ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA

ANALISI COMPARATIVA E IMPLEMENTAZIONE DI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) PER EVITARE IL SURRISCALDAMENTO DI UN CONTAINER

Tesi di laurea magistrale in Metodi matematici per l'energetica M

Relatore

Prof. Ing. Domiziano Mostacci

Presentata da

Federica Votto

Correlatori
Prof. Ing. Matthias Rädle
Ing. Sebastian Sonnick
Ing. Fredrik Wunder

Sessione Luglio 2025

Anno Accademico 2024/2025

"Alla mia testa dura, all'ansia e alla paura,
e giuro che un po' mi fa ridere.."

A chi ha creduto in me, anche quando tremavo più forte dei miei pensieri.

Abstract

Il contenimento del surriscaldamento estivo all'interno di moduli abitativi e container mobili rappresenta una delle sfide più rilevanti nell'ambito della progettazione energetica sostenibile, soprattutto in contesti caratterizzati da elevate escursioni termiche e limitato accesso a impianti di climatizzazione attiva. In tale contesto, la presente tesi esplora l'integrazione dei materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM) in container destinati allo stoccaggio di apparecchiature tecnologiche sensibili al calore, e sviluppa un'analisi comparativa finalizzata a individuare il PCM più efficace in termini di controllo termico passivo. Il lavoro è frutto di un tirocinio svolto in collaborazione con la startup tedesca MELT, durante il quale sono stati analizzati e modellati i pannelli contenenti PCM, sviluppati e testati dalla stessa azienda. La tesi si concentra inizialmente su una rassegna critica dei principi fisici, delle proprietà termofisiche, chimiche e meccaniche dei PCM, nonché sulle tecniche di incapsulamento e sulle principali modalità di integrazione in elementi edilizi. Sono stati analizzati in dettaglio gli idrati salini impiegati all'interno dei pannelli. Successivamente l'attenzione si pone sullo sviluppo del caso studio riguardante un container in acciaio ricoperto da pannelli contenenti PCM, destinato allo stoccaggio di dispositivi tecnologici sensibili alla temperatura. Le simulazioni sono state effettuate con DesignBuilder ed EnergyPlus, considerando tre diverse configurazioni: container di riferimento senza PCM, container con PCM a transizione di fase a 21 °C e container con PCM a transizione di fase a 25 °C, includendo inoltre una variante con stratigrafia mista. Sono stati analizzati inoltre tre contesti climatici differenti: una località in Afghanistan (clima desertico), Monaco di Baviera (clima temperato) e una località in Norvegia (clima freddo), con particolare attenzione al comportamento estivo del sistema. I risultati mostrano una significativa riduzione delle ore con temperatura interna oltre i 30 °C nel caso afghano, con un abbattimento fino al 90% rispetto al container privo di PCM. Anche nel contesto tedesco il PCM a 25 °C ha dimostrato buone performance, risultando la soluzione più versatile grazie al bilancio tra efficienza termica, costi e semplicità di installazione. Nel complesso, la ricerca evidenzia il potenziale dei PCM come strumenti chiave per l'efficientamento energetico nei sistemi mobili e prefabbricati, contribuendo alla mitigazione del carico termico estivo senza ricorrere a impianti attivi.

Indice

1. INTRODUZIONE 1

1.1 Contesto e motivazione 1
1.2 Obiettivo della tesi 2
1.3 Metodo e limitazioni dello studio 3
1.4 Struttura della Tesi 4
2. FONDAMENTI TEORICI DEI PCM 5

2.1 Introduzione 5
2.2 Stoccaggio termico dell'energia 6
2.2.1 Stoccaggio termico sensibile 6
2.2.2 Stoccaggio termico latente 8
2.2.3 – Altri metodi di accumulo 11
2.3 Materiali a cambiamento di fase (PCM) 12
2.3.1 Proprietà termofisiche 12
Calore latente di fusione 12
Conducibilità termica 12
Capacità termica e densità: 13
Temperatura di transizione 13
2.3.2 Proprietà termocinetiche 13
Velocità di fusione e solidificazione 14
Sottoraffreddamento (supercooling) 14
Isteresi termica 15
Stabilità ciclica 15
2.3.3 Proprietà chimiche e compatibilità 15
Stabilità chimica 16
Compatibilità con materiali di contenimento 16
Sicurezza e impatto ambientale 16
2.4 Classificazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) 17
2.4.1 PCM organici 19
Paraffine 19
Acidi grassi 24
Polialcoli 27
2.4.2 PCM inorganici 27
Idrati di sale 27
2.4.3 PCM eutettici 30

PCM eutettici organico–organico 30
PCM eutettici inorganico–inorganico 31
PCM eutettici organico–inorganico 31
2.4.4 Altri Materiali 33
2.5 Metodi di caratterizzazione delle proprietà dei PCM 33
2.6 Compatibilità chimica e corrosione dei materiali 34
2.7 Ottimizzazione dello scambio termico 36
2.8 Tecniche di incapsulamento dei PCM 37
3. INTEGRAZIONE DEI PCM NEGLI EDIFICI E NEI SISTEMI MOBILI 39
3.1 Introduzione 39
3.2 Strategie di integrazione dei PCM negli involucri edilizi 40
3.2.1 Involucro edilizio e comfort termico interno 40
3.2.2 Tecnologie di integrazione e soluzioni di retrofit 41
3.2.3 Limiti tecnici e barriere all'adozione dei PCM in edilizia 43
3.3 Applicazioni dei PCM nei moduli abitativi e nei container mobili 45
3.3.1 Container abitativi (cantieri, emergenza, militari) 45
3.3.2 PCM nei container refrigerati e nei sistemi di trasporto termicamente sensibili 46
3.3.3 Vincoli economico-normativi nei sistemi mobili 48
3.4 Considerazioni progettuali comuni 50
3.4.1 - Scelta del PCM in base all'applicazione 50
3.4.2 Comparazione con altre soluzioni di accumulo termico 51
3.5 Conclusioni 53
4. MODELLAZIONE DEL SISTEMA PCM–CONTAINER 54
4.1 Introduzione al caso studio 54
4.2 Fondamenti fisici e definizione del modello simulato 55
4.2.1 Principi di scambio termico del sistema 55
4.2.2 Definizione del modello fisico e numerico 61
4.2.2.1 Geometria del container e modellazione della stratigrafia 61
4.2.2.2 Materiali a cambiamento di fase selezionati 68
4.2.2.3 Pannelli in polipropilene e integrazione del PCM 70
4.2.2.4 Condizioni iniziali e al contorno nel modello termico 77
5. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI 79
5.1 Premessa metodologica 79
5.2 Risultati per il caso di studio in Afghanistan 81
5.3 Analisi dei risultati: località di Monaco di Baviera 88

5.4 Analisi dei risultati: località in Norvegia 92
5.5 Realizzazione del prototipo fisico 97
5.6 Considerazioni finali, limiti e prospettive future 99
CONCLUSIONI 101
BIBLIOGRAFIA 102

Indice delle Figure

Figura 1- Energia accumulata da TES sensibile e latente (PCM) in funzione della temperatura.
Figura 2 – Classificazione generale dei PCM
Figura 3 - Rappresentazione schematica dell'andamento della temperatura in funzione del contenuto energetico per diversi stadi della materia.
Figura 4 - Rappresentazione semplificata del comportamento termico del container durante l'esposizione alle condizioni ambientali.
Figura 5 - Vista frontale e vista posteriore del container.
Figura 6 - Vista laterale e dettaglio vista superiore del container.
Figura 7 - Vista frontale del container modellato tridimensionalmente in Design Builder.
Figura 8 - Vista posteriore del container modellato tridimensionalmente in Design Builder.
Figura 9 – Geometria del container.
Figura 10 - Vista frontale del container modellato in Design Builder, con evidenza delle sub-superfici in blu, non trattate con PCM.
Figura 11 - Vista posteriore del container modellato in Design Builder, con evidenza delle sub-superfici in blu, non trattate con PCM.
Figura 12 - Diagramma solare (Sun Path) generato con DesignBuilder.
Figura 13 - Stratigrafia semplificata delle pareti verticali e del tetto: legno interno (15 mm) + acciaio esterno (7 mm).
Figura 14 - Stratigrafia semplificata del pavimento: legno superiore (20 mm) + acciaio inferiore (7 mm).
Figura 15 - Andamento entalpia-temperatura dei due PCM selezionati (A21 e A25).
Figura 16 - Schema della struttura interna del pannello in polipropilene, con canali verticali.
Figura 17 - Vista in dettaglio della sezione di un pannello in PP: si notano gli alveoli vuoti (prima dell'introduzione del PCM) e la struttura tubolare.
Figura 18 - Stratigrafia delle superfici ricoperte dai pannelli in polipropilene con PCM, utilizzata nel modello di simulazione.
Figura 19 - Dettaglio della sigillatura ottimizzata: la barra in teflon (bianca) è inserita in un profilo in acciaio [47].
Figura 20 - Modello CAD [47] e vista fotografica del prototipo di macchina sviluppata per l'introduzione e la sigillatura del PCM nei pannelli in PP.
Figura 21 - Pannello in polipropilene già riempito, sigillato e implementato sulla porta del container; serie di pannelli in PP-PCM pronti per l'installazione presso il laboratorio MELT.
Figura 22 - Andamento orario della temperatura operativa interna: confronto tra container di riferimento (senza PCM) e container con pannelli PCM (transizione di fase a 21 °C) – periodo estivo, località: Afghanistan.

Figura 23 - Andamento orario della temperatura operativa interna: confronto tra container di riferimento (senza PCM) e container con pannelli PCM (transizione di fase a 25 °C) – periodo estivo, località: Afghanistan.
Figura 24 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container con PCM a 21 °C (1–7 giugno) confrontata con la configurazione di riferimento e la temperatura esterna (bulbo secco).
Figura 25 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container con PCM a 25 °C (1–7 giugno) confrontata con la configurazione di riferimento e la temperatura esterna (bulbo secco).
Figura 26 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale nel container privo di PCM (configurazione di riferimento in acciaio e legno).
Figura 27 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale per la configurazione con PCM A25.
Figura 28 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale per la configurazione con PCM A21.
Figura 29 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container per le quattro configurazioni simulate (senza PCM, PCM A21, PCM A25 e configurazione mista), nel periodo più caldo registrato a Monaco (15–29 luglio).
Figura 30 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione di riferimento, senza utilizzo dei PCM – località Monaco di Baviera.
Figura 31 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 21°C – località Monaco di Baviera.
Figura 32 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 25°C – località Monaco di Baviera.
Figura 33 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione mista (PCM a 25 °C sul tetto e PCM a 21 °C sulle pareti verticali)– località Monaco di Baviera.
Figura 34 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container nel periodo 19–26 giugno, in località norvegese, per le quattro configurazioni.
Figura 35 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container nel corso dell'intero trimestre estivo (giugno–agosto) in Norvegia.
Figura 36 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna per la configurazione di riferimento, priva di PCM, in località norvegese.
Figura 37 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 21 °C – località Norvegia.
Figura 38 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 25 °C – località Norvegia.
Figura 39 - Vista frontale del container dimostrativo con pannelli PCM a 25 °C. Sono visibili le sub-superfici non rivestite.
Figura 40 - Vista dall'alto del tetto del container. È evidente la continuità della copertura, realizzata con pannelli MELT e rivestimento protettivo in GRP.
Figura 41 - Vista laterale e posteriore del prototipo installato. Il container è dotato di unità HVAC e rivestimento integrale delle superfici verticali principali.

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Confronto tra accumulo termico sensibile e latente
Tabella 2 - Esempi PCM organici, con caratteristiche.

Tabella 3 - Esempi PCM inorganici, con caratteristiche.
Tabella 4 - Esempi di paraffine, con caratteristiche.
Tabella 5 - Esempi PCM non paraffinici, con caratteristiche.
Tabella 6 - Esempi acidi grassi, con caratteristiche.
Tabella 7 - Esempi idrati di sale, con caratteristiche.
Tabella 8 - Esempi eutettici, con caratteristiche.
Tabella 9 - Proprietà termofisiche medie dei pannelli compositi in polipropilene e PCM (79% PCM, 21% PP), per le due varianti a 21 °C e 25 °C.
Tabella 10 - Confronto tra pannelli PCM MELT e altri sistemi disponibili sul mercato.

1. INTRODUZIONE

1.1 Contesto e motivazione

Nello scenario attuale della transizione energetica, la riduzione dell'impatto ambientale dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra è diventata una priorità imprescindibile. Con l'obiettivo di abbandonare progressivamente le fonti fossili per contrastare il cambiamento climatico – come sancito dall'Accordo di Parigi – l'Unione Europea ha formalizzato questo impegno attraverso il *Green Deal*, una strategia politica e normativa ambiziosa che mira alla neutralità climatica entro il 2050, promuovendo l'efficienza energetica, l'impiego di fonti rinnovabili e l'innovazione nei materiali e nei sistemi costruttivi. In questo contesto, la Germania, con la sua *Energiewende* – letteralmente "svolta energetica" – è stata tra i Paesi pionieri a livello europeo e internazionale, avviando già nei primi anni 2000 una politica di transizione ecologica ben strutturata per riformare il sistema energetico nazionale in chiave sostenibile attraverso un percorso complesso che richiede equilibrio tra sostenibilità ambientale, sicurezza dell'approvvigionamento e competitività economica. Coinvolgendo anche il settore edilizio, i trasporti e l'industria, la transizione energetica richiede soluzioni integrate e innovative; in tale cornice, l'adozione di soluzioni per il controllo termico passivo è una delle leve fondamentali per abbattere il fabbisogno energetico, riducendo al minimo l'impiego di sistemi meccanici di climatizzazione spesso alimentati da fonti fossili. Tra le tecnologie più promettenti in questo ambito, spiccano i materiali a cambiamento di fase (PCM), in grado di immagazzinare e rilasciare energia termica sotto forma di calore latente durante il cambiamento di fase da solido a liquido e viceversa, contribuendo a stabilizzare la temperatura all'interno degli spazi confinati con consumi minimi o nulli. I PCM trovano applicazione concreta e immediata in strutture modulari, come i container, sempre più diffusi per scopi abitativi temporanei, applicazioni industriali o situazioni d'emergenza, ma anche per il trasporto e lo stoccaggio di merci sensibili alle variazioni termiche. Realizzati

generalmente in materiali metallici ad alta conducibilità, i container sono soggetti a forti escursioni termiche: si surriscaldano rapidamente sotto l'esposizione solare diretta e si raffreddano bruscamente in condizioni climatiche rigide. Tali variazioni termiche possono compromettere seriamente l'integrità di materiali conservati al loro interno, come alimenti, dispositivi elettronici, medicinali o altre attrezzature sensibili o rendere inadeguate le condizioni operative. Inoltre, l'assenza di sistemi di isolamento efficaci comporta spesso il ricorso a soluzioni attive come sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), che costituiscono una delle principali fonti di consumo energetico nei settori civile e industriale. Grazie alle loro proprietà uniche i PCM permettono di attenuare i picchi termici e, mantenendo la temperatura interna entro una fascia termica desiderata, offrono vantaggi in termini di efficienza energetica e riduzione dei costi operativi. Rispetto ai sistemi di raffrescamento tradizionali basati su compressione – ad alto consumo elettrico – le soluzioni passive con PCM non richiedono alimentazione esterna continua e permettono di spostare i picchi di richiesta energetica verso le fasce orarie a minor carico, favorendo una maggiore stabilità della rete elettrica e contribuendo alla riduzione delle emissioni di CO_2.

