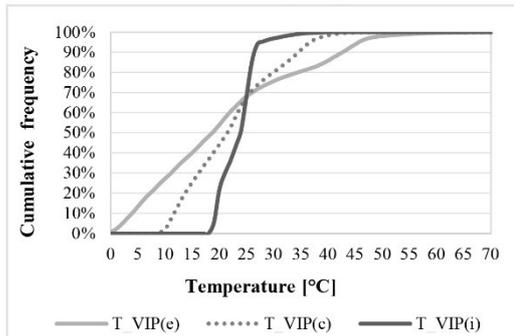
**Time series of temperature (VIP)**



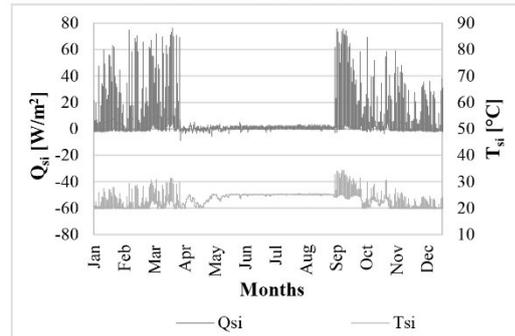
**Typical day analysis (23/08)**

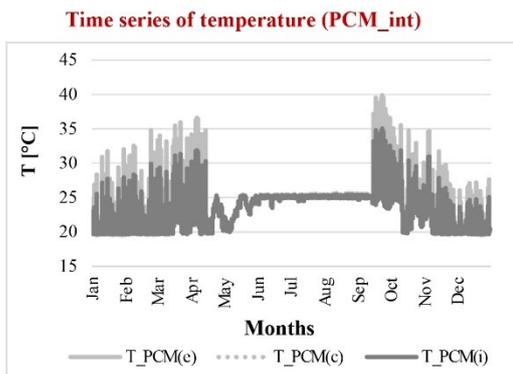
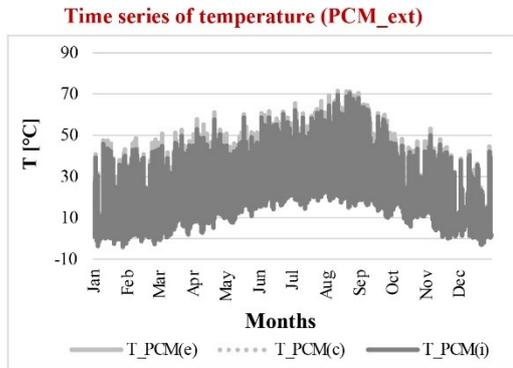


**Cumulative frequency**



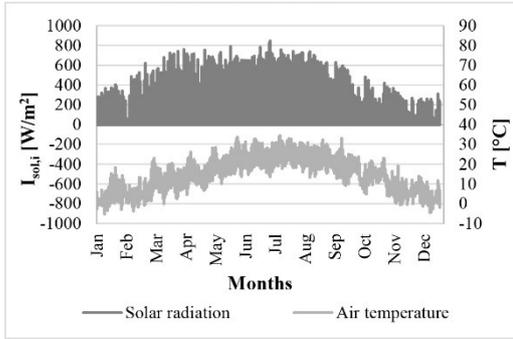
**Time series of internal surface**



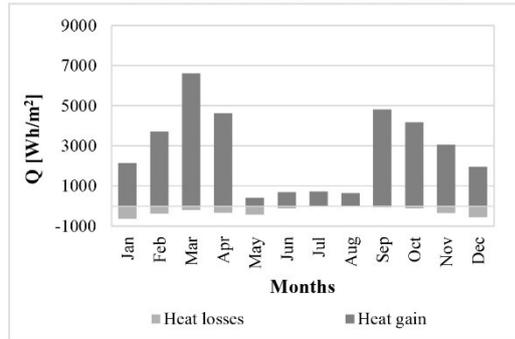


### Configurazione 3.2.1\_Ovest

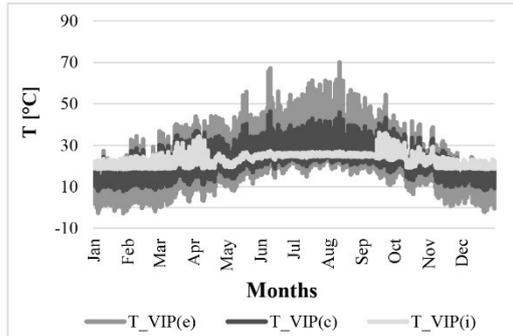
**Boundary conditions**



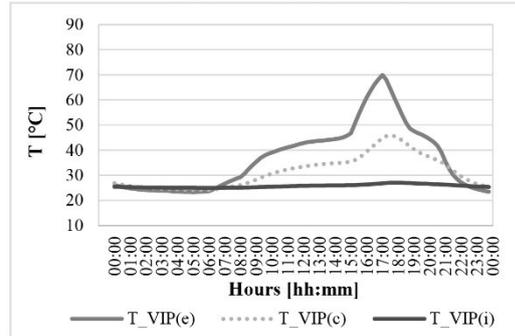
**Monthly analysis (interior surface)**



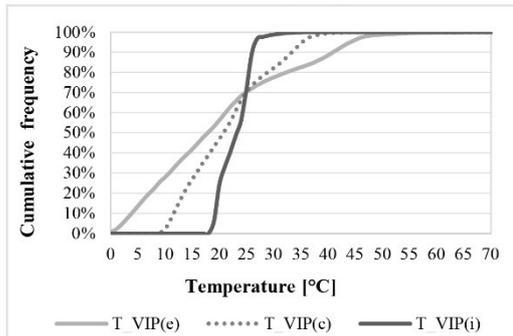
**Time series of temperature (VIP)**



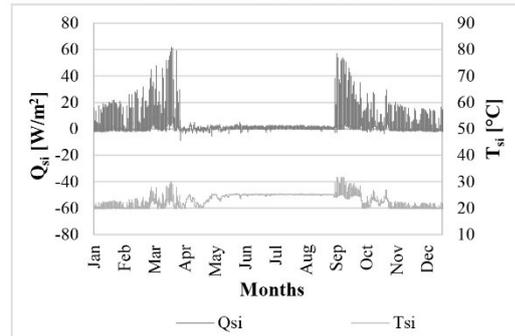
**Typical day analysis (12/08)**

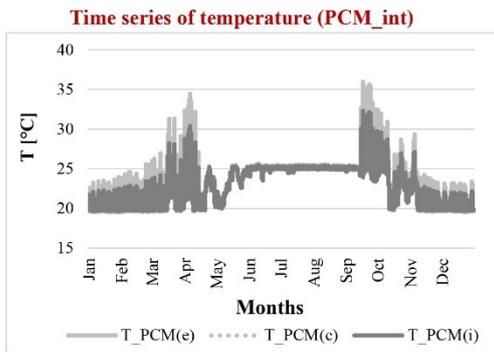
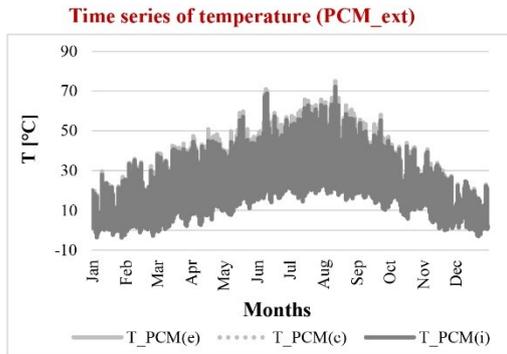


**Cumulative frequency**



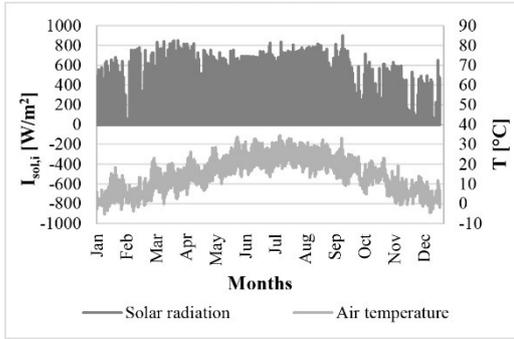
**Time series of internal surface**



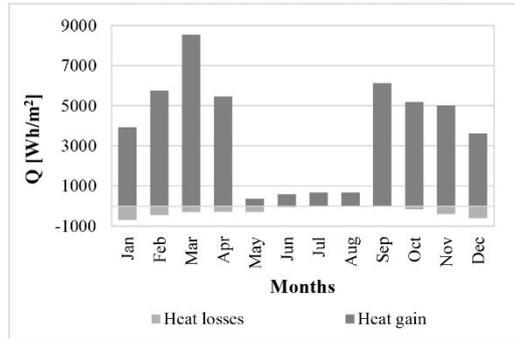


### Configurazione 3.2.2\_Sud Ovest

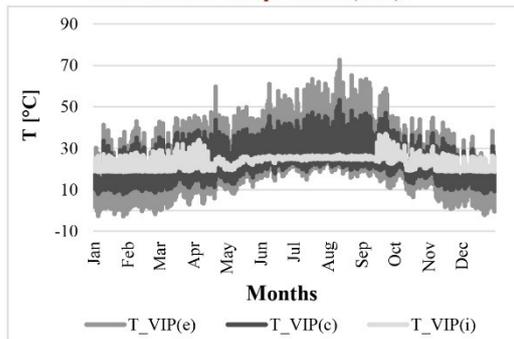
**Boundary conditions**



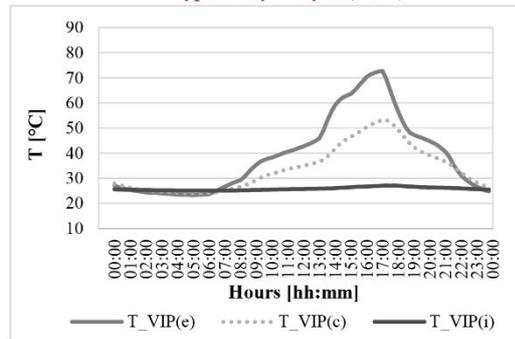
**Monthly analysis (interior surface)**



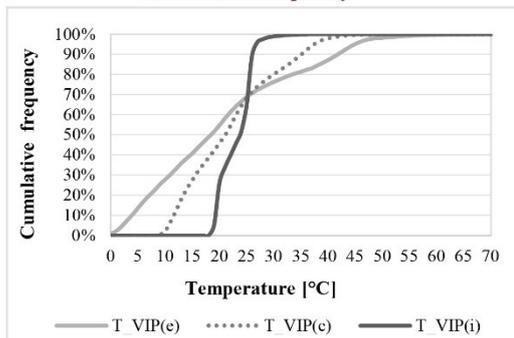
**Time series of temperature (VIP)**



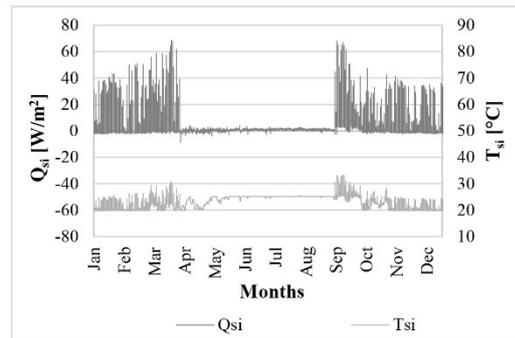
**Typical day analysis (12/08)**



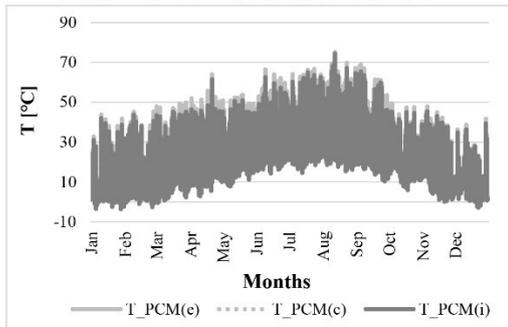
**Cumulative frequency**



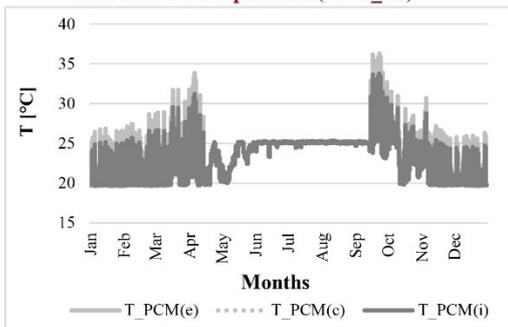
**Time series of internal surface**



**Time series of temperature (PCM\_ext)**

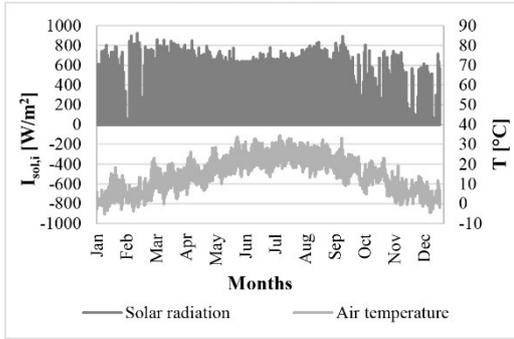


**Time series of temperature (PCM\_int)**

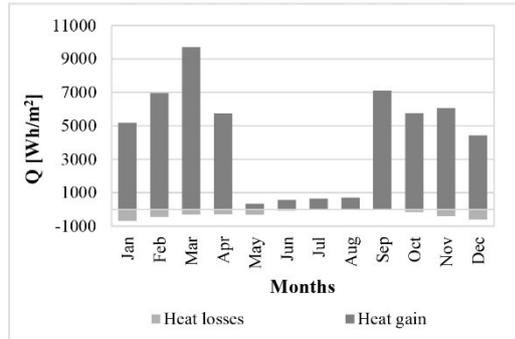


### Configurazione 3.2.2\_Sud

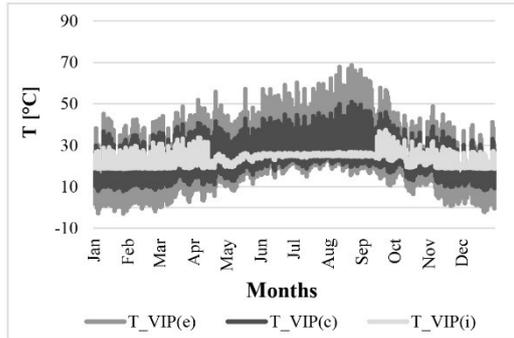
**Boundary conditions**



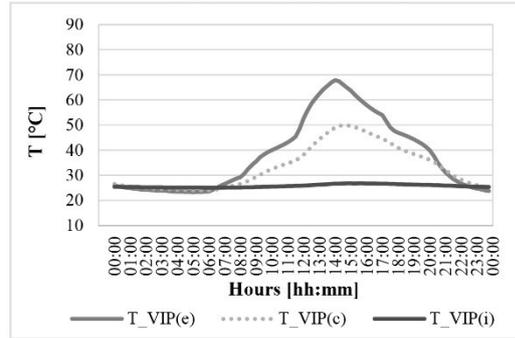
**Monthly analysis (interior surface)**



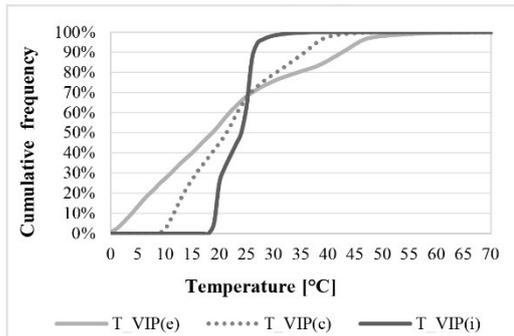
**Time series of temperature (VIP)**



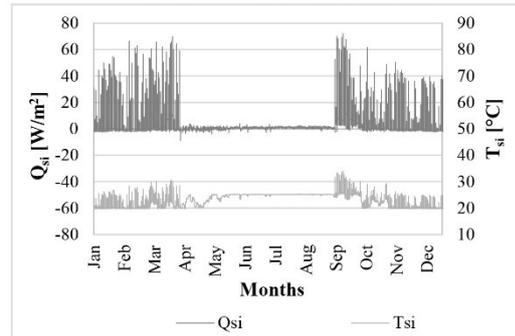
**Typical day analysis (12/08)**

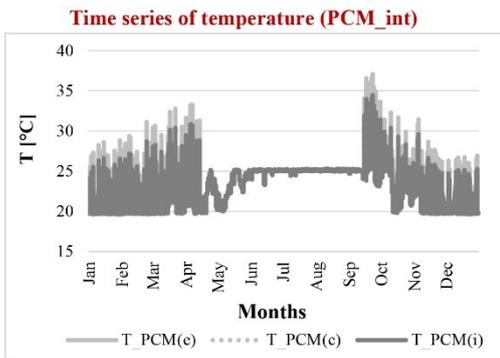
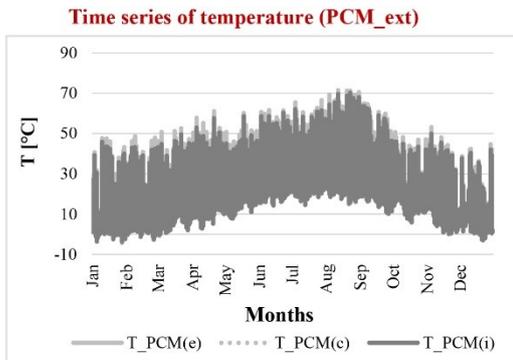


**Cumulative frequency**



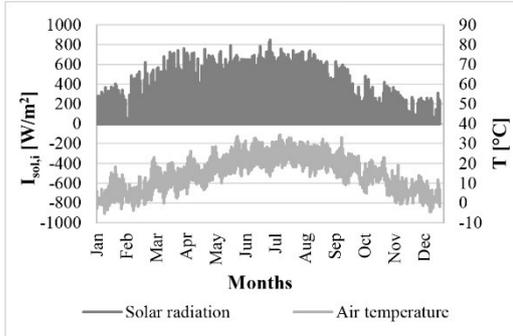
**Time series of internal surface**



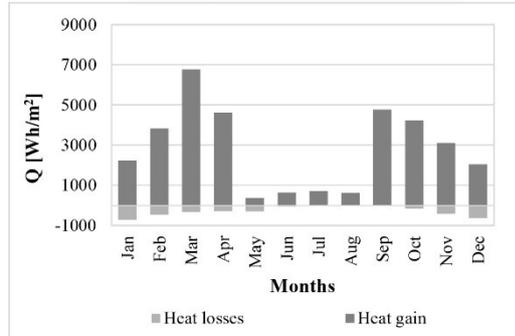


### Configurazione 3.2.2\_Ovest

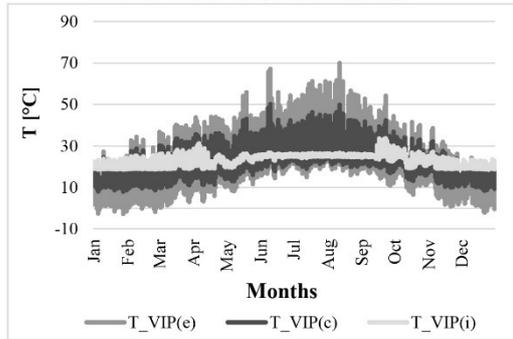
**Boundary conditions**



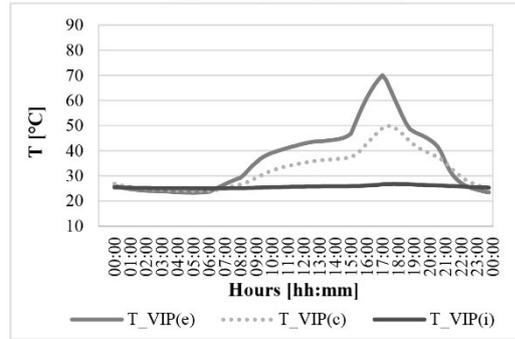
**Monthly analysis (interior surface)**



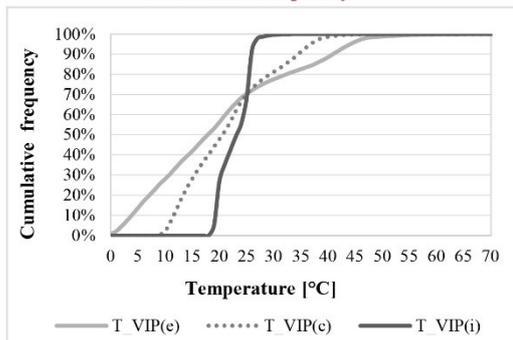
**Time series of temperature (VIP)**



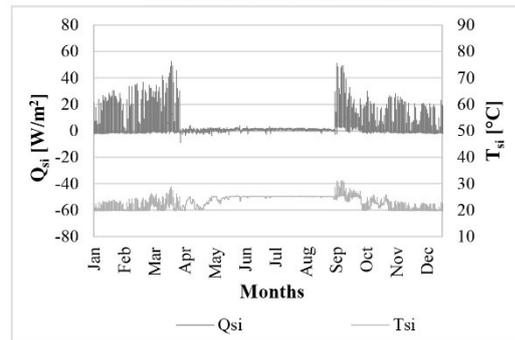
**Typical day analysis (12/08)**

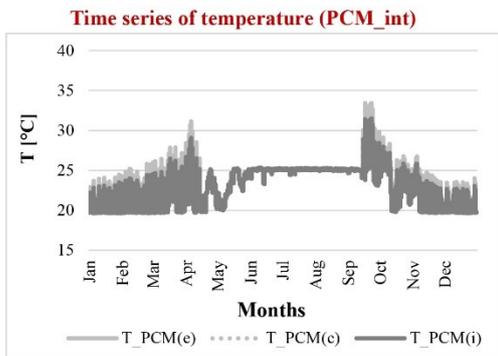
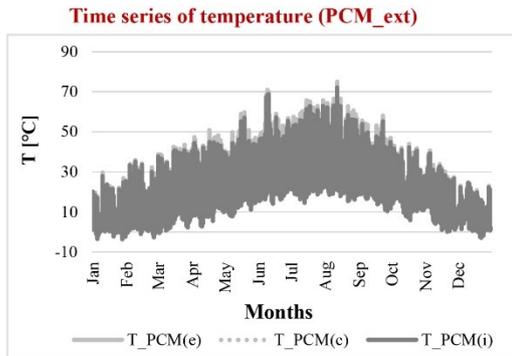