1.2 Obiettivo della tesi

In collaborazione con il team della giovane startup *MELT* (Materials, Energy and Latent-Heat Technology) e del dipartimento di *Chemietechnik* della *Hochschule Mannheim*, in Germania, ho analizzato l'efficacia del controllo termico passivo in un container, per evitare il surriscaldamento dello stesso, attraverso l'impiego dei PCM, mediante uno studio comparativo condotto su diverse configurazioni. In particolare, è stata studiata l'evoluzione della temperatura interna del container in tre diversi scenari: il primo riguarda il container privo di qualunque rivestimento a controllo passivo; il secondo prevede l'impiego di pannelli in polipropilene a camera cava con sigillatura ermetica, dello spessore di 10 mm, che fungono da supporto per il materiale di accumulo latente con punto di fusione pari a 21 °C; nel terzo scenario, gli stessi pannelli ospitano invece un PCM con punto di fusione pari a 25 °C. L'analisi è

stata condotta con l'obiettivo di valutare l'idoneità del container a contenere attrezzature tecniche particolarmente sensibili alle variazioni di temperatura, e i risultati ottenuti sono stati condivisi con un cliente, interessato a individuare la tipologia di PCM più adatta in funzione dello specifico contesto operativo. Per questa ragione, le simulazioni sono state ambientate in un contesto climatico estremo, un'area desertica dell'Afghanistan, caratterizzata da forti escursioni termiche giornaliere e temperature elevate. Successivamente, una volta individuato il materiale a cambiamento di fase più idoneo in base alle prestazioni riscontrate, sono state eseguite ulteriori simulazioni, spostando la posizione del container nella città di Monaco di Baviera con un clima continentale temperato e infine in una località della Norvegia settentrionale, caratterizzata da condizioni climatiche rigide e persistenti.

1.3 Metodo e limitazioni dello studio

Ho realizzato il modello tridimensionale del container utilizzando il software *DesignBuilder*, un'interfaccia grafica per la definizione geometrica e l'assegnazione delle proprietà termo-fisiche dei materiali e delle superfici, partendo dalle misure precise fornite dal cliente. L'analisi energetica è stata effettuata tramite il motore di calcolo *EnergyPlus*, integrato nel software, permettendo di simulare il comportamento termico del sistema sia in presenza che in assenza di materiali a cambiamento di fase (PCM). Durante la modellazione, ho introdotto alcune ipotesi semplificative, utili per rendere le simulazioni gestibili e confrontabili. In particolare, non tutte le superfici del container sono state rivestite con i pannelli e, per rappresentare il materiale utilizzato, ho optato per una media delle proprietà termo-fisiche tra il polipropilene (materiale del pannello) e il PCM al suo interno, ottenendo così un materiale composito semplificato. I risultati delle simulazioni sono stati infine elaborati con Microsoft Excel, che mi ha permesso di visualizzare i dati in modo chiaro e immediato attraverso grafici e istogrammi, facilitando il confronto tra le diverse configurazioni analizzate.

1.4 Struttura della Tesi

Il Report è organizzato come segue:

Capitolo I - Introduzione: In questo capitolo viene illustrato l'obiettivo della tesi, introducendo il contesto generale e le motivazioni che hanno portato allo sviluppo dello studio.

Capitolo II – Fondamenti teorici dei PCM: Questo capitolo introduce i principi fondamentali dello scambio termico e del controllo passivo del calore, approfondendo il funzionamento e le proprietà dei materiali a cambiamento di fase (PCM). Vengono analizzate le caratteristiche termofisiche, termocinetiche e chimiche dei PCM, le principali tecnologie di incapsulamento e le diverse tipologie esistenti, al fine di fornire un quadro completo delle potenzialità di questi materiali in ambito edilizio.

Capitolo III – Integrazione dei PCM negli edifici e nei sistemi mobili: Il capitolo analizza le principali applicazioni dei PCM nel settore edilizio e nei sistemi mobili, come i container abitativi e refrigerati, evidenziandone i vantaggi, i limiti e lo stato dell'arte attraverso una revisione della letteratura.

Capitolo IV – Modellazione del sistema PCM–Container: In questo capitolo vengono presentati i materiali a cambiamento di fase (PCM) forniti dalla startup Melt, partner della tesi, e utilizzati nella modellazione. Viene descritto il modello tridimensionale del container, realizzato con *DesignBuilder*, insieme alla definizione del modello fisico e numerico, alla stratigrafia delle pareti e alle tecniche di integrazione dei pannelli contenenti PCM. Sono inoltre illustrate le condizioni iniziali e al contorno, le semplificazioni adottate e la metodologia utilizzata per confrontare le configurazioni con e senza PCM mediante simulazioni eseguite con *EnergyPlus*.

Capitolo V – Analisi comparativa dei risultati: All'interno del Capitolo viene condotta un'analisi comparativa tra le diverse configurazioni simulate del container, con l'obiettivo di valutarne le prestazioni in termini di controllo termico passivo, efficacia energetica e sostenibilità tecnico-economica. L'analisi si articola in una fase numerica, basata su simulazioni stagionali in vari contesti climatici, e in una fase sperimentale, con la realizzazione di un prototipo fisico.

2. FONDAMENTI TEORICI DEI PCM

2.1 Introduzione

Nella progettazione di edifici e sistemi energetici efficienti, per garantire condizioni ambientali stabili e limitare il consumo di energia primaria, il controllo termico rappresenta un aspetto fondamentale. Sfruttando le proprietà fisiche dei materiali costruttivi e dell'involucro edilizio, il controllo termico passivo si distingue tra le strategie oggi disponibili, per la capacità di regolare i flussi di calore senza l'impiego di dispositivi meccanici o fonti esterne. In questo ambito, un ruolo particolarmente interessante è svolto dai materiali a cambiamento di fase (**Phase Change Materials, PCM**), grazie alla loro capacità di assorbire e rilasciare calore durante la transizione di stato tra solido e liquido [1].

Questi materiali agiscono come un vero e proprio "buffer termico": accumulano energia durante la fase di fusione e la restituiscono al momento della solidificazione, mantenendo la temperatura interna entro un intervallo più stabile rispetto ai materiali convenzionali utilizzati per lo stoccaggio sensibile dell'energia [2]. Questa loro capacità di sfruttare il calore latente di transizione per attenuare le fluttuazioni di temperatura negli ambienti confinati li rende particolarmente efficaci per applicazioni passive, come l'isolamento di container metallici destinati allo stoccaggio di merci sensibili o all'installazione di apparecchiature tecniche, che devono operare in condizioni climatiche estreme o variabili [3].

Negli ultimi decenni, specialmente nei settori dell'edilizia, della logistica e dell'industria, l'adozione dei PCM ha spinto la ricerca verso lo sviluppo di materiali sempre più performanti dal punto di vista termico, meccanico e ambientale. Tuttavia, alcune criticità tecniche, tra cui la bassa conducibilità termica, la variazione di volume durante il cambiamento di fase e la necessità di sistemi di incapsulamento sicuri e durevoli, ne limitano tutt'oggi l'implementazione su larga scala.

Questo capitolo descrive i principi teorici dello stoccaggio termico dell'energia, con particolare attenzione ai PCM e al loro impiego nel controllo

termico passivo. Verranno introdotti i meccanismi di scambio termico, le differenze tra accumulo sensibile e latente, le proprietà e le tipologie di materiali più utilizzati, e verranno affrontate le problematiche applicative.

2.2 Stoccaggio termico dell'energia

Lo stoccaggio di energia termica (Thermal Energy Storage – TES) rende più flessibili e sostenibili i sistemi termici in quanto permette di immagazzinare calore durante i periodi di surplus energetico e di rilasciarlo quando necessario. In questo modo contribuisce a ridurre i picchi di domanda, stabilizzare le condizioni termiche all'interno degli ambienti e migliorare l'integrazione delle fonti rinnovabili [4].

In generale, il principio dello stoccaggio termico si basa sulla capacità di accumulare calore in un mezzo materiale attraverso processi reversibili. A seconda del tipo di fenomeno fisico coinvolto, si distinguono tre principali categorie di sistemi TES:

- Stoccaggio sensibile, basato sulla variazione di temperatura del materiale;
- Stoccaggio latente, che sfrutta il cambiamento di fase di un materiale (come da solido a liquido);
- Stoccaggio termochimico, che coinvolge reazioni chimiche reversibili.

In questa sezione si approfondiranno le prime due modalità, che al momento sono le più consolidate dal punto di vista applicativo e più rilevanti per le soluzioni di controllo termico passivo.

2.2.1 Stoccaggio termico sensibile

Il TES sensibile è il metodo più semplice e diffuso per immagazzinare energia sotto forma di calore; si basa sull'aumento o la diminuzione della temperatura di un materiale in funzione della quantità di energia scambiata, senza che questo subisca un cambiamento di fase.

In termini generali, il calore immagazzinato nel materiale durante la fase di riscaldamento e rilasciato in fase di raffreddamento, è calcolabile con l'integrale:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m\, c_p(T) dT$$

dove:

- Q è l'energia termica accumulata [J],
- m è la massa del materiale [kg],
- $c_p(T)$ è il calore specifico a pressione costante in funzione della temperatura [J/kg·K],
- T_i e T_f sono rispettivamente la temperatura iniziale e finale del processo [K].

In molti casi pratici, se il calore specifico può essere assunto costante nel range di temperatura considerato, l'integrale si semplifica nell'espressione:

$$Q = mc_p\Delta T$$

Tra i materiali più utilizzati per lo stoccaggio sensibile troviamo l'acqua, per la sua elevata capacità termica, molto comune nei sistemi a bassa temperatura, oli minerali o sintetici, e materiali solidi come rocce e calcestruzzo, spesso impiegati in impianti ad alta temperatura o per accumuli stagionali. La scelta dipende principalmente dal campo di temperatura di esercizio, dalla disponibilità e dal contesto applicativo.

Questo metodo è ampiamente utilizzato per la sua semplicità e affidabilità. I materiali impiegati sono ampiamente disponibili, spesso poco costosi, non subiscono alterazioni chimiche significative durante i cicli termici, riducendo così le esigenze di manutenzione. Questa tecnologia non necessita di componenti complessi e ciò si traduce in costi contenuti e facilità di realizzazione, risulta quindi essere già consolidata, con una lunga storia di applicazioni per sistemi centralizzati e industriali.

Tuttavia, nonostante i suoi vantaggi, questa tipologia di accumulo porta con sé alcune criticità, soprattutto in relazione alla densità energetica. La quantità di energia stoccata è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura e

al calore specifico del materiale: questo significa che, per ottenere accumuli significativi, è spesso necessario ricorrere a grandi volumi di materiale, il che può comportare problemi di ingombro e peso. Inoltre, a differenza dei materiali a cambiamento di fase, i materiali sensibili non permettono di mantenere stabile la temperatura interna durante il rilascio dell'energia: la temperatura del sistema varia progressivamente, il che può rappresentare un ostacolo nelle applicazioni nel campo del controllo termico passivo dove l'obiettivo è contenere le oscillazioni termiche.

Proprio per questi motivi, nonostante l'efficacia dello stoccaggio sensibile in molti contesti, le sue applicazioni lasciano spazio all'impiego di soluzioni più evolute, come lo stoccaggio latente tramite materiali a cambiamento di fase.

2.2.2 Stoccaggio termico latente

Lo stoccaggio termico latente utilizza materiali che immagazzinano energia attraverso il cambiamento di fase, solitamente da solido a liquido. In questo caso l'energia viene accumulata attraverso il calore latente di fusione e trasferita a temperatura quasi isoterma, corrispondente al punto di fusione del materiale utilizzato. Questo comportamento consente di accumulare energia in modo più efficiente rispetto allo stoccaggio sensibile [1].

La quantità complessiva di calore accumulato durante il processo di riscaldamento e cambiamento di fase può essere descritta da un'espressione più generale, che tiene conto di tutte le fasi del processo:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_{p,s}(T)dT + ma_m\,\Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_{p,l}(T)dT$$

dove:

- a_m è la frazione di materiale già fuso,
- ΔH_m è il calore latente di fusione [J/kg],
- $c_{p,s}(T)$ è il calore specifico in fase solida [J/kg·K],
- $c_{p,l}$ è il calore specifico in fase liquida [J/kg·K],
- T_i, T_me T_f sono rispettivamente la temperatura iniziale, la temperatura di fusione e la temperatura finale del processo [K].

Questa formula permette di valutare con maggiore precisione l'energia termica scambiata nei materiali impiegati per questo tipo di accumulo detti materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM), considerando anche i contributi dovuti al riscaldamento prima e dopo la transizione di fase.

I PCM possono essere progettati per fondere e solidificare all'interno di uno specifico intervallo termico, senza che la loro temperatura aumenti in modo significativo, attenuando così i picchi termici e ritardando il surriscaldamento degli ambienti confinati. Tali caratteristiche rendono i PCM ideali per il controllo termico passivo e estremamente utili in applicazioni come l'isolamento termico di container metallici, di moduli abitativi o di ambienti destinati a ospitare attrezzature tecniche sensibili[3].

Un altro vantaggio significativo dello stoccaggio latente è la maggiore densità energetica rispetto al TES sensibile: a parità di volume o massa, i PCM possono accumulare una quantità di calore superiore, rendendo possibile la realizzazione di sistemi più compatti e leggeri.

Tuttavia, la bassa conducibilità termica di molti materiali latenti limita la velocità di trasferimento del calore e richiede, in molti casi, l'integrazione con materiali ad alta conducibilità o sistemi di incapsulamento [4]. Alcuni PCM possono inoltre subire variazioni di volume durante il passaggio di fase, che devono essere gestite mediante contenitori flessibili o strutture resistenti, oppure manifestare fenomeni di sottoraffreddamento (supercooling), ovvero la mancata solidificazione spontanea, che può compromettere l'efficienza ciclica [5].

Altri fattori da considerare sono la stabilità chimica nel tempo, la compatibilità con le superfici a contatto e, in certi casi, i costi elevati ancora associati a un impiego su larga scala.

Nonostante queste criticità, la ricerca sta sviluppando soluzioni sempre più performanti: PCM incapsulati, compositi o combinati con nanomateriali rappresentano oggi una tecnologia promettente e in crescita per il controllo termico passivo [6].

La tabella seguente evidenzia le principali differenze tra TES sensibile e TES latente confrontando i parametri chiave:

Tabella 1 - Confronto tra accumulo termico sensibile e latente

Caratteristica	TES sensibile	TES latente (PCM)
Meccanismo di accumulo	Variazione di temperatura	Cambiamento di fase
Temperatura di funzionamento	Ampio intervallo	Quasi costante (durante la transizione)
Densità energetica	Media	Elevata
Stabilità della temperatura	Limitata	Elevata (effetto tampone)
Volume richiesto	Maggiore	Minore
Complessità tecnica	Bassa	Media–Alta
Costi	Ridotti	Variabili, spesso maggiori
Materiali tipici	Acqua, oli, rocce, calcestruzzo	Paraffine, idrati di sale, acidi grassi
Applicabilità al controllo passivo	Limitata	Elevata

È utile, inoltre, rappresentare graficamente la differenza tra i due meccanismi attraverso uno schema qualitativo che mostra l'energia accumulata in funzione della temperatura.