**Cumulative frequency**



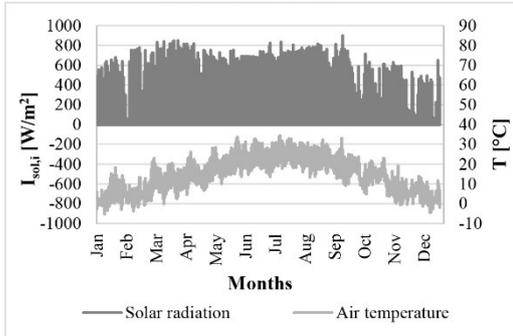
**Time series of internal surface**



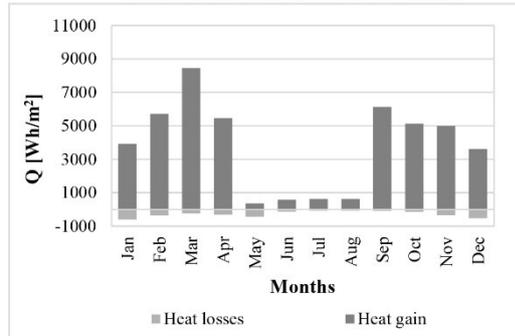


### Configurazione 3.3.1\_Sud Ovest

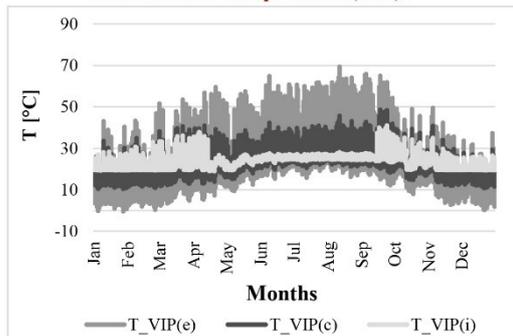
**Boundary conditions**



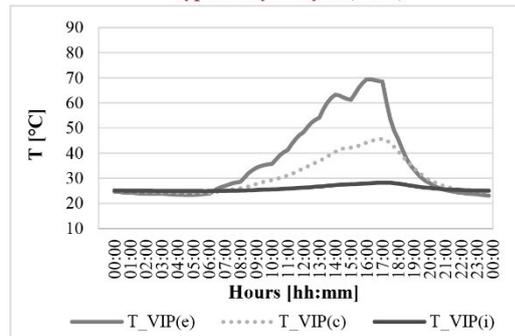
**Monthly analysis (interior surface)**



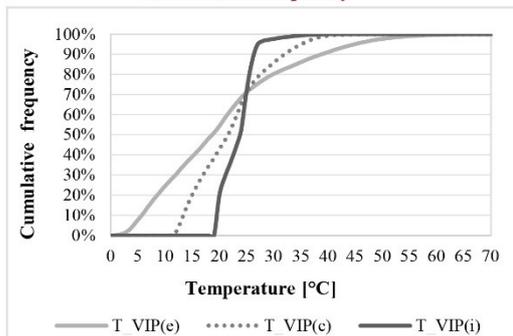
**Time series of temperature (VIP)**



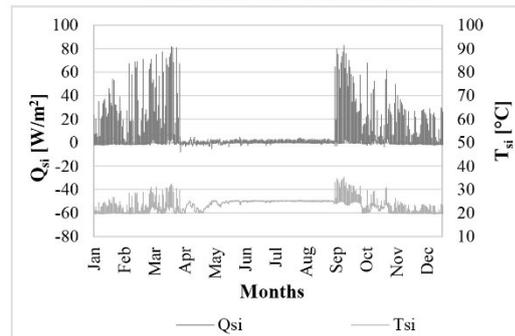
**Typical day analysis (12/08)**

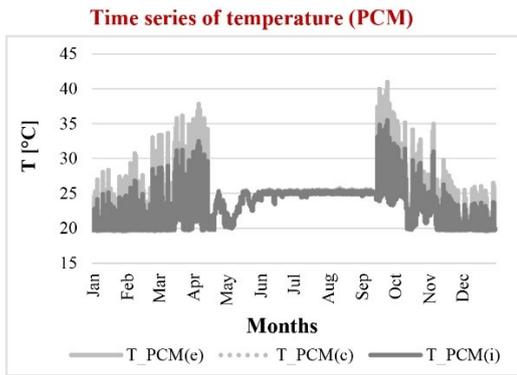


**Cumulative frequency**



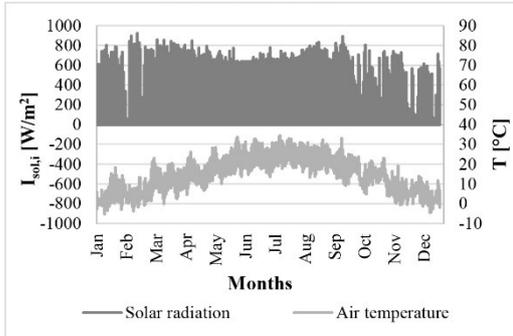
**Time series of internal surface**



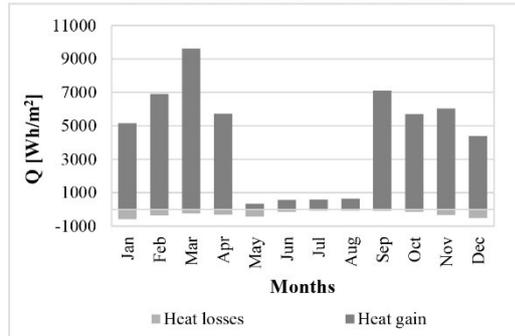


### Configurazione 3.3.1\_Sud

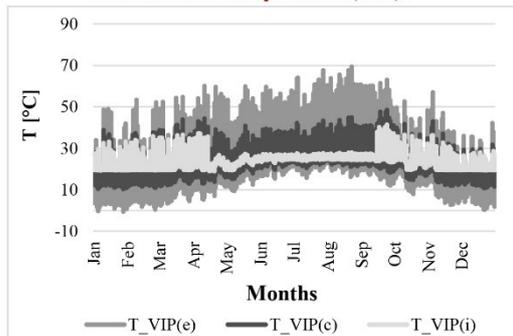
**Boundary conditions**



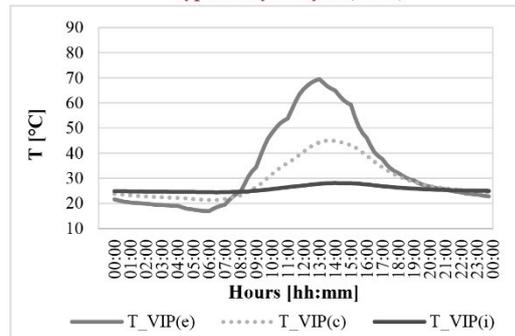
**Monthly analysis (interior surface)**



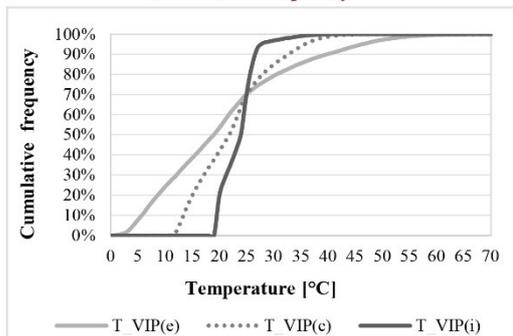
**Time series of temperature (VIP)**



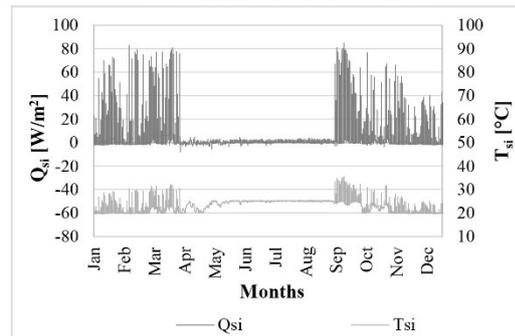
**Typical day analysis (23/08)**

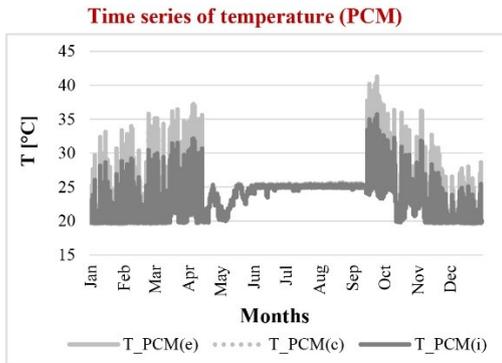


**Cumulative frequency**



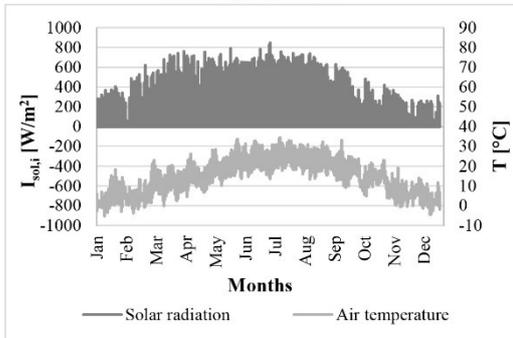
**Time series of internal surface**



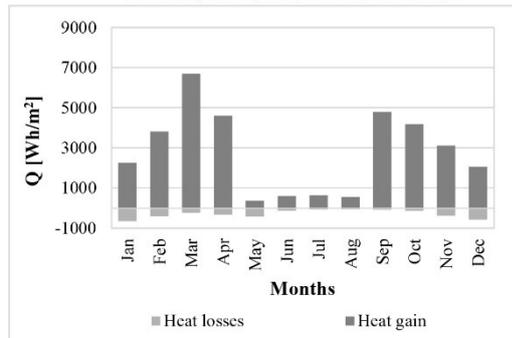


### Configurazione 3.3.1\_Ovest

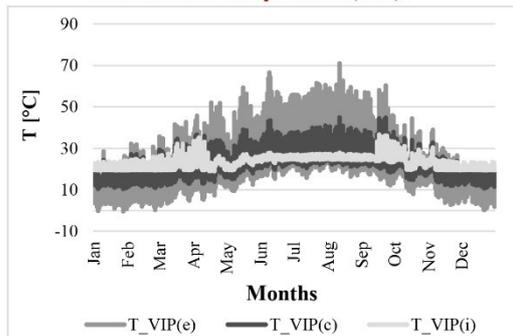
**Boundary conditions**



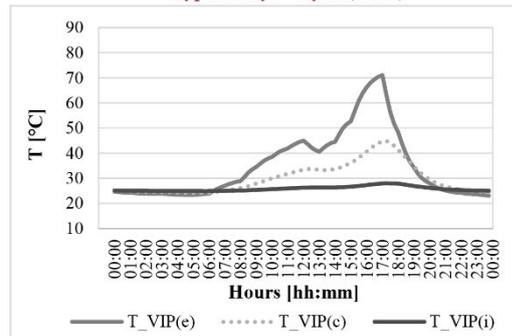
**Monthly analysis (interior surface)**



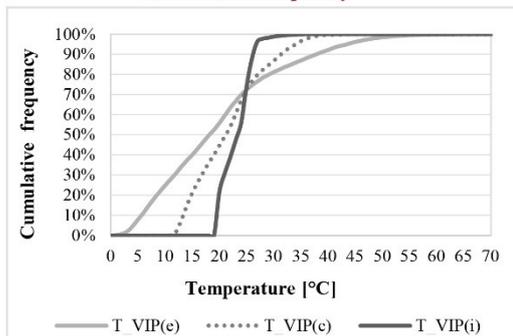
**Time series of temperature (VIP)**



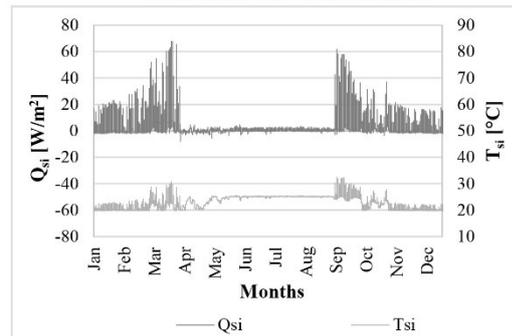
**Typical day analysis (12/08)**

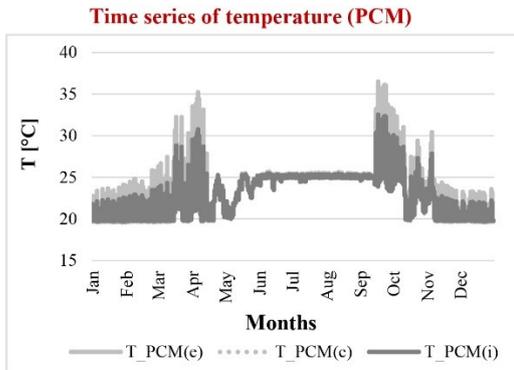


**Cumulative frequency**



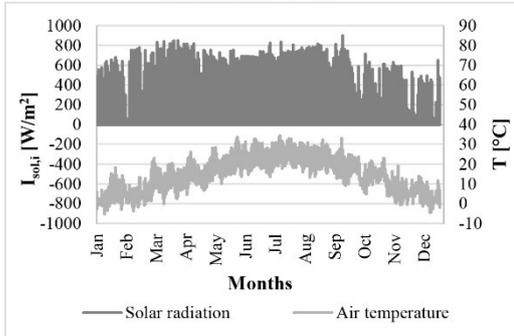
**Time series of internal surface**



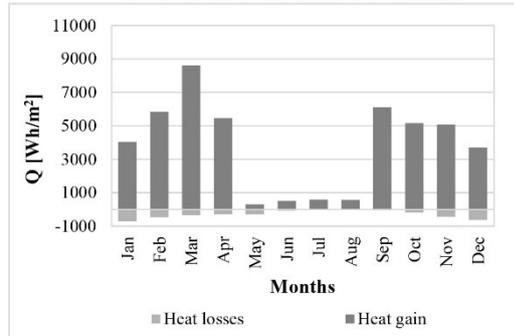


### Configurazione 3.3.2\_Sud Ovest

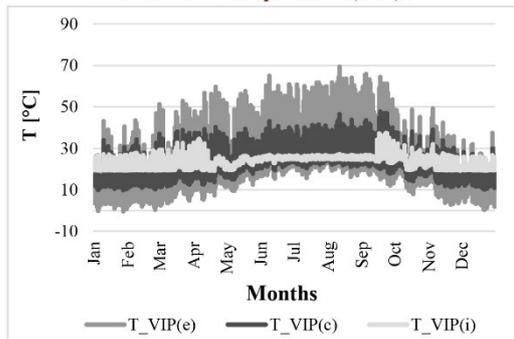
**Boundary conditions**



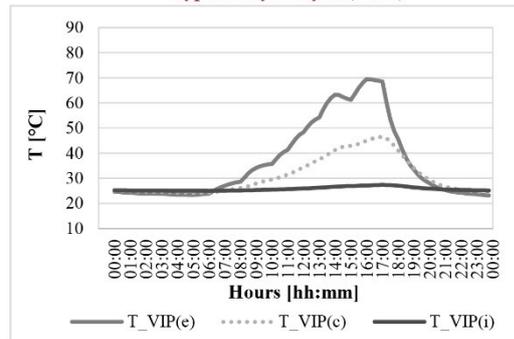
**Monthly analysis (interior surface)**



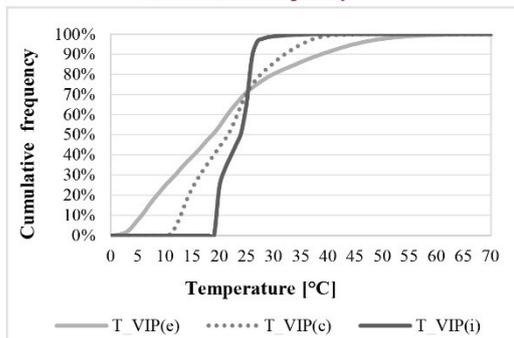
**Time series of temperature (VIP)**



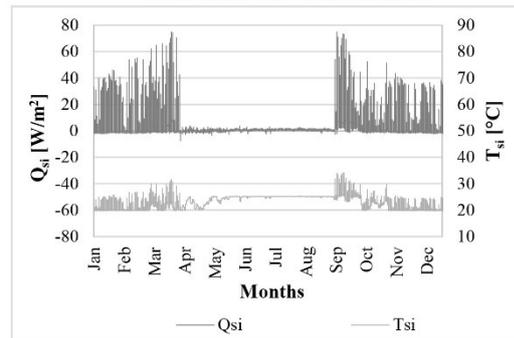
**Typical day analysis (12/08)**

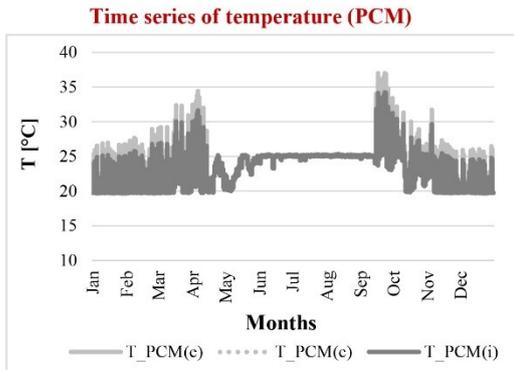


**Cumulative frequency**



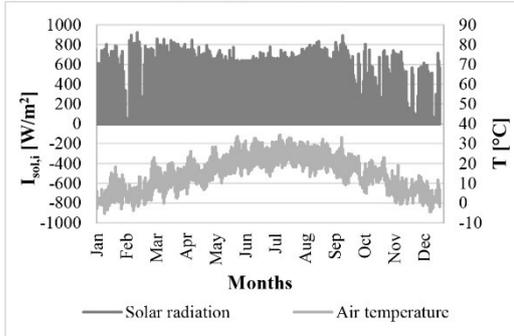
**Time series of internal surface**



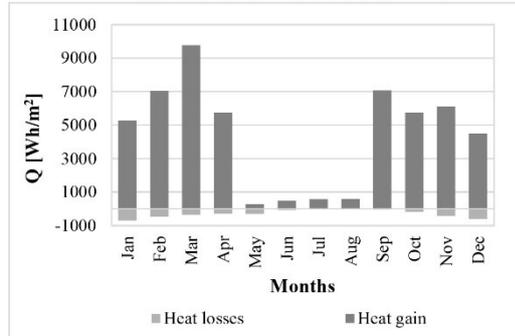


### Configurazione 3.3.2\_Sud

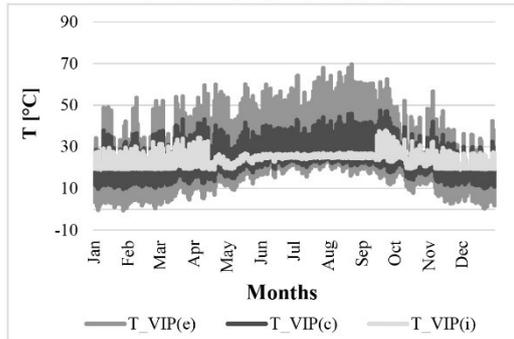
**Boundary conditions**



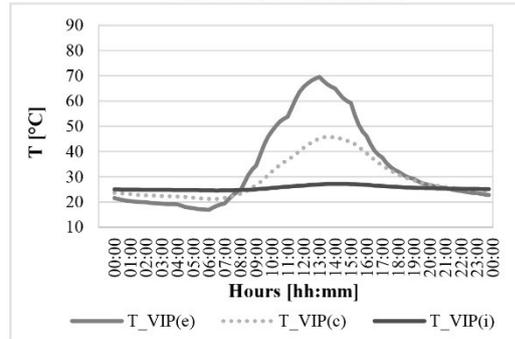
**Monthly analysis (interior surface)**



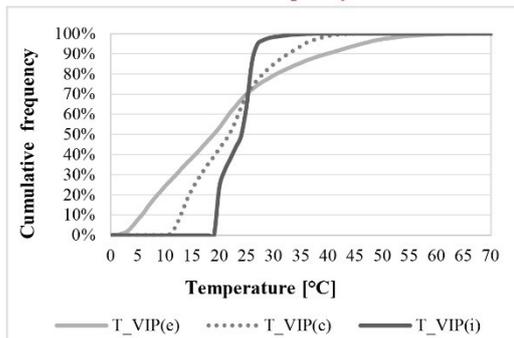
**Time series of temperature (VIP)**



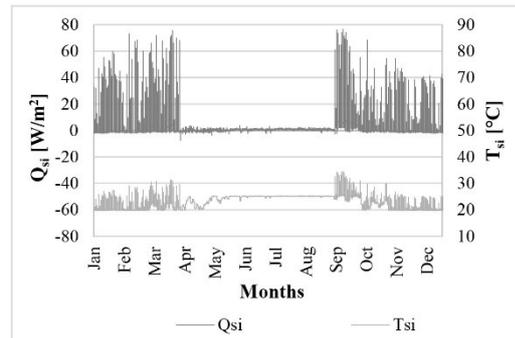
**Typical day analysis (23/08)**

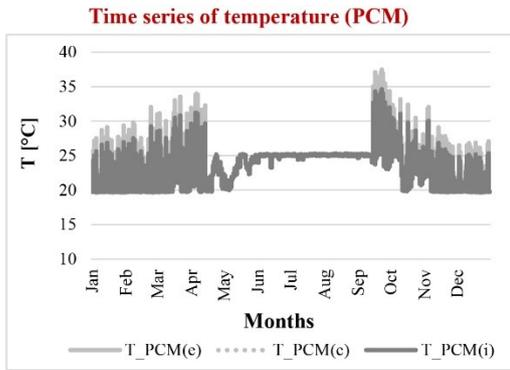


**Cumulative frequency**



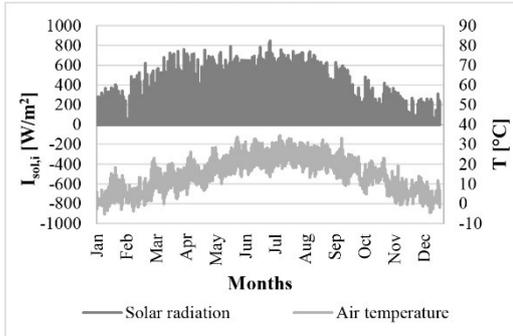
**Time series of internal surface**



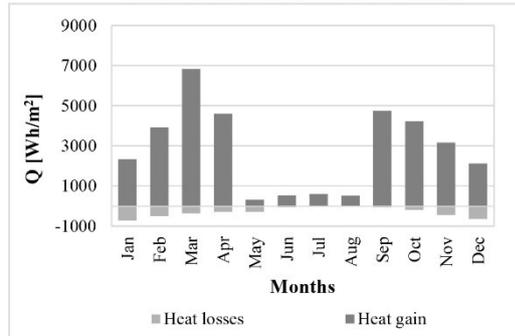


### Configurazione 3.3.2\_Ovest

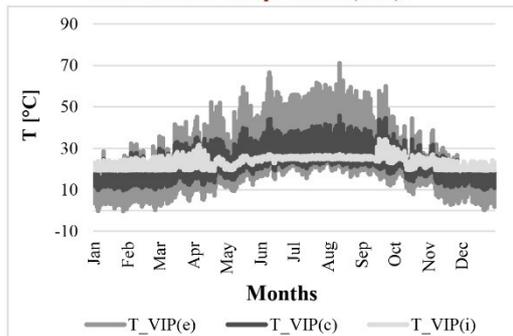
**Boundary conditions**



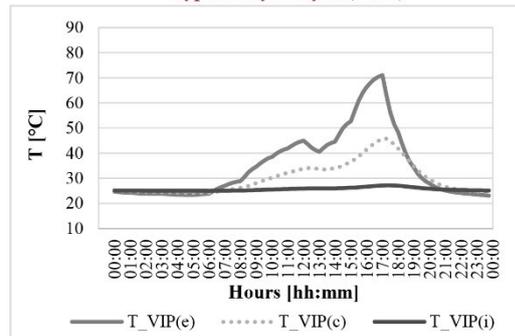
**Monthly analysis (interior surface)**



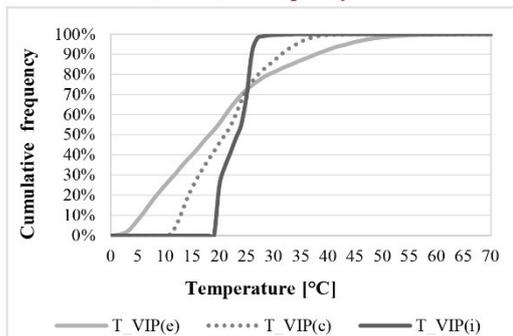
**Time series of temperature (VIP)**



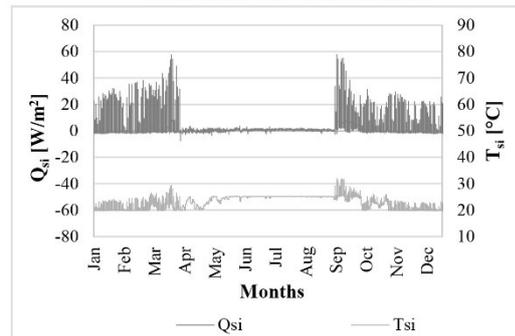
**Typical day analysis (12/08)**

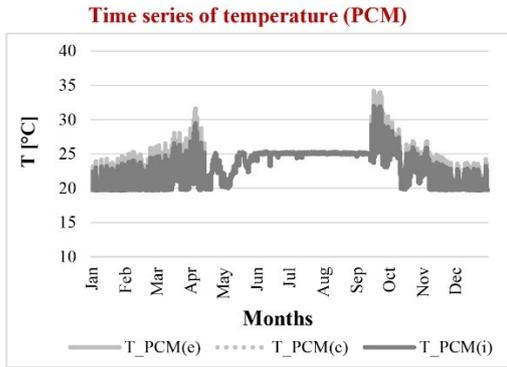


**Cumulative frequency**

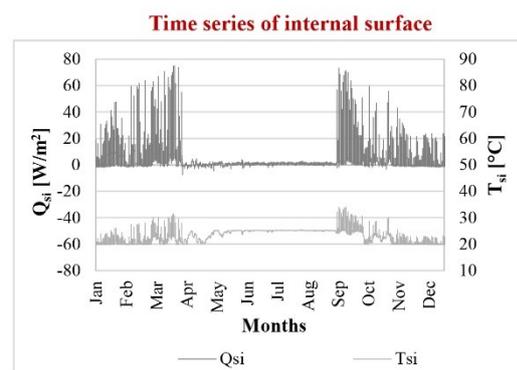
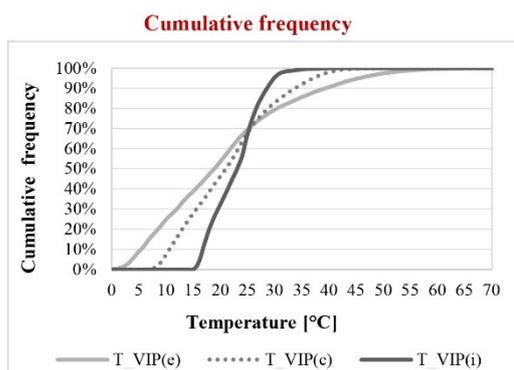
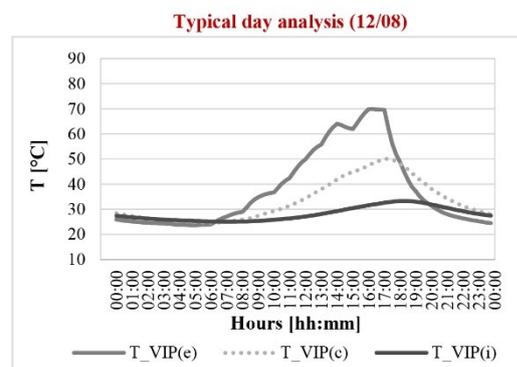
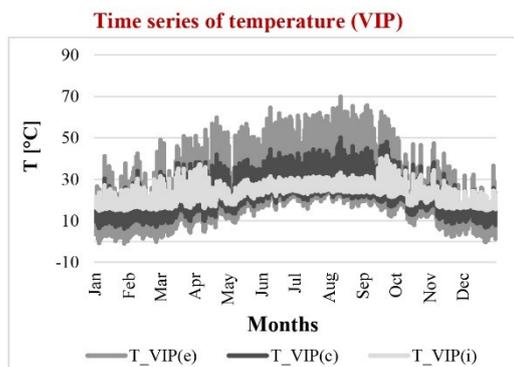
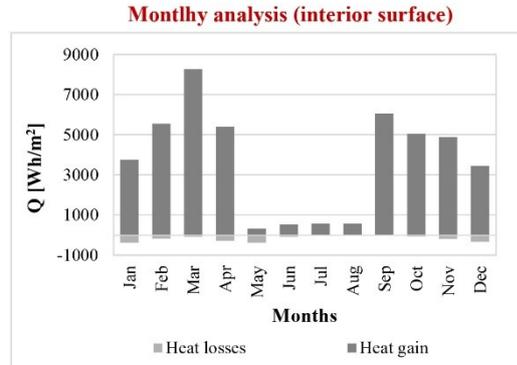
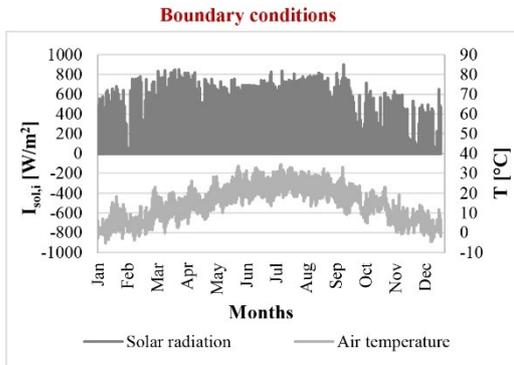


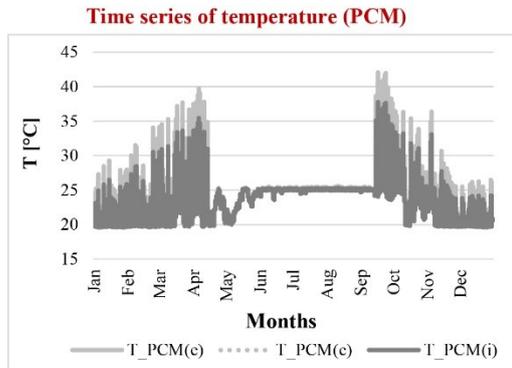
**Time series of internal surface**





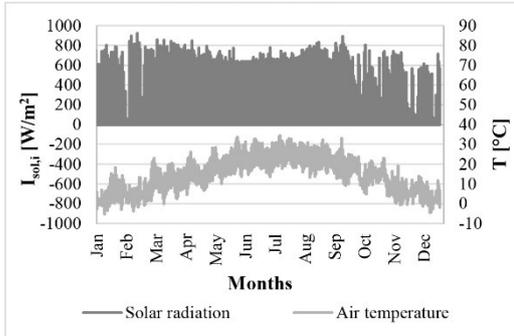
### Configurazione 3.4.1\_Sud Ovest



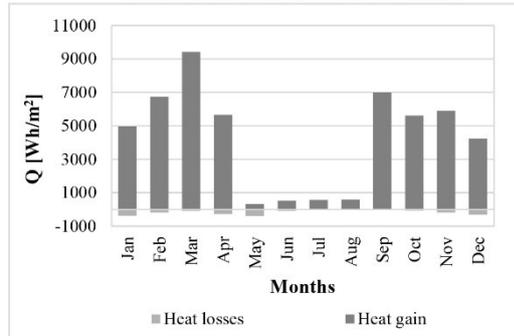


### Configurazione 3.4.1\_Sud

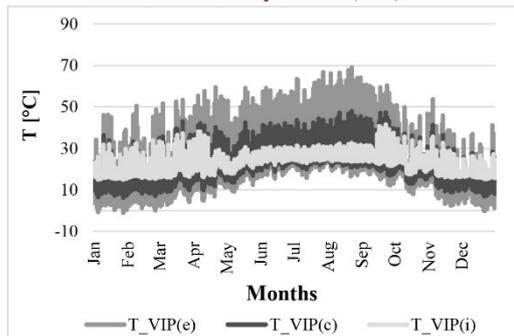
**Boundary conditions**



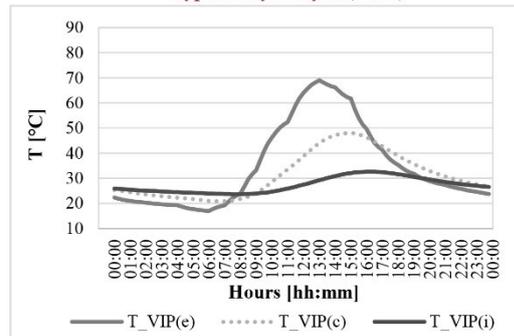
**Monthly analysis (interior surface)**



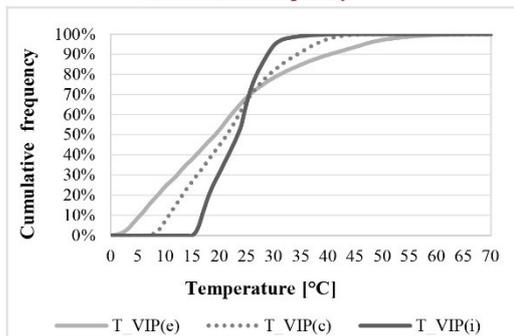
**Time series of temperature (VIP)**



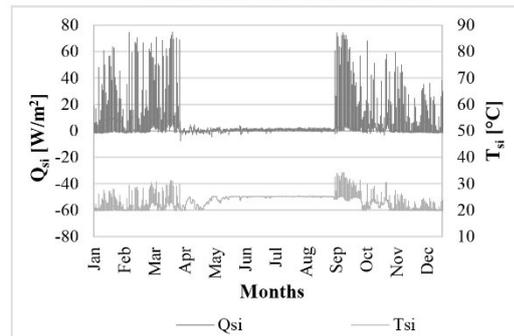
**Typical day analysis (12/08)**

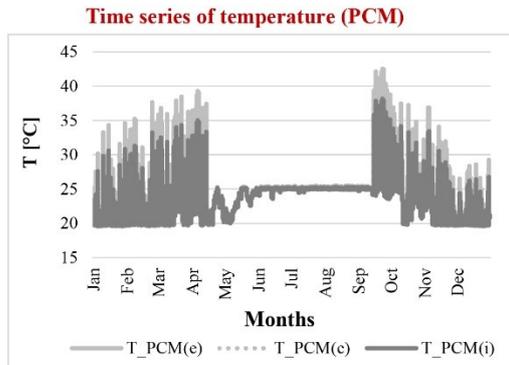


**Cumulative frequency**



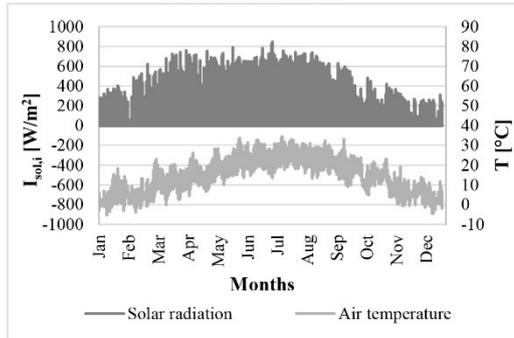
**Time series of internal surface**



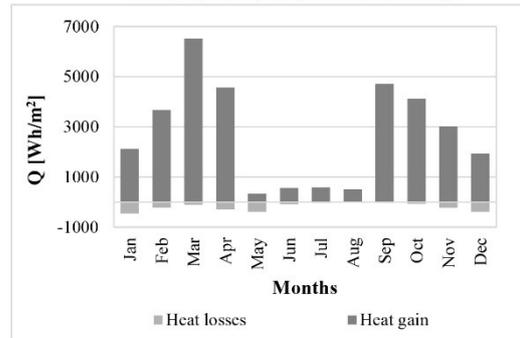


### Configurazione 3.4.1\_Ovest

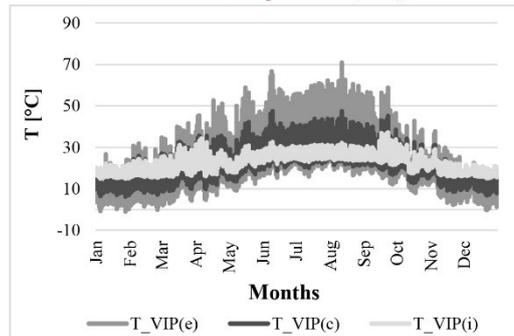
**Boundary conditions**



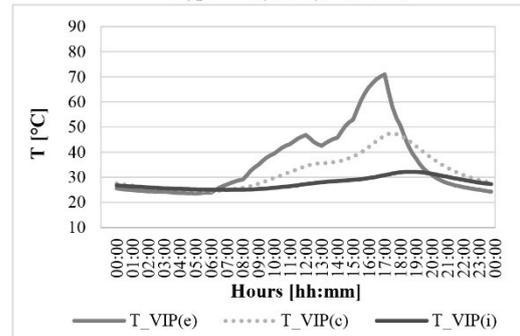
**Monthly analysis (interior surface)**



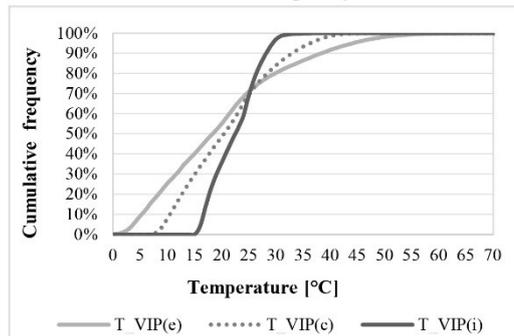
**Time series of temperature (VIP)**



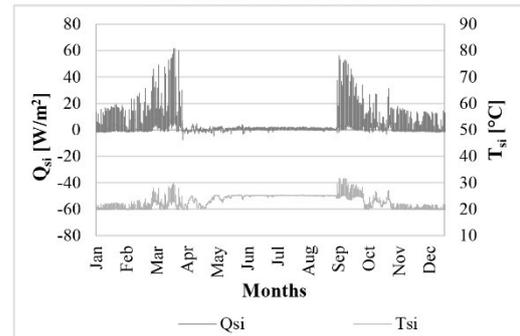
**Typical day analysis (12/08)**

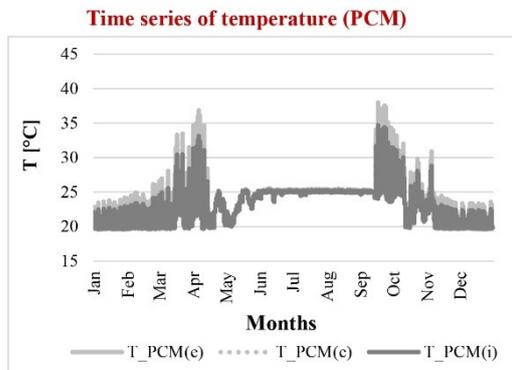


**Cumulative frequency**



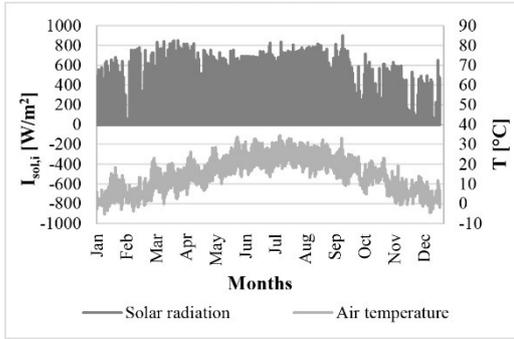
**Time series of internal surface**



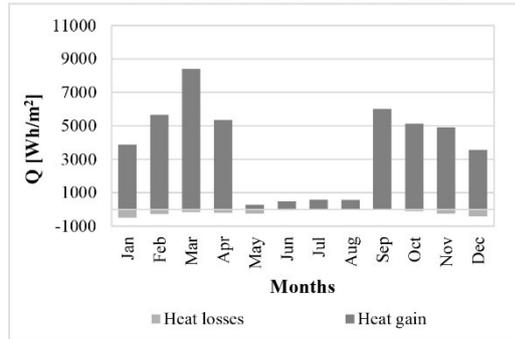


### Configurazione 3.4.2\_Sud Ovest

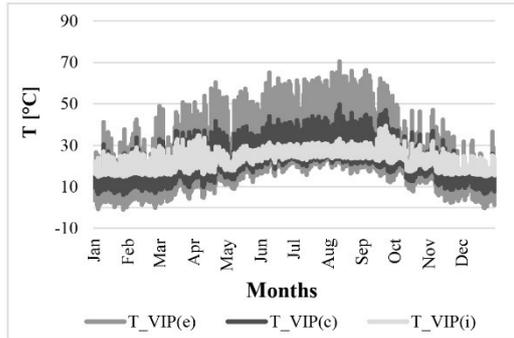
**Boundary conditions**



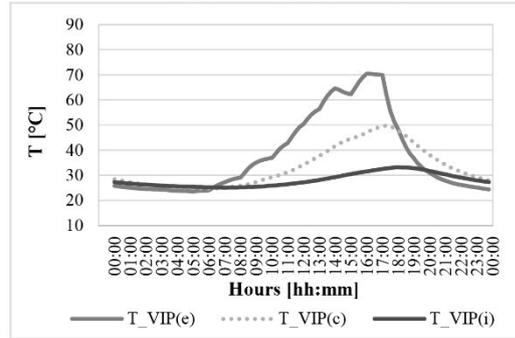
**Monthly analysis (interior surface)**



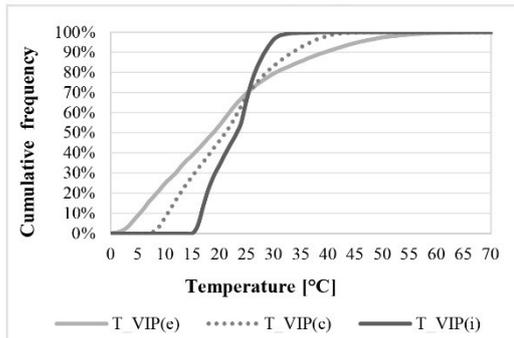
**Time series of temperature (VIP)**



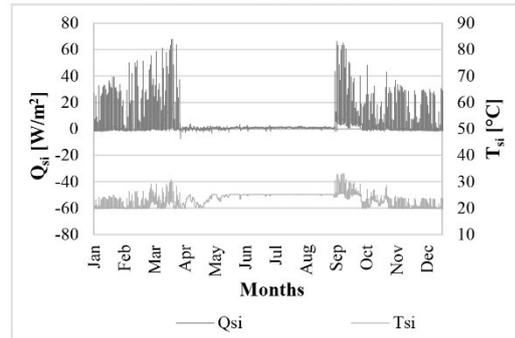
**Typical day analysis (12/08)**

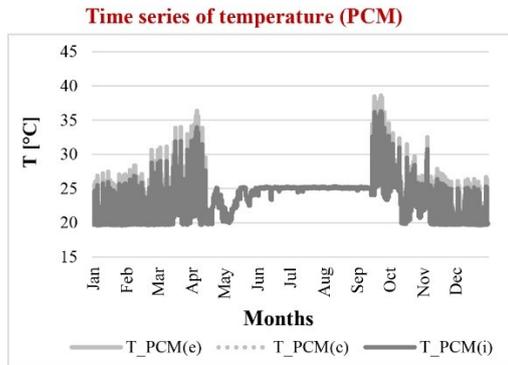


**Cumulative frequency**



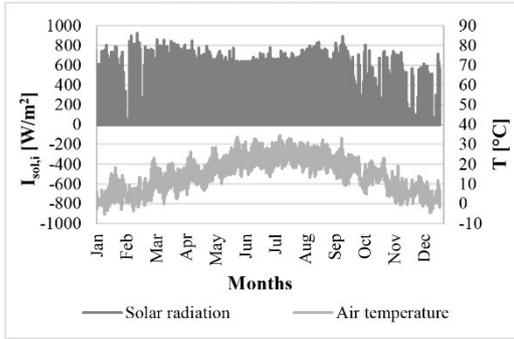
**Time series of internal surface**



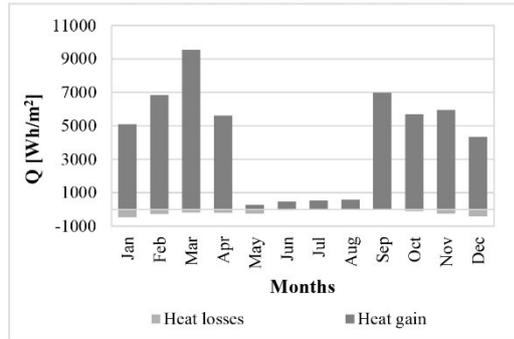


### Configurazione 3.4.2\_Sud

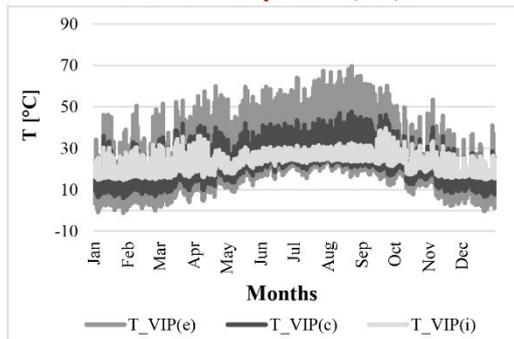
**Boundary conditions**



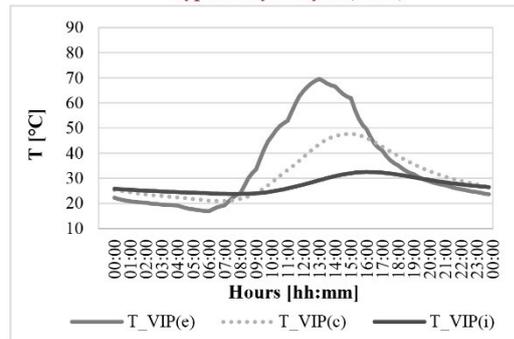
**Monthly analysis (interior surface)**



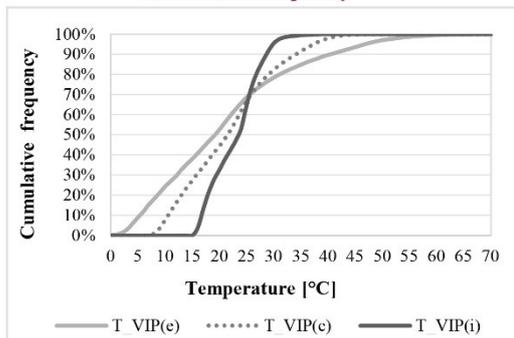
**Time series of temperature (VIP)**



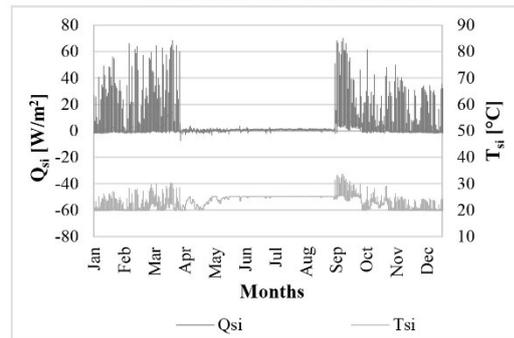
**Typical day analysis (23/08)**

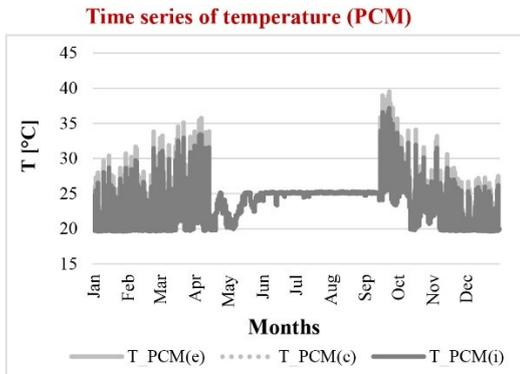


**Cumulative frequency**



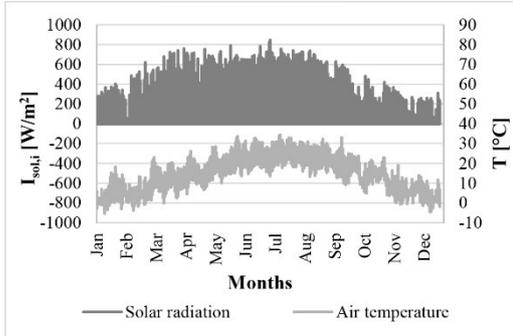
**Time series of internal surface**



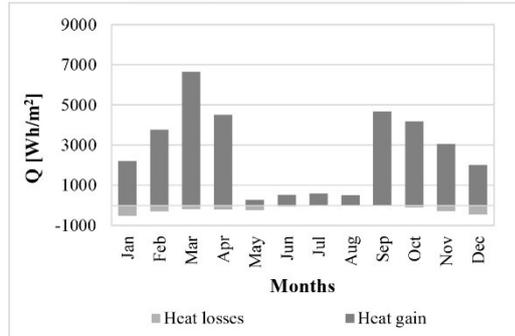


### Configurazione 3.4.2\_Ovest

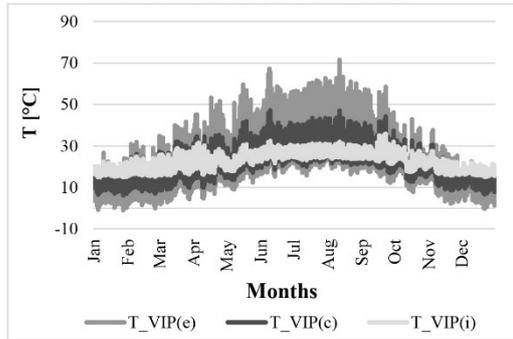
**Boundary conditions**



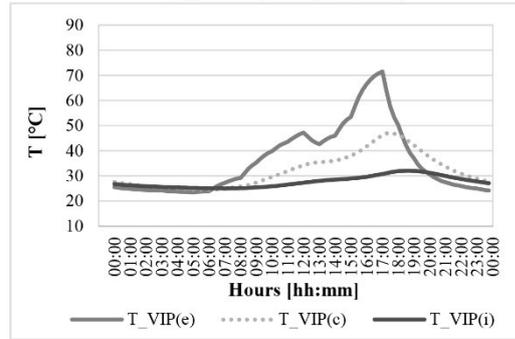
**Monthly analysis (interior surface)**



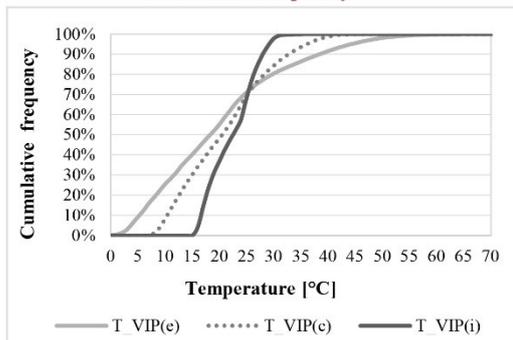
**Time series of temperature (VIP)**



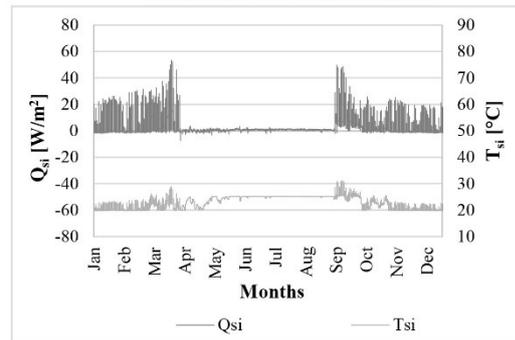
**Typical day analysis (12/08)**

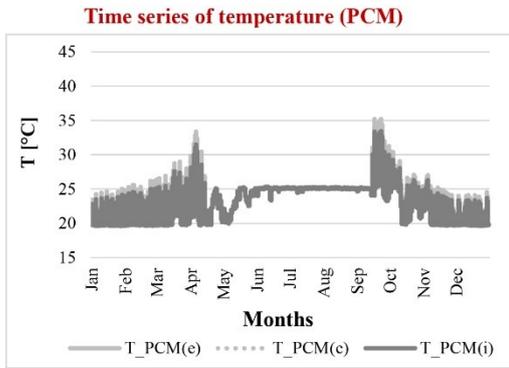


**Cumulative frequency**



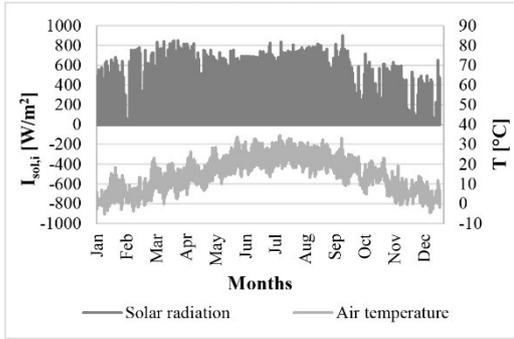
**Time series of internal surface**



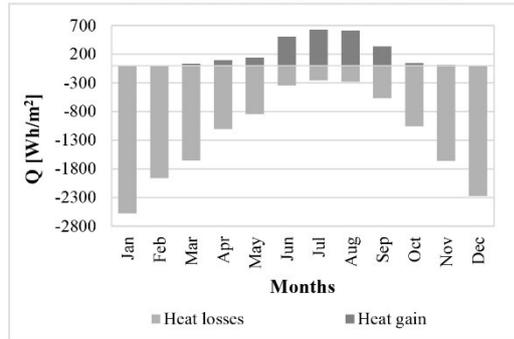


### Configurazione Benchmark\_Sud\_Ovest

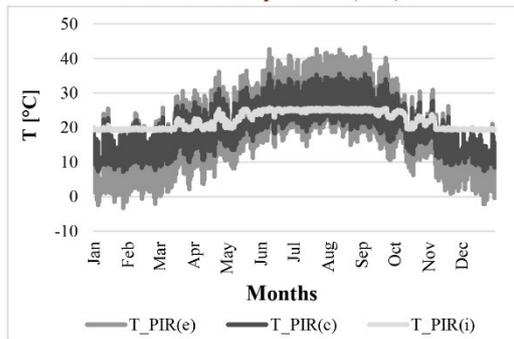
**Boundary conditions**



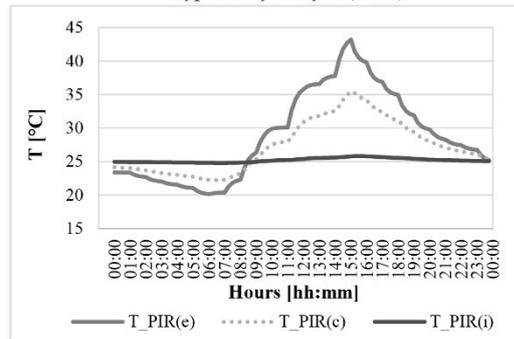
**Monthly analysis (interior surface)**



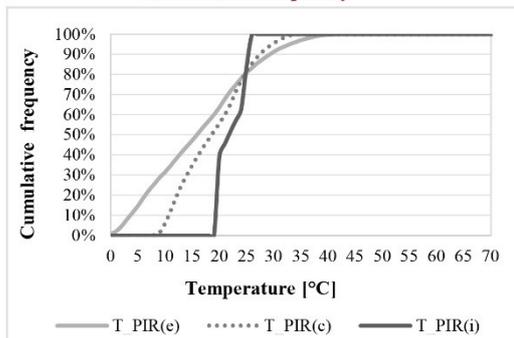
**Time series of temperature (PIR)**



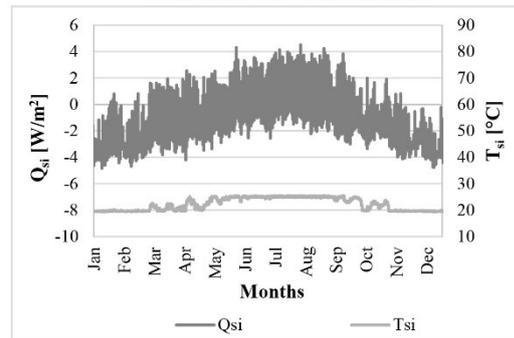
**Typical day analysis (04/09)**



**Cumulative frequency**

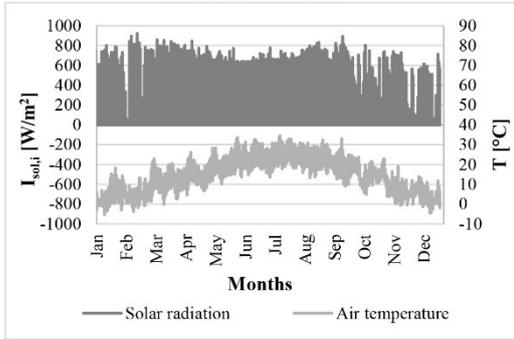


**Time series of internal surface**

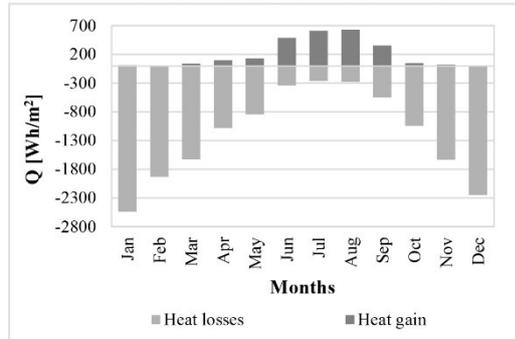


### Configurazione Benchmark\_Sud

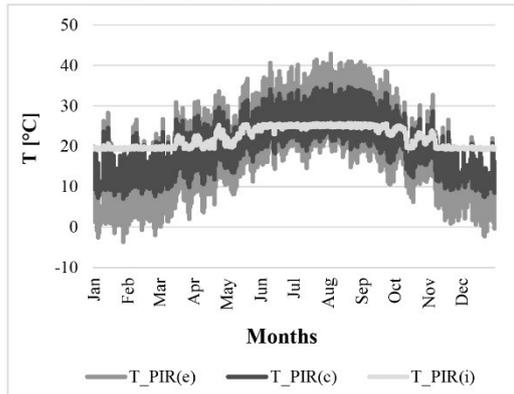
**Boundary conditions**



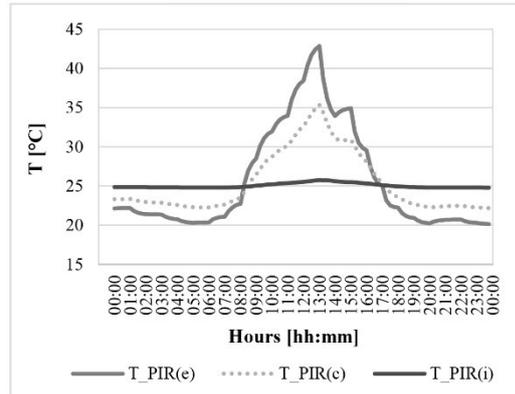
**Monthly analysis (interior surface)**



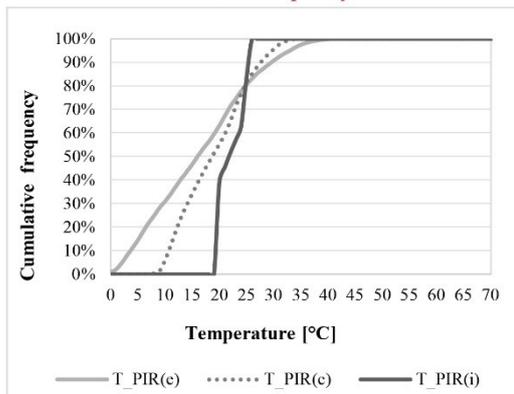
**Time series of temperature (PIR)**



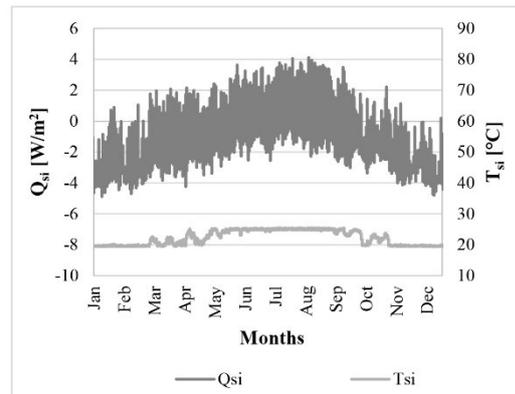
**Typical day analysis (04/08)**



**Cumulative frequency**

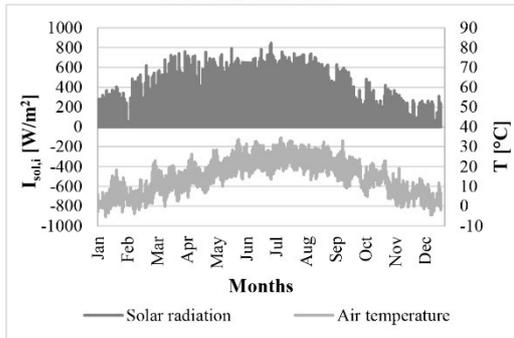


**Time series of internal surface**

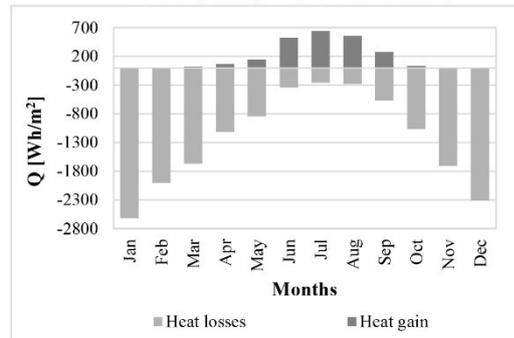


### Configurazione Benchmark\_Ovest

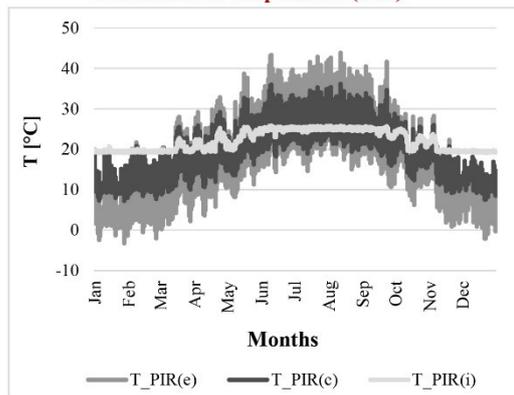
**Boundary conditions**



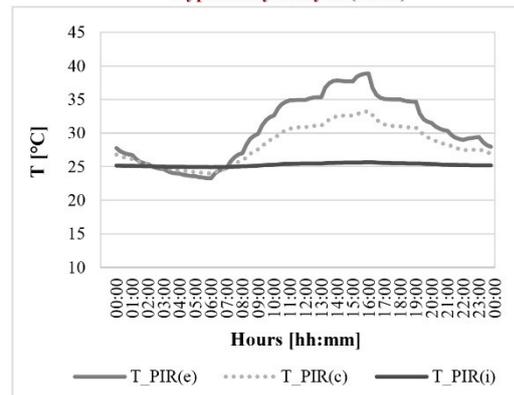
**Monthly analysis (interior surface)**



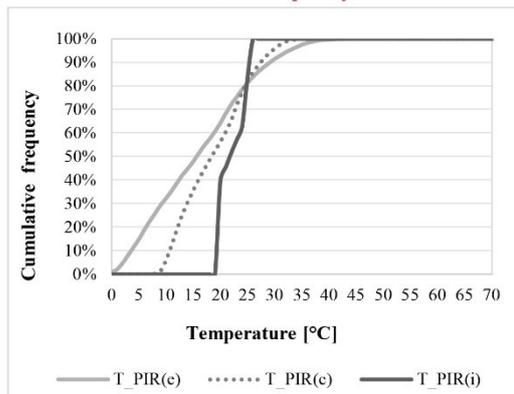
**Time series of temperature (PIR)**



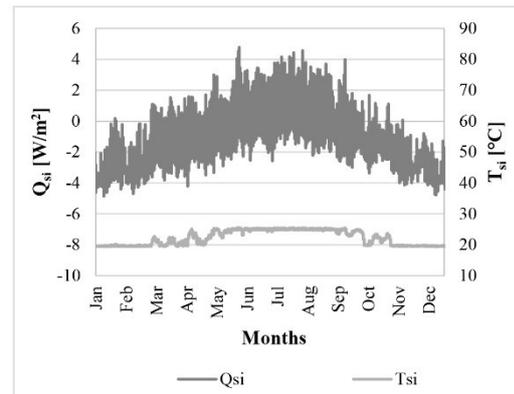
**Typical day analysis (23/07)**



**Cumulative frequency**



**Time series of internal surface**



## Appendice capitolo 6

## Conducibilità termica – DOE -PCM\_aluminium case\_a (CSM 10 mm)

**Dati di input**

Air cavity	t [mm]	w [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	$\lambda_{eq}^{17}$ [W/mK]	$\epsilon_1$ [-]	$\epsilon_2$ [-]	T <sub>low</sub> [°C]	T <sub>up</sub> [°C]
1	0.7	12	6.65	0.025	0.1	0.9	20	21
2	4.8	57	175.3	0.028	0.1	0.9	20	21
3	4.8	26	98.1	0.028	0.1	0.9	20	21

Material	$\lambda$ [W/mK]	$\epsilon$ [-]
PCM RT	0.2	0.9
Aluminium	235	0.1

CSM Panel							
Therm			Actual size				
I <sub>therm</sub> [m]	W <sub>therm</sub> [m]	A <sub>therm</sub> [m <sup>2</sup> ]	w [m]	l [m]	t [m]	2p [m]	A [m <sup>2</sup> ]
0.254	1	0.254	0.45	0.3	0.010	1.5	0.135

**Dati di output – elaborazione**

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\Delta T$ [K]	Q <sub>1D-2D</sub> [W]	$\psi$ [W/mK]	L [m]	Q <sub>2D</sub> [W]	Q <sub>extra</sub> [W]	q <sub>tot</sub> [W]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]
1A	0	10	57.792	-	-	30.716	-	102.834	0.777
2A	0		96.285	3.849	0.038	-	2.925		
3A	0		103.92	4.613	1.50	-	69.192		
1B	0.01	10	50.098	-	-	26.627	-	48.096	0.363
2B	0.01		64.723	1.463	0.038	-	1.115		
3B	0.01		63.670	1.357	1.50	-	20.358		
1C	0.1	10	14.773	-	-	7.852	-	8.268	0.0625
2C	0.1		14.705	-0.0068	0.038	-	-0.0052		
3C	0.1		15.054	0.0281	1.5	-	0.421		
1D	1	10	2.3608	-	-	1.255	-	1.249	0.00944
2D	1		2.3310	-0.0030	0.038	-	-0.0023		
3D	1		2.3587	-0.0002	1.5	-	-0.0032		

<sup>17</sup> La conducibilità termica delle cavità d'aria in esame è stata determinata secondo quanto indicato nella norma UNI-EN-ISO 6946:2008 "Appendice B"[45].

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]
A	0

### Calcolo del $\Delta T_{\max}$

Calculation about heat flow meter data				
Q <sub>max</sub> [W]	A [m <sup>2</sup> ]	t [m]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]	$\Delta T_{\max}$ [K]
800	0.36	0.010	0.777	29

### Configurazioni pannello/i

Configuration 1									
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>1</sub> [W]	t [m]	$\lambda_1$ [W/mK]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]	
49.144	0.065	10	4.613	0.254	72.577	0.010	1.125	0.777	

Configuration 2									
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_2$ [W/mK]	L <sub>2</sub> [m]	Q <sub>2</sub> [W]	t [m]	$\lambda_2$ [W/mK]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]	
49.144	0.065	10	3.849	0.038	50.607	0.010	0.784	0.777	

Configuration 3									
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>3</sub> [W]	t [m]	$\lambda_3$ [W/mK]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]	
49.144	0.065	10	4.613	0.381	84.293	0.010	1.307	0.777	

Configuration 4									
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>4</sub> [W]	t [m]	$\lambda_4$ [W/mK]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]	
49.144	0.065	10	4.613	0.254	96.010	0.010	1.488	0.777	

## Conducibilità termica – DOE - PCM\_aluminium case\_c (CSM 10 mm)

### Dati di input

Air cavity	t [mm]	w [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	$\lambda_{eq}^{18}$ [W/mK]	$\epsilon_1$ [-]	$\epsilon_2$ [-]	T <sub>low</sub> [°C]	T <sub>up</sub> [°C]
1	0.7	12	6.65	0.025	0.1	0.9	20	21
2	4.8	57	175.3	0.028	0.1	0.9	20	21
3	4.8	26	98.1	0.028	0.1	0.9	20	21

Material	$\lambda$ [W/mK]	$\epsilon$ [-]
PCM SP	0.5	0.9
Aluminium	235	0.1

BC	T [°C]	Hc [W/m <sup>2</sup> K]
1	10	9999
2	20	9999

CSM Panel								
Therm			Actual size					
l <sub>therm</sub> [m]	w <sub>therm</sub> [m]	A <sub>therm</sub> [m <sup>2</sup> ]	w [m]	l [m]	t [m]	2p [m]	A [m <sup>2</sup> ]	
0.254	1	0.254	0.45	0.3	0.010	1.5	0.135	

### Dati di output – elaborazione

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\Delta T$ [K]	Q <sub>1D-2D</sub> [W]	$\psi$ [W/mK]	L [m]	Q <sub>2D</sub> [W]	Q <sub>extra</sub> [W]	q <sub>tot</sub> [W]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]
1A	0	10	141.82	-	-	75.377	-	140.013	1.0579
2A	0		164.34	2.252	0.038	-	1.7115		
3A	0		183.77	4.195	1.5	-	62.925		
1B	0.01	10	60.76	-	-	32.297	-	33.244	0.251
2B	0.01		57.076	-0.369	0.038	-	-0.281		
3B	0.01		61.59	0.0818	1.5	-	1.227		
1C	0.1	10	17.41	-	-	9.253	-	8.836	0.0668
2C	0.1		16.16	-0.125	0.038	-	-0.0949		
3C	0.1		17.20	-0.0215	1.5	-	-0.323		
1D	1	10	2.42	-	-	1.286	-	1.263	0.0095
2D	1		2.36	-0.0058	0.038	-	-0.0044		
3D	1		2.41	-0.0013	1.5	-	-0.0189		

<sup>18</sup> La conducibilità termica delle cavità d'aria in esame è stata determinata secondo quanto indicato nella norma UNI-EN-ISO 6946:2008 "Appendice B" [45].

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]
A	0

### Calcolo del $\Delta T_{\max}$

Calculation about heat flow meter data				
$Q_{\max}$ [W]	A [m <sup>2</sup> ]	t [m]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]	$\Delta T_{\max}$ [K]
800	0.36	0.010	1.0579	21

### Configurazioni pannello/i

Configuration 1								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>1</sub> [W]	t [m]	$\lambda_1$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
49.144	0.065	10	4.195	0.254	88.222	0.010	1.395	1.0579

Configuration 2								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_2$ [W/mK]	L <sub>2</sub> [m]	Q <sub>2</sub> [W]	t [m]	$\lambda_2$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
49.144	0.065	10	2.252	0.038	67.768	0.010	1.0849	1.0579

Configuration 3								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>3</sub> [W]	t [m]	$\lambda_3$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
49.144	0.065	10	4.195	0.381	98.878	0.010	1.563	1.0579

Configuration 4								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>4</sub> [W]	t [m]	$\lambda_4$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
49.144	0.065	10	4.195	0.254	109.533	0.010	1.732	1.0579

## Conducibilità termica – DOE - PCM\_aluminium case\_c (CSM 15 mm)

**Dati di input**

Air cavity	t [mm]	w [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	$\lambda_{eq}^{19}$ [W/mK]	$\epsilon_1$ [-]	$\epsilon_2$ [-]	T <sub>low</sub> [°C]	T <sub>up</sub> [°C]
1	0.7	12	6.65	0.025	0.1	0.9	20	21
2.1	4.7	57	259.3	0.029	0.1	0.9	20	21
2.2	9.7	87	489.76	0.028	0.1	0.9	20	21
3	7.2	26	146.1	0.029	0.1	0.9	20	21

Material	$\lambda$ [W/mK]	$\epsilon$ [-]
PCM SP	0.5	0.9
Aluminium	235	0.1

BC	T [°C]	Hc [W/m <sup>2</sup> K]
1	10	9999
2	20	9999

**CSM Panel**

Therm			Actual size				
l <sub>therm</sub> [m]	w <sub>therm</sub> [m]	A <sub>therm</sub> [m <sup>2</sup> ]	w [m]	l [m]	t [m]	2p [m]	A [m <sup>2</sup> ]
0.254	1	0.254	0.45	0.3	0.015	1.5	0.135

**Dati di output – elaborazione**

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]	$\Delta T$ [K]	Q <sub>1D-2D</sub> [W]	$\psi$ [W/mK]	L [m]	Q <sub>2D</sub> [W]	Q <sub>extra</sub> [W]	q <sub>tot</sub> [W]	$\lambda_{eq}$ [W/mK]
1A	0	10	92.321	-	-	49.0682	-	98.329	1.0925
2A	0		99.461	0.714	0.038	-	0.543		
3A	0		124.80	3.248	1.5	-	48.719		
1B	0.01	10	74.029	-	-	39.346	-	52.967	0.589
2B	0.01		70.898	-0.313	0.038	-	-0.238		
3B	0.01		83.268	0.924	1.5	-	13.859		
1C	0.1	10	16.335	-	-	8.682	-	8.419	0.0935
2C	0.1		14.411	-0.192	0.038	-	-0.146		
3C	0.1		16.257	-0.0078	1.5	-	-0.117		
1D	1	10	2.397	-	-	1.274	-	1.248	0.0139
2D	1		2.287	-0.0111	0.038	-	-0.0084		
3D	1		2.385	-0.0012	1.5	-	-0.0182		

<sup>19</sup> La conducibilità termica delle cavità d'aria in esame è stata determinata secondo quanto indicato nella norma UNI-EN-ISO 6946:2008 "Appendice B"[45].

Test	Ri + Re [m <sup>2</sup> K/W]
A	0

### Calcolo del $\Delta T_{\max}$

Calculation about heat flow meter data				
$Q_{\max}$ [W]	A [m <sup>2</sup> ]	t [m]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]	$\Delta T_{\max}$ [K]
800	0.36	0.015	1.0925	31

### Configurazioni pannello/i

Configurazione 1								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>1</sub> [W]	t [m]	$\lambda_1$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
46.991	0.065	10	3.248	0.254	63.491	0.015	1.476	1.0925

Configurazione 2								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_2$ [W/mK]	L <sub>2</sub> [m]	Q <sub>2</sub> [W]	t [m]	$\lambda_2$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
46.991	0.065	10	0.714	0.038	47.263	0.015	1.0989	1.0925

Configurazione 3								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>3</sub> [W]	t [m]	$\lambda_3$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
46.991	0.065	10	3.248	0.381	71.740	0.015	1.668	1.0925

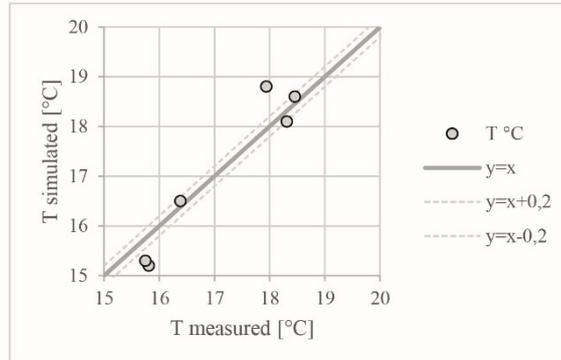
Configurazione 4								
Q [W]	A [m <sup>2</sup> ]	$\Delta T$ [K]	$\Psi_3$ [W/mK]	L <sub>3</sub> [m]	Q <sub>4</sub> [W]	t [m]	$\lambda_4$ [W/mK]	$\lambda_{\text{eq}}$ [W/mK]
46.991	0.065	10	3.248	0.254	79.990	0.015	1.860	1.0925

## Conducibilità Termica - VALIDAZIONE MODELLO SIMULATIVO REALIZZATO CON SOFTWARE THERM – PCM\_aluminium case\_a (CSM 10 mm)

Setpoint	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	λ [W/mK]
1	14	19	0.1406

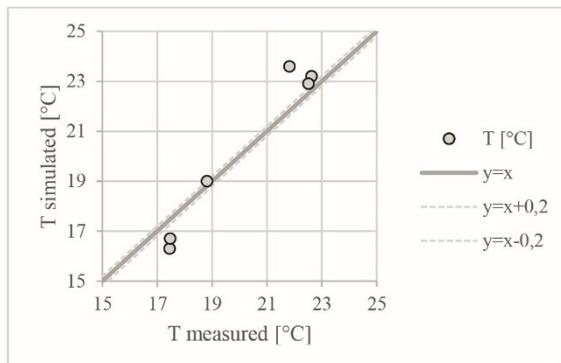
Thermocouples	T Measured [°C]	T Simulated [°C]	
Up	t/c 1	15.81	15.20
	t/c 2	15.75	15.30
	t/c 3	16.38	16.50
Low	t/c 9	18.45	18.60
	t/c 10	18.31	18.10
	t/c 11	17.94	18.80



Setpoint	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	λ [W/mK]
2	14	24	0.1400

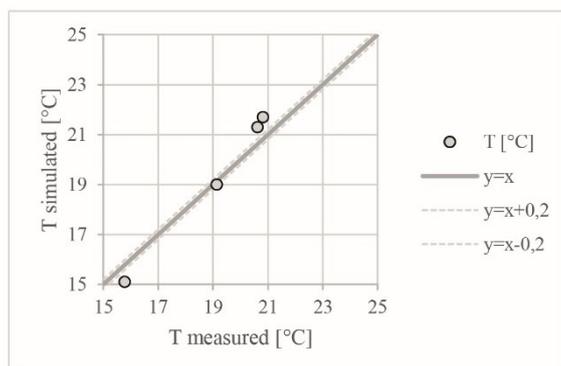
Thermocouples	T Measured [°C]	T Simulated [°C]	
Up	t/c 1	17.45	16.30
	t/c 2	17.47	16.70
	t/c 3	18.81	19.00
Low	t/c 9	22.63	23.20
	t/c 10	22.51	22.90
	t/c 11	21.83	23.60



Setpoint	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	λ [W/mK]
3	24	14	0.1400

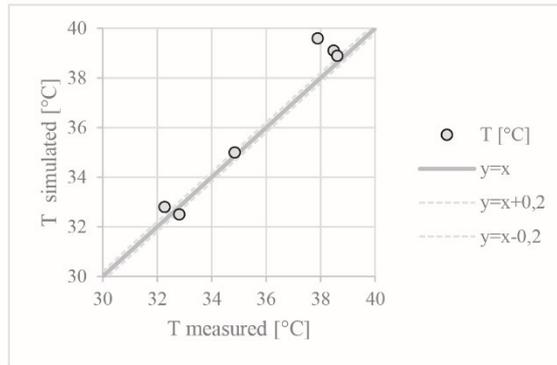
  

Thermocouples	T Measured [°C]	T Simulated [°C]	
Up	t/c 1	20.82	21.7
	t/c 2	20.625	21.3
	t/c 3	19.144	19
Low	t/c 9	15.598	14.8
	t/c 10	15.784	15.1
	t/c 11	15.99	14.4



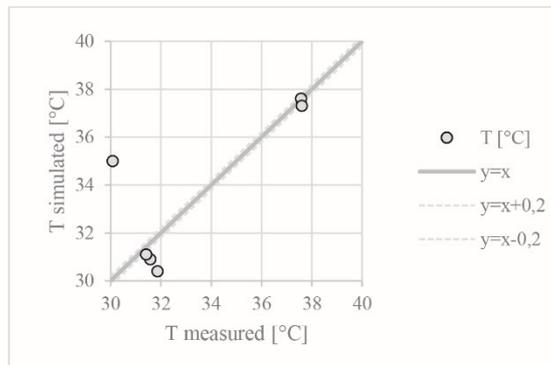
Setpoint	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	λ [W/mK]
4	30	40	0.1557

Thermocouples		T Measured [°C]	T Simulated [°C]
Up	t/c 1	32.812	32.5
	t/c 2	32.276	32.8
	t/c 3	34.852	35
Low	tc/9	38.48	39.1
	t/c 10	38.614	38.9
	t/c 11	37.892	39.6

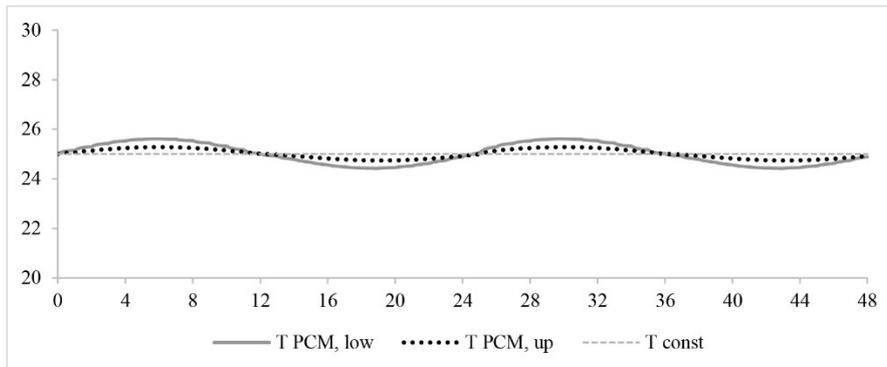
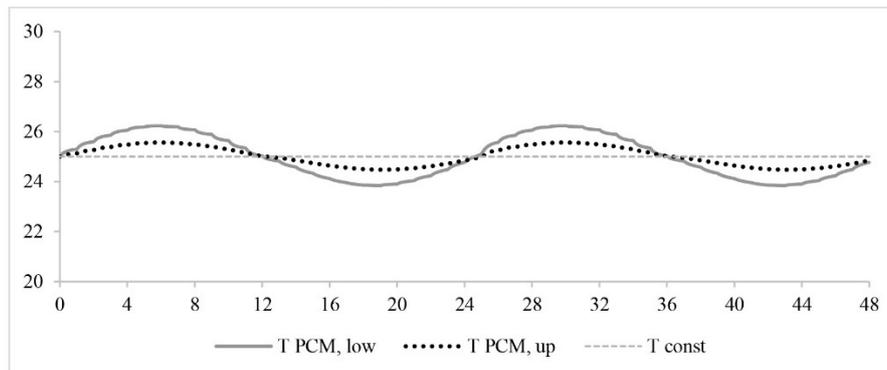
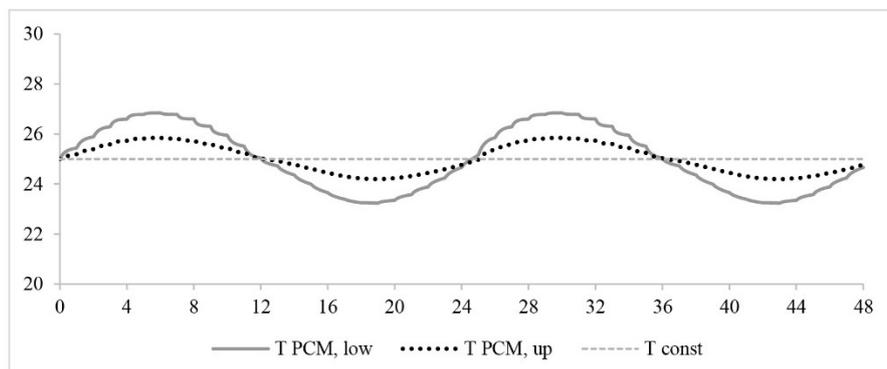