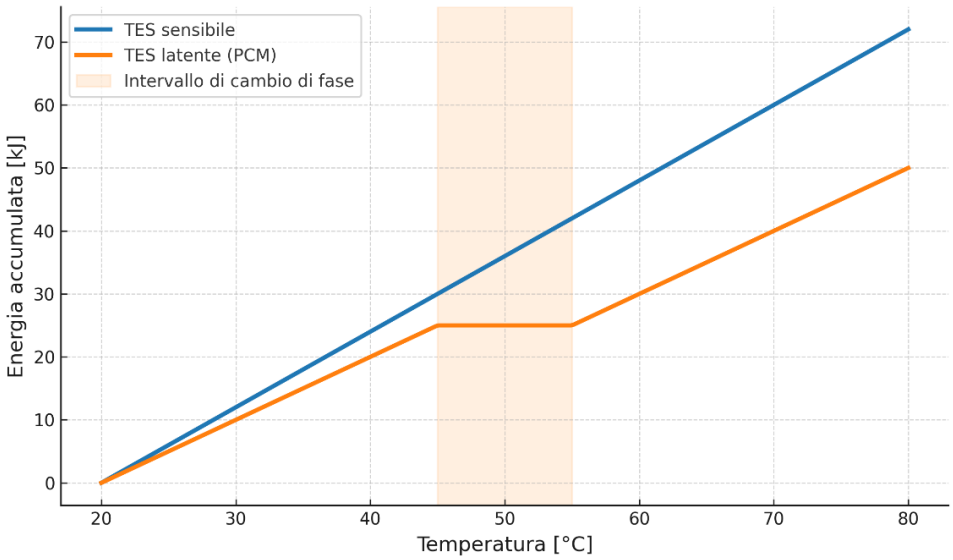


Figura 1- Energia accumulata da TES sensibile e latente (PCM) in funzione della temperatura.

- TES sensibile: la curva ha una crescita lineare che mostra la dipendenza proporzionale dell'energia accumulata dall'aumento della temperatura;
- TES latente (PCM): la curva mostra un tratto orizzontale tra 45°C e 55°C che rappresenta l'accumulo di calore latente a temperatura quasi costante. In questo intervallo (zona evidenziata in arancione chiaro), il materiale assorbe energia senza variazione di temperatura.

Il prossimo paragrafo sarà dedicato a una panoramica dei materiali per lo stoccaggio di calore latente, con particolare attenzione alle proprietà termofisiche, chimiche e alle tipologie più comuni di PCM. Prima di introdurli, tuttavia, si fornisce un breve accenno agli altri metodi di accumulo termico, come lo stoccaggio termochimico, ancora in fase di sviluppo, ma promettente per alcune applicazioni future.

2.2.3 – Altri metodi di accumulo

Accanto ai sistemi sensibili e latenti, esiste una terza categoria di sistemi di accumulo termico, basata su reazioni chimiche reversibili: lo stoccaggio termochimico. Questo metodo sfrutta l'energia assorbita o rilasciata durante reazioni endotermiche o esotermiche, garantendo una densità energetica potenzialmente superiore rispetto agli altri sistemi e la possibilità di conservare l'energia senza perdite per lunghi periodi. Tuttavia lo sviluppo di questa

tecnologia è ancora in fase di ricerca: presenta infatti criticità legate alla reversibilità delle reazioni, alla stabilità dei materiali e alla complessità dei sistemi di scambio termico coinvolti [4].

2.3 Materiali a cambiamento di fase (PCM)

2.3.1 Proprietà termofisiche

Le proprietà termofisiche dei PCM rivestono un ruolo determinante nella valutazione della loro efficacia come mezzi per l'accumulo termico. Tra le principali proprietà da considerare vi sono il calore latente di fusione, la conducibilità termica e la capacità termica specifica, la densità e la temperatura di transizione. Ciascuna di queste incide in modo diverso sul comportamento del materiale durante i cicli di carico e scarico termico, nonché sulla progettazione e il dimensionamento del sistema in cui il PCM viene integrato [2-3].

Calore latente di fusione

Il calore latente è un parametro chiave nei sistemi di controllo termico passivo, rappresenta la quantità di energia termica necessaria per trasformare una sostanza dallo stato solido a quello liquido, senza che si abbia una variazione della sua temperatura. Maggiore è questo valore, maggiore sarà la quantità di energia accumulabile durante la transizione di fase. I PCM ideali per il controllo passivo sono caratterizzati da valori elevati di calore latente di fusione, così da minimizzare la massa necessaria per ottenere una determinata capacità di accumulo [2].

Conducibilità termica

La conduttività termica è un parametro fondamentale, in quanto regola la velocità di diffusione del calore all'interno del materiale. Una bassa conducibilità può allungare i tempi di caricamento e scaricamento termico, specialmente in PCM a base organica. Per superare questa limitazione, si adottano spesso materiali ad alta conducibilità termica (metalli, nanoparticelle o grafite) oppure tecniche di incapsulamento avanzate, che aumentano la superficie di scambio e migliorano il trasferimento termico [3].

Capacità termica e densità:

La capacità termica specifica, ovvero la quantità di energia necessaria per innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg di sostanza, influenza la quantità totale di energia che può essere accumulata dal PCM, durante le fasi in cui il materiale è completamente solido o completamente liquido, cioè prima e dopo la transizione. La densità del materiale (ρ) influenza sia il volume richiesto per lo stoccaggio, sia il peso del sistema. La combinazione di queste due proprietà definisce la capacità di accumulo per unità di volume, grandezza particolarmente rilevante nei contesti in cui lo spazio disponibile è limitato, come nei container o nei moduli edilizi prefabbricati: un'elevata densità permette di contenere volumi ridotti a parità di capacità di accumulo, ma può comportare un aumento del carico strutturale [4].

Temperatura di transizione

La temperatura alla quale il PCM cambia stato è un parametro fondamentale: essa deve essere compatibile con il profilo termico dell'applicazione, in modo da garantire che il materiale fonda e solidifichi nel corretto intervallo di temperatura. In ambito edilizio o nei sistemi di controllo termico passivo, ad esempio, è spesso richiesta una temperatura di transizione compresa tra i 18 °C e i 30 °C, così da mantenere le condizioni termiche ottimali nel sistema applicativo [2]. La scelta del PCM più adatto dipende dunque dal punto di fusione e dalla capacità del materiale di mantenere tale temperatura costante durante il passaggio di fase.

La valutazione delle proprietà termofisiche permette di identificare i PCM più idonei per ogni applicazione, assicurando un buon equilibrio tra capacità di accumulo, rapidità di risposta e stabilità operativa.

2.3.2 Proprietà termocinetiche

Oltre alle proprietà termofisiche, nella progettazione e selezione dei PCM rivestono un ruolo fondamentale anche le proprietà termocinetiche, ovvero quelle caratteristiche che si riferiscono alla velocità e alla dinamica con cui

avvengono i cambi di fase, parametri cruciali per un efficace controllo termico in tempo reale.

Velocità di fusione e solidificazione

Una delle principali proprietà termocinetiche è la rapidità con cui il materiale assorbe o rilascia calore durante la transizione di fase. Questa dipende dalla conducibilità termica, dal gradiente di temperatura applicato e dalle condizioni fisiche del sistema. In applicazioni in cui le condizioni ambientali variano rapidamente, come nel caso di container metallici esposti alla radiazione solare o a bruschi sbalzi termici, si preferiscono PCM con elevata velocità di transizione che garantiscono un effetto tampone immediato. Tuttavia, molti PCM, soprattutto quelli organici, hanno tempi di risposta relativamente lenti [3]. A livello microscopico la velocità di nucleazione è essenziale per evitare fenomeni di sottoraffreddamento, inoltre una rapida crescita cristallina, consente una solidificazione efficiente e tempestiva del PCM, migliorando la capacità del sistema di rispondere rapidamente alle richieste di scarico termico [7].

Sottoraffreddamento (supercooling)

Un aspetto critico è il sottoraffreddamento, ovvero quando il PCM non solidifica immediatamente dopo la fusione, anche quando la temperatura scende al di sotto del punto di congelamento, ma permane in stato liquido anche a temperature inferiori. Questo comportamento, tipico soprattutto di alcuni materiali inorganici, compromette la regolarità del rilascio termico del PCM, riducendo l'efficienza ciclica del sistema [4]. In applicazioni come il condizionamento passivo di container, è fondamentale che la solidificazione avvenga ogni volta in modo affidabile, evitando ritardi nel rilascio dell'energia immagazzinata durante i cicli notte-giorno; l'eventuale sottoraffreddamento può compromettere il comfort termico e l'integrità delle attrezzature poste al suo interno. Per contrastare questo fenomeno si ricorre all'impiego di agenti nucleanti o di tecnologie di incapsulamento mirate.

Isteresi termica

L'isteresi termica è il fenomeno per cui la temperatura di fusione di un PCM (inizio dello scioglimento) non coincide con quella di solidificazione (inizio della ricristallizzazione), generando un intervallo di temperatura nel quale il materiale si trova in una condizione metastabile. Un'elevata isteresi può ridurre il controllo termico del sistema poiché il rilascio di calore durante il raffreddamento avviene a una temperatura inferiore rispetto all'assorbimento durante il riscaldamento. Idealmente quindi, un PCM efficiente dovrebbe presentare un comportamento termico simmetrico e ripetibile durante i cicli di carico e scarico, ciò dipende dalla natura chimica del materiale, dalla purezza, dalla presenza di additivi e dalla velocità dei cicli termici [3].

Stabilità ciclica

Un altro parametro essenziale per l'uso a lungo termine dei PCM è la stabilità ciclica, ovvero la capacità del materiale di mantenere le proprie proprietà fisiche e chimiche stabili nel tempo, anche dopo numerosi cicli termici. La degradazione ciclica può manifestarsi sotto forma di variazione della temperatura di transizione, riduzione del calore latente o perdita di massa per evaporazione, compromettendo l'affidabilità dell'intero sistema. Un'elevata stabilità ciclica è condizione indispensabile per l'uso dei PCM in sistemi edilizi a lunga vita utile, come pareti termoregolanti e impianti HVAC integrati [4].

Nel complesso, una buona progettazione termocinetica garantisce non solo una maggiore reattività del sistema ma anche un comportamento prevedibile, stabile e sicuro, rendendo i PCM più adatti all'impiego in applicazioni reali, anche in condizioni ambientali complesse.

2.3.3 Proprietà chimiche e compatibilità

L'impiego efficace dei PCM richiede non solo buone proprietà termiche, ma anche una stabilità chimica adeguata e compatibilità con gli altri materiali del sistema.

Stabilità chimica

La stabilità chimica si riferisce alla capacità del PCM di mantenere inalterata la propria struttura molecolare durante i cicli ripetuti di fusione e solidificazione. I PCM organici, come le paraffine, tendono a essere più stabili rispetto a molti composti inorganici, anche se soggetti a degradazione ossidativa, evaporazione o alterazione sotto l'effetto dei raggi UV o del calore prolungato. I PCM inorganici invece, come gli idrati di sale, possono andare incontro a separazione di fase o idrolisi, con effetti negativi sulla ripetibilità delle prestazioni. Per contrastare questi effetti, si utilizzano additivi stabilizzanti e contenitori sigillati [1].

Compatibilità con materiali di contenimento

Un altro aspetto critico è la compatibilità chimica tra PCM e i materiali costruttivi del contenitore o del supporto. Alcuni PCM, soprattutto quelli inorganici, possono reagire con metalli o polimeri, causando fenomeni di corrosione galvanica, danneggiamenti meccanici o perdita di massa, aumentando di conseguenza i costi di manutenzione. Per questa ragione, la selezione dei materiali a contatto deve tenere conto della possibile formazione di sottoprodotti o di Sali indesiderati: si prediligono materiali resistenti come acciai inossidabili, polimeri fluorurati o contenitori rivestiti internamente con resine epossidiche [2]. Per simulare l'invecchiamento dei materiali e verificare eventuali interazioni indesiderate, in letteratura sono frequentemente citati test di compatibilità accelerati, condotti in condizioni di temperatura e umidità elevate [3].

Sicurezza e impatto ambientale

Infine, è importante considerare anche la tossicità, l'infiammabilità e la biodegradabilità dei PCM impiegati, soprattutto in applicazioni abitative o ambienti confinati. Le paraffine, ad esempio, pur essendo chimicamente stabili, derivano da fonti fossili e sono altamente infiammabili [4]. Gli acidi grassi sono un'alternativa più sostenibile ma sono soggetti a ossidazione. Alcuni composti inorganici invece, se dispersi nell'ambiente possono presentare problemi ecotossicologici, oltre a una gestione complicata in fase di smaltimento [5]. Per

questo, la selezione del PCM deve avvenire anche in funzione del ciclo di vita, della sicurezza d'uso e delle normative ambientali vigenti [8].

In sintesi, un'accurata valutazione delle proprietà chimiche consente di ridurre i rischi di degrado, corrosione o contaminazione, aspetti fondamentali nella progettazione di soluzioni energetiche passive affidabili e sostenibili.

2.4 Classificazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM)

I materiali a cambiamento di fase (PCM) rappresentano una categoria eterogenea di sostanze capaci di immagazzinare e rilasciare grandi quantità di energia termica attraverso la transizione tra differenti stati della materia, solitamente tra solido e liquido. In base alla loro composizione chimica e alle caratteristiche termiche, i PCM possono essere suddivisi in tre grandi famiglie: organici, inorganici ed eutettici, al fine di selezionare la tipologia più adatta a specifici intervalli di temperatura e contesti applicativi. Questa classificazione è essenziale, in quanto ogni categoria presenta vantaggi e criticità specifici in termini di stabilità chimica, conducibilità termica, costi, sicurezza, comportamento in cicli ripetuti e possibilità di incapsulamento.

La figura seguente fornisce una rappresentazione schematica dei principali gruppi di PCM:

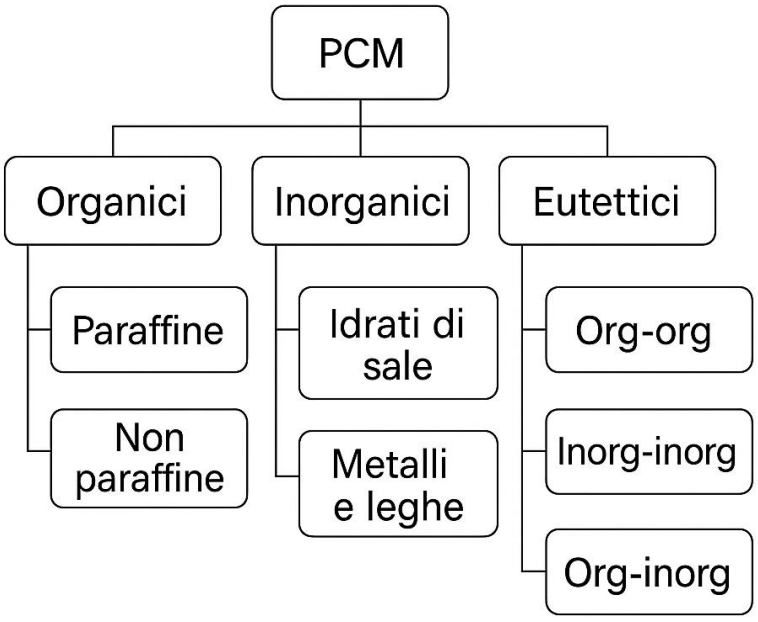


Figura 2 – Classificazione generale dei PCM.

A partire da questa suddivisione generale, nei paragrafi successivi verranno analizzate in dettaglio le caratteristiche chimico-fisiche, i principali vantaggi e svantaggi e le applicazioni più comuni dei vari PCM, con l'ausilio di tabelle comparative dei composti più comunemente impiegati.

Tabella 2 - Esempi PCM organici, con caratteristiche.

Materiale	Punto di fusione (°C)	Calore latente (kJ/kg)	Materiale	Punto di fusione (°C)	Calore latente (kJ/kg)
$N-Tetradecano$	5.5	226	$N-Pentacosano$	53.7	164
Acido formico	7.8	247	Acido miristico	54.0	199
$N-Pentadecano$	10.0	205	Ossalato	54.3	178
Acido acetico	16.7	273	Tristearina	54.5	191
N – Esadecano	16.7	237	O-Dicloruro di xylene	55.0	121
Caprilone	40.0	260	β Acido cloroacetico	56.0	147
Bromuro di dodecile	40.0	201	N – Esacosano	56.3	255
N – Enicosano	40.5	161	$Nitro\ naftalene$	56.7	103
F$enol$o	41.0	120	α − Acido cloroacetico	61.2	130
N – Acido laurico	43.0	183	N – Ottacosano	61.4	134
P – $Joluid$ina	43.3	167	Acido palmitico	61.8	164
Cianammide	44.0	209	Cera d'api	61.8	177
N – $Docosano$	44.5	157	Acido glicolico	63.0	109
N – $Tricosano$	47.6	130	P – $Bromo$fenolo	63.5	86
Acido idrocinnamico	48.0	118	$Azobenzene$	67.1	121
Alcol cetilico	49.3	141	Acido acrilico	68.0	115
O – $Nitroanilin$a	50.0	93	2,4 – Dinitrotoluene	70.0	111
Canfene	50.0	239	Acido fenilacetico	76.7	102
Difenilammina	52.9	107	Tiosemicarbazide	77.0	140
P – Diclorobenzene	53.1	121	Benzilammina	78.0	174

Tabella 3 - Esempi PCM inorganici, con caratteristiche.

Nome	Punto di fusione (°C)	Calore latente (kJ/ kg)	Nome	Punto di fusione (°C)	Calore latente (kJ/ kg)
H_20	0.0	333	Bl_3	31.8	10
$POCI_3$	1.0	85	$SO_3(\beta)$	32.3	151
D_20	3.7	318	$TiBr_4$	38.2	23
$SbCl_5$	4.0	33	$H_4P_2O_6$	55.0	213
H_2SO_4	10.4	100	$SO_3(\Upsilon)$	62.1	331
$IC\ (\beta)$	13.9	56	$SbCl_3$	73.4	25
MOF_6	17.0	50	$NaNO_3$	307	199
$SO_3(\alpha)$	17.0	108	KNO_3	380	266
$IC1\ (\alpha)$	17.2	69	KOH	380	149
P_4O_6	23.7	64	$MgCl_2$	800	492
H_3PO_4	26.0	147	$NaCl$	802	492
Cs	28.3	15	Na_2CO_3	854	275
Ga	30.0	80	KF	857	452
$AsBr_3$	30.0	38	K_2CO_3	897	235
$SnBr_4$	30.0	28			

2.4.1 PCM organici

Paraffine

Le paraffine sono una classe di idrocarburi saturi, con formula generale C_nH_{2n+2}, che derivano prevalentemente da processi di distillazione del petrolio greggio [1]. Le paraffine che vanno da C5 a C15 sono liquide, mentre le altre sono solide cerose. La paraffina di grado commerciale, ampiamente utilizzata nei sistemi di accumulo termico, è costituita da una miscela di diversi composti alifatici, generalmente a catena lineare (n-alcani), che fondono in un intervallo di temperatura compreso tra 20 °C e 70 °C, a seconda della lunghezza della catena carboniosa [2]. All'aumentare della lunghezza media della catena idrocarburica, crescono sia la temperatura di fusione che il calore latente di transizione[3].

Tabella 4 - Esempi di paraffine, con caratteristiche.

Nome	N. atomi di C	Punto di fusione (°C)	Densità (kg/m³)	Conducibilità termica (W/mK)	Calore latente (kJ/kg)
$n-Dodecano$	12	-12	750	0.21^{S}	$n.a.$
$n-Tridecano$	13	-6	756		$n.a.$
$n-Tetradecano$	14	$4.5-5.6$	771		231
$n-Pentadecano$	15	10	768	0.17	207
$n-$ Esadecano	16	18.2	774	0.21^{S}	238
$n-$ Eptadecano	17	22	778		215
$n-Ottadecane$	18	28.2	814^{S}, 775^{L}	0.35^{S}, 0.149^{L}	245
$n-Nonadecano$	19	31.9	912^{S}, 769^{L}	0.21^{S}	222
$n-Eicosano$	20	37			247
$n-$ Eneicosano	21	41			215
$n-Docosano$	22	44			249
$n-Tricosano$	23	47			234
$n-Tetracosano$	24	51			255
$n-Pentacosano$	25	54			238
$Paraffina$ – cera	$n.a.$	32	785^{S}, 749^{L}	0.514^{S}, 0.224^{L}	251
$n-$ Eicosano	26	56	770	0.21^{S}	257
$n-$ Eptacosano	27	59	773		236
$n-$ Ottacosano	28	61	910^{S}, 765^{L}		255
$n-Nonacosano$	29	64			240
$n-Triacontano$	30	65			252
$n-$ Entriacontano	31	$n.a.$	930^{S}, 830^{L}		$n.a.$
$n-Dotriacontano$	32	70			$n.a.$
$n-Tritriacontano$	33	71			189

Vantaggi

Le cere paraffiniche si distinguono per l'elevata stabilità chimica: sono inerti, non corrosive e mantengono una buona ripetibilità ciclica anche dopo numerosi cicli di fusione e solidificazione, senza degrado significativo delle prestazioni termiche[4]. Possono subire un lento processo di ossidazione se esposte all'ossigeno, e per questo motivo richiedono contenitori chiusi[5]. Inoltre, non presentano fenomeni di sottoraffreddamento (supercooling), il che significa che non sono necessari agenti nucleanti, e mostrano una isteresi termica molto contenuta [4]. Un altro aspetto favorevole è la buona compatibilità con i metalli comunemente utilizzati per i contenitori [4], ciò si traduce in facilità di incapsulamento e integrazione nei sistemi edilizi. Tuttavia, è necessaria cautela nell'utilizzo di contenitori polimerici, poiché le paraffine tendono a infiltrarsi e ammorbidire alcuni tipi di plastica[5]. Le paraffine risultano anche facilmente reperibili sul mercato, disponibili in varie formulazioni e gradi di purezza, sebbene il loro costo unitario sia generalmente più elevato rispetto ad altri PCM inorganici, come gli idrati di sale [2].

Svantaggi

Tra le varie criticità tecniche delle paraffine, in primo luogo troviamo la loro bassa conducibilità termica nello stato solido (circa 0,2 W/m·K), che può rappresentare un problema, soprattutto durante il ciclo di congelamento, quando sono richieste alte velocità di trasferimento termico [2]. Per ovviare a questo problema, vengono spesso impiegati filler metallici (come alluminio, rame o grafite), superfici alettate o materiali compositi con conduttori ad alta efficienza [6]. Le paraffine inoltre subiscono una variazione di volume significativa tra lo stato solido e liquido, il che richiede un'accurata progettazione dei contenitori, per evitare deformazioni o rotture meccaniche dovute all'espansione o alla contrazione [3]. A differenza dei sali idrati, le paraffine commerciali generalmente non hanno un punto di fusione netto, riducono notevolmente la capacità di stoccaggio del calore e, infine, essendo infiammabili, richiedono sistemi di contenimento sicuri per evitare rischi di incendio [4].

Nel complesso, le paraffine rappresentano una delle soluzioni più affidabili, versatili e studiate nel campo dei PCM, particolarmente adatte a intervalli di temperatura moderati, anche se il loro costo può essere superiore rispetto ad altri materiali[5]. Il loro elevato calore latente (fino a circa 250 kJ/kg), la semplicità d'uso e l'ottima stabilità termochimica le rendono ideali per applicazioni dove è richiesto un accumulo termico passivo, stabile e ripetibile, come nei pannelli termici integrati in involucri edilizi, nei container o in sistemi HVAC a bassa potenza [6].

Tabella 5 - Esempi PCM non paraffinici, con caratteristiche.

Nome	Punto di fusione (°C)	Densità (kg/m³)	Calore latente (kJ/kg)
Acido formico	7.8	1226.7	247
Acido acetico	16.7	1050	187
Glicerina	17.9	1260	198.7
Etanolato di cloruro di litio	21	n.d.	188
Polietilenglicole 600	20–25	1100	146
Acido lattico	26	1249	188
1–3 Metilpentacosano	29	n.d.	197
Campenilone	39	n.d.	205
Bromuro di docasile	40	n.d.	201
Caprilone	40	n.d.	259
Eptadecanone	40	n.d.	198
1–Cicloesilooctadecano	41	n.d.	214
4–Eptadecanone	41	n.d.	197
Cianamide	44	1080	209
Metileicosanato	45	851	218

3–Eptadecanone	48	n.d.	213
2–Eptadecanone	48	n.d.	218
Canfene	50	842	238
9–Eptadecanone	51	n.d.	213
Behenato di metile	52	n.d.	217
Acido pentadecanoico	52.5	n.d.	188
Acido ipofosforico	55	n.d.	204
Acido cloroacetico	56	1580	200
Trimiristina	33–57	862	201–213
Acido eptadecanoico	60.6	n.d.	189
Cera d'api	61.8	950	178
Acido glicolico	63	n.d.	109
Cera oxazolina – TS 970	63.5	n.d.	210
Acido arachico	76.5	n.d.	227
Canforabromo	77	1449	174
Durene	79.3	838	195
Acetamide	80	1159	241
Benzoato di bromuro di metile	81	n.d.	174
Alfa-naftolo	84	1095.9	163
Acido glutarico	97.5	1429	156
p–Xilene dicloruro	100	n.d.	138.7
Fumarato di metile	102	1045	242
Catecolo	104.3	1370	207
Chinone	115	1318	171

Acetanilide	115	1210	204
Anidride succinica	119	1104	204
Acido benzoico	121.7	1266	142.8
Stibene	124	1164	167
Benzammide	127.2	1341	169.4
Fenacetina	137	1103	136.7
Alfa-glucosio	141	1544	174
Acetil–p–tolidina	146	n.d.	180
Fenilidrazone benzaldeide	155	n.d.	134.8
Acido salicilico	159	1443	199
Benzanilide	161	n.d.	188
O–Mannitolo	166	1489	294
Idrochinone	172.4	1358	258
Acido p–aminobenzoico	187	n.d.	153

Acidi grassi

Gli acidi grassi sono composti organici appartenenti alla famiglia degli acidi carbossilici a lunga catena, spesso di origine vegetale o animale, con formula generale $CH_3(CH_2)_nCOOH$. La loro struttura molecolare lineare e regolare consente un'elevata stabilità termica e proprietà termiche interessanti per l'accumulo di energia latente, come valori elevati di calore latente di fusione, temperature di transizione adatte all'ambito edilizio e una buona ripetibilità ciclica.

La temperatura di fusione degli acidi grassi varia generalmente tra i 30 °C e i 65 °C, con valori del calore latente di fusione comparabili, o in certi casi superiori, a quelli delle paraffine. I più comunemente impiegati come PCM sono l'acido miristico, palmitico, stearico e oleico, tutti caratterizzati da una buona capacità

di assorbire calore senza variazioni sensibili di temperatura. Dal punto di vista chimico, gli acidi grassi presentano una struttura molecolare più polare rispetto agli idrocarburi saturi, e ciò può influire sulla loro compatibilità con altri materiali da costruzione.

Vantaggi

Tra i principali vantaggi degli acidi grassi troviamo la possibilità di miscelazione controllata tra diverse specie, così da ottenere intervalli di fusione su misura per specifiche applicazioni. Questa strategia permette di regolare la soglia termica del materiale con buona precisione, anche nell'ordine di ± 0,5 °C. Altre peculiarità degli acidi grassi che li rendono molto interessanti sono: l'elevata ripetibilità del ciclo di fusione e solidificazione, l'assenza di fenomeni di supercooling nella maggior parte dei casi, nonché la buona disponibilità commerciale in varie purezze e composizioni. Questi inoltre, a differenza di alcuni composti inorganici, non richiedono nucleanti o additivi per avviare il processo di cristallizzazione, e presentano un comportamento termico prevedibile anche su lunghi periodi.

Svantaggi

L'impiego di acidi grassi non è tuttavia privo di svantaggi. In primo luogo, presentano un costo superiore rispetto a quello delle paraffine e la loro purezza commerciale può variare sensibilmente, influenzando le prestazioni termiche e la ripetibilità. La loro acidità residua può causare corrosione nei confronti di metalli comunemente utilizzati nei sistemi di contenimento, come l'alluminio o il rame: è dunque necessario selezionare accuratamente i materiali strutturali o adottare rivestimenti protettivi. Infine, nonostante la loro origine naturale, alcuni acidi grassi possono ossidarsi in presenza di ossigeno e alte temperature, causando degrado chimico e riduzione dell'efficienza nel tempo, motivo per cui devono essere conservati in condizioni controllate o stabilizzati tramite additivi antiossidanti.

Nel complesso, gli acidi grassi si configurano come PCM altamente promettenti, soprattutto per applicazioni che richiedono elevata stabilità

termica, precisione nella temperatura di fusione e una buona compatibilità ambientale.

Tabella 6 - Esempi acidi grassi, con caratteristiche.

Nome	Punto di fusione (°C)	Densità (kg/m³)	Conducibilità termica (W/mK)	Calore latente (kJ/kg)
Propil palmitato	10	n.a.	n.a.	186
Isopropil palmitato	11	n.a.	n.a.	100
Acido oleico	13.5 – 16.3	863^{60c}	n.a.	n.a.
Isopropil stearato	14 – 19	n.a.	n.a.	140 – 142
Acido caprilico	16 16,3	901^{30c}	0.149^{39c} / 0.145^{67c}	148 149
Stearato di butile	19	862^{80c}	n.a.	140 / 123 – 200
Sabacato di dimetile	21	n.a.	n.a.	120 – 135
Stearato di vinile	27 – 29	n.a.	n.a.	122
Palmitato di metile	29	n.a.	n.a.	205
Acido caprico	32 / 31.5	878^{45c} / 886^{40c}	$0.153^{38.5c}$ / $0.152^{55.5c}$	152.7 / 153
Acido erucico	33	853^{70c}	n.a.	n.a.
Metil-12-idrossi-stearato	42 – 43	n.a.	n.a.	120 – 126
Acido laurico	42 – 44	862^{60c}	n.a.	178
Acido elaidico	47	851^{79c}	n.a.	218
Acido pelargonico	48	n.a.	n.a.	205
Acido miristico	51 – 54	861^{55c} / 844^{80c}	n.a.	205 / 187
Acido palmitico	64 / 61	850^{65c} / 847^{80c}	$0.162^{68.4c}$ / $0.159^{80.1c}$	185.4 / 203.4
Acido stearico	69 / 60 – 61	848^{70c} / 965^{24c}	0.172^{70c}	202.5 / 186.5

Acido valporico	120	n.a.	n.a.	n.a.

Polialcoli

I polialcoli sono classificati tra i PCM organici non paraffinici, con transizioni di fase che non avvengono tra stato solido e liquido, ma tra differenti fasi solide. Pur essendo meno noti rispetto a paraffine e acidi grassi, questi composti, come ad esempio l'eritritolo o il mannitolo, si distinguono per la loro struttura molecolare ricca di gruppi –OH (ossidrilici), che favoriscono la formazione di legami a idrogeno e conferiscono buone proprietà termiche e di stabilità.

In particolare, è stato osservato che durante il riscaldamento questi materiali possono passare da una fase solida ordinata a una struttura cristallina più simmetrica, come una disposizione cubica a facce centrate. Tale transizione è associata a un assorbimento di energia che, pur essendo inferiore rispetto a quello dei PCM solidi–liquidi tradizionali, può essere efficacemente sfruttato per il controllo passivo della temperatura in applicazioni specifiche.