Setpoint	T <sub>upper</sub> [°C]	T <sub>lower</sub> [°C]	λ [W/mK]
5	40	30	0.1516

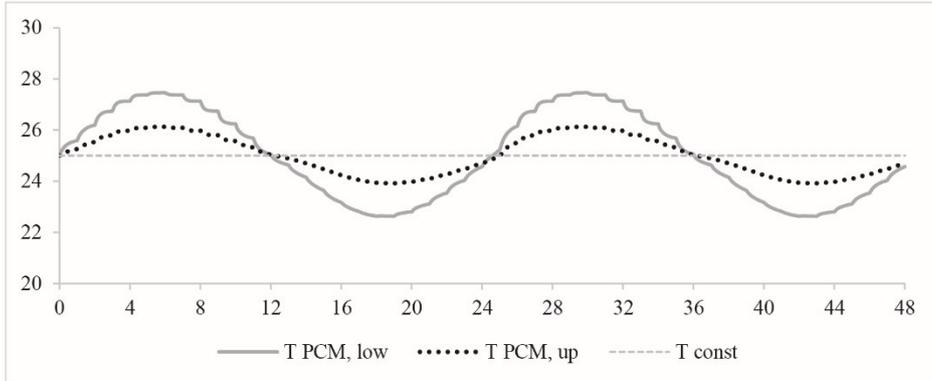
Thermocouples		T Measured [°C]	T Simulated [°C]
Up	t/c 1	37.564	37.6
	t/c 2	37.598	37.3
	t/c 3	30.084	35
Low	tc/9	31.576	30.9
	t/c 10	31.41	31.1
	t/c 11	31.866	30.4



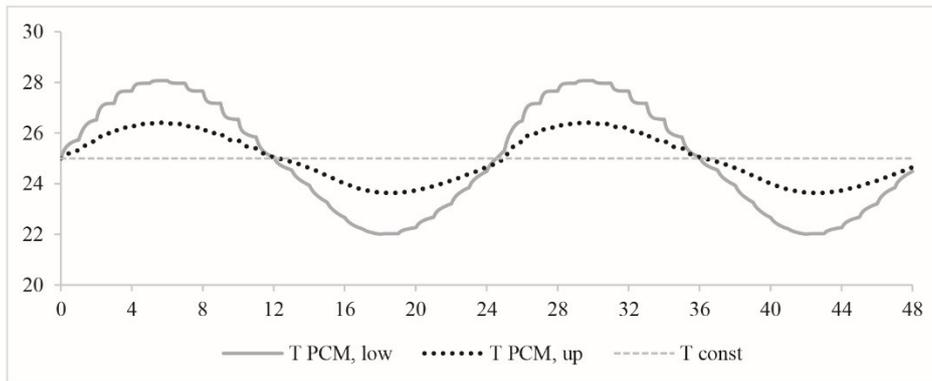
## Risposta sinusoidale - DOE - PCM\_aluminium case\_a (CSM 10 mm)

Amplitude  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ 

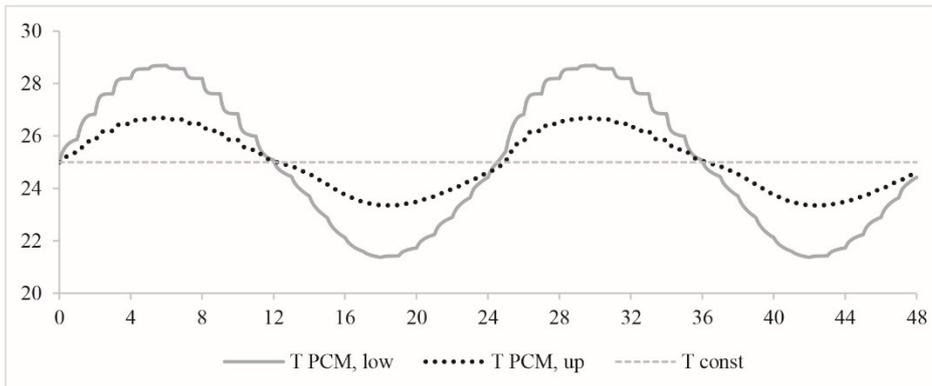
Amplitude  $\pm 8^{\circ}\text{C}$



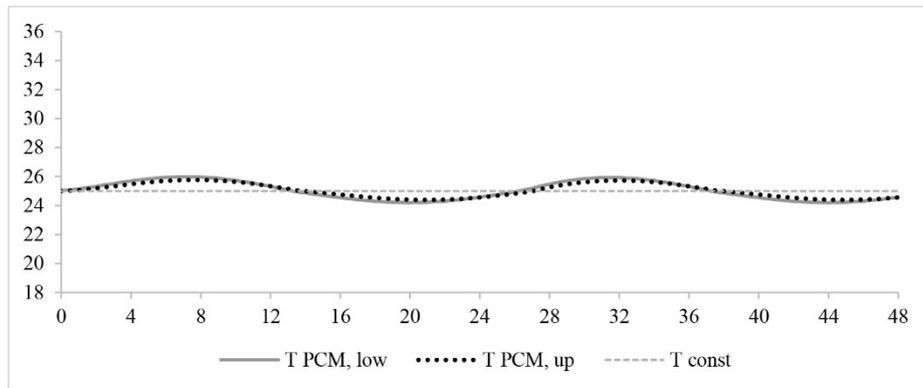
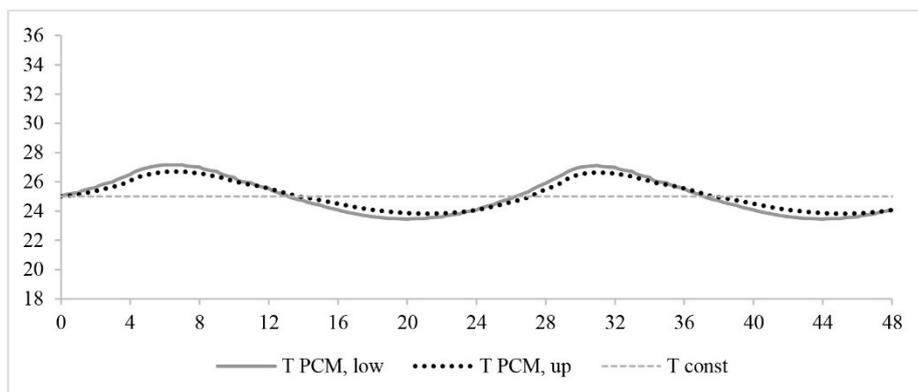
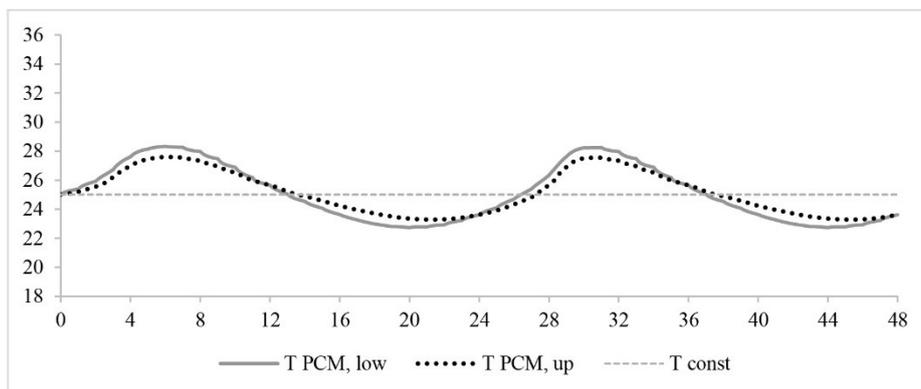
Amplitude  $\pm 10^{\circ}\text{C}$

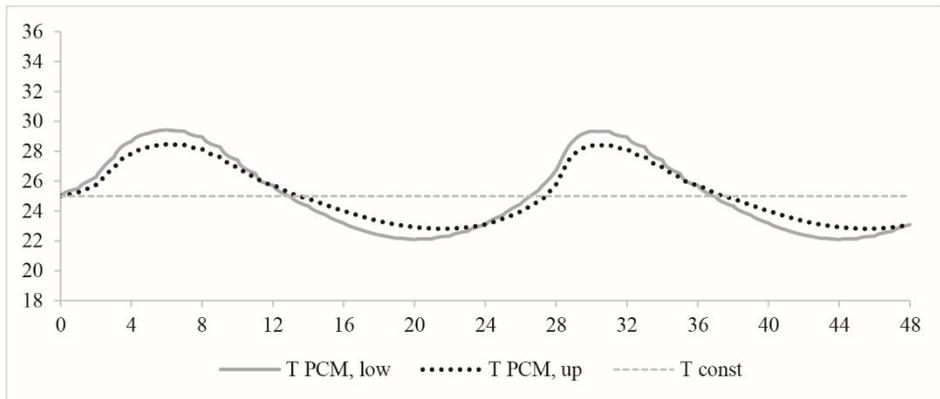
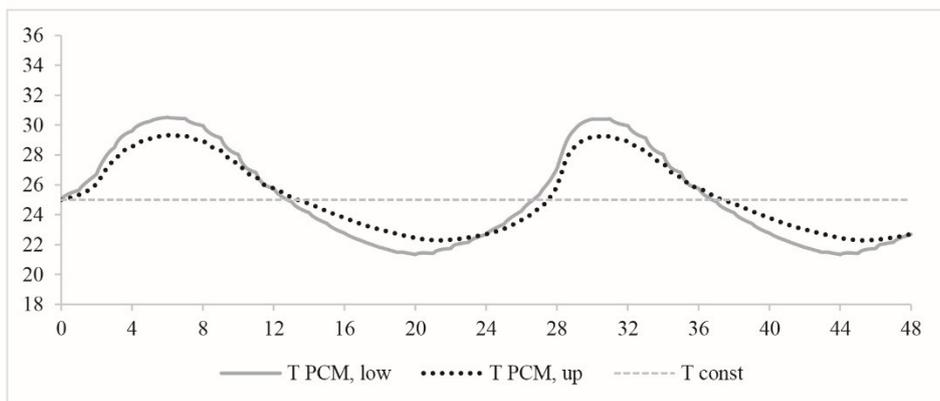
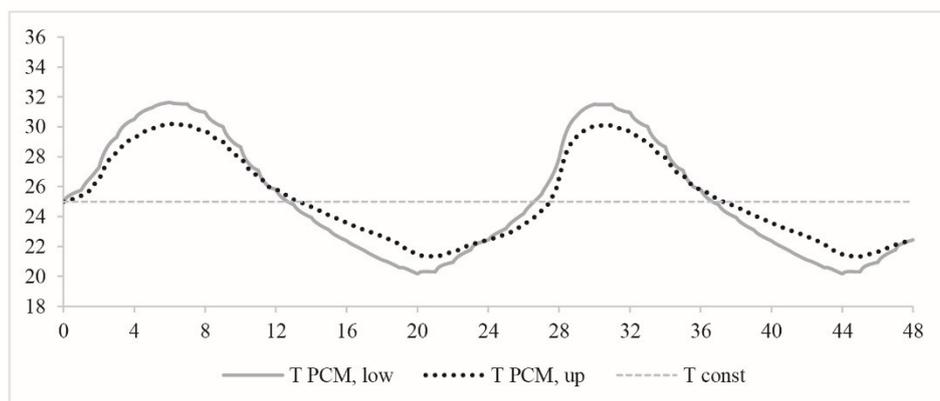


Amplitude  $\pm 12^{\circ}\text{C}$



## Risposta sinusoidale - DOE - PCM\_aluminium case\_c (CSM 15 mm)

Amplitude  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ 

Amplitude  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ Amplitude  $\pm 12^{\circ}\text{C}$ 

## Conducibilità termica - RISULTATI SPERIMENTALI

## PCM\_aluminium case\_a (CSM 10 mm)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Setpoint 1	19	14	16.5	5	0.1406
Setpoint 2	24	14	19	10	0.1400
Setpoint 3	14	24	19	10	0.1400
<b>Thermal conductivity – solid - average value</b>					<b>0.1402</b>
Setpoint 4	40	30	35	10	0.1557
Setpoint 5	30	40	35	10	0.1516
<b>Thermal conductivity – liquid - average value</b>					<b>0.1537</b>
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.1456</b>

## PCM\_aluminium case\_c (CSM 10 mm)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	14	24	19	10	0.1378
Test 2_ Setpoint 1	27	37	32	10	0.1696
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.1537</b>

## PCM\_aluminium case\_c (CSM 15 mm)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	14	24	19	10	0.1817
Test 2_ Setpoint 1	27	37	32	10	0.2882
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.2350</b>

## PCM\_plastic film bags

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Setpoint 1	14	24	19	10	0.1528
Setpoint 2	24	14	19	10	0.1462
<b>Thermal conductivity – solid - average value</b>					<b>0.1495</b>
Setpoint 3	30	40	35	10	0.1911
Setpoint 4	40	30	35	10	0.1952
<b>Thermal conductivity – liquid - average value</b>					<b>0.1932</b>
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.1713</b>

## PCM\_plastic container

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	11	21	16	10	0.1484
Test 2_ Setpoint 1	27	37	32	10	0.2082
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.1783</b>

## PCM\_plastic case\_a(23)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	12.50	22.50	17.50	10	0.3441
Test 2_ Setpoint 1	25	35	30	10	0.3558
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.3500</b>

## PCM\_plastic case\_b(26)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	15	25	20	10	0.3662
Test 2_ Setpoint 1	28	38	33	10	0.3440
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.3551</b>

## PCM\_plastic case\_c(32)

	<b>T<sub>upper</sub></b> [°C]	<b>T<sub>lower</sub></b> [°C]	<b>T<sub>average</sub></b> [°C]	<b>ΔT</b> [°C]	<b>λ</b> [W/mK]
Test 1_ Setpoint 1	15	25	20	10	0.4151
Test 2_ Setpoint 1	34	44	39	10	0.3459
<b>Thermal conductivity - average value</b>					<b>0.3805</b>

## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

### PCM\_aluminium case\_a (CSM 10 mm)

	t	[m]	m	Vnetto	Vlordo	$\rho$ eq,m
			[kg]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
CSM 0,30x0,45	0.00993	15020	0.897	0.00134055		669.1283
CSM+PCM 0,254x0,254	0.00993		0.266	0.00039775		415.4349
PCM 0,254x0,254	-		0.146	0.00035338	0.000640644	414.1344
CSM (Al) 0,254x0,254	-		0.120	0.00004437		2700
$\Delta T = 1^\circ C$ Heating phase 15-32°C						
Mean Temp	Enthalpy	Partial	Partial	Partial	Enthalpy	Enthalpy
[°C]	[J/m <sup>2</sup> ]	Enthalpy	Enthalpy	Enthalpy	PCM [J/kgK]	PCM
		[J/m <sup>2</sup> ]	[J/kgK]	[kJ/kgK]		[kJ/kgK]
15.51	12928	15020	3641	3.64	5884.73	6
16.52	26268	15614	3785	3.78	6146.59	6
17.52	40524	16832	4080	4.08	6683.54	7
18.52	56338	18881	4577	4.58	7586.82	8
19.52	74270	23068	5592	5.59	9432.64	9
20.52	96078	30728	7449	7.45	12809.49	13
21.53	121880	44293	10737	10.74	18789.53	19
22.54	150604	69169	16767	16.77	29755.95	30
23.55	180732	103321	25046	25.05	44811.63	45
24.55	238339	117999	28604	28.60	51282.33	51
25.55	266446	28107	6813	6.81	11654.04	12
26.56	317371	50925	12345	12.34	21713.21	22
27.54	336192	18821	4562	4.56	7560.37	8
28.52	346733	10541	2555	2.56	3910.19	4
29.52	357180	10447	2532	2.53	3868.75	4
30.52	367619	10439	2531	2.53	3865.23	4
31.52	378069	10450	2533	2.53	3870.08	4
C (24°-29°)[J/m2]		236840		144		250
C [kJ/m2]		237				
C normalized [kJ						
mm/m2]		24				
$\Delta T = 1^\circ C$ Cooling phase 32-15 °C						
31.52	10678	13932	3377.235	3.38	5405.09	5
30.52	21309	14046	3404.87	3.40	5455.35	5
29.52	31842	14006	3395.173	3.40	5437.71	5
28.52	42402	13920	3374.326	3.37	5399.80	5
27.52	52893	13536	3281.241	3.28	5230.52	5
26.52	63523	13729	3328.026	3.33	5315.60	5
25.51	75428	81985	19873.86	19.87	35405.80	35
24.48	130986	201983	48962.39	48.96	88306.11	88
23.45	200479	157890	38273.88	38.27	68868.01	69
22.46	255307	83920	20342.92	20.34	36258.83	36
21.49	294500	39193	9500.716	9.50	16541.23	17
20.52	311478	16978	4115.611	4.12	6747.90	7
19.52	365148	53670	13010.06	13.01	22923.32	23
18.5	391225	26077	6321.286	6.32	10759.13	11
17.51	412162	20937	5075.306	5.08	8493.20	8
16.51	429538	17376	4212.09	4.21	6923.36	7
15.51	444976	15438	3742.302	3.74	6069.00	6
C (21°-26°C)[J/m2]		578700		194		340
C [kJ/m2]		579				
C normalized [kJ						
mm/m2]		58				

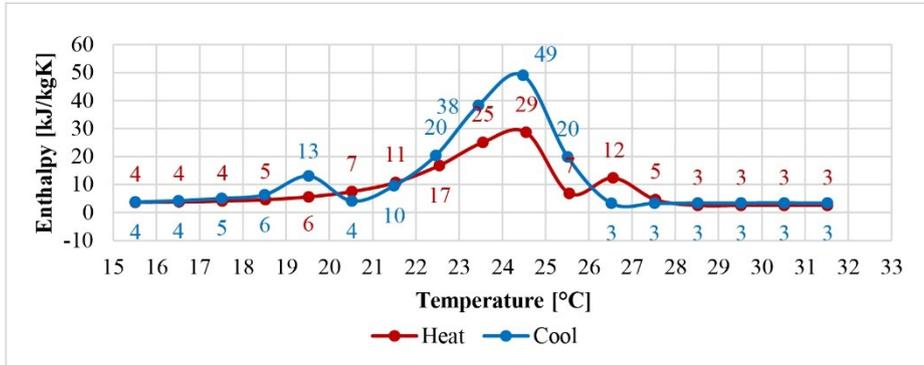
$\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$		Heating phase 20-28 °C					
Mean Temp [°C]	Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/kg]	Partial Enthalpy [kJ/kgK]	Spc Heat [J/(m <sup>3</sup> K)]	Spc Heat [J/kgK]	Spc Heat [kJ/kgK]
20.27	11224	11224	2720.793	2.72	2175502	5237	5.2
20.78	23942	12718	3082.951	3.08	2458587	5918	5.9
21.28	37715	13773	3338.692	3.34	2730251	6572	6.6
21.78	53479	15764	3821.327	3.82	3035714	7307	7.3
22.29	70621	17142	4155.366	4.16	3325339	8004	8.0
22.79	89108	18487	4481.406	4.48	3569195	8591	8.6
23.3	108693	19585	4747.57	4.75	3799805	9147	9.1
23.81	132623	23930	5800.835	5.80	4591841	11053	11.1
24.31	153068	20445	4956.041	4.96	4056525	9765	9.8
24.81	173869	20801	5042.339	5.04	4060535	9774	9.8
25.31	194412	20543	4979.798	4.98	4023834	9686	9.7
25.81	215354	20942	5076.519	5.08	4094027	9855	9.9
26.31	237807	22453	5442.798	5.44	4368689	10516	10.5
26.79	305015	67208	16291.79	16.29	14402710	34669	34.7
27.27	310171	5156	1249.858	1.25	1014236	2441	2.4
27.77	315281	5110	1238.707	1.24	1005866	2421	2.4
28.27	320524	5243	1270.948	1.27	1012412	2437	2.4
$\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$		Cooling phase 28,5-20 °C					
28.27	5468	5468	1325	1.33	1073112	2583	2.6
27.77	10851	5383	1305	1.30	1081148	2602	2.6
27.27	16263	5412	1312	1.31	1082141	2605	2.6
26.77	21673	5410	1311	1.31	1088719	2621	2.6
26.27	26984	5311	1287	1.29	1062330	2557	2.6
25.77	32401	5417	1313	1.31	1083122	2607	2.6
25.26	42368	9967	2416	2.42	1920541	4623	4.6
24.74	65195	22827	5533	5.53	4367954	10514	10.5
24.23	92743	27548	6678	6.68	5398024	12994	13.0
23.72	120603	27860	6754	6.75	5580078	13432	13.4
23.23	145002	24399	5915	5.91	4951295	11918	11.9
22.73	166474	21472	5205	5.20	4346198	10462	10.5
22.24	186276	19802	4800	4.80	3988966	9602	9.6
21.74	204888	18612	4512	4.51	3736170	8993	9.0
21.25	221990	17102	4146	4.15	3499305	8423	8.4
20.75	238067	16077	3897	3.90	3208490	7723	7.7
20.26	250942	12875	3121	3.12	2647357	6372	6.4

Volumi netti, riferiti alla sola area di misura di 254 x 254 mm, modellati con SketchUP

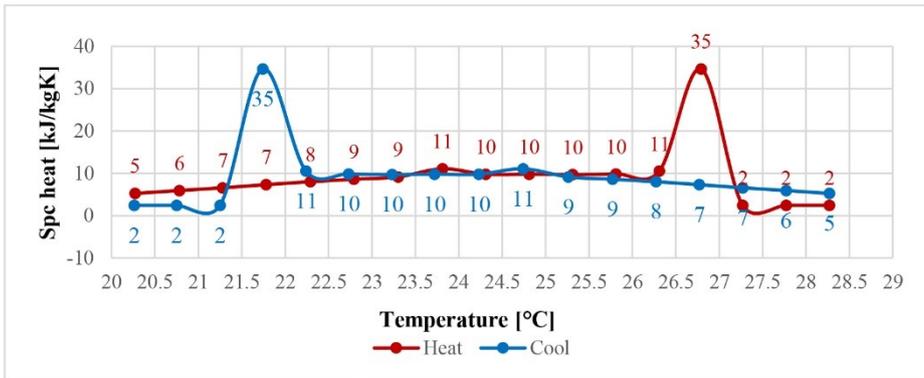
Dati riferiti al solo PCM puro per confronto con dati dichiarati da Rubitherm

Nei grafici "Heating phase - Enthalpy vs temperature" e "Cooling phase - Enthalpy vs temperature" sono state confrontate le curve di entalpia nelle due fasi e con due diversi  $\Delta T$ . Nello specifico, con  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  sono stati utilizzati i dati di Partial Enthalpy [kJ/kgK], i quali sono stati verificati dal punto di vista dei flussi termici; mentre con  $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$  sono stati utilizzati i valori di Spc Heat [kJ/kgK]

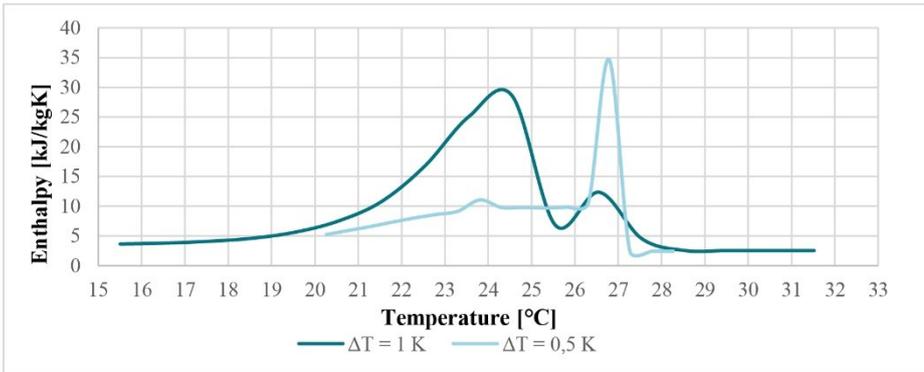
$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature



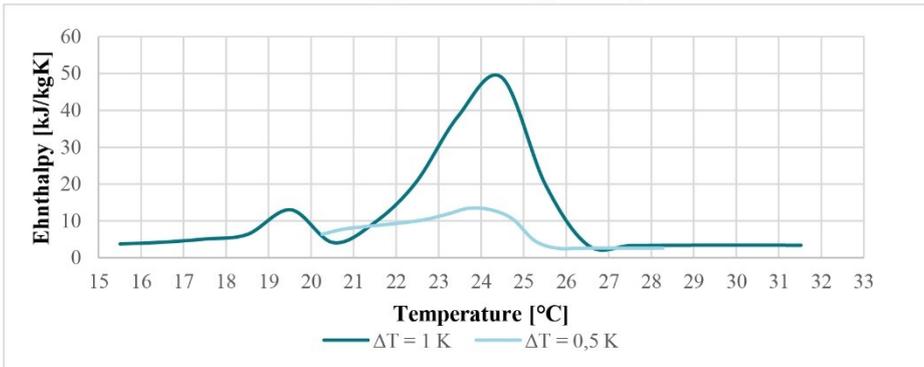
$\Delta T = 0.5 \text{ K}$  - Spc heat vs temperature



Heating phase - Enthalpy vs temperature



Cooling phase - Enthalpy vs temperature



## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

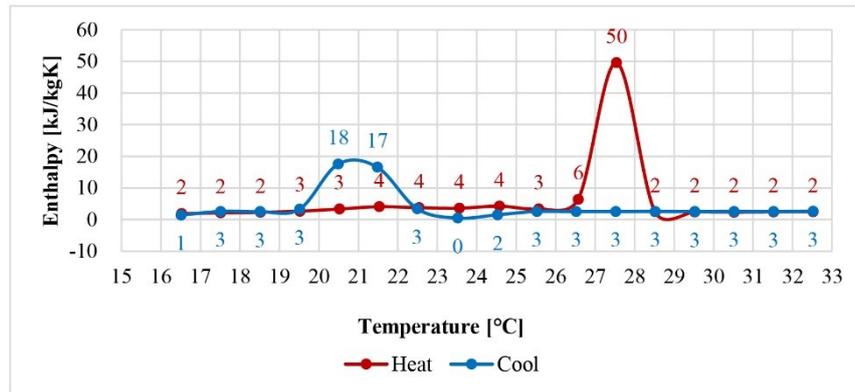
## PCM\_aluminium case\_c (CSM 15 mm) – Test 1

	t [m]	m [kg]	Vnetto [m <sup>3</sup> ]	Vlordo [m <sup>3</sup> ]	ρ eq,m [kg/m <sup>3</sup> ]	C [J/m <sup>2</sup> ]	spc heat [J/kgK]
PANEL 0,30x0,45	0.01498	2.358	0.0020223		1165.999		
PANEL 0,254x0,254	0.01498	1.001	0.00085851		1035.777		
PCM 0,254x0,254	-	0.864	0.00080781	0.00096645	1069.721		
CSM (Al) 0,254x0,254	-	0.137	0.00005070		2700		900
PARA 0,254x0,254	0.00404	0.264	0.00026064		1013.266	7195.479	
$\Delta T = 1^\circ C$ Heating phase 16-32°C							
Mean Temp [°C]	Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy NO PARA [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy NO PARA [J/kgK]	Partial Enthalpy NO PARA [kJ/kgK]	Enthalpy PCM [J/kgK]	Enthalpy PCM [kJ/kgK]
16.52	37984	36620	29425	1896	2	2054	2
17.51	79897	40262	33066	2131	2	2326	2
18.52	125173	43313	36117	2328	2	2554	3
19.52	176100	48522	41327	2663	3	2943	3
20.52	235654	59095	51900	3345	3	3732	4
21.53	303813	70446	63250	4076	4	4580	5
22.54	369300	65487	58292	3757	4	4209	4
23.56	432386	63086	55891	3602	4	4030	4
24.57	505488	73102	65907	4248	4	4778	5
25.57	565286	59798	52603	3390	3	3785	4
26.57	672322	107036	99841	6435	6	7311	7
27.54	1448632	776310	769115	49569	50	57279	57
28.52	1493826	45194	37999	2449	2	2694	3
29.52	1538802	44976	37781	2435	2	2678	3
30.52	1582576	43774	36579	2357	2	2588	3
31.52	1627331	44755	37560	2421	2	2662	3
32.52	1673107	45776	38581	2487	2	2738	3
		C (24°-29°)[J/m <sup>2</sup> ]	1063243		100		113
		C [kJ/m <sup>2</sup> ]	1063.24				
		C normalized [kJ mm/m <sup>2</sup> ]	71				
$\Delta T = 1^\circ C$ Cooling phase 32-16 °C							
32.52	44724	48285	41089	2648	3	2925	3
31.52	89594	46581	39385	2538	3	2798	3
30.52	134379	47291	40096	2584	3	2851	3
29.52	179184	46449	39253	2530	3	2788	3
28.52	224459	47268	40072	2583	3	2849	3
27.52	269365	46672	39476	2544	3	2805	3
26.52	314557	46604	39409	2540	3	2800	3
25.52	359363	47073	39878	2570	3	2835	3
24.53	281452	30928	23733	1530	2	1629	2
23.52	296234	14782	7587	489	0	424	0
22.49	356810	60576	53381	3440	3	3843	4
21.48	621254	264444	257249	16580	17	19064	19
20.49	900598	279344	272149	17540	18	20176	20
19.51	958696	58098	50903	3281	3	3658	4
18.51	1005123	46427	39232	2528	3	2786	3
17.51	1052709	47586	40391	2603	3	2873	3
16.51	1081606	28897	21702	1399	1	1478	1

C (21°-26°C)[J/m <sup>2</sup>	421.23	70
C [kJ/m <sup>2</sup> ]	28	
C normalized [kJ mm/m <sup>2</sup> ]		

Volumi netti, riferiti alla sola area di misura di 254 x 254 mm, modellati con SketchUP  
 Dati riferiti al solo PCM puro per confronto con dati dichiarati da Rubitherm

$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature



## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

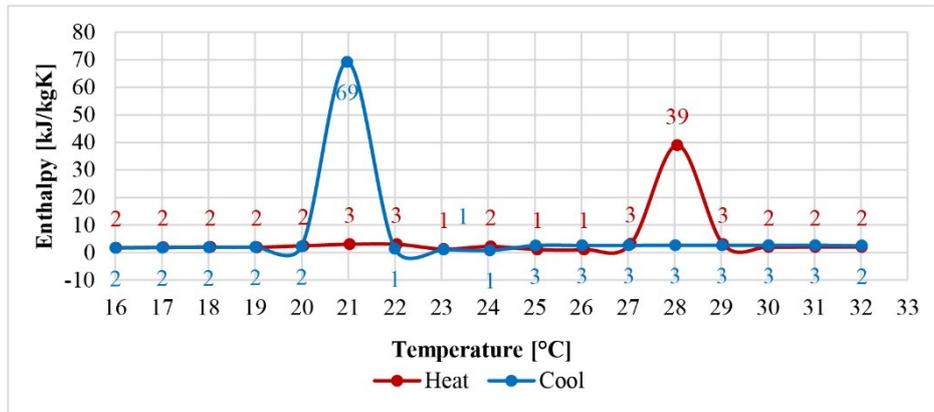
## PCM\_aluminium case\_c (CSM 15 mm) – Test 2

	t [m]	m [kg]	Vnetto [m <sup>3</sup> ]	Vlordo [m <sup>3</sup> ]	$\rho_{eq,m}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
CSM 0,30x0,45	0.014995	2.127	0.002024325		1050.721	
CSM+PCM 0,254x0,254	0.014995	0.902054	0.00085851	0.000967417	932.4353	
PCM 0,254x0,254		0.765164	0.00080781			
CSM (Al) 0,254x0,254		0.13689	0.0000507		2700	
$\Delta T = 1^\circ C$						
Heating phase 15-32°C						
Mean Temp [°C]	Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/kgK]	Partial Enthalpy [kJ/kgK]	Enthalpy PCM [J/kgK]	Enthalpy PCM [kJ/kgK]
16.02	18804	23732	1697	2	1840	2
17.03	38937	26793	1916	2	2098	2
18.04	59228	27989	2002	2	2199	2
19.04	80043	26927	1926	2	2109	2
20.04	105846	33997	2431	2	2705	3
21.03	133045	41657	2979	3	3351	3
22.04	160544	41657	2979	3	3351	3
23.05	177914	17370	1242	1	1304	1
24.06	208567	30653	2192	2	2424	2
25.06	223688	15121	1081	1	1114	1
26.06	238811	15123	1082	1	1114	1
27.06	282251	43440	3107	3	3502	4
28.06	826693	544442	38939	39	45744	46
29.04	869468	42775	3059	3	3446	3
30.02	897315	27847	1992	2	2187	2
31.02	925406	28091	2009	2	2208	2
32.02	953629	28223	2019	2	2219	2
C (24°-29°)[J/m2]		691554		72.65		83
C [kJ/m2]		692				
C normalized [kJ mm/m2]		46				
$\Delta T = 1^\circ C$						
Cooling phase 32-15 °C						
32.02	2436	34508	2468	2	2749	3
31.02	29822	36871	2637	3	2948	3
30.02	61891	36608	2618	3	2926	3
29.02	93554	36440	2606	3	2912	3
28.02	125609	36646	2621	3	2929	3
27.02	157406	36298	2596	3	2900	3
26.02	189030	36126	2584	3	2885	3
25.02	220475	35333	2527	3	2818	3
24.04	230919	10444	747	1	720	1
23.05	152133	15161	1084	1	1117	1
22	172011	19878	1422	1	1515	2
20.98	1138986	966975	69159	69	81371	81
20	1170233	31247	2235	2	2474	2
19.01	1198408	28175	2015	2	2215	2
18.01	1224541	26133	1869	2	2042	2
17.01	1249225	24684	1765	2	1920	2
16.01	1272819	23594	1687	2	1828	2
C (21°-26°C)[J/m2]		1083917		103		118
C [kJ/m2]		1084				
C normalized [kJ mm/m2]		72				

Volumi netti, riferiti alla sola area di misura di 254 x 254 mm, modellati con SketchUP