I principali vantaggi dei polialcoli - come la quasi totale assenza di variazioni di volume, l'assenza di fenomeni di perdita per gocciolamento (in quanto non avviene fusione), e una buona ripetibilità ciclica - sono tuttavia bilanciati da alcuni limiti significativi: basso calore latente, temperature di transizione spesso troppo elevate per il comfort abitativo, e costi elevati dovuti alla complessità dei processi di sintesi e purificazione.

Nonostante queste difficoltà, i polialcoli rappresentano un'interessante alternativa nei casi in cui siano richieste soluzioni solide-stabili, compatte e prive di incapsulamento, come in ambito industriale o in applicazioni a temperatura più elevata.

2.4.2 PCM inorganici

Idrati di sale

Gli idrati di sale rappresentano una delle categorie più studiate di PCM inorganici, grazie alla loro elevata capacità di accumulo di calore e alla disponibilità commerciale di numerose formulazioni. Si tratta di composti

cristallini formati da un sale anidro combinato con un certo numero di molecole d'acqua, che vengono incorporate nella struttura reticolare del cristallo sotto forma di acqua di cristallizzazione. Durante il processo di fusione, l'idrato assorbe energia e si dissocia in sale anidro e acqua liquida; durante la solidificazione, si ricombina formando nuovamente il cristallo idrato.

Vantaggi

Uno dei principali vantaggi offerti dagli idrati di sale è la loro elevata densità energetica volumetrica, che consente di realizzare sistemi compatti e ad alta efficienza. Sono disponibili in un ampio intervallo di temperature operative, il che li rende adatti per applicazioni sia a bassa che a media temperatura. Presentano valori di calore latente di fusione che possono raggiungere l'ordine di 200–300 kJ/kg, e una conducibilità termica generalmente superiore a quella dei PCM organici, il che facilita lo scambio termico e rende più rapida la risposta del materiale alle variazioni di temperatura [3]. Inoltre, gli idrati di sale sono generalmente non infiammabili, economici e facilmente reperibili, rendendoli adatti ad applicazioni su larga scala in ambito edilizio e industriale [2].

Svantaggi

L'uso pratico di questi materiali presenta, tuttavia, alcune criticità. Una delle principali è la tendenza alla separazione di fase: durante il ciclo di fusione, la differente densità tra il sale anidro e l'acqua liquida può causare la sedimentazione del sale, portando nel tempo a una perdita di capacità di accumulo[4]. Inoltre, molti idrati di sale manifestano fenomeni di supercooling, che impediscono la solidificazione spontanea del materiale alla temperatura desiderata e richiedono quindi l'impiego di agenti nucleanti, ispessenti o tecniche di microincapsulamento [6]. Dal punto di vista chimico, molti idrati di sale possono essere corrosivi nei confronti dei metalli, in particolare se il contenitore è in acciaio o alluminio, motivo per cui è necessario adottare materiali compatibili o applicare rivestimenti protettivi [8]. Anche la stabilità ciclica può risultare inferiore rispetto ai PCM organici, soprattutto in assenza di additivi stabilizzanti.

In definitiva, gli idrati di sale restano tra i candidati più promettenti per il controllo termico passivo, in virtù del loro buon equilibrio tra prestazioni energetiche, costi contenuti e disponibilità, ma richiedono un'attenta gestione progettuale per garantirne l'efficienza ciclica e la stabilità nel tempo. Sono particolarmente adatti a sistemi in cui la densità energetica elevata e la non infiammabilità costituiscono requisiti essenziali, come nei pannelli murari ad accumulo integrato, nei container tecnici e nei sistemi di climatizzazione passiva in ambienti industriali.

Tabella 7 - Esempi idrati di sale, con caratteristiche.

Nome	Punto di Fusione (°C)	Densità (kg/m³)	Conducibilità Termica (W/mK) / Calore Latente (kJ/kg)
$LiClO_3 \cdot 3H_2O$	8	n.a.	n.a. / 253
$NH_4Cl \cdot Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	11	n.a.	n.a. / 163
$K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$	14	n.a.	n.a. / 108
$NaCl \cdot Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	18	n.a.	n.a. / 286
$KF \cdot 4H_2O$	18	n.a.	n.a. / 330
$K_2HPO_4 \cdot 4H_2O$	18.5	1447–1480	n.a. / 231
$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.8	1738–1795	n.a. / 148–125.9
$LiBO_3 \cdot 8H_2O$	25.7	n.a.	n.a. / 289
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	27	n.a.	n.a. / 105
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29–30	1562–1802	0.561–1.008 / 170–192
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	n.a.	n.a. / 189–296
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32	1485	0.544 / 251–254
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	33–36	1442	n.a. / 247
$KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	33	n.a.	n.a. / 173
$CaBr_2 \cdot 6H_2O$	34	1956–2194	n.a. / 115–138

$LiBr{\cdot}2H_2O$	34	n.a.	n.a. / 124
$Na_2HPO_4{\cdot}12H_2O$	35	1522	n.a. / 256–281
$Zn(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$	36	1828–2065	0.464–0.469 / 134–147
$Mn(NO_3)_2{\cdot}2H_2O$	37	n.a.	n.a. / 115
$FeCl_3{\cdot}6H_2O$	37	n.a.	n.a. / 223

2.4.3 PCM eutettici

I materiali a cambiamento di fase eutettici rappresentano una particolare classe di PCM composta da miscele di due o più componenti, le quali fondono o solidificano simultaneamente a una temperatura definita, detta punto eutettico. Questi si comportano come sostanze pure, con una transizione di fase netta e ben definita, il che li rende particolarmente adatti per applicazioni che richiedono un controllo termico preciso.

In funzione della natura chimica dei componenti, i PCM eutettici si suddividono in tre principali categorie: organico-organico, inorganico-inorganico e organico-inorganico.

PCM eutettici organico–organico

I PCM eutettici organico–organico sono costituiti dalla combinazione di due o più composti organici, come paraffine, acidi grassi o alcoli, che formano una miscela con punto di fusione definito e inferiore rispetto a quello dei singoli componenti. Sono apprezzati per l'elevata stabilità chimica, la bassa corrosività e l'assenza di problemi legati al supercooling. La possibilità di modulare la composizione consente di ottenere punti di fusione molto precisi, rendendoli adatti ad applicazioni nel settore edilizio e HVAC, dove si richiede un controllo preciso nell'intervallo 18–35 °C. Tuttavia, presentano una conducibilità termica bassa, specialmente nello stato solido, e un calore latente di fusione generalmente inferiore rispetto agli analoghi inorganici.

PCM eutettici inorganico–inorganico

I PCM eutettici inorganico–inorganico tipicamente sono combinazione di sali idrati o sali anidri, offrono un'elevata densità energetica e conducibilità termica. Tuttavia, essi possono presentare criticità come la separazione di fase, il degrado chimico, il supercooling e la corrosione dei materiali di contenimento, aspetti che richiedono l'utilizzo di contenitori resistenti o trattamenti superficiali protettivi, oltre all'aggiunta di stabilizzanti o nucleanti. Questi materiali sono spesso utilizzati per applicazioni a temperature medio-alte, come l'accumulo termico in ambito industriale o solare termico.

PCM eutettici organico–inorganico

I PCM eutettici organico–inorganico combinano un composto organico (es. acido grasso, alcol o paraffina) con uno inorganico (es. sale idrato), per ottenere una miscela eutettica a comportamento termico definito. Cercano di coniugare i vantaggi delle due famiglie di PCM: la stabilità e la sicurezza degli organici con l'elevata densità energetica degli inorganici. Questa tipologia, meno comune delle precedenti, è ancora oggetto di studio, poiché la compatibilità tra le due fasi può essere problematica a causa delle differenze di polarità, stabilità chimica e comportamento durante i cicli.

Nel complesso, le proprietà dei PCM eutettici dipendono fortemente dalla natura dei componenti e dal rapporto di miscelazione. In generale, offrono buone capacità di accumulo energetico e temperature di fusione progettabili con alta precisione, ma possono presentare fenomeni di separazione di fase, instabilità a lungo termine o corrosività (soprattutto nelle miscele contenenti sali). Costituiscono una soluzione estremamente flessibile e adattabile per il controllo termico passivo, ma la loro implementazione su larga scala richiede una caratterizzazione accurata delle proprietà termiche, chimiche e cicliche della miscela eutettica selezionata, nonché un'attenta progettazione dei sistemi di contenimento.

Tabella 8 - Esempi eutettici, con caratteristiche.

Nome	Composizione (% in peso)	Punto di fusione (°C)	Calore latente (kJ/kg)
$Na_2SO_4 + NaCl + KCl + H_2O$	31 + 13 + 16 + 40	4	234
$Na_2SO_4 + NaCl + NH_4Cl + H_2O$	32 + 14 + 12 + 42	11	n.a.
$C_6H_5C_2H_5 + (C_6H_5)_2O$	26.5 + 73.5	12	97.9
$Na_2SO_4 + NaCl + H_2O$	37 + 17 + 46	18	n.a.
$Na_2SO_4 + MgSO_4 + H_2O$	25 + 11 + 64	20	n.a.
$C_{14}H_{28}O_2 + C_{16}H_{32}O_2$	34 + 66	24	149.7
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	47 + 53	30	136
$NH_2CONH_2 + Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	–	45	95
$NH_2CONH_2 + NH_4NO_3$	–	46	115
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + NH_4NO_3$	61.5 + 38	52	125.5
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + MgCl_2 \cdot 6H_2O$	58.7 + 41.3	54	120
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	53 + 47	55	148
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	59 + 41	56	168
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + MgBr_2 \cdot 6H_2O$	–	57	164
Naftalene + Acido benzoico	67.1 + 32.9	67	123.4
$AlCl_3 + NaCl + ZrCl_4$	79 + 17 + 4	68	205
$AlCl_3 + NaCl + KCl$	66 + 10 + 24	70	209
$NH_2CONH_2 + NH_4Br$	65 + 35	70	115
$LiNO_3 + NH_4NO_3 + NaNO_3$	38 + 30 + 32	71	213

$AlCl_3 + NaCl + KCl$	$61 + 23 + 16$	73	201
$NaNO_2 + NaNO_3 + KNO_3$	$40 + 7 + 53$	142	243

2.4.4 Altri Materiali

Oltre ai PCM convenzionali, esistono anche materiali non propriamente classificabili come PCM, ma in grado di svolgere funzioni simili di accumulo termico grazie a meccanismi fisico-strutturali differenti. Ad esempio, i polimeri reticolati, come il polietilene reticolato, che non fondono ma sfruttano le transizioni tra stati cristallini per immagazzinare e rilasciare calore, non necessitano di incapsulamento, costituendo quindi soluzioni interessanti soprattutto in contesti ad alta temperatura. Sebbene abbiano densità energetiche inferiori, questi materiali offrono stabilità dimensionale e nessun rischio di perdita di contenuto, risultando potenzialmente utili in applicazioni dove l'integrità meccanica e la sicurezza sono prioritari.

2.5 Metodi di caratterizzazione delle proprietà dei PCM

La corretta selezione e progettazione dei PCM richiede una precisa determinazione delle loro proprietà termofisiche, in particolare del calore latente di fusione e della temperatura di transizione. Esistono diversi metodi sperimentali per misurare queste grandezze, i principali sono: il calorimetro a caduta (Drop Calorimeter, DC), l'analisi termica differenziale (Differential Thermal Analysis, DTA), la calorimetria a scansione differenziale (Differential Scanning Calorimetry, DSC) e il metodo T-history.

Il calorimetro a caduta misura direttamente l'entalpia attraverso il rilascio di calore da un campione riscaldato che viene lasciato cadere in un contenitore isolato; oggi meno diffuso rispetto al passato, risente di limiti in termini di precisione e tempi di esecuzione, rendendolo poco pratico per applicazioni standard.

I metodi DTA (Differential Thermal Analysis) e DSC (Differential Scanning Calorimetry) si basano su un principio comune: campione e materiale di

riferimento sono sottoposti a un riscaldamento controllato, e si misura la differenza di flusso termico tra i due. Nel caso del DSC, il calore latente di fusione viene determinato dall'area sotto il picco termico, mentre la temperatura di fusione viene ricavata dal punto di massima variazione. Questo metodo permette di analizzare piccolissime quantità di campione (1–10 mg) e il materiale di riferimento più utilizzato è l'allumina (Al_2O_3). È ampiamente impiegato per la sua alta risoluzione e affidabilità nei test ciclici su PCM a bassa e media temperatura, tuttavia, proprio la ridotta quantità di materiale analizzato rappresenta un limite quando si vogliono estrapolare dati validi su larga scala o su materiali con eterogeneità interne [6].

In questi casi, può risultare più indicato il metodo T-history, che utilizza tubi sigillati contenenti PCM e ne osserva il comportamento termico nel tempo, confrontandolo con un materiale di riferimento, permettendo di testare quantità maggiori di materiale, simulando condizioni operative più realistiche. Nonostante le prime versioni di questo metodo presentassero approssimazioni che ne limitavano la precisione, miglioramenti successivi sviluppati da parte di Marin et al. e Hong et al., hanno permesso di ottenere dati affidabili anche su proprietà termiche variabili con la temperatura[6-7].

In conclusione, la selezione del metodo sperimentale più adatto dipende dal tipo di PCM, dal livello di precisione richiesto e dall'ambito applicativo. L'impiego combinato di tecniche complementari permette di ottenere una caratterizzazione termica più robusta e affidabile dei PCM, utile anche per il corretto dimensionamento dei sistemi TES.

2.6 Compatibilità chimica e corrosione dei materiali

Nell'ambito dei sistemi di accumulo termico a cambiamento di fase (LHS), la compatibilità chimica tra il PCM e i materiali costituenti il contenitore o lo scambiatore di calore rappresenta una criticità progettuale di primaria importanza. Sebbene i PCM offrano indubbi vantaggi in termini di densità energetica e stabilità termica, la loro interazione con metalli come rame, acciaio al carbonio, alluminio e acciaio inossidabile può generare fenomeni corrosivi tali

da compromettere l'affidabilità del sistema. In particolare, molti PCM di tipo inorganico, come gli idrati di sale o i sali fusi, sono noti per la loro tendenza a favorire reazioni elettrochimiche, specie in ambienti umidi o a temperature elevate [9].

Numerosi studi sperimentali hanno sottolineato come la scelta del materiale metallico debba essere strettamente vincolata alla composizione del PCM, alla temperatura operativa e alla durata del ciclo di vita previsto. Uno studio condotto da Cabeza et al. [10] ha analizzato il comportamento di quattro metalli (rame, alluminio, acciaio al carbonio e acciaio inossidabile AISI 316) a contatto con undici PCM a base di idrati di sale, distinguendo tra applicazioni per il riscaldamento (45–48 °C) e per il raffrescamento (10–15 °C). I risultati hanno evidenziato che l'acciaio inossidabile 316 è il materiale più stabile e compatibile con tutti i PCM testati, mentre il rame ha mostrato tassi di corrosione elevati soprattutto in presenza di PCM per il riscaldamento. L'acciaio al carbonio, pur presentando una buona conduttività termica, ha manifestato gravi segni di degrado in tempi relativamente brevi.

A completare il quadro sperimentale lo studio di Calabrese et al. [11], questo si basa sull'impiego dell'impedenza elettrochimica (EIS) per valutare la resistenza alla corrosione di leghe metalliche immerse in sali idrati fusi. In tali studi, l'alluminio si è rivelato relativamente stabile in presenza di nitrato di magnesio esaidrato, mentre il rame e l'acciaio al carbonio hanno mostrato significative attività elettrochimiche già dopo poche ore a 120 °C. È stato proposto che la formazione di prodotti di corrosione sulla superficie dei metalli sia influenzata dalla solubilità e mobilità ionica del PCM, nonché dalla sua capacità di trattenere umidità residua.