Dati riferiti al solo PCM puro per confronto con dati dichiarati da Rubitherm

$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature

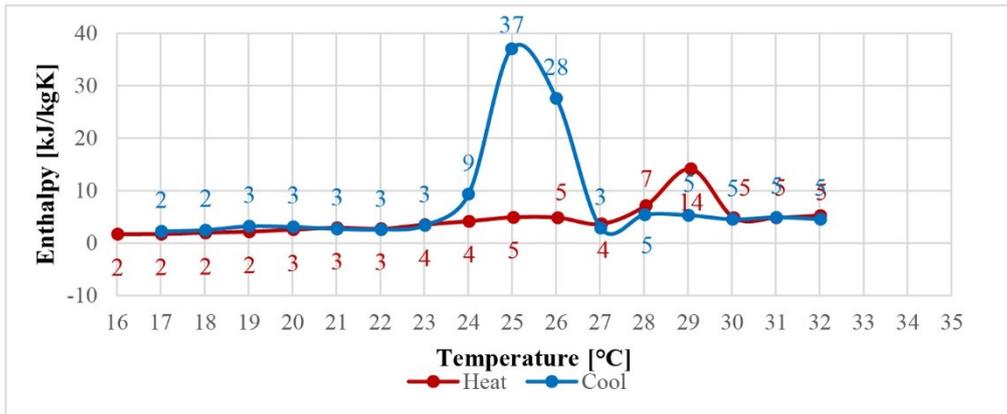


## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

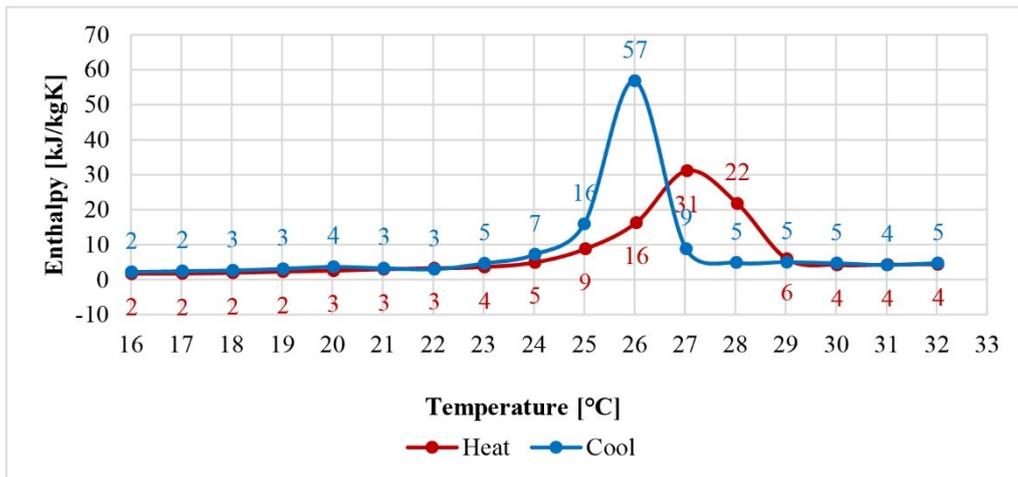
### PCM\_plastic film bags – Test 1

	<b>t</b> [m]	<b>m</b> [kg]	<b>Vnetto</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>ρ eq,m</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	
PANEL 0.55 x 0.55	0.00682	1.62	0.00206	784.96	
PANEL 0.254 x 0.254	0.00682	0.00013	0.00044		
PARA	0.01947	5.644		1164.18	
<b>ΔT= 1°C Heating phase 16-32°C</b>					
<b>Mean Temp</b> [°C]	<b>Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy NO PARA</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy NO PARA</b> [J/kgK]	<b>Partial Enthalpy NO PARA</b> [kJ/kgK]
16.02	44097	44097	9154.238514	1709	1.71
17.02	88381	44284	9341.238514	1744	1.74
18.02	133890	45509	10566.23851	1973	1.97
19.02	180586	46696	11753.23851	2195	2.19
20.02	229289	48703	13760.23851	2569	2.57
21.02	280004	50715	15772.23851	2945	2.95
22.02	329628	49624	14681.23851	2741	2.74
23.02	383486	53858	18915.23851	3532	3.53
24.02	440793	57307	22364.23851	4176	4.18
25.03	502100	61307	26364.23851	4923	4.92
26.04	563071	60971	26028.23851	4860	4.86
27.04	617677	54606	19663.23851	3672	3.67
28.05	691082	73405	38462.23851	7182	7.18
29.07	801730	110648	75705.23851	14136	14.14
30.05	862538	60808	25865.23851	4830	4.83
31.02	923437	60899	25956.23851	4847	4.85
32.02	986619	63182	28239.23851	5273	5.27
<b>C (24°-29°)[J/m<sup>2</sup>]</b>		208587			73,31
<b>C [kJ/m<sup>2</sup>]</b>		209			
<b>C normalized [kJ mm/m<sup>2</sup>]</b>		31			
<b>ΔT= 1°C Cooling phase 34-17 °C</b>					
34.27	168261	168261	133318	24894	24.89
32.02	218265	59281	24338	4545	4.54
31.02	267943	61239	26296	4910	4.91
30.02	317358	59230	24287	4535	4.54
29.02	366370	63388	28445	5312	5.31
28.02	415943	63883	28940	5404	5.40
27.02	438364	50251	15308	2858	2.86
26.01	480969	182597	147654	27571	27.57
24.99	607943	233352	198409	37049	37.05
24.01	692897	84954	50011	9339	9.34
23.02	746049	53152	18209	3400	3.40
22.02	794802	48753	13810	2579	2.58
21.02	844283	49481	14538	2715	2.71
20.02	895724	51441	16498	3081	3.08
19.02	947848	52124	17181	3208	3.21
18.02	996166	48318	13375	2498	2.50
17.02	1043089	46923	11980	2237	2.24
<b>C (21°-26°C)[J/m<sup>2</sup>]</b>		442632			146.13
<b>C [kJ/m<sup>2</sup>]</b>		443			
<b>C normalized [kJ mm/m<sup>2</sup>]</b>		65			

$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature



$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature  
PROVA SENZA PARA



## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

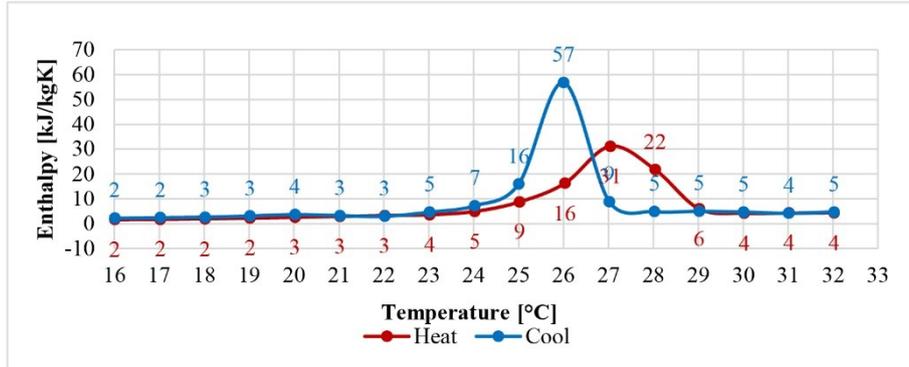
## PCM\_plastic film bags – Test 2

	<b>t</b> [m]	<b>m</b> [kg]	<b>Vnetto</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>ρ eq,m</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
PANEL 0.55 x 0.55	0.00682	1.62	0.00206	784.96
PANEL 0.254 x 0.254	0.00682	0.00013	0.00044	
<b>ΔT= 1°C Heating phase 16-32°C</b>				
<b>Mean Temp</b> [°C]	<b>Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/kgK]	<b>Partial Enthalpy</b> [kJ/kgK]
16.01	8951	8951	1671	1.67
17.02	18158	9207	1719	1.72
18.02	28545	10387	1940	1.94
19.02	40586	12041	2248	2.25
20.02	54228	13642	2547	2.55
21.02	69885	15657	2924	2.92
22.02	87279	17394	3248	3.25
23.02	106474	19195	3584	3.58
24.02	132706	26232	4898	4.90
25.02	179515	46809	8741	8.74
26.03	266516	87001	16246	16.25
27.04	433191	166675	31123	31.12
28.04	549519	116328	21722	21.72
29.02	581299	31780	5934	5.93
30.02	603707	22408	4184	4.18
31.02	626535	22828	4263	4.26
32.02	649885	23350	4360	4.36
<b>C (24°-29°)[J/m<sup>2</sup>]</b>		485780		121.35
<b>C [kJ/m<sup>2</sup>]</b>		486		
<b>C normalized [kJ mm/m<sup>2</sup>]</b>		71		
<b>ΔT= 1°C Cooling phase 32-16 °C</b>				
32.02	22890	25135	4693	4.69
31.01	42415	22375	4178	4.18
30.01	61514	24890	4648	4.65
29.02	80219	26727	4991	4.99
28.02	98490	25858	4828	4.83
27.02	102770	47150	8804	8.80
26	316847	304145	56793	56.79
25	387052	85304	15929	15.93
24.02	419264	38411	7172	7.17
23.02	439384	24816	4634	4.63
22.02	455167	15783	2947	2.95
21.02	472488	17321	3234	3.23
20.02	491951	19463	3634	3.63
19.02	508418	16467	3075	3.07
18.02	522385	13967	2608	2.61
17.02	535185	12800	2390	2.39
16.01	546950	11765	2197	2.20
<b>C (21°-26°C)[J/m<sup>2</sup>]</b>		732377		136.76
<b>C [kJ/m<sup>2</sup>]</b>		732.38		
<b>C normalized [kJ mm/m<sup>2</sup>]</b>		107.35		

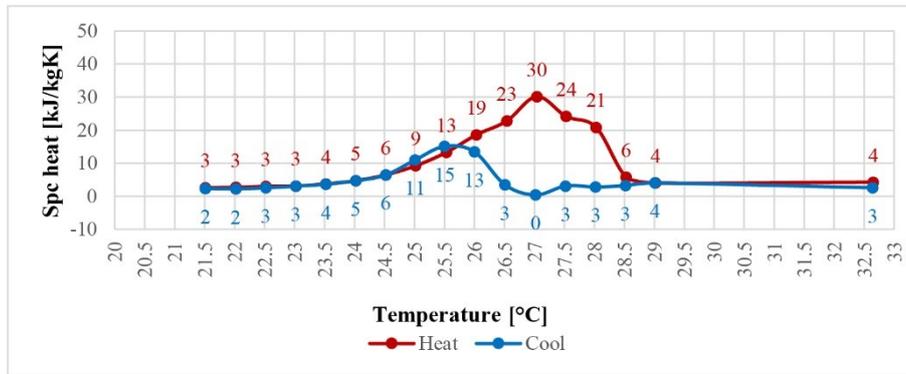
$\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$		Heating phase 21-32 °C						
Mean Temp [°C]	Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/m <sup>2</sup> ]	Partial Enthalpy [J/kg]	Partial Enthalpy [kJ/kgK]	Spc Heat [J/(m <sup>2</sup> K)]	Spc Heat [J/kgK]	Spc Heat [kJ/kgK]	
21.51	7349	7349	1372	1.37	2007754	2558	2.56	
22.02	15068	7719	1441	1.44	2114970	2694	2.69	
22.52	23645	8577	1602	1.60	2348906	2992	2.99	
23.02	32443	8798	1643	1.64	2418428	3081	3.08	
23.52	43167	10724	2002	2.00	2940682	3746	3.75	
24.02	56681	13514	2523	2.52	3707241	4723	4.72	
24.52	75143	18462	3447	3.45	5073444	6463	6.46	
25.02	101500	26357	4922	4.92	7239417	9223	9.22	
25.53	139546	38046	7104	7.10	10409093	13261	13.26	
26.03	193496	53950	10074	10.07	14558360	18547	18.55	
26.54	259739	66243	12369	12.37	17875994	22773	22.77	
27.04	344426	84687	15813	15.81	23665226	30148	30.15	
27.53	412068	67642	12631	12.63	18948036	24139	24.14	
28.03	471436	59368	11086	11.09	16344991	20823	20.82	
28.53	487712	16276	3039	3.04	4554482	5802	5.80	
29.02	499146	11434	2135	2.14	3165213	4032	4.03	
32.65	662759	163613	30551	30.55	3329979	4242	4.24	
$\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$		Cooling phase 32-21 °C						
32.64	103475	103475	19322	19.32	2021575	2575	2.58	
29.01	115157	11682	2181	2.18	3151289	4015	4.01	
28.52	124588	9431	1761	1.76	2510844	3199	3.20	
28.02	133050	8462	1580	1.58	2210727	2816	2.82	
27.52	142148	9098	1699	1.70	2419768	3083	3.08	
27.02	143309	1161	217	0.22	310425	395	0.40	
26.51	154082	10773	2012	2.01	2718308	3463	3.46	
26	193977	39895	7450	7.45	10541226	13429	13.43	
25.5	238497	44520	8313	8.31	11832296	15074	15.07	
25.01	270124	31627	5906	5.91	8603535	10961	10.96	
24.52	288964	18840	3518	3.52	5042127	6423	6.42	
24.02	302796	13832	2583	2.58	3660546	4663	4.66	
23.52	313577	10781	2013	2.01	2852959	3635	3.63	
23.02	322643	9066	1693	1.69	2391001	3046	3.05	
22.52	330183	7540	1408	1.41	1986337	2531	2.53	
22.02	336857	6674	1246	1.25	1757203	2239	2.24	
21.51	343713	6856	1280	1.28	1803601	2298	2.30	

Nei grafici "Heating phase - Enthalpy vs temperature" e "Cooling phase - Enthalpy vs temperature" sono state confrontate le curve di entalpia nelle due fasi e con due diversi  $\Delta T$ . Nello specifico, con  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  sono stati utilizzati i dati di Partial Enthalpy [kJ/kgK], i quali sono stati verificati dal punto di vista dei flussi termici; mentre con  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$  sono stati utilizzati i valori di Spc Heat [kJ/kgK]

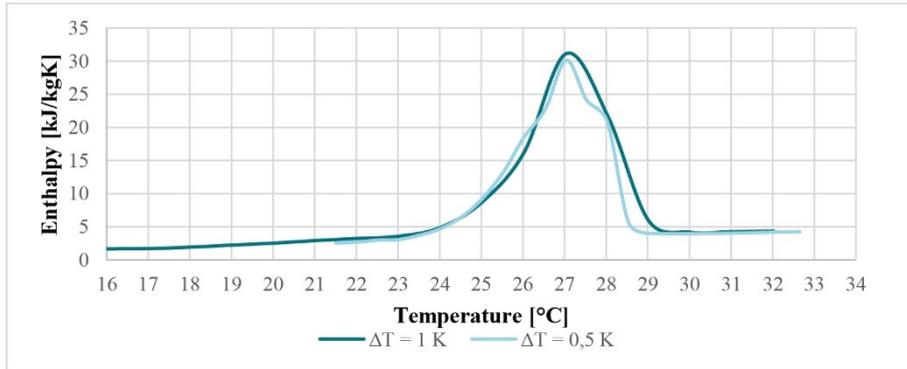
$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature



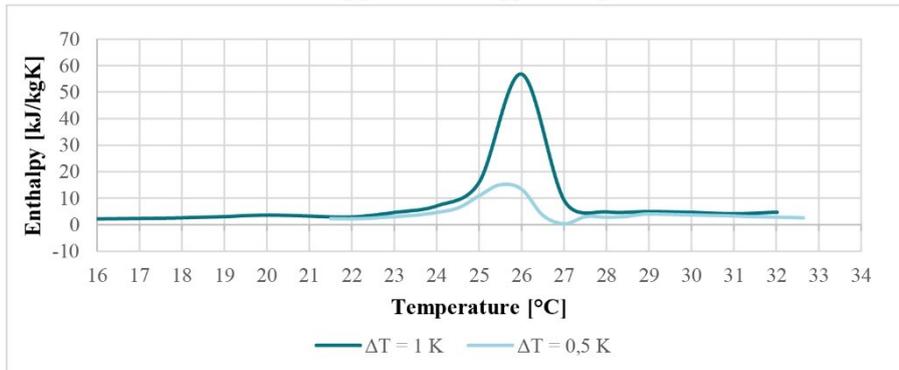
$\Delta T = 0.5 \text{ K}$  - Spc heat vs temperature



Heating phase - Enthalpy vs temperature



Cooling phase - Enthalpy vs temperature

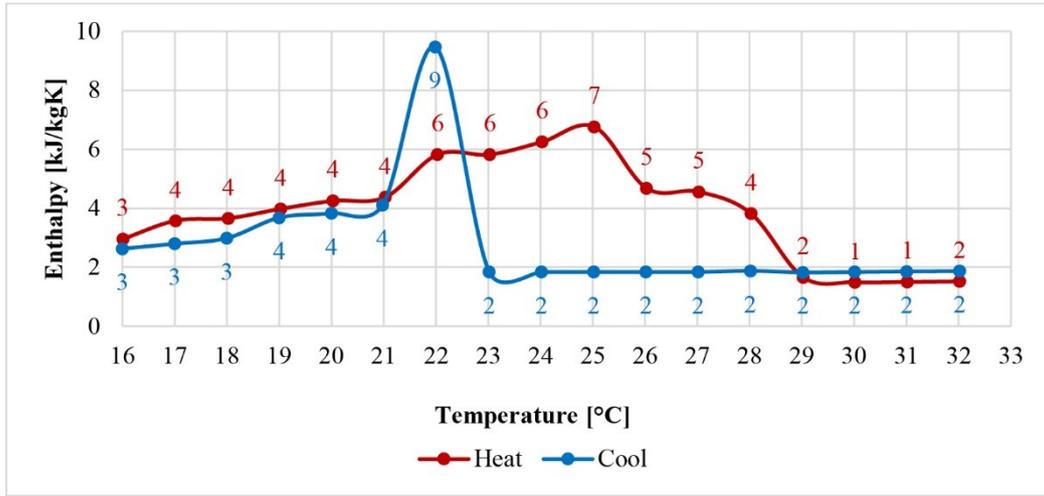


## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

## PCM\_plastic container

	<b>t</b> [m]	<b>m</b> [kg]	<b>Vnetto</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>ρ eq,m</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
PANEL 0.23 x 0.23	0.00724	0.503	0.00038	1314.24
PANEL 0.254 x 0.254	-	-	-	
<b>ΔT= 1°C Heating phase 16-32°C</b>				
<b>Mean Temp</b> [°C]	<b>Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/kgK]	<b>Partial Enthalpy</b> [kJ/kgK]
16.01	23910	28101	2955	3
17.02	49366	34003	3576	4
18.03	76189	34799	3660	4
19.03	104585	37819	3977	4
20.03	134376	40404	4249	4
21.03	165751	41599	4375	4
22.03	202533	55350	5821	6
23.03	240908	55354	5821	6
24.03	281823	59421	6249	6
25.03	324537	64289	6761	7
26.03	369010	44473	4677	5
27.03	412335	43325	4556	5
28.03	448620	36285	3816	4
29.03	464336	15716	1653	2
30.02	478478	14142	1487	1
31.02	492728	14250	1499	1
32.02	507156	14428	1517	2
<b>C (24°-29°)[J/m<sup>2</sup>]</b> 263509 67				
<b>C [kJ/m2]</b> 264				
<b>C normalized [kJ mm/m2]</b> 36				
<b>ΔT= 1°C Cooling phase 32-16 °C</b>				
32.02	14755	17746	1866	2
31.01	29299	17637	1855	2
30.01	43871	17460	1836	2
29.02	58362	17342	1824	2
28.02	72898	17819	1874	2
27.02	87347	17474	1838	2
26.02	101722	17461	1836	2
25.02	116166	17457	1836	2
24.02	130650	17458	1836	2
23.02	145069	17452	1835	2
21.99	235099	90030	9468	9
20.98	274203	39104	4113	4
20.00	310625	36422	3830	4
19.00	345614	34989	3680	4
18.00	374001	28387	2985	3
17.00	400583	26582	2796	3
16.00	425554	24971	2626	3
<b>C (21°-26°C)[J/m<sup>2</sup>]</b> 198962 48				
<b>C [kJ/m2]</b> 199				
<b>C normalized [kJ mm/m2]</b> 27				

$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature

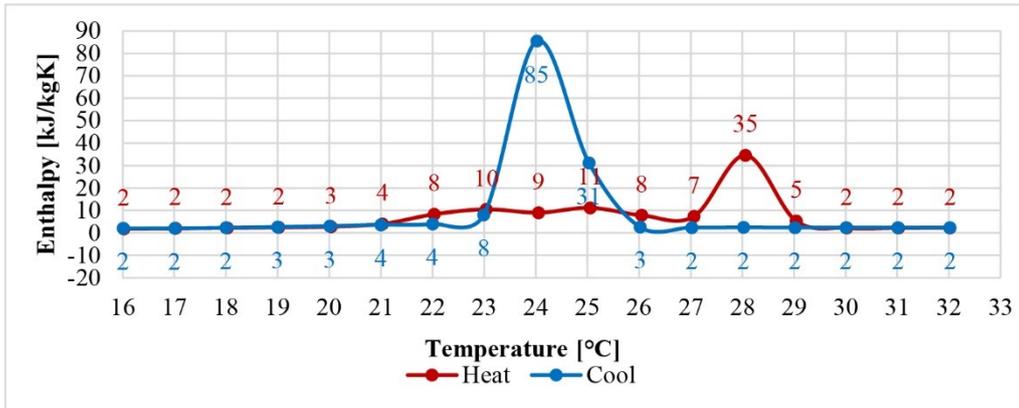


## Entalpia in funzione della temperatura - RISULTATI SPERIMENTALI

## PCM\_plastic case\_b

	<b>t</b> [m]	<b>m</b> [kg]	<b>V</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>ρ eq,m</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
2 Panel 0,58 x 0,20	0.01279	3.3435	0.00297	1126.79
Panel 0,254x0,254	0.01279	0.92978	0.00083	
<b>ΔT= 1°C Heating phase 16-32°C</b>				
<b>Mean Temp</b> [°C]	<b>Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/m <sup>2</sup> ]	<b>Partial Enthalpy</b> [J/kgK]	<b>Partial Enthalpy</b> [kJ/kgK]
16.02	24282	26253	1822	2
17.02	50942	28824	2000	2
18.02	80010	31464	2183	2
19.02	111507	34670	2406	2
20.03	146566	40268	2794	3
21.03	190481	57343	3979	4
22.03	255374	119365	8283	8
23.04	368930	151116	10486	10
24.05	456605	129786	9006	9
25.05	563425	161003	11172	11
26.05	676408	112983	7840	8
27.06	781801	105393	7313	7
28.06	1280316	498515	34591	35
29.04	1357232	76916	5337	5
30.02	1388388	31156	2162	2
31.02	1419645	31257	2169	2
32.02	1451867	32222	2236	2
<b>C (24°-29°)[J/m<sup>2</sup>]</b>		1084596		116
<b>C [kJ/m2]</b>		1085		
<b>C normalized [kJ mm/m2]</b>		85		
<b>ΔT= 1°C Cooling phase 32-16 °C</b>				
32.02	31693	34499	2394	2
31.01	62847	34548	2397	2
30.01	94142	34597	2401	2
29.02	125126	34315	2381	2
28.02	156482	34861	2419	2
27.02	187338	34604	2401	2
26.02	217623	37244	2584	3
25.03	93150	448685	31134	31
24.02	1107201	1231995	85486	85
22.99	1187451	114972	7978	8
22	1244508	57057	3959	4
21	1296600	52092	3615	4
20.01	1340925	44325	3076	3
19	1378853	37928	2632	3
18	1412217	33364	2315	2
17.01	1441425	29208	2027	2
16.01	1470923	29498	2047	2
<b>C (21°-26°C)[J/m<sup>2</sup>]</b>		1942045		161.24
<b>C [kJ/m2]</b>		1942		
<b>C normalized [kJ mm/m2]</b>		152		

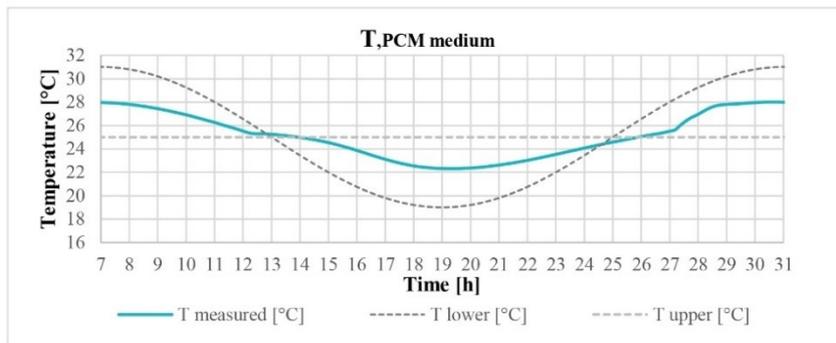
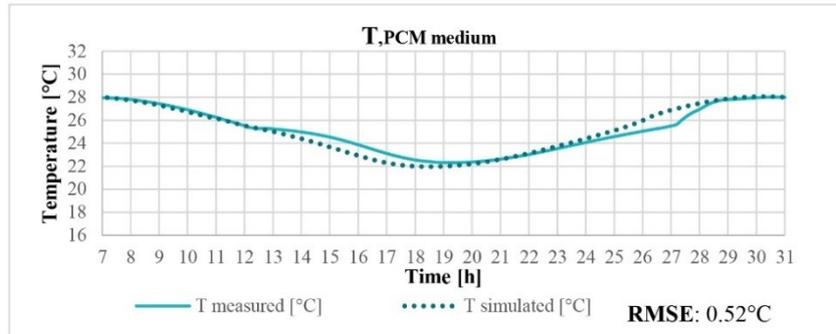
$\Delta T = 1 \text{ K}$  - Enthalpy vs temperature



## Risposta sinusoidale - RISULTATI SPERIMENTALI

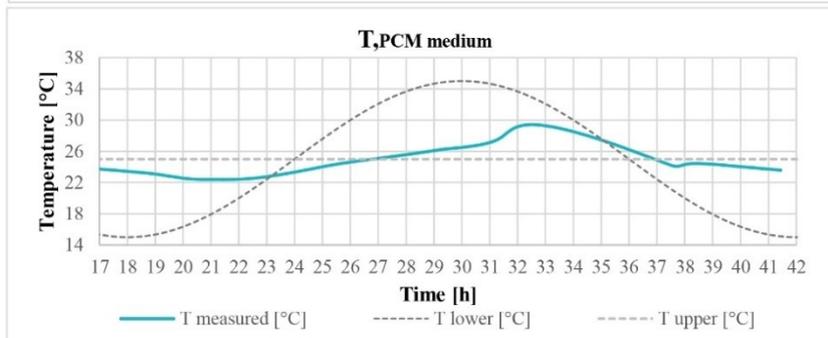
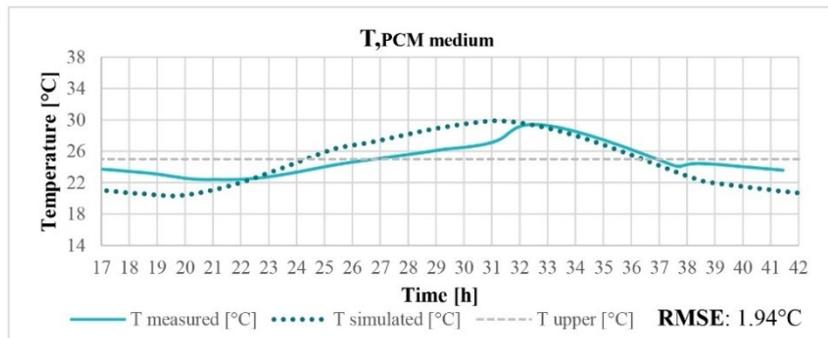
PCM\_aluminium case\_a

25±6°C



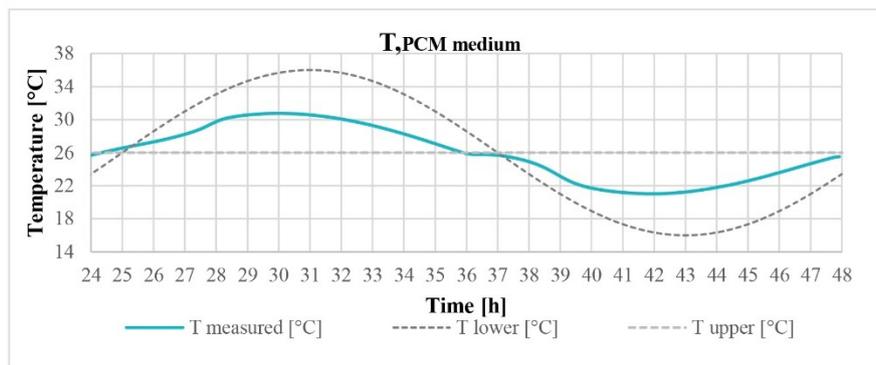
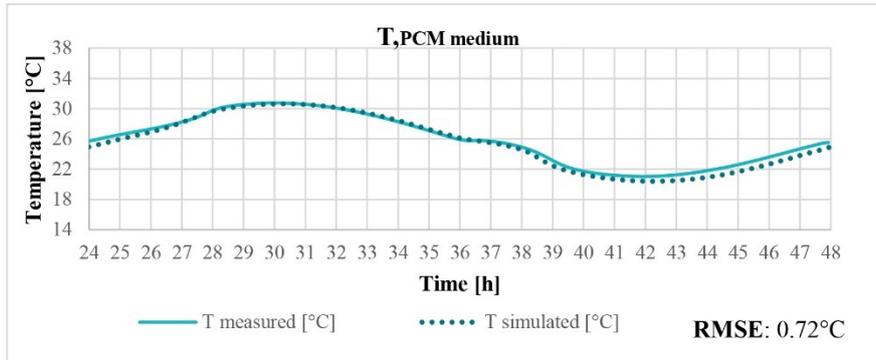
PCM\_aluminium case\_c

25±10°C



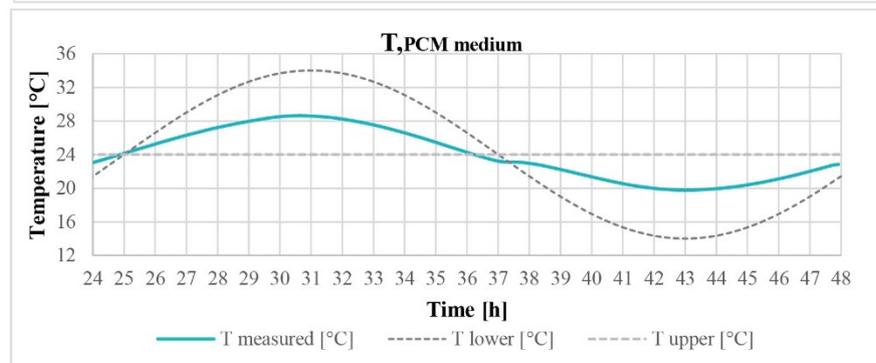
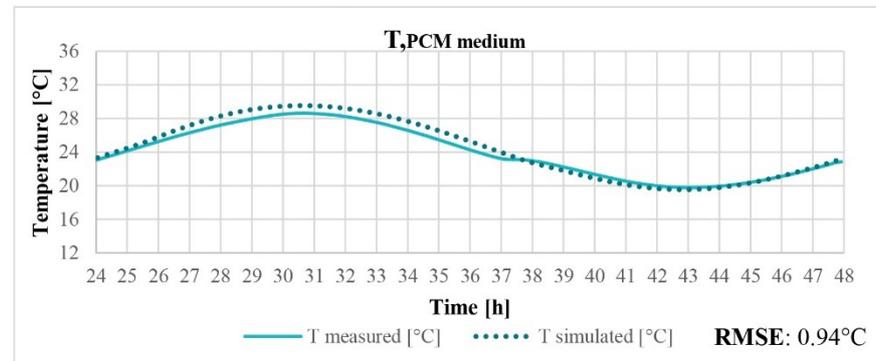
PCM\_plastic film bags

26±10°C

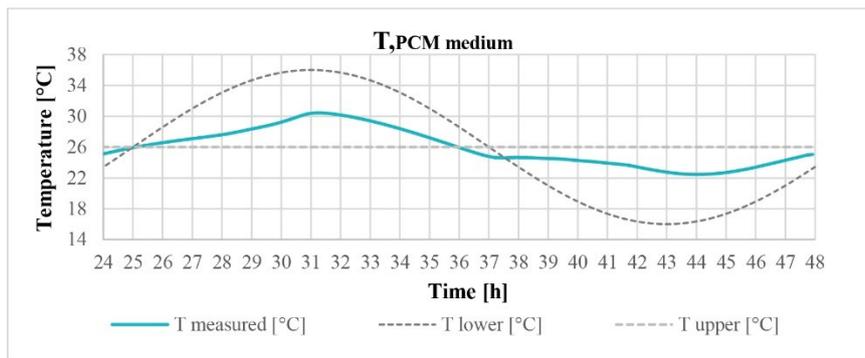
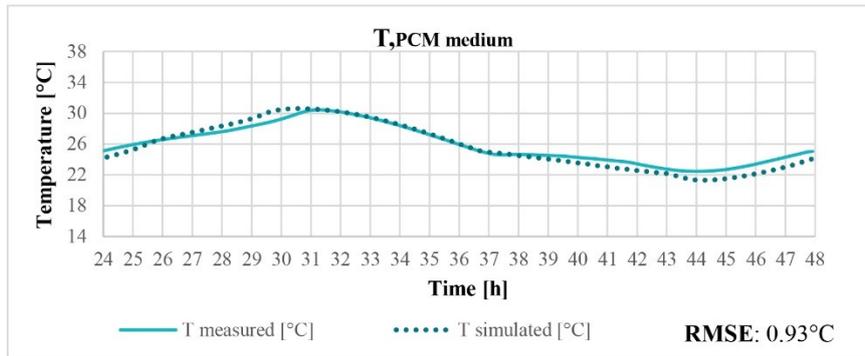


PCM\_plastic container

24±10°C



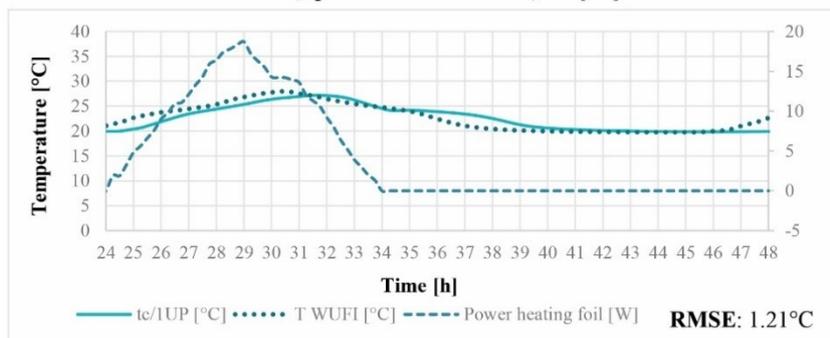
## PCM\_plastic case

 $26 \pm 10^\circ\text{C}$ 

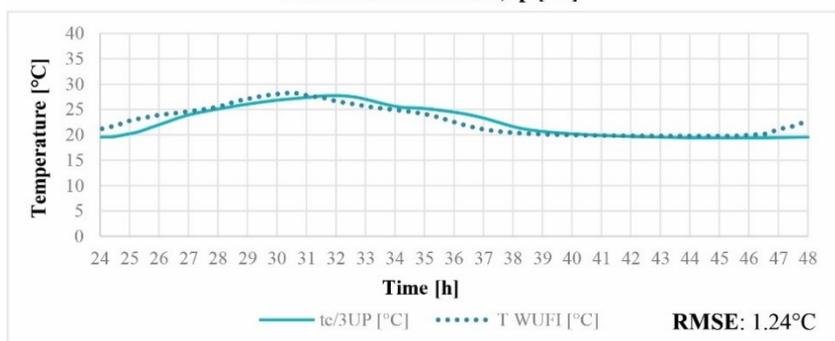
## Analisi a scala di componente - RISULTATI SPERIMENTALI

Prototipo 1 – Condizioni invernali ( $T_{\text{upper plate}}=18\pm 19^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{lower plate}}=20^{\circ}\text{C}$ )

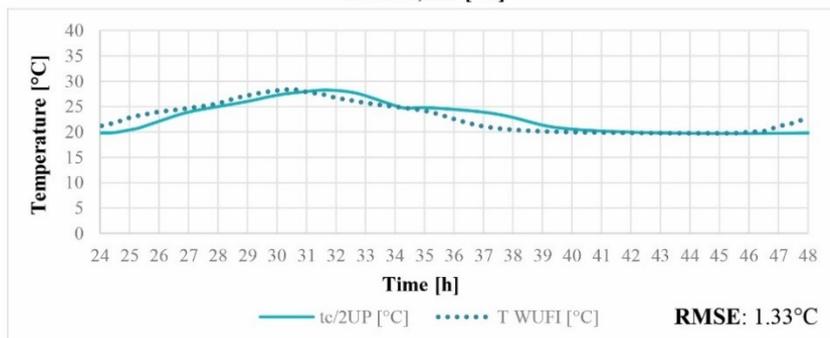
T PEX,up/GLASS INTERIOR,low [°C]



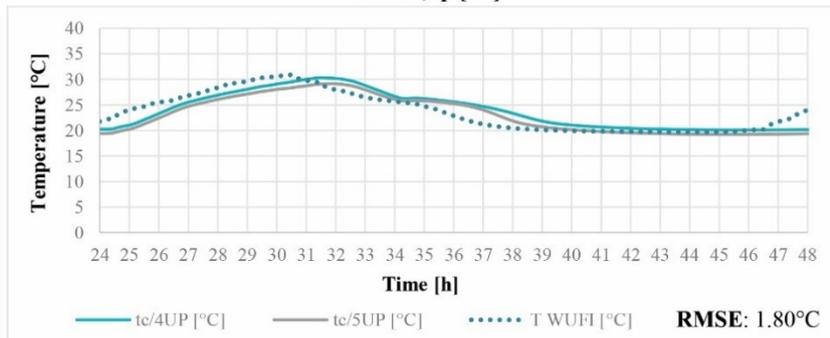
T GLASS INTERIOR,up [°C]

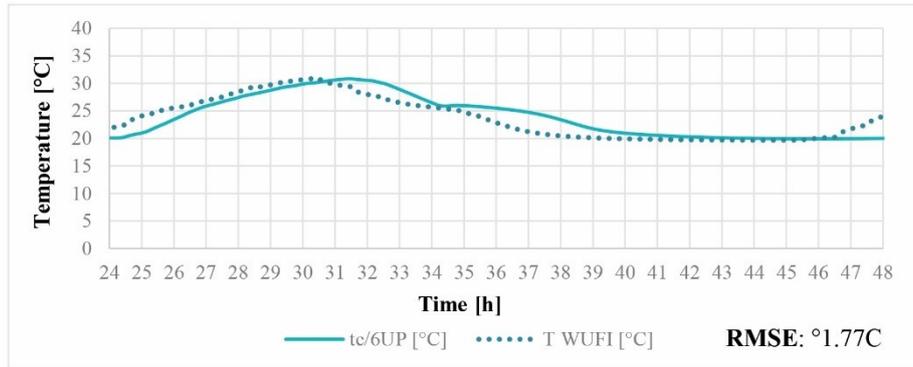
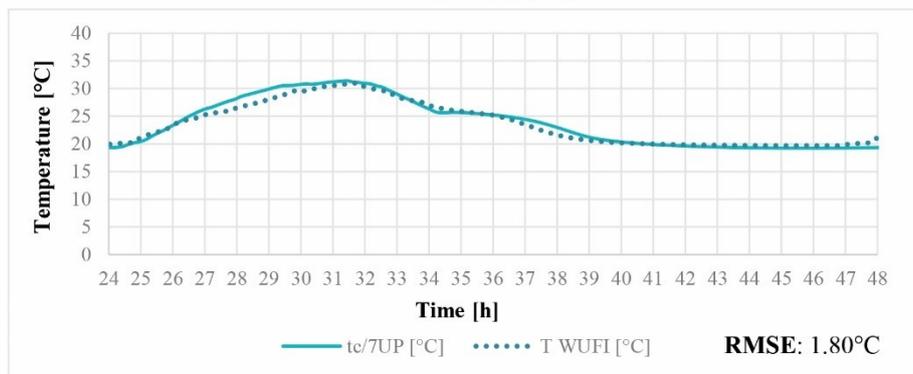
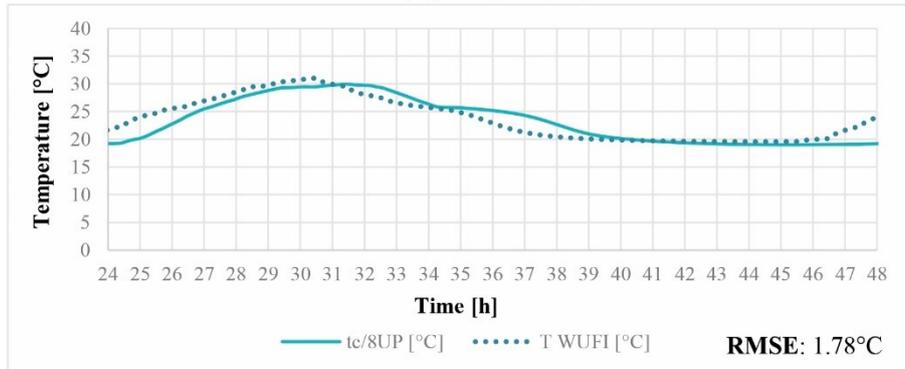
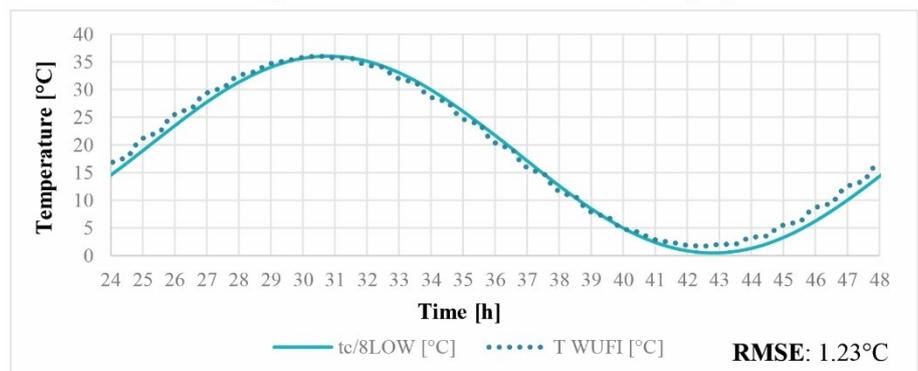


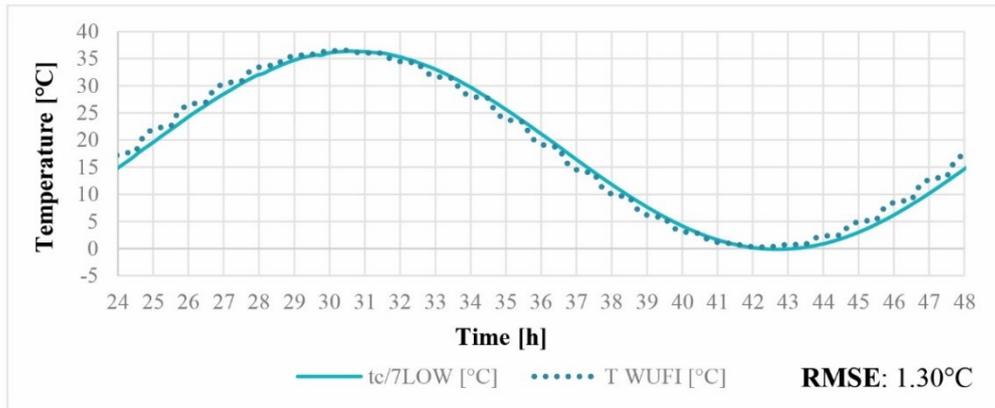
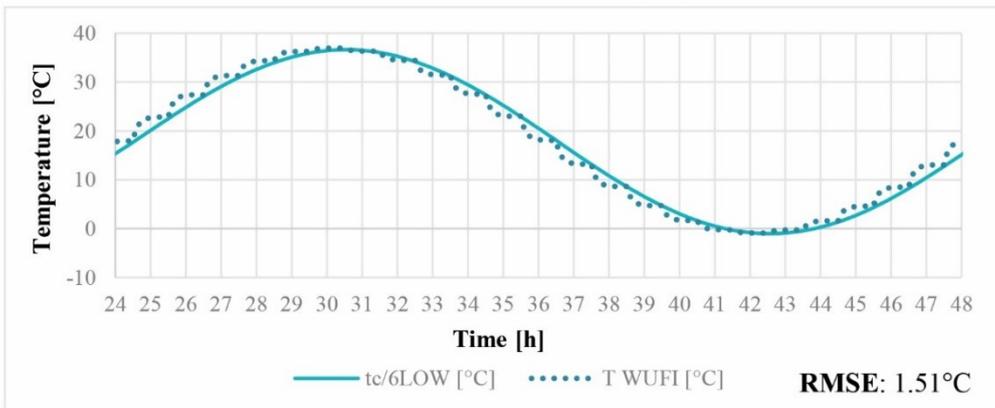
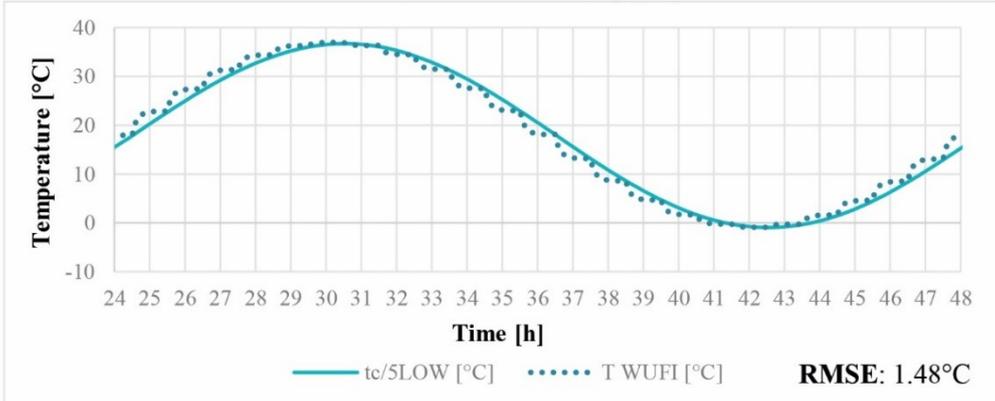
T PCM,low [°C]



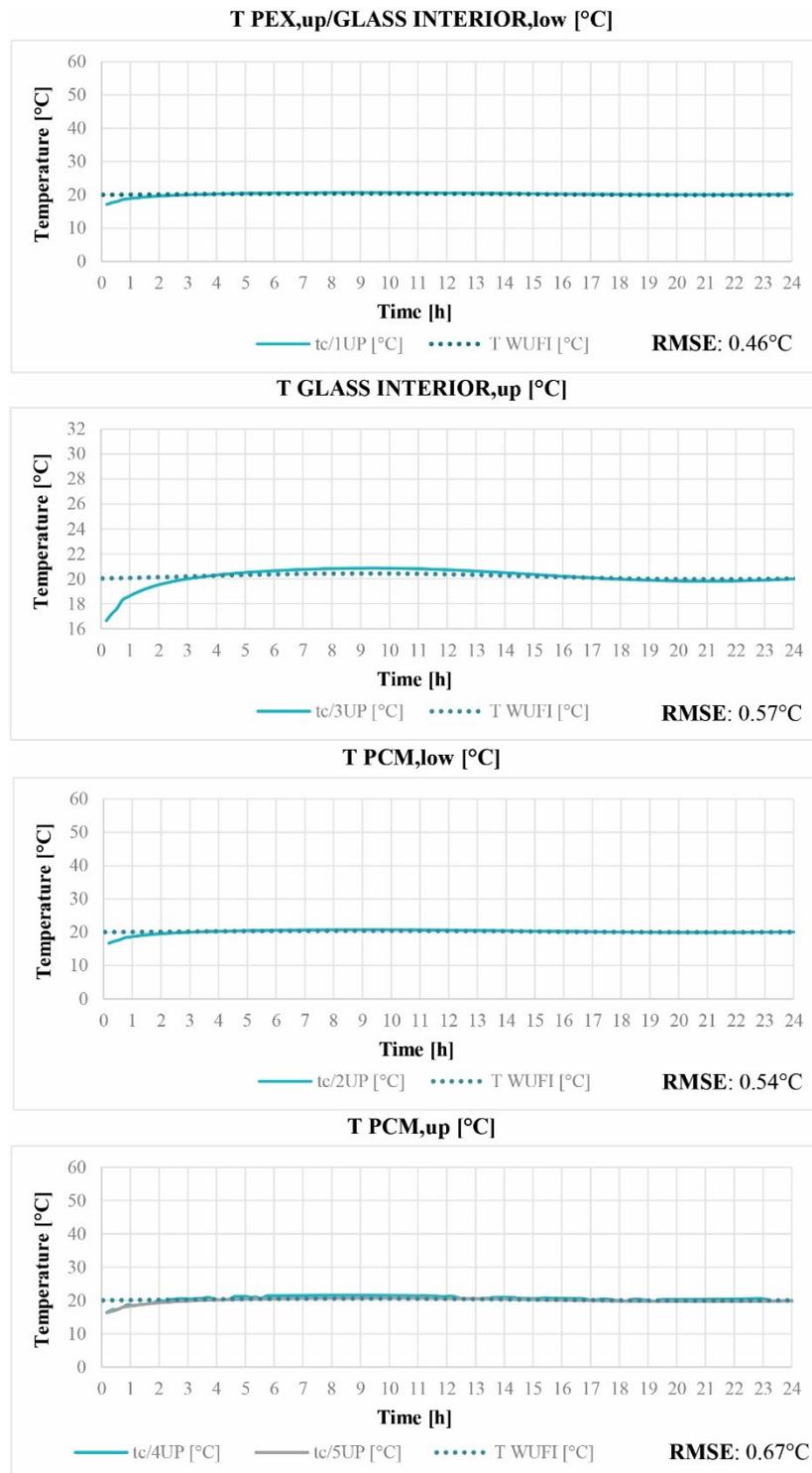
T PCM,up [°C]



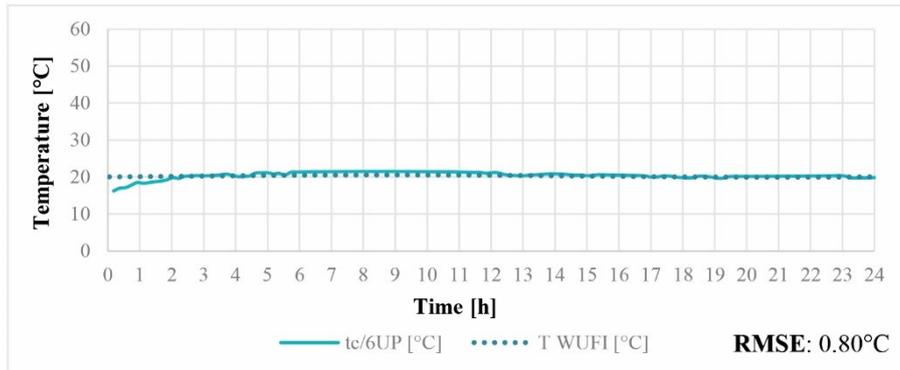
**T heating foil,low [°C]****T heating foil,up [°C]****T PEX,up/VIP,low [°C]****T VIP,up/MULTILAYER REFLECTIVE,low [°C]**

**T MULTILAYER REFLECTIVE,up [°C]****T GLASS EXTERIOR,low [°C]****T GLASS EXTERIOR,up [°C]**

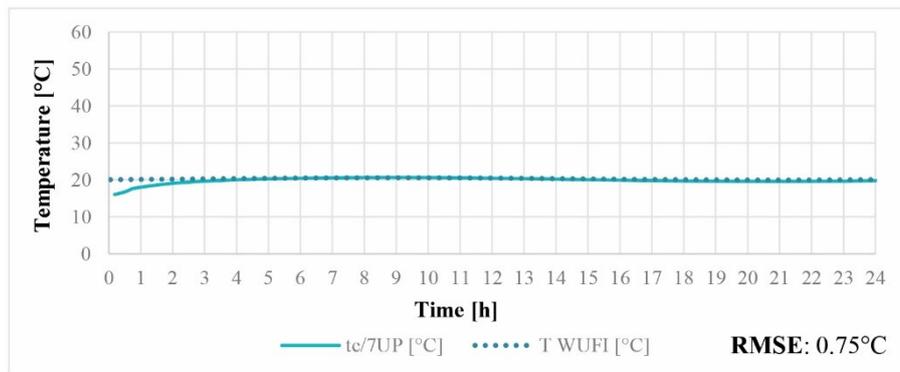
## Analisi a scala di componente - RISULTATI SPERIMENTALI

Prototipo 1 – Condizioni estive ( $T_{\text{upper plate}}=36\pm 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{lower plate}}=20^{\circ}\text{C}$ )

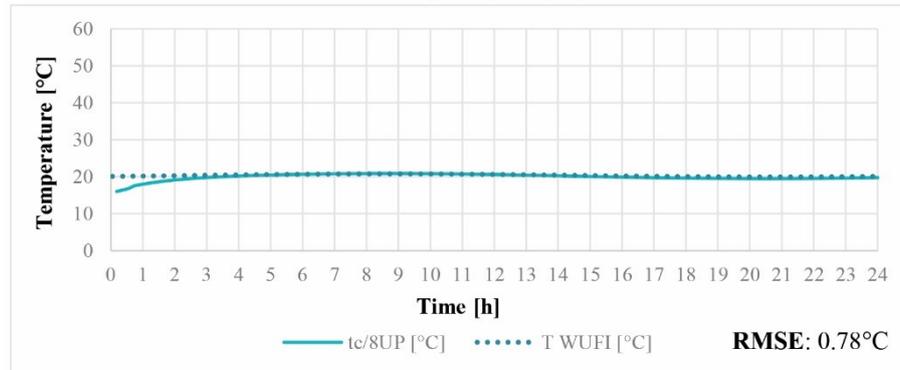
**T heating foil,low [°C]**



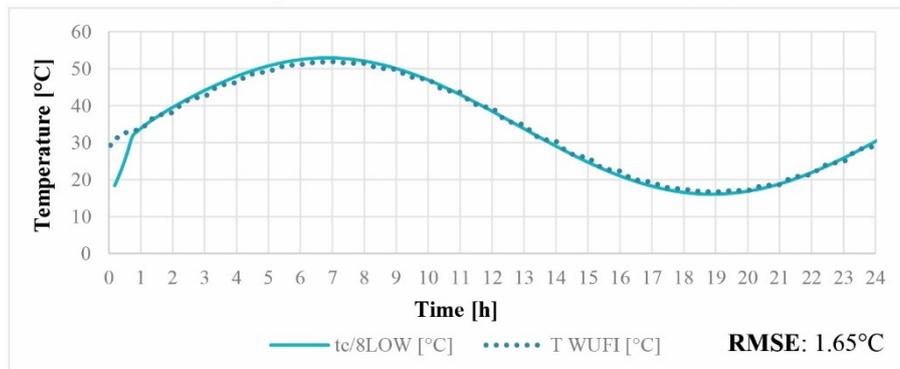
**T heating foil,up [°C]**

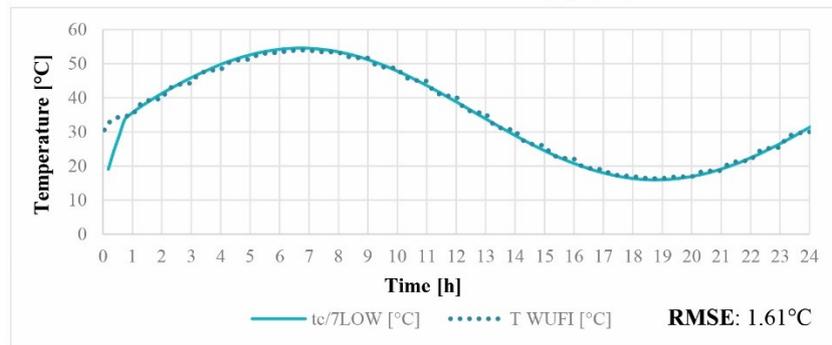
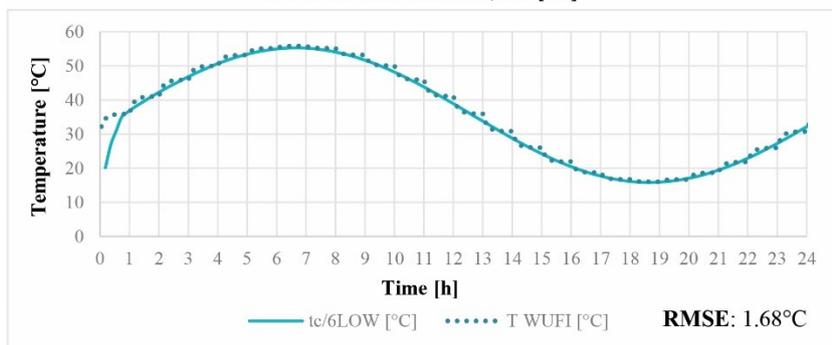
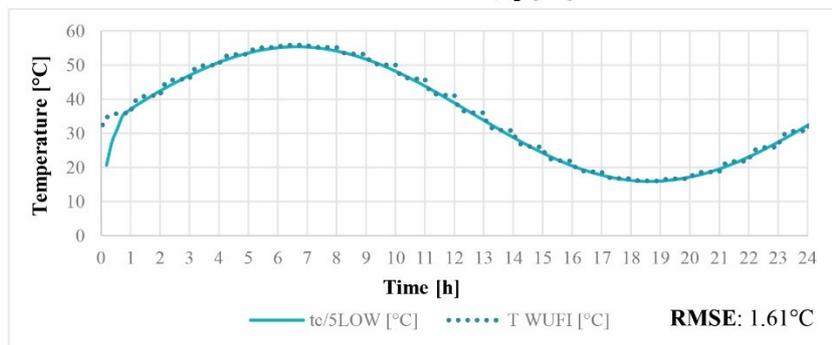


**T PEX,up/VIP,low [°C]**



**T VIP,up/MULTILAYER REFLECTIVE,low [°C]**

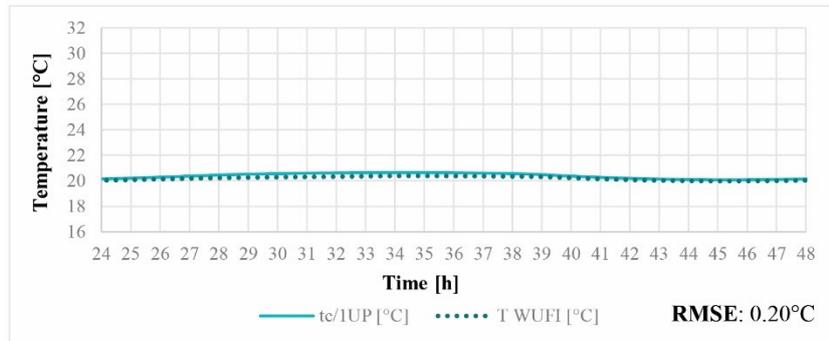


**T MULTILAYER REFLECTIVE,up [°C]****T GLASS EXTERIOR,low [°C]****T GLASS EXTERIOR,up [°C]**

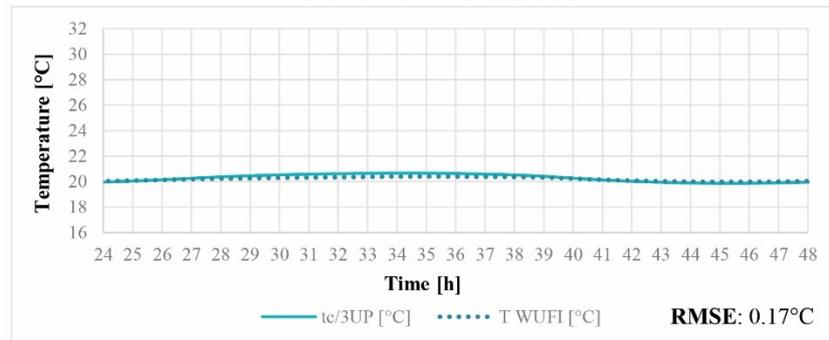
## Analisi a scala di componente - RISULTATI SPERIMENTALI

Prototipo 2 – Condizioni estive ( $T_{\text{upper plate}}=35\pm 18^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{lower plate}}=20^{\circ}\text{C}$ )

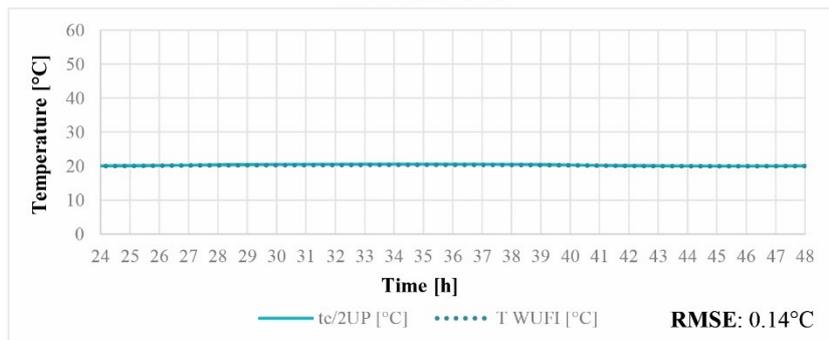
T PEX,up/GLASS INTERIOR,low [°C]



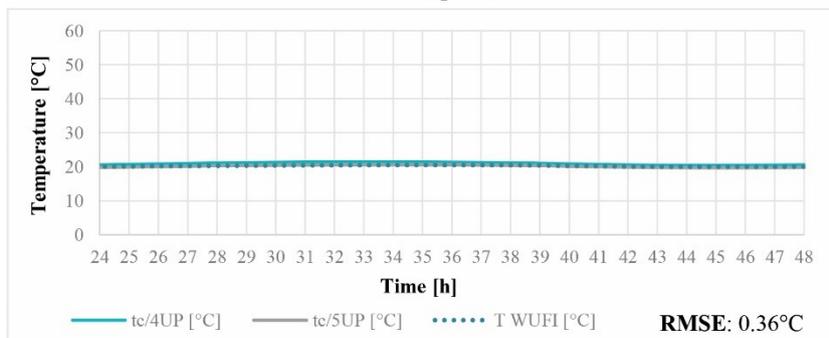
T GLASS INTERIOR,up [°C]

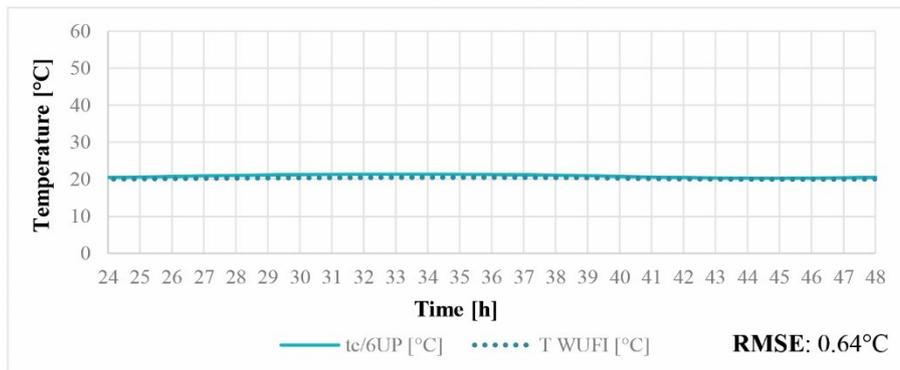
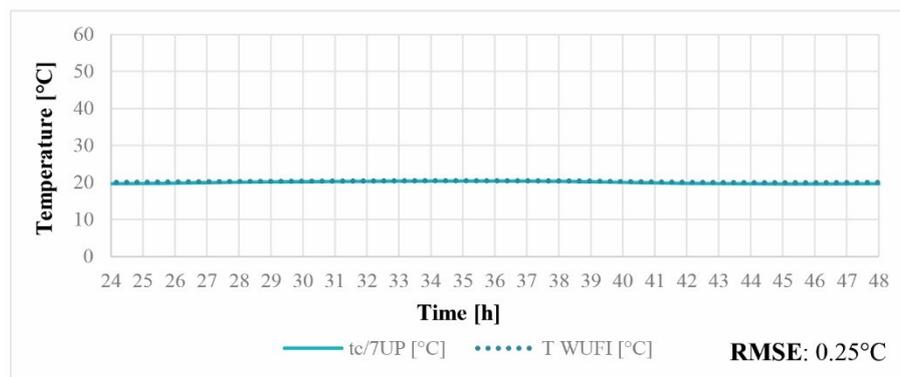
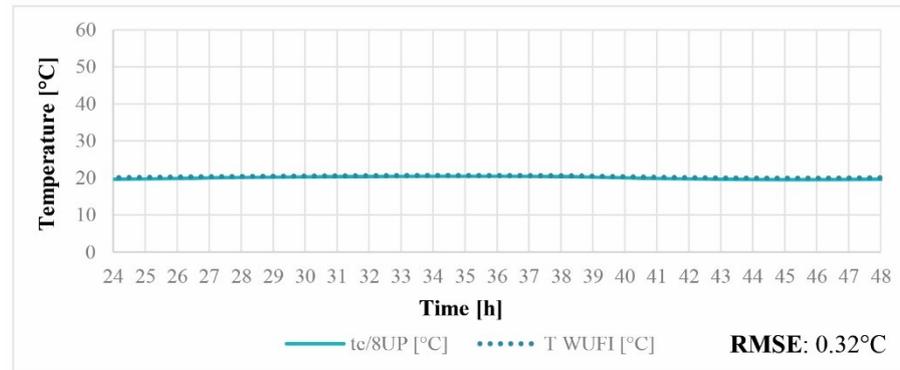
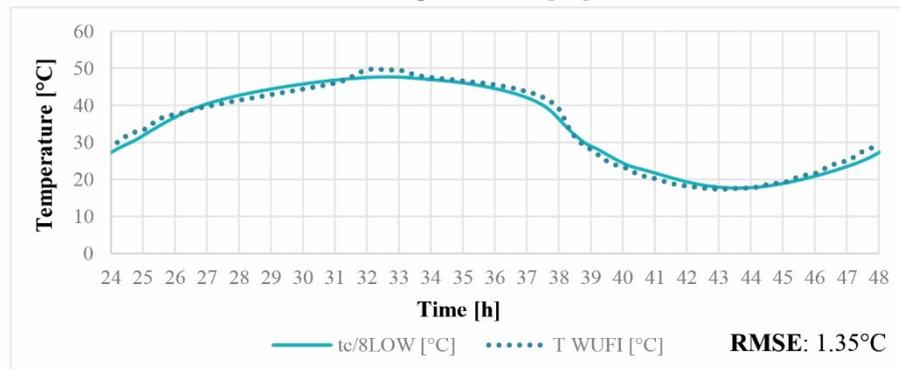


T PCM,low [°C]

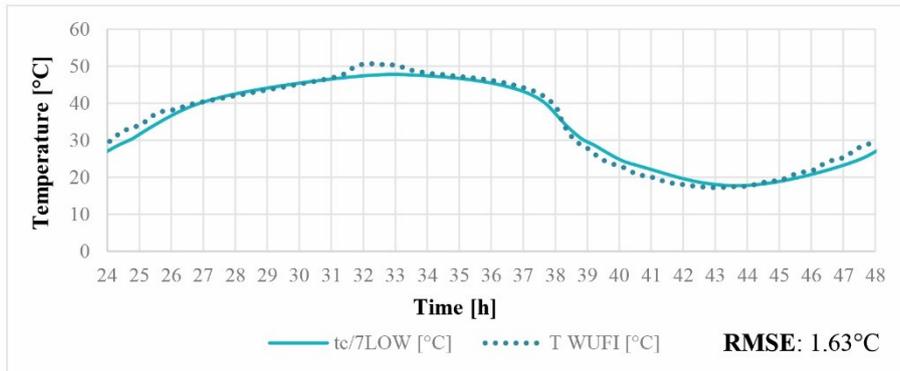


T PCM,up [°C]

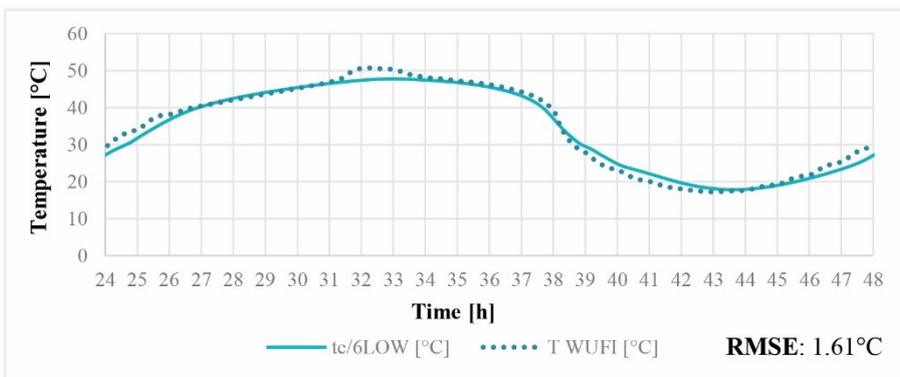


**T heating foil,low [°C]****T heating foil,up [°C]****T PEX,up/VIP,low [°C]****T VIP,up/ PEX,low [°C]**

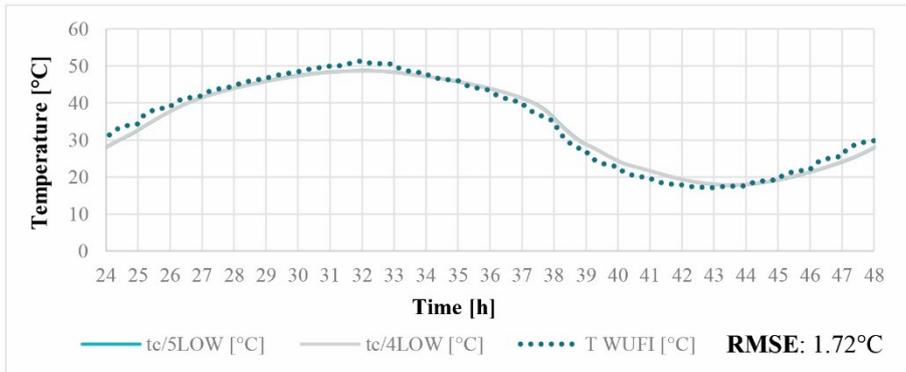
**T PEX,up [°C]**



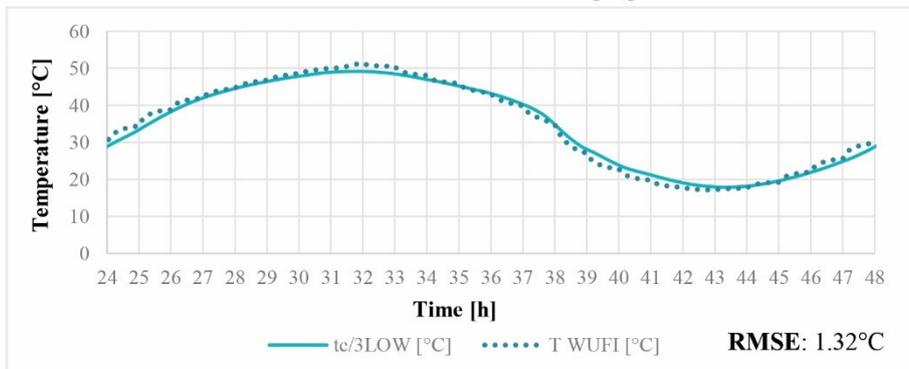
**T PCM,low [°C]**

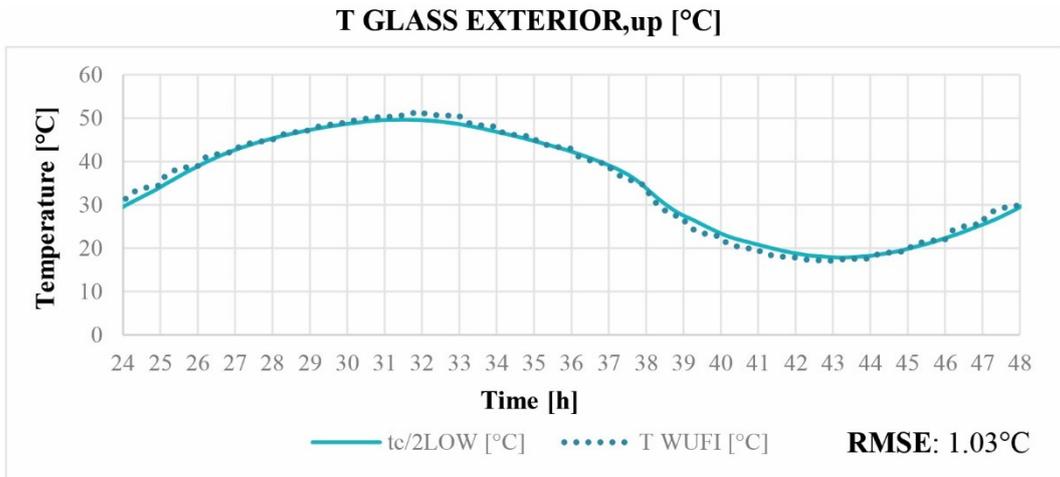


**T PCM,up [°C]**



**T GLASS EXTERIOR,low [°C]**





## Appendice capitolo 8



Calculated by Rita Adamo

Calculated on 17/12/2020

Country Italy

1 Stratobel 33.1 (3 mm Planibel Clearlite + 0.38 mm PVB Clear + 3 mm ipasol ultraselect 62/29 pos.2)  
 Annealed 2 14 mm Argon 90% 3 3 mm Planibel Clearlite Annealed 4 14 mm Argon 90% 5 4 mm  
 plus 1.1T pos.5 Thermally toughened

### Glass performance data simulation

#### ☀ Light properties - EN 410

Light transmittance : $\tau_v$ [%]	57
External light reflection : $\rho_v$ [%]	11
Internal light reflection : $\rho_{vi}$ [%]	14
Colour rendering index : Ra [%]	92

#### 🔥 Energy properties - EN 410

Solar factor : g [%]	27
External energy reflection : $\rho_e$ [%]	35
Internal energy reflection : $\rho_{ei}$ [%]	39
Direct energy transmission : $\tau_e$ [%]	24
Energy absorption glass 1 : $\alpha_{e1}$ [%]	39
Energy absorption glass 2 : $\alpha_{e2}$ [%]	1
Energy absorption glass 3 : $\alpha_{e3}$ [%]	1
Total energy absorption : $\alpha_e$ [%]	41
Shading coefficient : SC	0.31
UV transmission : $\tau_{uv}$ [%]	0
Selectivity	2.11

#### 🔥 Thermal properties - EN 673

Thermal transmittance (vertical glazing) : $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	0.6
---	-----

#### 🔊 Acoustic properties

Direct airborne sound insulation - EN 12758 : $R_w$ (C;Ctr) [dB] <sub>1</sub>	NPD
--	-----

#### 🛡 Safety properties

Resistance to fire - EN 13501-2	NPD
Reaction to fire - EN 13501-1	NPD
Bullet resistance - EN 1063	NPD
Burglar resistance - EN 356	NPD
Pendulum body impact resistance - EN 12600	2B2 / NPD / 1C3
Explosion resistance - EN 13541	NPD

#### 📏 Thickness and weight

Nominal thickness : [mm]	41.4
Weight : [kg/m <sup>2</sup> ]	33

1. The sound reduction indexes correspond to glazing with dimensions 1230 mm by 1480 mm according to EN ISO 10140-3 and are tested in laboratory conditions. In-situ performances may vary according to the effective glazing dimensions, supporting system, installation, environment, noise sources etc. The accuracy of the given indexes is +/- 1 dB.