Per mitigare gli effetti corrosivi, sono state proposte varie strategie. Oltre alla selezione di materiali intrinsecamente resistenti, come gli acciai inossidabili, si stanno sperimentando rivestimenti protettivi inorganici o polimerici, l'impiego di contenitori in plastica ad alta resistenza termica, nonché l'aggiunta di inibitori di corrosione direttamente al PCM. Tali strategie, tuttavia, devono essere valutate con attenzione: l'uso di rivestimenti può compromettere la trasmissione del

calore, mentre l'inserimento di additivi rischia di alterare le proprietà termofisiche del PCM stesso [12].

In definitiva, la longevità e l'efficienza dell'impianto dipendono da una scelta ottimale del materiale di contenimento che richiede una valutazione integrata delle prestazioni termiche, della compatibilità chimica e del costo. Le future attività di ricerca dovranno concentrarsi sull'analisi a lungo termine dei fenomeni di corrosione e sullo sviluppo di standard internazionali per la valutazione della compatibilità chimica tra PCM e materiali strutturali, in modo da favorire una diffusione più ampia e sicura di questi sistemi nell'ingegneria energetica.

2.7 Ottimizzazione dello scambio termico

Uno dei principali limiti all'impiego efficace dei PCM nei sistemi passivi (APCM), dove non è previsto l'uso di fluidi vettori o meccanismi attivi per il trasferimento di calore, è la loro intrinseca bassa conducibilità termica. Questo limita la velocità di fusione e solidificazione del PCM e, in applicazioni reali, si traduce in un comportamento termico inefficiente, con tempi di risposta rallentati e distribuzione non uniforme della temperatura nel volume del materiale [9].

Per rispondere a questa criticità, la ricerca ha sviluppato numerose strategie di ottimizzazione dello scambio termico, senza compromettere le caratteristiche fondamentali del materiale.

Una prima tecnica consiste nell'incrementare direttamente la conducibilità del PCM attraverso la formazione di materiali compositi tramite l'aggiunta di sostanze ad alta conduttività, come grafite espansa, ossidi metallici o nanoparticelle (es. nanotubi di carbonio, grafene, allumina). Questi materiali favoriscono la distribuzione del calore all'interno della massa del PCM e permettono di ridurre i gradienti termici durante la transizione di fase, sebbene l'efficacia dipende fortemente dall'omogeneità della dispersione e dalla compatibilità tra le fasi. Va inoltre considerato che l'aggiunta di additivi può alterare la temperatura di fusione, aumentare la viscosità o ridurre la quantità effettiva di calore immagazzinabile per unità di volume [13].

Un secondo approccio, ampiamente studiato, riguarda la progettazione geometrica del contenitore che ospita il PCM. L'efficienza dello scambio termico può essere significativamente migliorata adottando configurazioni con elevato rapporto superficie/volume, come celle parallele, canali sottili o pannelli lamellari. Qui, il calore viene distribuito più uniformemente, e i tempi di risposta termica si riducono. L'integrazione di alette o strutture metalliche interne, ad esempio in rame o alluminio, è stata dimostrata efficace nell'accelerazione dei processi termici, fungendo da "ponte termico" tra la sorgente di calore e il cuore del PCM.

Una terza categoria di strategie si basa sull'impiego di matrici porose conduttive, come schiume metalliche o supporti in grafite espansa, che fungono da struttura di sostegno e canale termico allo stesso tempo, assicurando una distribuzione più rapida del calore in tutto il volume attivo. Tali soluzioni sono particolarmente indicate in applicazioni con elevati carichi termici e frequenti cicli di funzionamento, seppur più costose e complesse da realizzare.

In geometrie verticali o in contenitori sufficientemente ampi, la convezione naturale all'interno del PCM liquido durante la fase di fusione può contribuire significativamente alla riduzione dei tempi di scambio termico. Tuttavia, nei sistemi passivi e in geometrie compatte – come quelli impiegati nei pannelli APCM – l'effetto della convezione risulta spesso trascurabile, rendendo ancora più cruciali le soluzioni sopra descritte.

In generale, le strategie disponibili offrono un ampio ventaglio di soluzioni tecnologiche, tutte mirate a trovare un certo equilibrio tra miglioramento della conducibilità, mantenimento della capacità di accumulo e semplicità realizzativa. Nel caso trattato in questa tesi, l'ottimizzazione è già stata affrontata a monte mediante l'adozione di pannelli polimerici ingegnerizzati, la cui descrizione dettagliata sarà fornita nel Capitolo 4.

2.8 Tecniche di incapsulamento dei PCM

L'incapsulamento dei PCM rappresenta una delle strategie più diffuse per migliorare lo scambio termico e l'integrazione nei sistemi di accumulo termico e

prolungare la durata operativa del sistema [14]. Questo processo consiste nel racchiudere il PCM all'interno di una struttura confinata, allo scopo di evitare perdite durante la fase liquida, incrementare la superficie di scambio termico e proteggerlo da contaminazioni esterne o fenomeni di corrosione.

Le tecniche di incapsulamento più comuni sono il microincapsulamento e il macroincapsulamento.

Il microincapsulamento prevede l'inclusione del PCM in particelle microniche, cioè di dimensioni inferiori al millimetro, generalmente mediante tecniche chimiche come la polimerizzazione in situ, la coacervazione o l'interfacial polymerization. Le microcapsule ottenute, solitamente rivestite da membrane polimeriche (es. poliuretani, poliacrilati), garantiscono un'elevata superficie di contatto possono essere facilmente integrate in matrici solide (intonaci, tessuti, vernici), sono particolarmente adatte per applicazioni nell'edilizia o nei sistemi HVAC su scala ridotta [14].

Il macroincapsulamento, invece, consiste nel confinare il PCM in contenitori più grandi e facilmente gestibili, come sfere, tubi, pannelli o celle modulari. Questo approccio è ampiamente utilizzato nei sistemi LHS su scala edilizia e industriale, dove la semplicità costruttiva, la robustezza meccanica e la facilità di installazione risultano prioritari. I contenitori possono essere in polimeri, metalli o materiali compositi [15].

Ogni metodo presenta vantaggi e limiti. Il microincapsulamento permette una buona dispersione e risposte termiche rapide, ma richiede processi industriali complessi e può aumentare il costo del materiale. Il macroincapsulamento, invece, offre soluzioni più semplici e scalabili, sebbene con maggiore inerzia termica e rischio di stratificazione se il design non è ottimizzato [16].

Il tipo di incapsulamento influisce significativamente sulla conducibilità termica del sistema: un rivestimento ad alta conducibilità accelera il trasferimento di calore, mentre l'impiego di materiali termicamente isolanti come i polimeri può ridurre l'efficienza dello scambio [16]. Analogamente, la

resistenza chimica del contenitore influenza la durabilità dell'intero sistema, specie in presenza di PCM salini o aggressivi.

In questa tesi, i PCM utilizzati sono stati integrati in pannelli rigidi preformati in polipropilene, già ottimizzati per garantire una distribuzione uniforme del calore, una buona robustezza e compatibilità con il PCM, come sarà discusso nel Capitolo 4.

3. INTEGRAZIONE DEI PCM NEGLI EDIFICI E NEI SISTEMI MOBILI

3.1 Introduzione

Negli ultimi anni, l'interesse per strategie costruttive sostenibili ed efficienti dal punto di vista energetico nel settore delle costruzioni ha stimolato lo sviluppo di soluzioni innovative per la gestione termica passiva. Tra queste, i PCM rappresentano una delle tecnologie più promettenti, in quanto contribuiscono in modo significativo alla riduzione dei consumi energetici legati al riscaldamento e al raffrescamento degli ambienti. La loro capacità di assorbire e rilasciare calore latente durante i processi di fusione e solidificazione li rende particolarmente adatti per applicazioni in cui si desidera mantenere la temperatura interna entro un intervallo confortevole, ridurre la dipendenza da impianti meccanici di climatizzazione e favorire quindi una maggiore autonomia energetica degli edifici e dei moduli abitativi.

L'edilizia è uno dei settori in cui i PCM hanno trovato maggiore impiego, grazie alla possibilità di incorporarli in pareti, coperture, intonaci o pannelli modulari. Questo approccio consente di migliorare l'inerzia termica dell'involucro edilizio, contribuendo al comfort termoigrometrico interno e attenuando le oscillazioni di temperatura. Parallelamente, anche il settore dei sistemi mobili – in particolare i container abitativi e refrigerati – ha riconosciuto il potenziale dei PCM, soprattutto in applicazioni off-grid, in ambienti remoti o in scenari emergenziali dove l'accesso a fonti energetiche tradizionali è limitato.

Questo capitolo offre una panoramica delle applicazioni più rilevanti dei PCM in ambito edilizio e nei moduli mobili, analizzando le tecnologie attualmente disponibili, le modalità di implementazione e gli effetti sulle prestazioni

energetiche. Attraverso un excursus della letteratura scientifica e tecnica più recente, vengono evidenziate le potenzialità e le criticità ancora da risolvere di questi materiali, ponendo le basi per il successivo approfondimento del caso studio presentato nel Capitolo 4.

3.2 Strategie di integrazione dei PCM negli involucri edilizi

3.2.1 Involucro edilizio e comfort termico interno

L'integrazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'involucro edilizio rappresenta una strategia efficace per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici. In particolare, l'utilizzo di intonaci arricchiti con microcapsule di PCM consente di ridurre le escursioni termiche interne, stabilizzare la temperatura dell'aria e ridurre il fabbisogno energetico, specialmente nelle stagioni intermedie.

Uno studio sperimentale condotto da Ferencz et al. ha evidenziato come un'abitazione leggera dotata di intonaco al PCM presenti una riduzione dell'ampiezza giornaliera delle fluttuazioni termiche da 6,3 °C (nell'abitazione di riferimento) a 3,6 °C. Il calore accumulato durante le ore più calde viene rilasciato gradualmente nelle ore più fredde, migliorando il comfort interno e generando un risparmio energetico del 42,9% rispetto al caso senza PCM [17].

Anche lo studio di Skalar et al. ha confermato il potenziale degli intonaci con PCM integrato per l'involucro edilizio. In particolare, i materiali sviluppati hanno mostrato una buona capacità di accumulo di calore latente e un comportamento ciclico stabile nel tempo. La distribuzione omogenea delle microcapsule nella matrice cementizia ha garantito prestazioni termiche coerenti e una durata meccanica accettabile. Il comfort interno è stato migliorato mantenendo la temperatura dell'aria entro la fascia di benessere per il 43,7% del tempo, contro il 33,9% ottenuto con materiali tradizionali [18].

In climi estremi come quelli desertici, l'efficacia dei PCM dipende fortemente dalla corretta selezione della temperatura di transizione e dalla loro posizione nell'involucro. Amin Al-Absi ha condotto, con i suoi colleghi, uno studio di ottimizzazione che dimostra come la scelta del PCM con transizione a 30–31 °C

(applicazione esterna) o 24–26 °C (applicazione interna) possa portare a una riduzione del consumo energetico annuo fino al 30,4%, mantenendo la temperatura operativa sotto i 27 °C nel 96% delle ore analizzate [19].

In zone con elevate escursioni termiche giornaliere o stagionali, l'integrazione di PCM può essere ulteriormente ottimizzata tramite l'uso di materiali termocromatici. Ru Ji e Xiang Li hanno proposto un sistema innovativo (TC-PCM) in cui l'assorbimento solare varia in funzione della temperatura: questo ha permesso di migliorare la ciclicità del cambiamento di fase, riducendo contemporaneamente i carichi per il riscaldamento e il raffrescamento. Nel clima di Shanghai, il sistema ha ridotto la domanda energetica annuale di 42,9 kWh/m² rispetto ai PCM tradizionali, con un tasso di risparmio energetico fino al 39,9% [20].

Infine, una recente ricerca di il lavoro di Mohajerzadeh et al. ha evidenziato il potenziale dell'integrazione tra PCM e generatori termoelettrici (TEG) per favorire non solo la regolazione passiva della temperatura, ma anche la generazione locale di energia elettrica. I PCM contribuiscono a mantenere costante il gradiente termico necessario al funzionamento dei TEG, migliorandone l'efficienza. La riduzione del flusso termico ottenuta grazie ai PCM può arrivare fino al 75%, supportando applicazioni per edifici a energia quasi zero [1].

In sintesi, i PCM si confermano materiali estremamente versatili per l'edilizia passiva, ma la loro efficacia richiede un'accurata progettazione dell'involucro, una valutazione delle condizioni climatiche e una corretta selezione delle proprietà termofisiche del materiale.

3.2.2 Tecnologie di integrazione e soluzioni di retrofit

Negli ultimi anni, l'integrazione dei PCM negli involucri edilizi ha assunto un ruolo centrale nelle strategie di retrofit energetico. Le tecnologie più recenti mirano non solo a inserire i PCM nei materiali da costruzione in fase progettuale, ma anche a sviluppare soluzioni efficienti e sostenibili per la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente.

Le soluzioni più semplici prevedono l'inserimento del PCM nei componenti tradizionali dell'involucro, come pareti, tetti, pavimenti, intonaci o pannelli in cartongesso. In particolare, l'incapsulamento dei PCM all'interno di intonaci a base di nanoparticelle, come proposto da Maleki et al. confrontando due celle climatiche con e senza PCM, è in grado di attenuare le fluttuazioni della temperatura interna, migliorando le condizioni di comfort per gran parte dell'anno, anche grazie alla maggiore stabilità termica conferita dalla presenza di materiali come CuO. Questo intonaco contenente PCM nano-incapsulato a base di n-dodecanolo è stato ottenuto tramite polimerizzazione in miniemulsione ed è caratterizzato da elevate capacità termiche (148,88 J/g) e buona stabilità [22].

Tra le tecnologie più promettenti rientra la combinazione di PCM con sistemi attivi. Hosseini et al. hanno proposto una soluzione innovativa per edifici residenziali in clima freddo, che prevede l'adozione di un sistema attivo con tubazioni integrate all'interno delle pareti, immerse in uno strato di PCM e collegate a un collettore solare. In questo caso, il PCM agisce come stabilizzatore termico, mantenendo la temperatura dell'acqua all'interno dei tubi durante i picchi di domanda. I risultati ottenuti con simulazioni in TRNSYS mostrano risparmi energetici annuali fino al 92% rispetto a una configurazione priva di PCM, con un tempo di ritorno economico di circa 22 anni, confermando il forte potenziale di questi sistemi integrati in applicazioni retrofit [23].

Tra le soluzioni più avanzate si collocano le integrazioni multistrato, in cui i PCM vengono combinati con altri sistemi attivi o passivi. Ad esempio, Li et al. hanno sviluppato una tecnica di integrazione dinamica del PCM all'interno di pareti in calcestruzzo a base di biomateriali, dimostrando una riduzione delle fluttuazioni termiche del 62,5% in estate e del 16,1% in inverno, accompagnata anche da una riduzione del rischio di condensa interstiziale, tipica dei climi umidi [24]. Inoltre, l'ottimizzazione multi-obiettivo del sistema ha consentito di individuare configurazioni in grado di ridurre contemporaneamente i costi e i consumi energetici, rendendo il sistema adatto a diversi contesti climatici.

Un altro ambito applicativo riguarda l'integrazione del PCM in coperture edilizie. In uno studio sperimentale, Baskar e Chellapandian hanno testato in

scala ridotta quattro tipologie di coperture, tra cui una contenente PCM macro-incapsulato, e un'altra realizzata con PCM in forma stabile (FSPCM) su base perlite espansa [25]. Le misurazioni, effettuate tramite sensori e sistema DAQ su modelli reali, hanno evidenziato una significativa riduzione delle temperature interne nei modelli equipaggiati con FSPCM, dimostrando l'efficacia della soluzione come metodo passivo di raffrescamento.