The AGC Glass Configurator is a simulation tool providing a performance analysis for the limited purpose of assisting the user in evaluating the performance of the glass configuration identified in this report. The interpolated performance is only applicable for glass products manufactured or processed by AGC. It does not replace an official Declaration of Performance and therefore may contain some variations, although AGC has made every effort to verify the reliability of this simulation tool. The user assumes any risk relating to the results provided by the tool and is solely responsible for the selection of the appropriate glass configuration for the user's application.

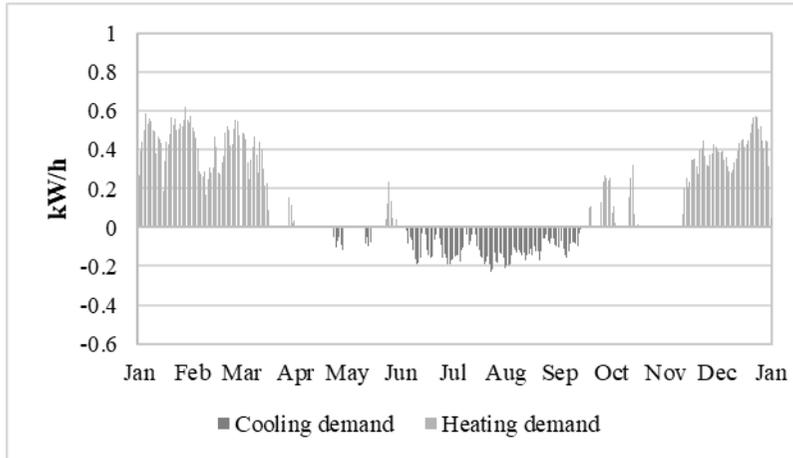
This document is for informative purposes only and in no way implies acceptance of any order by the AGC Group. Please consult the Specific Conditions of Use for the calculation standards that are used, the INISMA test report number and the accuracy of the values.

AGC makes no express or implied warranty of any kind with respect to the Glass Configurator. There are no warranties of merchantability, non-infringement or fitness for any particular purpose and no warranty shall be implied by operation of law or otherwise. In no event shall AGC be liable for direct, indirect, consequential or incidental damages of any kind relating to or resulting from the use of the Glass Configurator.

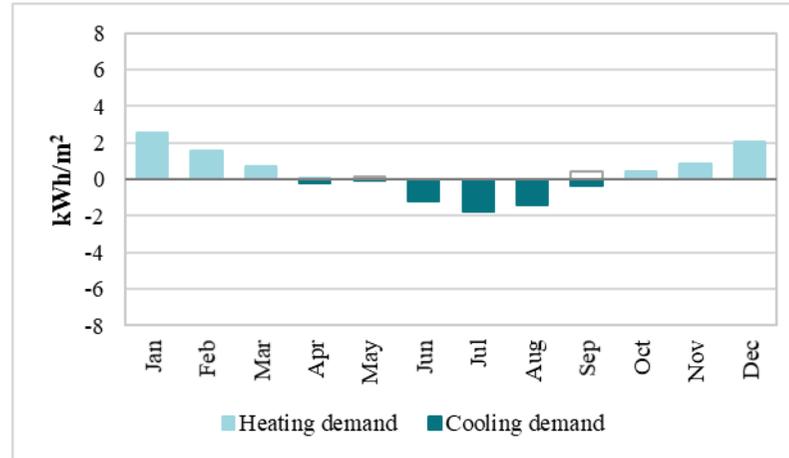
Simulazioni WWR

Benchmark

WWR 16.66%



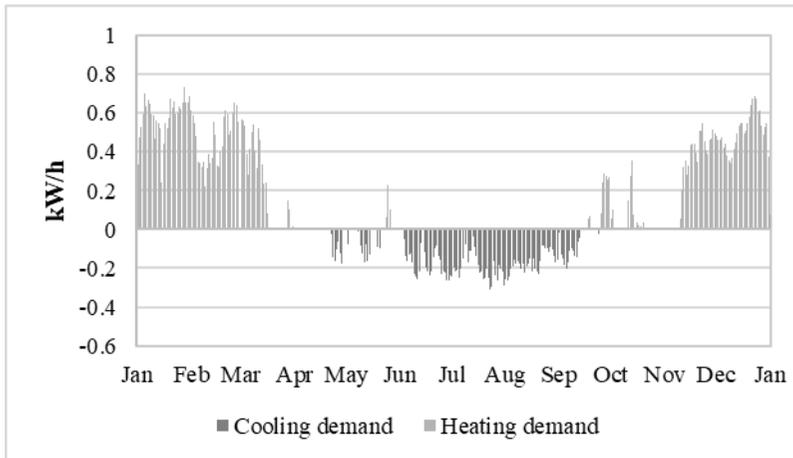
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 16.66%



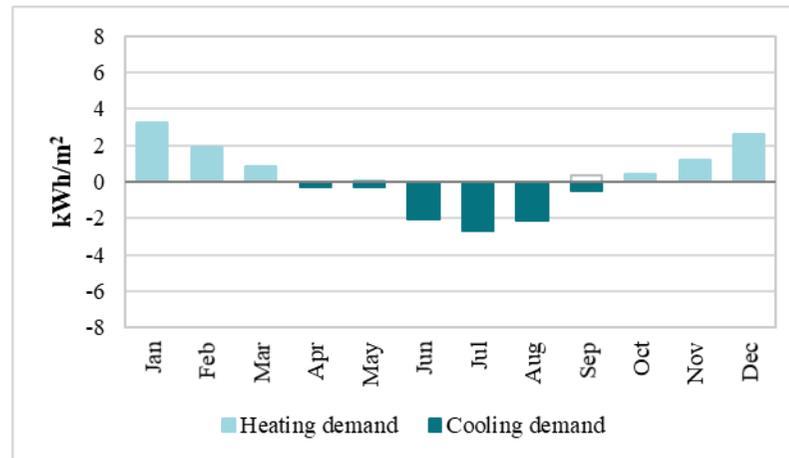
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 16.66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
8.042	4.97

WWR 33.3%



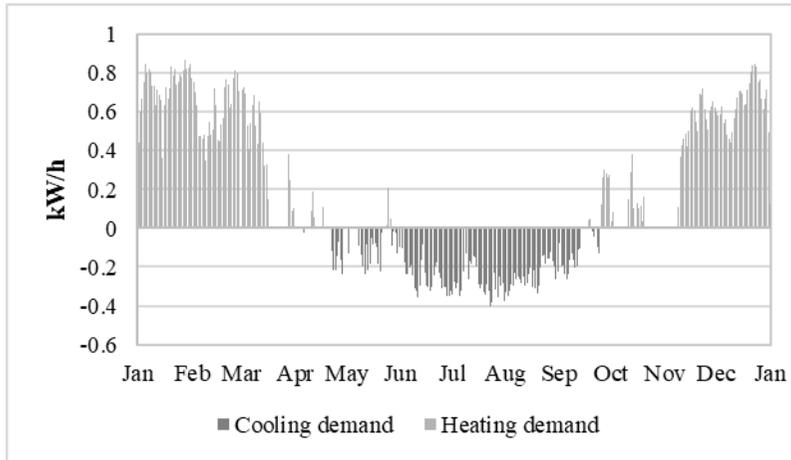
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 33.33%



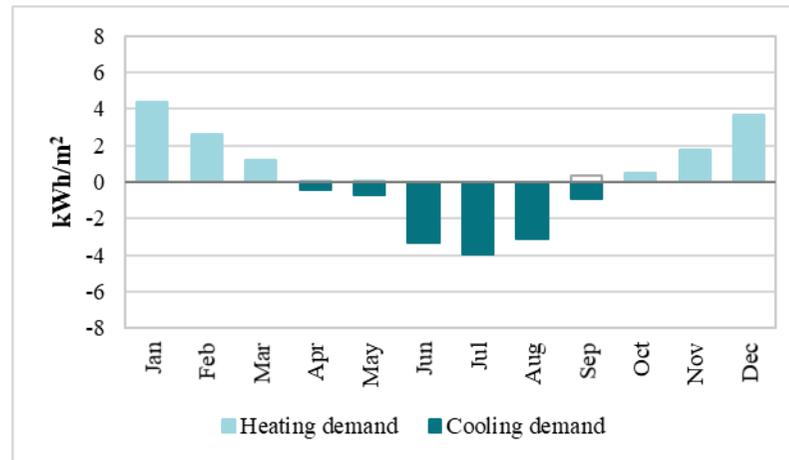
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 33.33%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
10.21	7.97

### WWR 50%



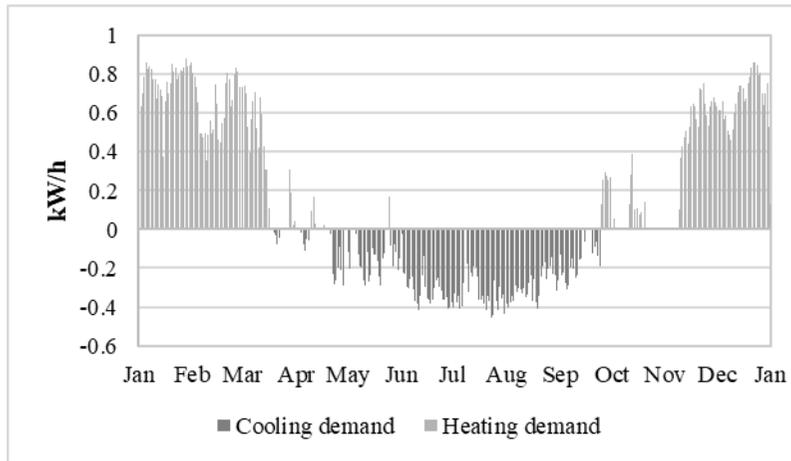
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 50%



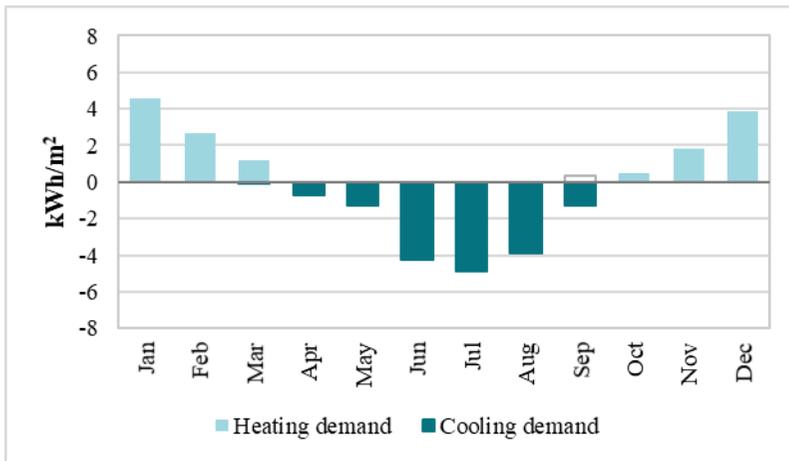
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 50%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
14.22	12.41

### WWR 66.66%



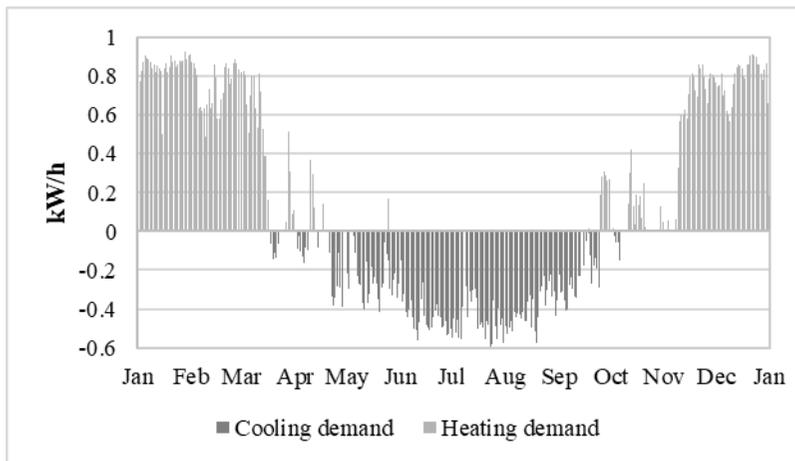
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 66%



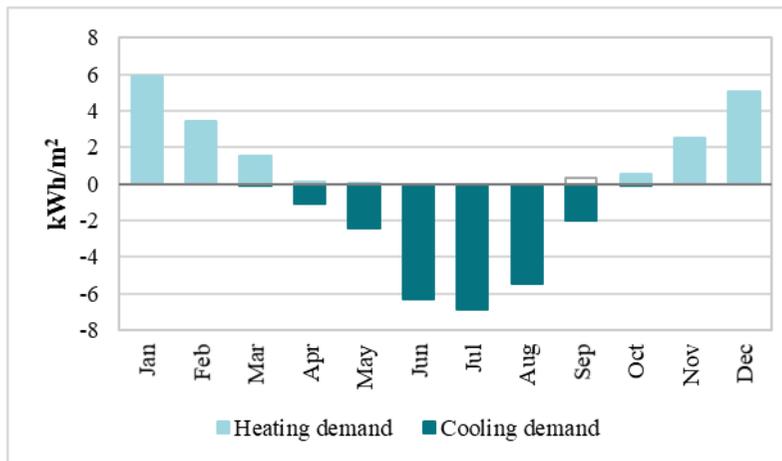
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
14.54	16.25

### WWR 100%



Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 100%

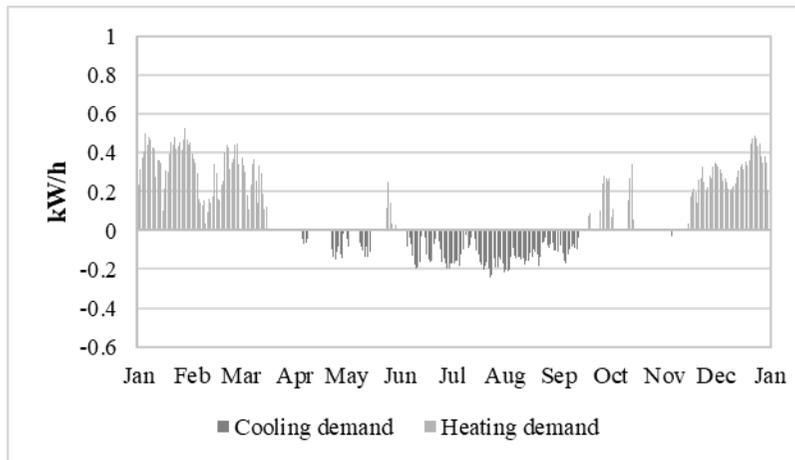


Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Benchmark\_WWR 100%

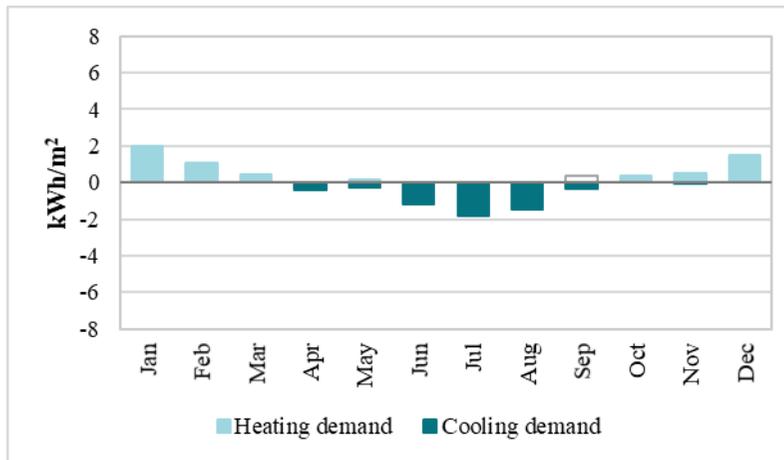
Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
19.05	24.21

### Configurazione 1.2

WWR 16.66%



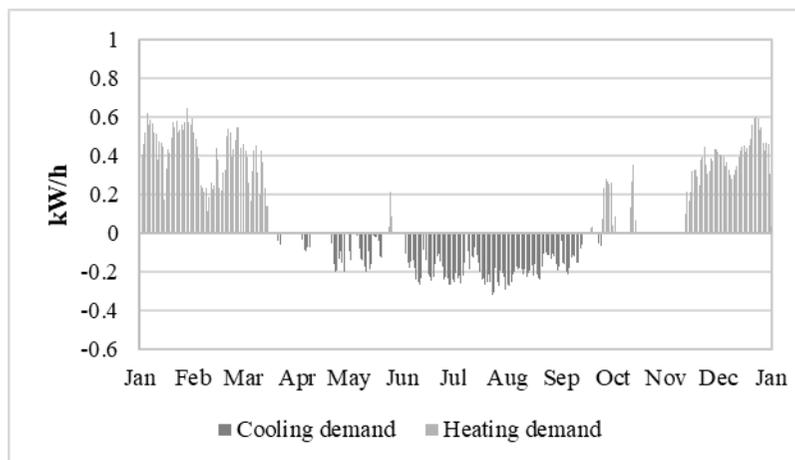
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 16.66%



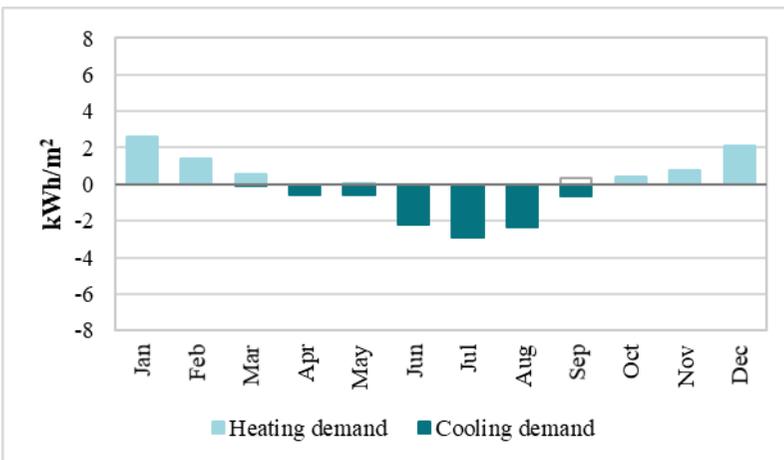
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 16.66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
5.84	5.52

WWR 33.33%



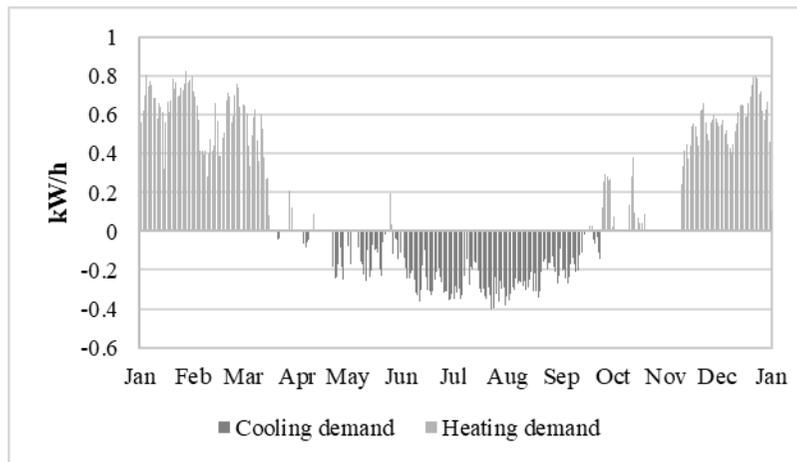
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 33.33%



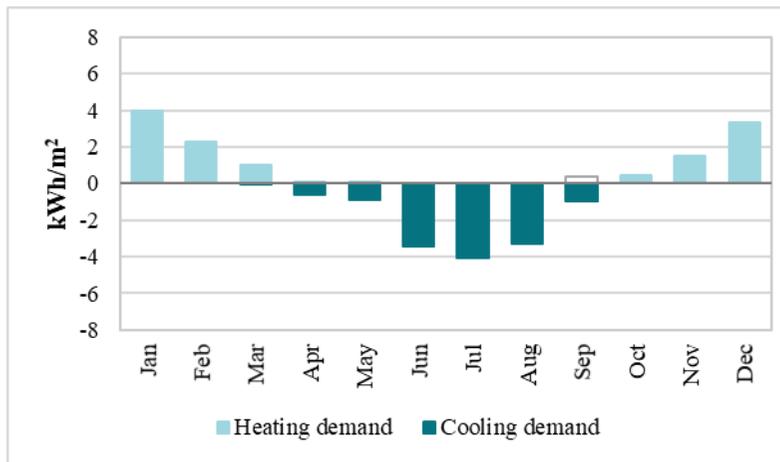
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 33.33%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
7.86	9.19

### WWR 50%



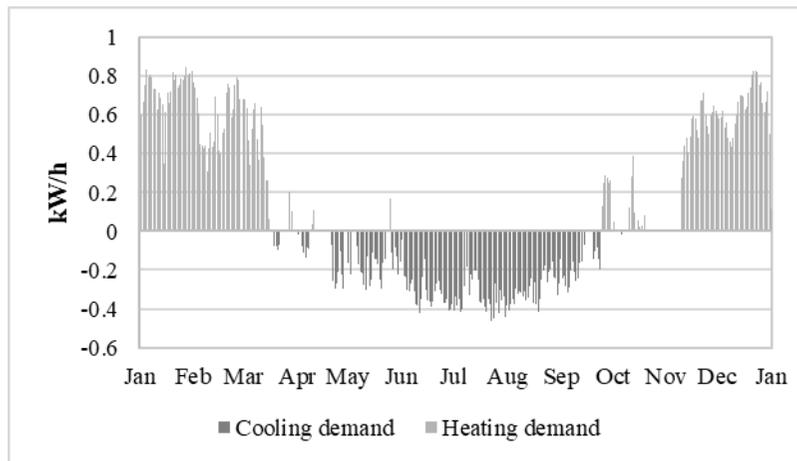
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 50%



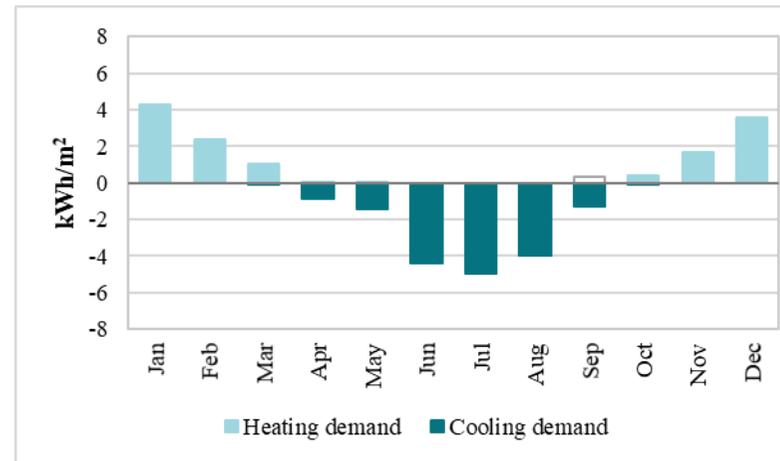
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 50%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
12.60	13.28

### WWR 66.66%



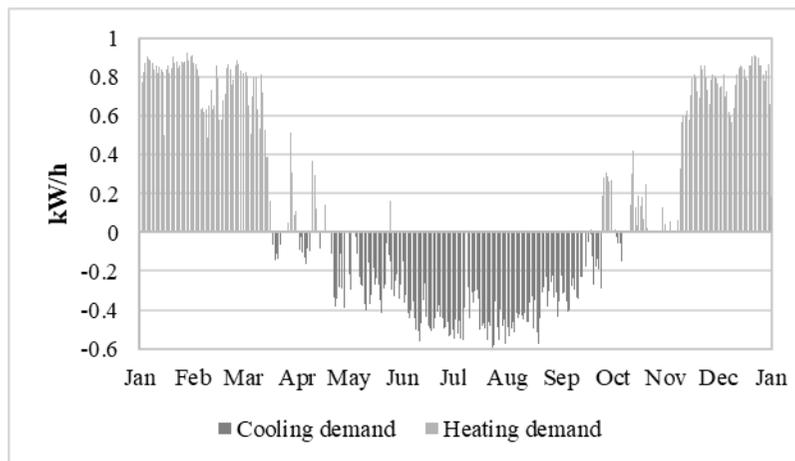
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 66.66%



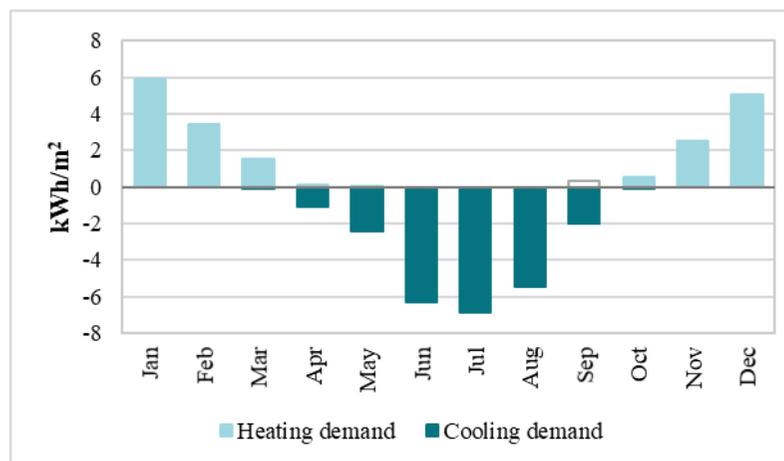
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 66.66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
13.35	16.96

## WWR 100%



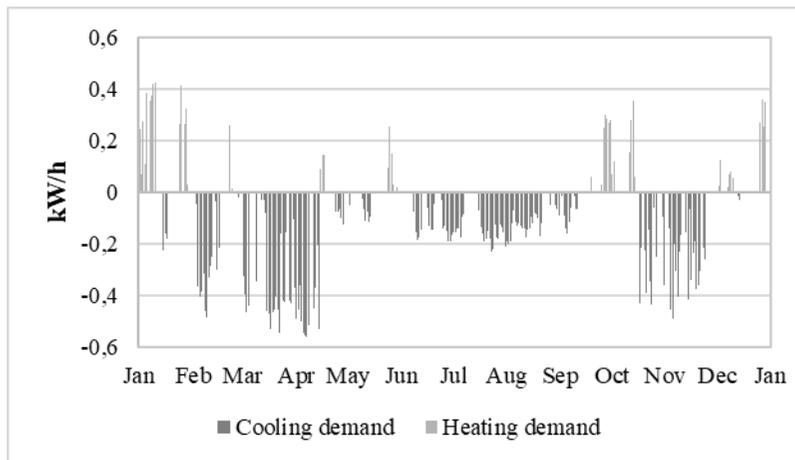
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 100%



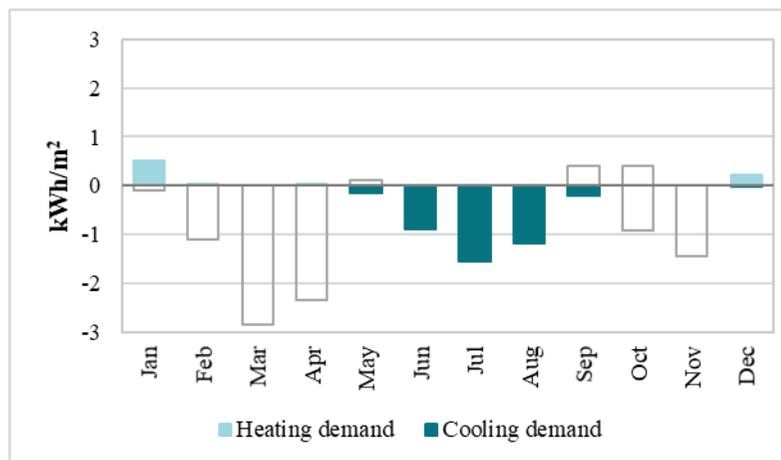
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Configurazione 1.2\_WWR 100%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
19.04	24.13

Confronto PCM  
PCM aluminium case a



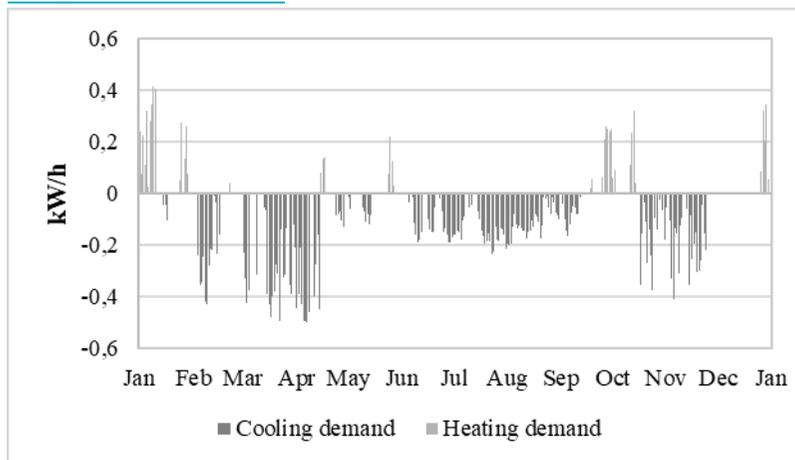
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_PCM\_aluminium case\_a



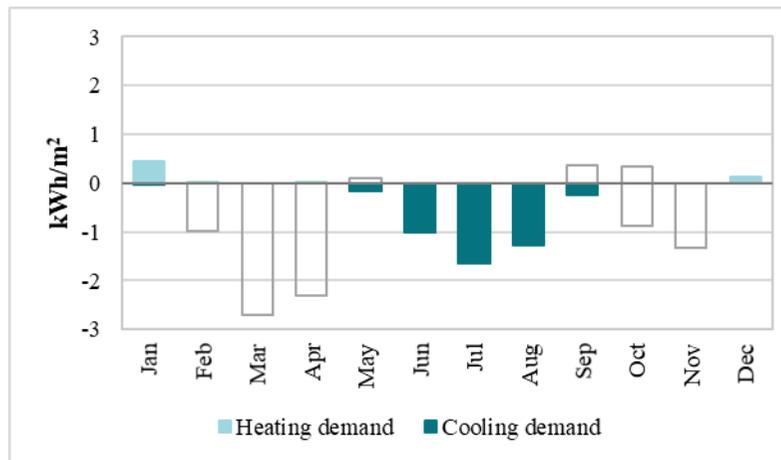
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_PCM\_aluminium case\_a