Nel complesso, le tecnologie di integrazione e retrofit dei PCM spaziano dalle configurazioni passive a quelle attive, includendo materiali innovativi e sistemi ibridi. Tali soluzioni offrono prospettive concrete per migliorare le prestazioni termiche degli edifici esistenti, promuovendo efficienza energetica, comfort abitativo e sostenibilità ambientale.

3.2.3 Limiti tecnici e barriere all'adozione dei PCM in edilizia

Nonostante i numerosi vantaggi legati all'impiego dei PCM negli involucri edilizi, la loro diffusione su larga scala è ancora ostacolata da diverse barriere di natura tecnica, normativa e commerciale.

Una delle principali criticità è legata alla sensibilità dei PCM alle condizioni ambientali estreme, che possono compromettere l'efficienza dei cicli di fusione e solidificazione, riducendo la capacità di accumulo e rilascio del calore. Per mitigare tali effetti negativi, sono state proposte soluzioni innovative come i rivestimenti termocromatici, capaci di regolare l'assorbimento solare e di migliorare l'efficienza dei cicli termici dei PCM; tuttavia, queste tecnologie restano ancora in fase di ottimizzazione e non sempre garantiscono prestazioni elevate in ogni contesto climatico [20].

Anche dal punto di vista energetico e ambientale esistono delle limitazioni, riguardanti principalmente la difficoltà di integrazione post-costruttiva dei PCM nelle strutture esistenti. Georgiou et al. hanno evidenziato come le prestazioni dei PCM varino fortemente in funzione delle condizioni climatiche, dell'orientamento dell'edificio e del tipo di elemento strutturale in cui vengono applicati. In alcune configurazioni, il risparmio energetico annuo risulta marginale (0.24 kWh/m²a) e i tempi di ritorno energetico possono superare i 19

anni. Inoltre, gli studi di valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) condotti dagli stessi autori sottolineano che l'impatto ambientale complessivo dell'adozione dei PCM può, in taluni casi, non giustificare l'investimento iniziale, soprattutto se il materiale non è integrato correttamente o non è scelto in funzione del contesto climatico [26].

A questi ostacoli si aggiungono le incertezze legate alla durabilità e all'affidabilità dei PCM nel lungo periodo. Come evidenziato da Furszyfer Del Rio et al., la mancanza di studi sperimentali estesi e la scarsa disponibilità di dati sulla performance dei PCM nel tempo alimentano una diffusa riluttanza da parte del settore industriale ad adottare soluzioni basate su questi materiali. In particolare, i principali fornitori di sistemi per il raffreddamento termico, come quelli per i pacchi batteria o i componenti edilizi prefabbricati, mostrano ancora un limitato interesse verso i PCM, ostacolando così il loro passaggio dal laboratorio alla scala commerciale [27].

Infine, una delle barriere tecniche più critiche è rappresentata dalla reazione al fuoco dei materiali contenenti PCM. Arinaitwe et al. hanno dimostrato, attraverso simulazioni effettuate con il software ConeTools, che la maggior parte dei materiali da costruzione contenenti PCM ricade nelle classi Euroclass D o E, anche in presenza di ritardanti di fiamma, risultando quindi inadatti per applicazioni in spazi pubblici o vie di fuga, dove è richiesta almeno la classe C secondo la normativa europea [28]. Questa limitazione normativa costituisce un freno importante all'adozione dei PCM in edilizia, soprattutto nei contesti con requisiti stringenti in termini di sicurezza antincendio.

In conclusione, sebbene i PCM rappresentino una tecnologia promettente per la transizione verso edifici più sostenibili ed energeticamente efficienti, la loro adozione su larga scala è frenata da una combinazione di fattori: limitazioni normative legate alla sicurezza antincendio, incertezze prestazionali sul lungo periodo, scarsa maturità commerciale, e benefici energetici talvolta marginali in relazione ai costi ambientali e economici complessivi. Affinché i PCM possano trovare un impiego più diffuso e affidabile nel settore delle costruzioni, è

necessario un maggiore sforzo in termini di ricerca applicata, normazione specifica e strategie di ottimizzazione in fase progettuale.

3.3 Applicazioni dei PCM nei moduli abitativi e nei container mobili

3.3.1 Container abitativi (cantieri, emergenza, militari)

L'impiego dei PCM nei container abitativi si è rivelato una soluzione promettente per migliorare il comfort termico interno in contesti di emergenza, cantieri temporanei o strutture militari, dove spesso l'isolamento è ridotto e le condizioni climatiche sono estreme. In queste situazioni, l'adozione di sistemi passivi di accumulo termico consente di compensare la scarsa inerzia termica degli involucri leggeri e di ridurre il carico energetico richiesto per la climatizzazione.

Yun et al. hanno condotto uno studio sperimentale sull'impiego di PCM macroincapsulati (MPPCM) all'interno di moduli edilizi temporanei utilizzati per l'isolamento di letti ospedalieri durante l'emergenza COVID-19. I risultati hanno mostrato che, in presenza di fonti di calore interne, l'adozione dei PCM è in grado di stabilizzare la temperatura interna e di ridurre la temperatura massima percepita fino a 4,9 °C, contribuendo così al miglioramento delle condizioni ambientali per i pazienti e il personale sanitario [29].

Anche Li et al. hanno evidenziato il potenziale dei PCM nel raffrescamento passivo degli ambienti interni. L'integrazione dei materiali a cambiamento di fase in sistemi radianti a soffitto e pavimento ha permesso di aumentare l'efficienza del raffrescamento e ridurre i carichi termici in edifici leggeri. Tuttavia, gli autori sottolineano che la lenta velocità di trasmissione del calore nei PCM costituisce ancora un ostacolo per l'efficacia dinamica del sistema, suggerendo l'adozione di modelli numerici robusti per ottimizzarne il comportamento [24].

Almtuly et al. hanno proposto una soluzione per container abitativi a basso costo basata sull'integrazione di PCM incapsulati in perlite espansa (EP) e grafite espansa (EG) all'interno di blocchi in terra battuta. I test sperimentali hanno mostrato che, rispetto al blocco di riferimento, l'inserimento del 2,2% di PCM ha permesso una riduzione della temperatura superficiale interna di 1,2 °C, mentre

con il 4,3% e il 6,5% di PCM si sono ottenute riduzioni rispettivamente di 3,3 °C e 4,1 °C. Tali risultati dimostrano la capacità del PCM di trasformare ambienti termicamente severi in spazi più moderati e abitabili [30].

Anche Farouq et al. hanno evidenziato la buona distribuzione del PCM all'interno della matrice porosa e la stabilità termica del materiale in condizioni operative. I test eseguiti, tra cui DSC e SEM, hanno confermato l'efficacia del composito PCM in termini di capacità termica e resistenza meccanica, rafforzando la fattibilità di utilizzo dei PCM in contesti abitativi temporanei e sostenibili [31].

Infine, Zhu et al. hanno condotto una simulazione numerica su un container temporaneo realizzato con involucro leggero ad alto coefficiente di resistenza aerodinamica. I risultati hanno dimostrato che uno strato di PCM dello spessore di 5,0 mm, posizionato sulla superficie interna, è in grado di migliorare sensibilmente il comfort termico, soprattutto in configurazioni a più orientamenti. In particolare, l'impiego di layout multi-orientati ha consentito il mantenimento di un clima interno confortevole anche in assenza di raffrescamento meccanico, suggerendo un'ottima applicabilità per l'alloggiamento in ambienti remoti o in condizioni off-grid [32].

In sintesi, l'adozione dei PCM nei container abitativi consente di ridurre le escursioni termiche, migliorare il comfort interno e abbattere i consumi energetici. Tuttavia, per ottenere i risultati migliori è necessaria una progettazione accurata, che tenga conto della quantità di PCM, della sua posizione nell'involucro e delle condizioni climatiche specifiche.

3.3.2 PCM nei container refrigerati e nei sistemi di trasporto termicamente sensibili

L'utilizzo dei PCM nei container refrigerati e, più in generale, nei sistemi mobili destinati al trasporto di merci termicamente sensibili, rappresenta una soluzione tecnologica sempre più promettente. In particolare, i PCM trovano impiego sia nella catena del freddo (cold chain) per la conservazione di alimenti e farmaci, sia in applicazioni non strettamente refrigerate, ma dove è comunque

essenziale mantenere la temperatura interna entro range ristretti, come nel caso dello stoccaggio di materiali industriali o tecnologici sensibili.

Tong et al. hanno sviluppato un sistema passivo di raffreddamento per container refrigerati impiegando piastre di accumulo contenenti PCM e una stazione di carica dedicata [33]. Il sistema ha mostrato un tempo di scarica termica fino a 94,6 ore e un coefficiente di prestazione (COP) massimo pari a 1,84. Rispetto ai container refrigerati alimentati a diesel, il nuovo sistema ha permesso una riduzione del consumo energetico del 86,7%, dei costi operativi del 91,6% e delle emissioni del 78,5%. Questi dati evidenziano come l'integrazione di PCM consenta non solo di migliorare l'efficienza energetica, ma anche di ottenere vantaggi economici e ambientali significativi.

Anche Xu et al. hanno affrontato il problema dell'efficienza nei sistemi di accumulo a freddo per container refrigerati, sviluppando un materiale PCM composito a base di acido caprilico e alcol laurilico con l'aggiunta dell'8% di grafite espansa per migliorarne la conducibilità termica [34]. Il materiale ha mostrato una conducibilità aumentata di oltre sei volte rispetto al PCM puro e una latenza termica di 170,4 J/g, con una temperatura di transizione di circa 0,7 °C. Inoltre, la modalità di carica tramite serpentina interna ha ridotto il tempo di carica del 58,1% rispetto al raffreddamento convenzionale. Ciò si traduce in una maggiore velocità operativa e minori tempi morti nella logistica refrigerata.

Michel et al. hanno invece studiato l'integrazione di schiume poliuretaniche con PCM (PU-PCM) all'interno di pareti multistrato per veicoli refrigerati, mostrando come la posizione ottimale del materiale composito, vicino alla parete esterna del veicolo, possa ridurre l'energia termica entrante fino al 18% durante la fase di trasporto su strada [35]. Questi risultati sottolineano l'importanza della progettazione dell'involucro, oltre alla scelta del materiale.

La questione dell'adattabilità climatica è stata discussa da Umate e Sawarkar, i quali suggeriscono l'impiego di PCM a diversa temperatura di fusione disposti a strati multipli o a "piastrelle" sulle pareti esterne dei container refrigerati [36]. Questo approccio multizona permette una risposta più flessibile

alle variazioni climatiche esterne, migliorando la stabilità interna del container e riducendo il consumo energetico in ambienti non costanti.

Infine, Zhao et al. hanno sottolineato il ruolo strategico dei PCM per la logistica agricola e la riduzione degli sprechi alimentari, evidenziando la necessità di sviluppare materiali ad alte prestazioni e a basso impatto ambientale, nonché di implementare metodi di integrazione efficienti [37]. La visione prospettica di questo studio estende il ruolo dei PCM al contesto socio-economico, promuovendone l'adozione come chiave per la resilienza dei sistemi di trasporto termico.

In conclusione, l'adozione di PCM nei container refrigerati e nei sistemi mobili per merci sensibili alla temperatura si configura come una tecnologia in grado di coniugare efficienza energetica, sostenibilità ambientale e affidabilità operativa. Tuttavia, la piena diffusione richiede ancora progressi nella progettazione dei materiali, nell'ottimizzazione dei cicli di carica/scarica e nelle strategie di integrazione nei diversi scenari d'uso.

3.3.3 Vincoli economico-normativi nei sistemi mobili

L'adozione dei PCM nei container mobili e nei sistemi di trasporto termicamente controllati rappresenta una soluzione innovativa per la gestione energetica passiva. Tuttavia, l'implementazione su larga scala di queste tecnologie incontra ancora diversi ostacoli, sia dal punto di vista economico che normativo.

Sotto il profilo economico, uno dei principali limiti è legato al costo iniziale dei materiali e delle tecnologie di integrazione. Sebbene i PCM consentano una significativa riduzione dei consumi energetici e dei costi operativi nel lungo periodo, l'investimento iniziale risulta spesso superiore rispetto alle soluzioni convenzionali. Lo studio di Tong et al. ha mostrato che un container refrigerato passivo con piastre a PCM, utilizzato per la logistica agroalimentare su rotaia, ha permesso di ridurre i costi operativi del 91,6% rispetto a un container diesel [33]. Nonostante questo dato promettente, la necessità di impianti di carica dedicati e di componenti ad alte prestazioni, come pannelli ad accumulo e sistemi di

controllo, può aumentare il costo complessivo del sistema nella fase di progettazione e installazione.

Un ulteriore fattore critico è rappresentato dalla variabilità delle normative di sicurezza, igiene e certificazione nei diversi settori applicativi. Nei sistemi destinati al trasporto alimentare o farmaceutico, l'utilizzo dei PCM è subordinato alla conformità a specifiche direttive, come quelle relative al contatto con gli alimenti, alla stabilità termica o alla sicurezza antincendio. Umate e Sawarkar hanno evidenziato come la selezione dei PCM per le pareti esterne dei container refrigerati sia ostacolata da difficoltà legate alla variabilità climatica esterna, che impone soluzioni progettuali complesse e spesso difficili da standardizzare [36].

Anche le modalità di integrazione rappresentano un punto critico. Zhao et al. sottolineano come la scarsa disponibilità di metodi di integrazione efficienti e certificati all'interno dei sistemi logistici agricoli rallenti la diffusione delle tecnologie a PCM, specialmente nei contesti rurali o in fase di sviluppo [37]. Il problema non riguarda soltanto l'adozione tecnica, ma anche la mancanza di linee guida condivise e incentivi normativi che favoriscano soluzioni passive a basso impatto ambientale.

Infine, l'efficienza dei PCM dipende da parametri termici e climatici specifici, che rendono necessaria un'attenta calibrazione del sistema per ciascun contesto operativo. Come mostrato nello studio di Xu et al., la scelta del metodo di carica e delle proprietà del materiale (conduttività, punto di fusione, stabilità ciclica) incide fortemente sulla durata del ciclo logistico e sull'efficienza della catena del freddo [34]. In assenza di standard internazionali per la selezione e l'impiego dei PCM nei trasporti mobili, ogni soluzione richiede uno sforzo di progettazione su misura, con un conseguente aumento dei costi progettuali e un rallentamento dell'industrializzazione.

In conclusione, benché i PCM offrano un grande potenziale per l'efficienza energetica e la sostenibilità dei sistemi mobili, la loro diffusione è ancora limitata da barriere economiche, vincoli normativi e assenza di standard tecnici consolidati. La risoluzione di questi ostacoli richiede un coordinamento tra

ricerca scientifica, industria e regolatori, al fine di favorire la standardizzazione e la scalabilità delle soluzioni.

3.4 Considerazioni progettuali comuni

3.4.1 - Scelta del PCM in base all'applicazione

La selezione del PCM più adatto per una specifica applicazione richiede un'attenta valutazione di numerosi parametri, tra cui le condizioni climatiche, il profilo termico del sistema, la temperatura di transizione desiderata, la compatibilità con i materiali circostanti e le esigenze di sostenibilità ambientale. Una corretta scelta del PCM consente non solo di massimizzare l'efficacia dell'accumulo termico, ma anche di garantire cicli di carica e scarica coerenti con i carichi termici reali, prolungando la durata del sistema e migliorandone l'efficienza complessiva.