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.713	4.006

PCM aluminium case c



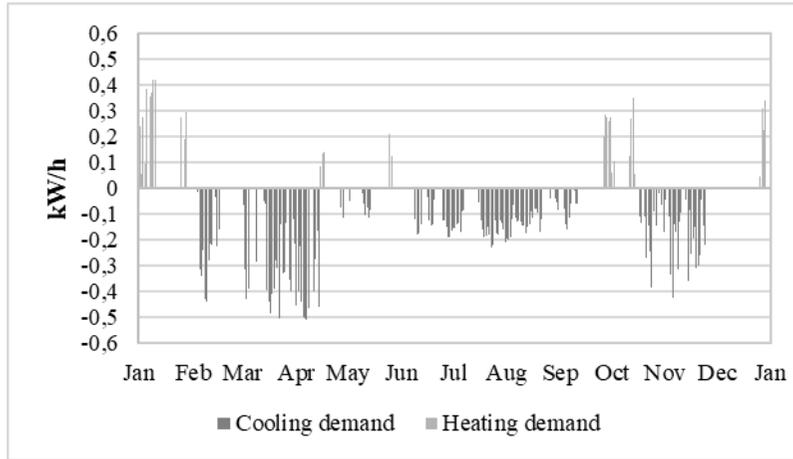
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_PCM\_aluminium case c



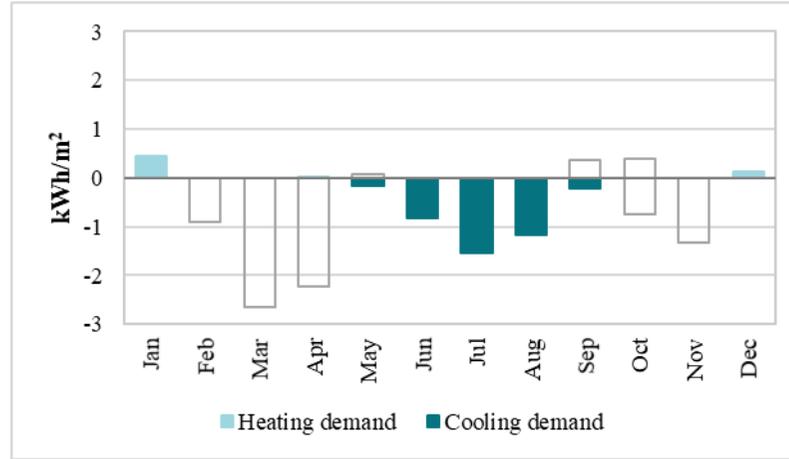
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_PCM\_aluminium case c

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.569	4.352

PCM\_plastic case\_b



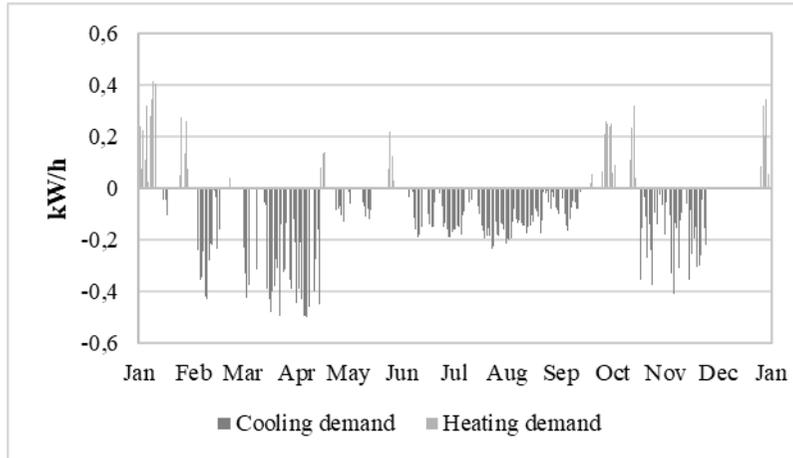
Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic case\_b



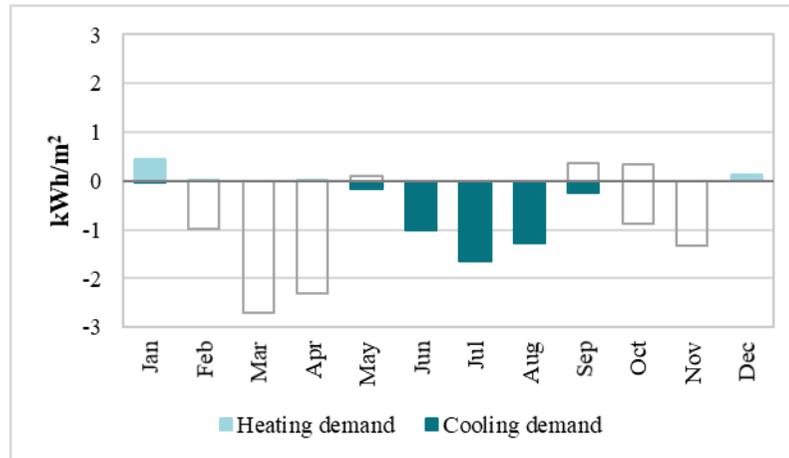
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic case\_b

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.559	3.91

PCM\_plastic container



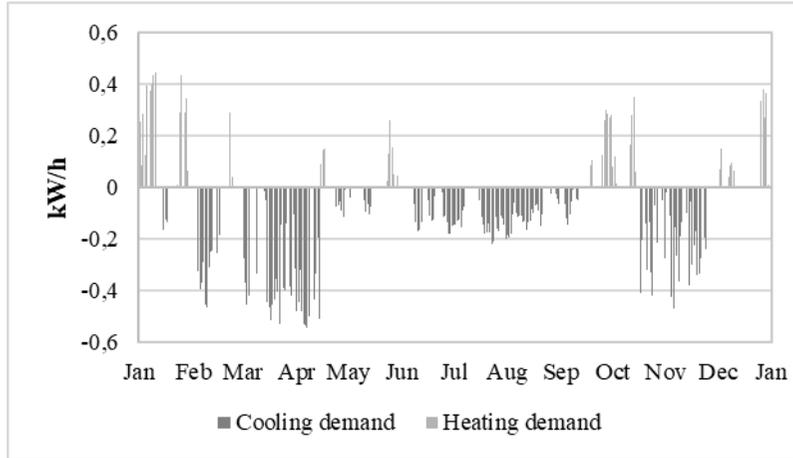
Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic container



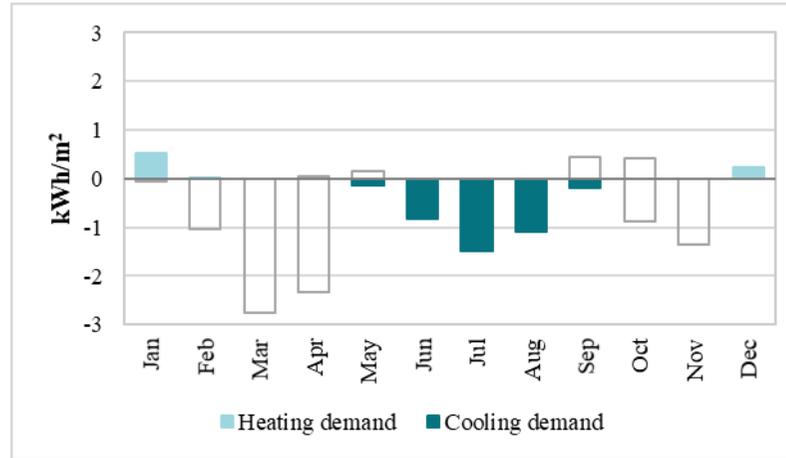
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic container

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.736	4.201

PCM\_plastic film bags



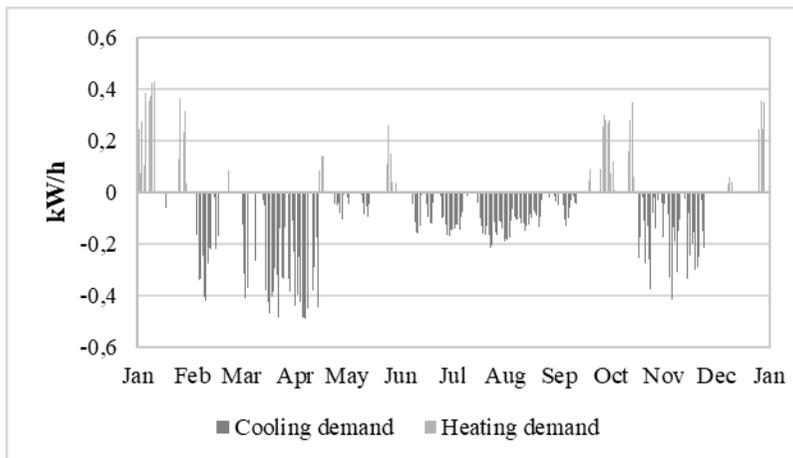
Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic film bags



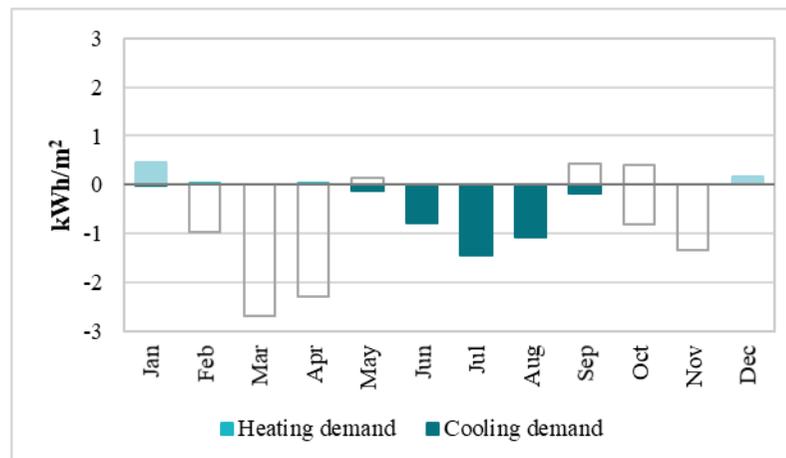
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic film bags

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.752	3.698

PCM\_pastic film bags (x2)



Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic film bags (x2)

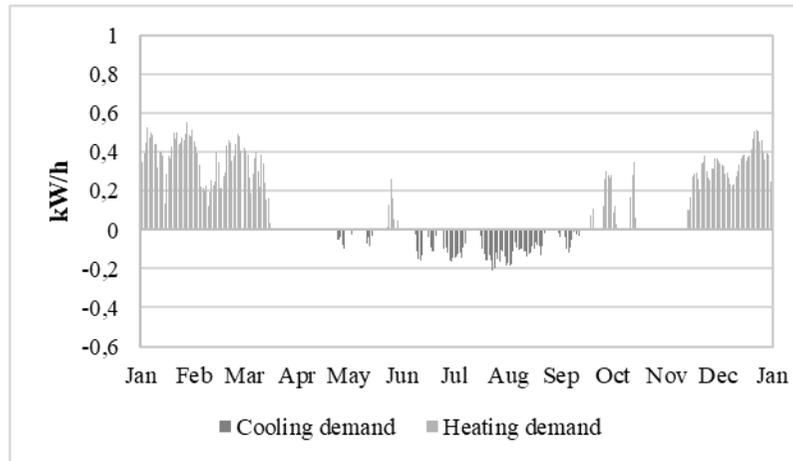


Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_PCM\_plastic film bags (x2)

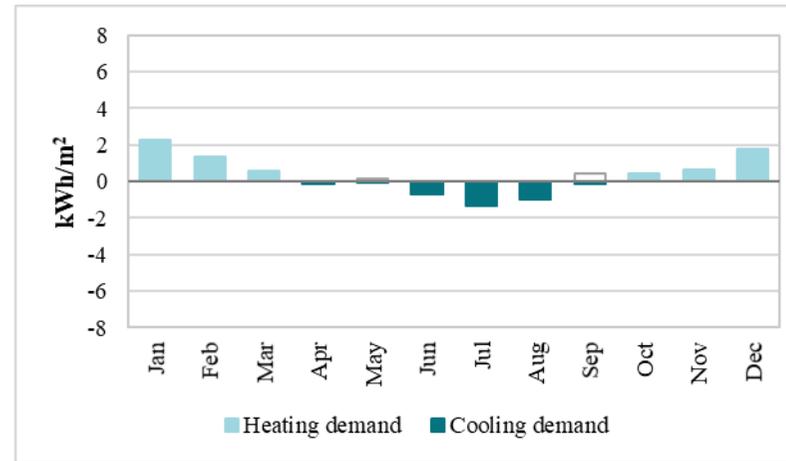
Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.645	3.601

### Configurazione 2.3 PCM Plastic film bags doppio

WWR 16.66%



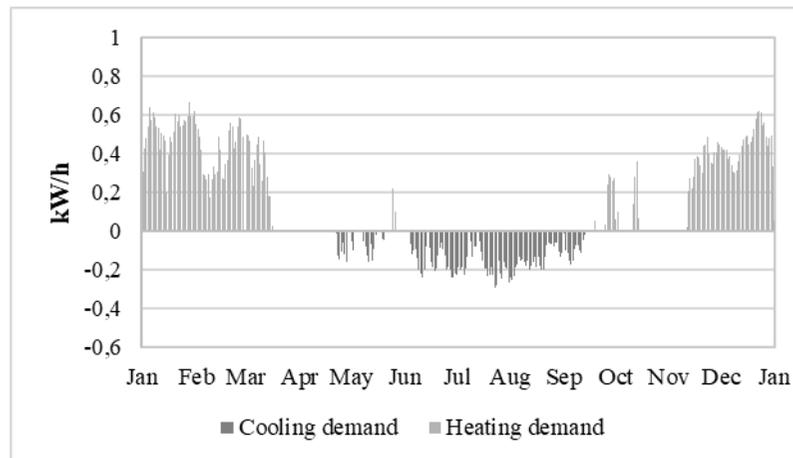
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Configurazione 2.3\_WWR 16.66%



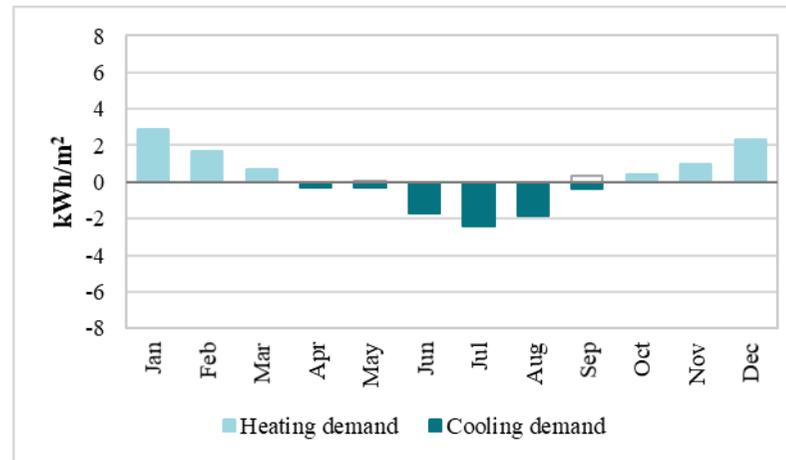
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Configurazione 2.3\_WWR 16.66% 16.66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
7.14	3.34

WWR 33.33%



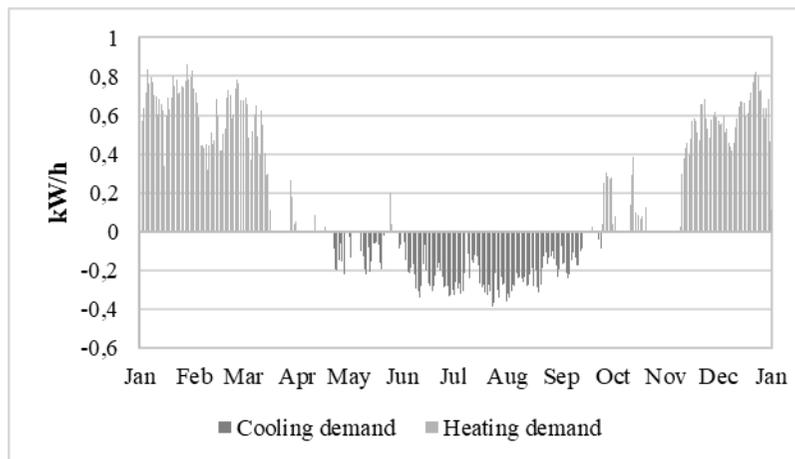
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Configurazione 2.3\_WWR 33.33%



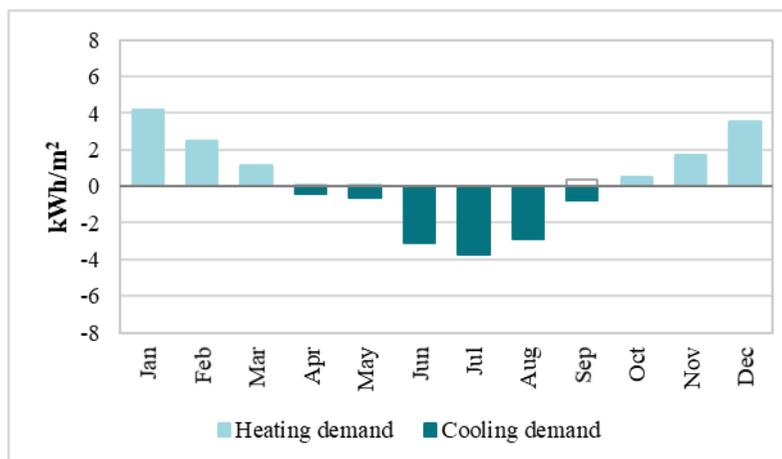
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_  
Configurazione 2.3\_WWR 33.33%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
8.98	6.96

### WWR 50%



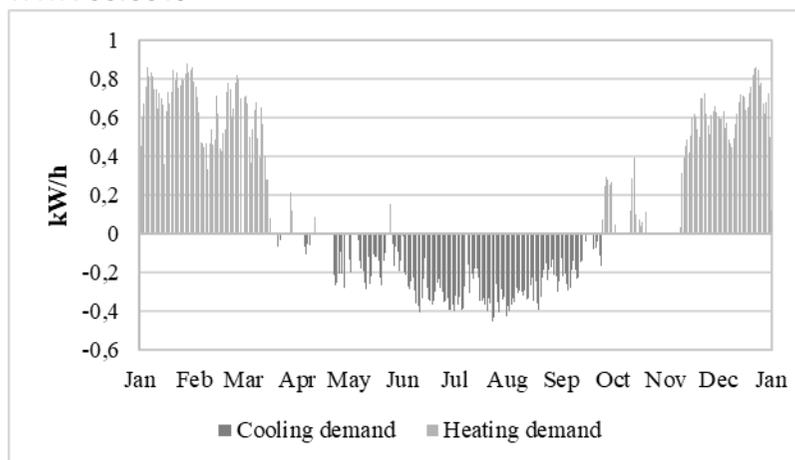
Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_ Configurazione 2.3\_WWR 50%



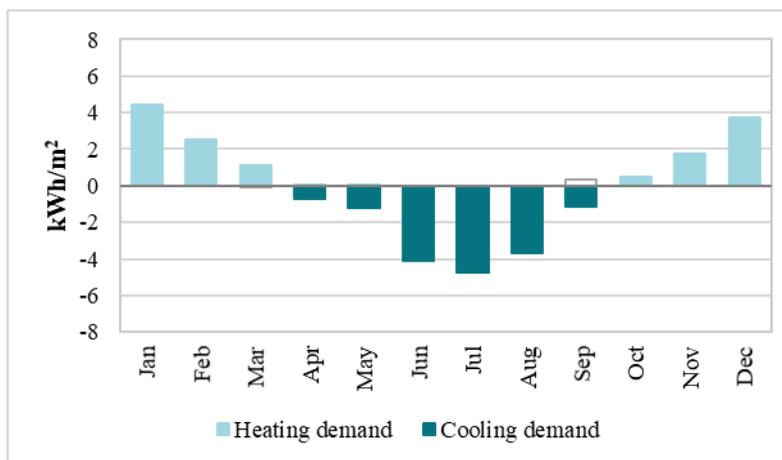
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_ Configurazione 2.3\_WWR 50%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
13.43	11.54

### WWR 66.66%



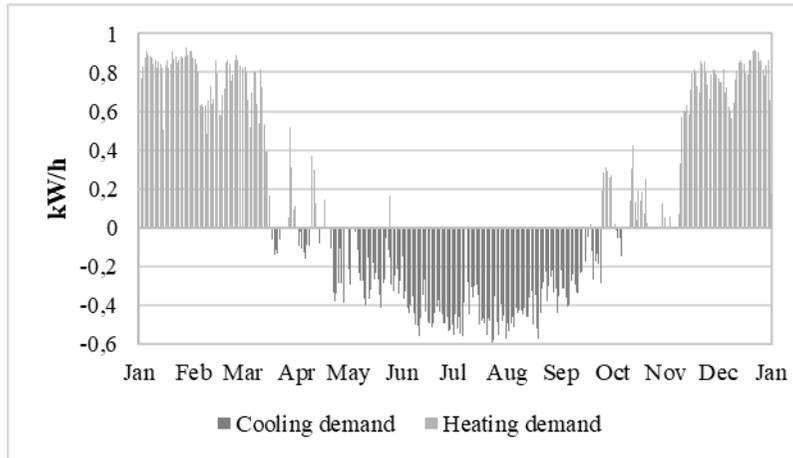
Fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_ Configurazione 2.3\_WWR 66.66%



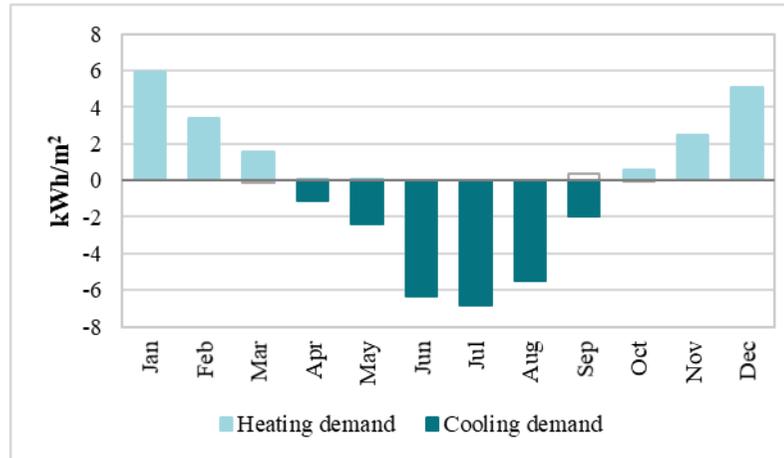
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento\_ Configurazione 2.3\_WWR 66.66%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
13.95	15.51

## WWR 100%



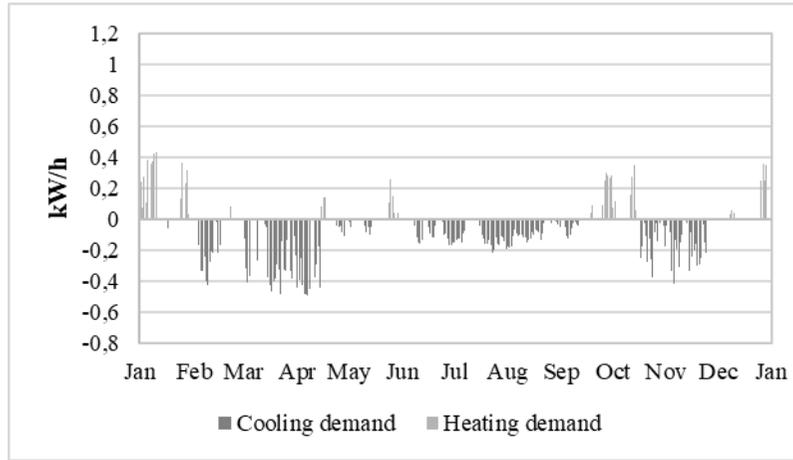
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_ Configurazione 2.3\_WWR 100%



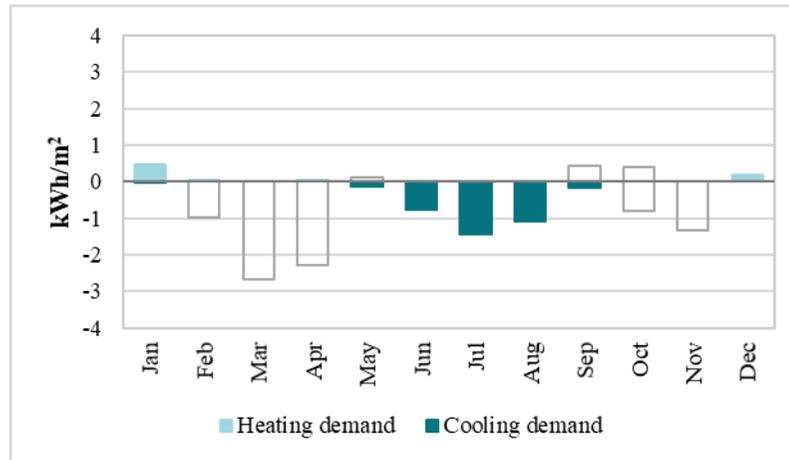
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_  
Configurazione 2.3\_WWR 100%

Heating (Oct-Mar) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (Apr-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
19.04	24.11

**Configurazione 3.3 PCM Plastic film bags doppio**  
**WWR 16.66%**



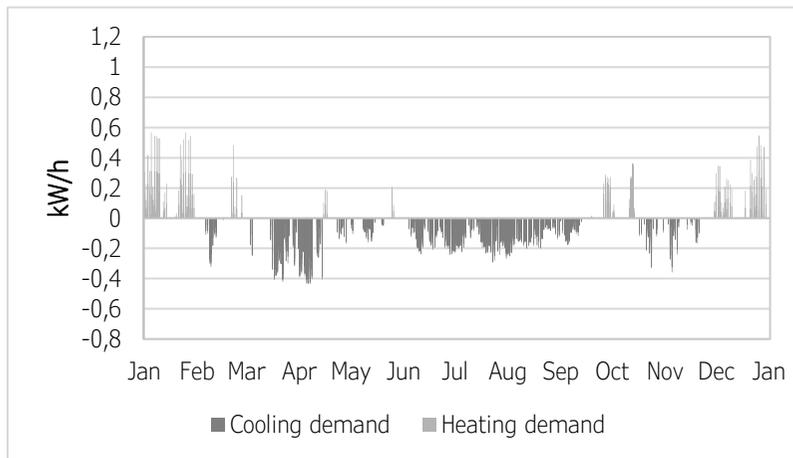
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 16.66%



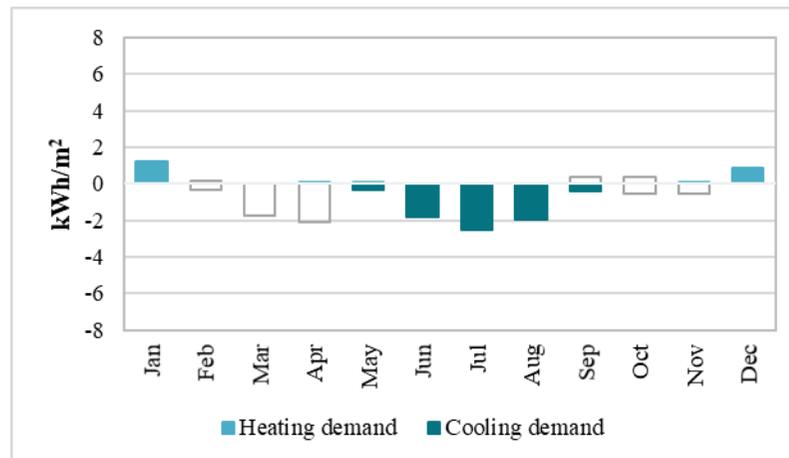
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 16.66%

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
0.65	3.60

**WWR 33.33%**



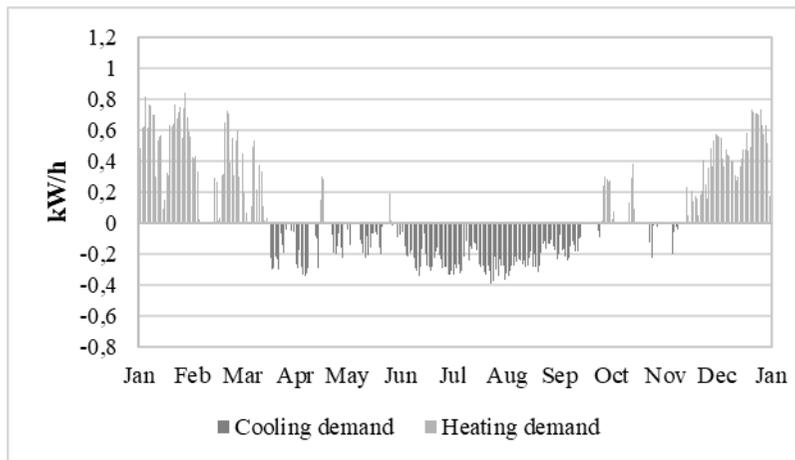
Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 33.33%



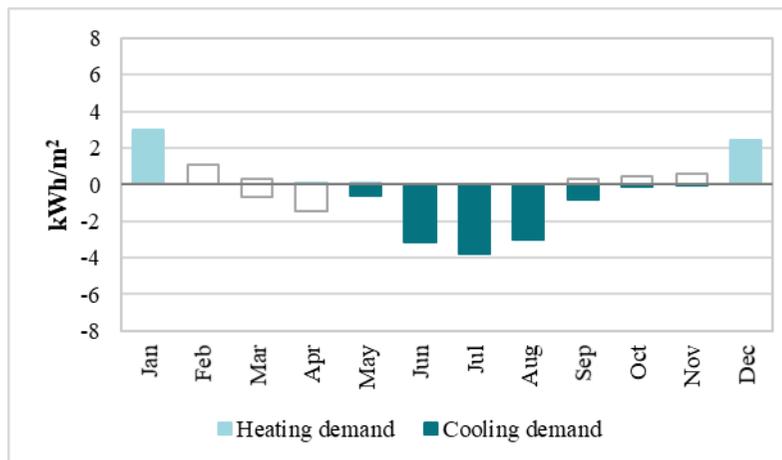
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 33.33%

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
2.089	7.033

### WWR 50%



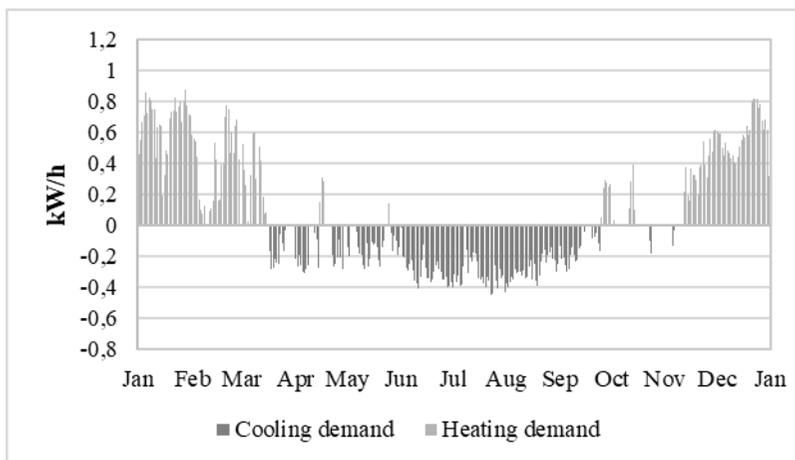
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 50%



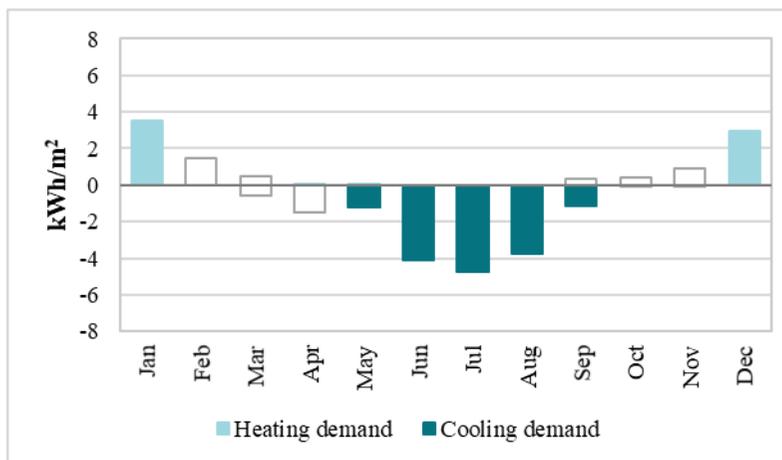
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 50%

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
5.43	11.34

### WWR 66.66%



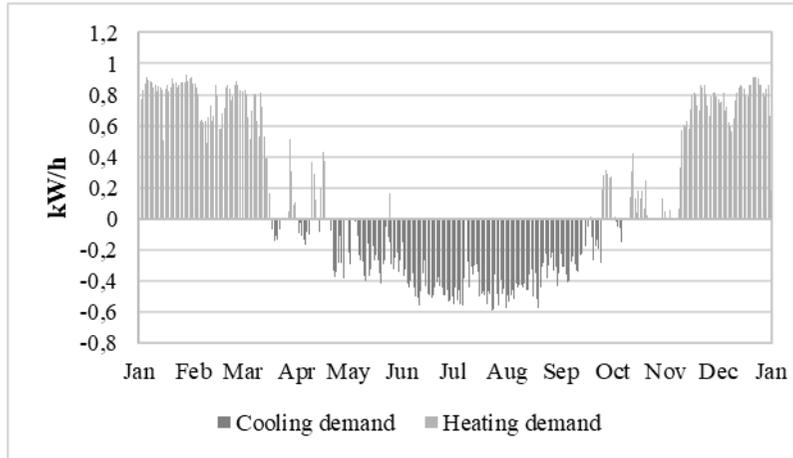
Fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 66.66%



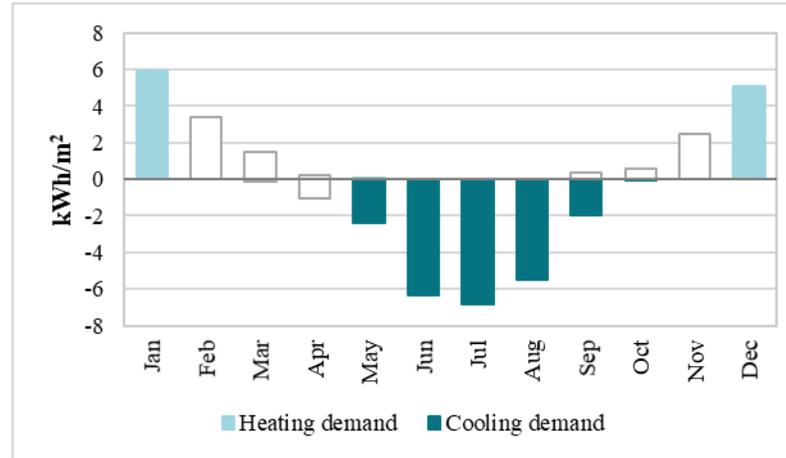
Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 66.66%

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
6.41	14.99

WWR 100%



Fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 100%



Analisi mensile del fabbisogno di riscaldamento e  
raffrescamento\_Config.3.3\_WWR 100%

Heating (Dec-Jan) [kWh/m <sup>2</sup> ]	Cooling (May-Sep) [kWh/m <sup>2</sup> ]
11.00	23.03