Nel contesto del solare termico, Mellouli et al. hanno confrontato le prestazioni di due sistemi di accumulo, uno basato su PCM e l'altro su idruri metallici (MH), installati in collettori piani solari. Le simulazioni hanno dimostrato che il collettore con PCM si comporta meglio durante le ore diurne, raggiungendo una temperatura dell'acqua in uscita superiore di 5,5 K rispetto al sistema MH e un'efficienza energetica del 28%, contro il 21% del secondo. Tuttavia, durante il funzionamento notturno, i collettori a idruri hanno mostrato prestazioni migliori, con una temperatura di uscita più alta di 6,4 K rispetto al PCM, pur mantenendo efficienze comparabili (82% per MH contro 84,5% per PCM) [38]. Questo confronto evidenzia come la scelta del materiale di accumulo debba tener conto del ciclo operativo del sistema: i PCM risultano preferibili nei profili a carico diurno, mentre gli MH sono vantaggiosi in presenza di carichi notturni o discontinui.

Un'altra variabile fondamentale è la stabilità termica e meccanica nel lungo periodo. Manikandan et al. hanno studiato l'impiego di PCM derivati da scarti industriali, come acidi grassi residui e polietilenglicole riciclato, riscontrando una buona stabilità termica anche dopo 2000 cicli di utilizzo. Tali materiali, oltre a presentare un'elevata capacità di accumulo, hanno mostrato una significativa

riduzione delle emissioni di gas serra e dei costi di produzione rispetto ai PCM convenzionali, rivelandosi quindi idonei per applicazioni che richiedano un basso impatto ambientale e un'elevata durabilità [39].

La conducibilità termica rappresenta spesso un limite per l'efficienza dei PCM, specialmente in applicazioni che richiedano cicli rapidi. In questo senso, Wang ha sviluppato materiali a base di acido stearico stabilizzato su supporti mesoporosi a struttura grafitica (UiO-66-C), ottenendo una conducibilità termica pari a 0,531 W/(m·K), superiore del 141% rispetto al PCM puro. Il materiale ha mantenuto una buona entalpia di transizione (93,6 J/g) e una stabilità eccellente anche dopo 100 cicli termici, dimostrandosi particolarmente adatto per applicazioni dove sia richiesta una risposta termica rapida e ripetuta nel tempo [40].

Anche i recenti sviluppi nel campo dei nanoPCM e dei sistemi ibridi hanno ampliato le opzioni disponibili. Secondo Selvam, l'integrazione di nanoparticelle conduttive nei PCM consente di aumentarne la conducibilità fino al 60%, mantenendo una stabilità oltre i 2500 cicli. I sistemi ibridi che combinano accumulo sensibile e latente permettono di superare i 350 MJ/m³ di densità energetica, con efficienze operative superiori al 90%. Inoltre, l'uso di materiali derivati da scarti industriali e strategie di ottimizzazione guidate da algoritmi di intelligenza artificiale contribuisce a migliorare la sostenibilità e la scalabilità dei sistemi [41].

In sintesi, la scelta del PCM più appropriato non può prescindere da un'analisi sistemica che consideri simultaneamente le condizioni d'uso, le proprietà termofisiche, i requisiti di ciclicità e le implicazioni economico-ambientali. I dati sperimentali e numerici emersi dalla letteratura confermano come le diverse famiglie di PCM offrano vantaggi differenziati, rendendo possibile un adattamento mirato alle specifiche esigenze progettuali.

3.4.2 Comparazione con altre soluzioni di accumulo termico

Nel contesto della gestione dell'energia termica in edilizia e nei sistemi mobili, i PCM rappresentano una delle tecnologie più promettenti per lo stoccaggio del calore latente. Il principio alla base dell'accumulo termico nei PCM è

rappresentato in Figura 3.1, dove viene evidenziato il contributo dell'energia latente durante le transizioni di fase, in contrasto con l'accumulo sensibile che avviene con variazione di temperatura.

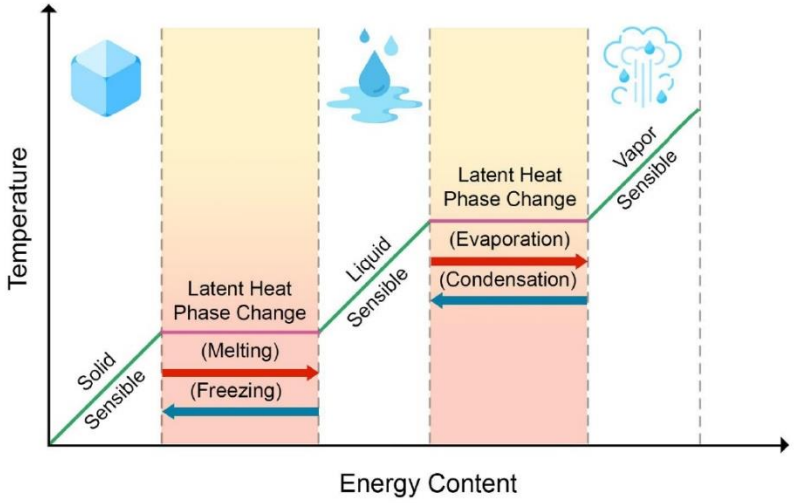


Figura 3 - Rappresentazione schematica dell'andamento della temperatura in funzione del contenuto energetico per diversi stadi della materia.

Per una valutazione completa della loro efficacia, è utile confrontarli con altre soluzioni disponibili, in particolare con i sistemi di accumulo sensibile e con alternative emergenti come gli idruri metallici.

In un'analisi numerica condotta da Mellouli et al., due collettori solari piani con identica superficie e capacità teorica di accumulo sono stati equipaggiati rispettivamente con PCM e con idruri metallici (MH), evidenziando che il PCM garantisce migliori prestazioni termiche durante il giorno grazie alla sua temperatura di fusione ben calibrata, mentre l'MH mostra una maggiore efficienza nelle ore notturne, grazie al suo comportamento endotermico controllato dalla pressione di desorbimento [38]. Questo suggerisce un possibile impiego complementare in funzione del profilo temporale del fabbisogno energetico.

Noro et al. hanno valutato l'efficacia dell'accumulo latente rispetto a quello sensibile nell'ambito di impianti solari di riscaldamento e raffrescamento ad assorbimento. Simulando un edificio per uffici situato nei pressi di Roma, i

ricercatori hanno evidenziato che l'uso di PCM per il serbatoio caldo (temperatura di fusione pari a 44 °C) in combinazione con un serbatoio freddo sensibile, ottimizza il bilancio energetico complessivo, riducendo il consumo di energia primaria e aumentando il solar ratio. La configurazione ottimale prevedeva un accumulo latente da 3000 L sul lato caldo e uno sensibile da 2000 L sul lato freddo [42]. Questi risultati indicano che la scelta tra sistemi di accumulo latente e sensibile dovrebbe basarsi sulle specifiche esigenze dell'applicazione. I PCM risultano particolarmente vantaggiosi in presenza di temperature di esercizio quasi costanti e dove è richiesta compattezza e densità energetica elevata. Gli accumuli sensibili, d'altro canto, offrono una maggiore semplicità progettuale e costi più contenuti, pur avendo densità energetiche inferiori.

Infine, recenti ricerche hanno esplorato anche l'impiego di materiali ibridi e di soluzioni innovative, come i sistemi TES con nanoparticelle o le tecnologie integrate con intelligenza artificiale, che permettono di ottimizzare il funzionamento in funzione della variabilità climatica e del profilo di carico. Sebbene tali soluzioni siano ancora in fase di sviluppo, rappresentano una promettente direzione per il futuro dello stoccaggio termico avanzato.

3.5 Conclusioni

Il presente capitolo ha messo in luce le molteplici possibilità di impiego dei PCM per migliorare le prestazioni termiche di edifici e sistemi mobili, evidenziandone il ruolo strategico nella transizione verso soluzioni costruttive più sostenibili e autonome dal punto di vista energetico. Particolare attenzione è stata riservata ai container mobili, non solo in ambito abitativo ma anche per applicazioni più specialistiche, come nel caso del trasporto o dello stoccaggio di merci sensibili alle variazioni di temperatura. In tali scenari, i PCM possono rappresentare una risposta efficace alla necessità di mantenere condizioni termiche stabili senza ricorrere a sistemi di raffreddamento attivo, con evidenti vantaggi in termini di efficienza energetica e riduzione delle emissioni, anche in condizioni ambientali estreme o in contesti off-grid.

Il capitolo ha inoltre mostrato come l'efficacia dei PCM dipenda strettamente da una corretta progettazione dell'involucro, dalla scelta della temperatura di

fusione e dalla modalità di integrazione, elementi che assumono un valore ancora più critico nel caso di container per materiali tecnologici termicamente sensibili. L'adozione su larga scala è ancora limitata da barriere normative, costi iniziali elevati, problematiche legate alla durabilità e alla sicurezza antincendio, e assenza di standard tecnici consolidati. È quindi fondamentale proseguire con la ricerca applicata e con lo sviluppo di linee guida progettuali specifiche, per facilitare l'industrializzazione e la diffusione dei PCM in edilizia e nella logistica termicamente sensibile.

Il caso studio presentato nel capitolo successivo offrirà un esempio concreto di integrazione dei PCM in un container, valutando in modo comparativo l'efficacia di diversi PCM nel contenimento della temperatura interna, in funzione del loro punto di transizione e delle condizioni operative. Tali valutazioni rappresentano un passo fondamentale verso la progettazione di sistemi passivi efficienti per applicazioni logistiche avanzate.

4. MODELLAZIONE DEL SISTEMA PCM–CONTAINER

4.1 Introduzione al caso studio

Il presente caso studio si concentra sull'analisi delle prestazioni termiche di un container standard, modificato con l'integrazione di materiali a cambiamento di fase (PCM), con l'obiettivo di limitare il surriscaldamento degli ambienti interni in condizioni climatiche estreme. Il progetto è stato sviluppato in collaborazione con la start-up MELT, azienda specializzata nella progettazione di sistemi avanzati per il controllo passivo della temperatura mediante PCM. La necessità di assicurare la stabilità termica all'interno del container deriva dalla sua destinazione d'uso, che prevede l'immagazzinamento sicuro di materiali termicamente sensibili, da conservare in contesti caratterizzati da elevate temperature ambientali, come regioni desertiche o aree soggette a intensa irradiazione solare.

A tale scopo, sono stati impiegati pannelli prefabbricati in polipropilene contenenti PCM incapsulati, ottimizzati per garantire un'elevata capacità di accumulo termico e un'efficace ridistribuzione del calore. La selezione dei PCM si

è basata su criteri di compatibilità chimica, temperatura di transizione adeguata e ripetibilità ciclica. In particolare, tra le due opzioni disponibili (con temperature di transizione pari a 21 °C e 25 °C), è stato selezionato il PCM da 25 °C, in quanto si è dimostrato più efficace nel mantenere la temperatura interna del container al di sotto della soglia critica dei 30 °C per la maggior parte delle ore dell'anno.

Le simulazioni numeriche, condotte mediante il software DesignBuilder, hanno permesso di valutare il comportamento termico del container in diverse configurazioni, con e senza l'integrazione dei PCM. Il capitolo presenta quindi il sistema analizzato, descrivendone i materiali utilizzati, la geometria del container, le metodologie adottate per la simulazione e i risultati ottenuti, con l'obiettivo di verificare l'efficacia della strategia proposta nel mitigare le temperature interne e nel prolungare la stabilità termica in condizioni ambientali avverse.

4.2 Fondamenti fisici e definizione del modello simulato

4.2.1 Principi di scambio termico del sistema

Nel caso studio in esame, l'impiego dei PCM è finalizzato alla mitigazione del surriscaldamento dell'ambiente interno di un container non abitativo, destinato al trasporto e allo stoccaggio di componenti tecnologici termicamente sensibili. L'obiettivo progettuale, definito in accordo con il committente, consiste nel mantenere la temperatura interna al di sotto di 30 °C anche in condizioni esterne particolarmente gravose, come quelle tipiche dei climi desertici, caratterizzati da elevate escursioni termiche giornaliere e forti sollecitazioni radiative.

Per valutare e modellare in modo accurato il comportamento termico del sistema, è essenziale comprendere i principali meccanismi di scambio di energia che avvengono nel dominio fisico considerato. Questi includono la conduzione nei materiali solidi (pareti del container, pannelli in polipropilene e PCM), la convezione dell'aria all'interno del volume confinato, lo scambio radiativo con l'ambiente esterno e l'effetto di accumulo latente legato alla transizione di fase dei PCM. Ciascuno di questi fenomeni gioca un ruolo differente nella dinamica termica del sistema e contribuisce in modo più o meno rilevante alla determinazione del bilancio energetico globale.

Conduzione termica

La conduzione è il fenomeno fisico dominante nei materiali solidi. Essa regola la propagazione del calore, in particolare:

- dalle superfici esterne irradiate verso l'interno del container;
- all'interno dei pannelli sandwich in polipropilene;
- attraverso il PCM durante i regimi di pre- e post- transizione.

In regime stazionario, il flusso di calore si descrive mediante la *legge di Fourier*:

$$q = -k\frac{dT}{dx}$$

[43]

dove k rappresenta la conducibilità termica [W/m·K], grandezza che varia significativamente tra i diversi materiali impiegati. Questa disomogeneità comporta resistenze termiche differenziate lungo le superfici e tra i pannelli.

Per una trattazione generale e in condizioni transitorie, la temperatura in un corpo solido è descritta dalla *forma differenziale dell'equazione del calore*:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q$$

[43]

Dove il termine Q rappresenta un'eventuale sorgente interna di calore oppure, nel caso di modelli accoppiati, l'energia termica immagazzinata dal materiale a cambiamento di fase durante la transizione, modellata come contributo distribuito alla variazione temporale del campo termico. Questa equazione parabolica descrive la diffusione termica nel tempo e nello spazio, ed è importante notare che la stabilità numerica e l'accuratezza della simulazione dipendono fortemente dal corretto trattamento di questa equazione, soprattutto nella fase di accoppiamento con la transizione di fase del PCM.

Un parametro utile per valutare la risposta termica di una parete è il *numero di Biot:*

$$Bi = \frac{h}{k}L_c$$

[44]

dove:

- h è il coefficiente di scambio termico con l'esterno [W/m²·K];
- L_c è la lunghezza caratteristica del solido considerato [m].

Valori di Bi≪1 indicano che la temperatura è pressoché uniforme all'interno del corpo, condizione approssimabile nel caso dei pannelli in polipropilene sottili.

Convezione naturale dell'aria interna

In un volume chiuso come quello di un container, il trasporto di calore avviene anche tramite convezione naturale, innescata dalla stratificazione termica interna. L'aria più calda, a contatto con le pareti irradiate, tende a salire, instaurando moti convettivi naturali a basso numero di Reynolds, tipicamente stazionari in assenza di ventilazione forzata.

La valutazione dell'intensità della convezione avviene tramite il *numero di Rayleigh*:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

e il *numero di Nusselt*, che esprime l'efficienza dello scambio convettivo rispetto a quello puramente conduttivo:

$$Nu = C \cdot Ra^n$$

[44]

dove:

- g è l'accelerazione gravitazionale,
- β è il coefficiente di espansione termica,
- ν è la viscosità cinematica,
- α è la diffusività termica,
- T_s *e* T_∞ sono rispettivamente la temperatura della superficie e dell'aria ambiente,
- L è la lunghezza caratteristica del sistema.

Il valore di Nu consente di stimare il coefficiente di scambio convettivo interno h, utilizzato per calcolare il flusso:

$$q_{connv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

In sistemi a geometria semplice e flussi laminari (come nel caso in esame), la convezione naturale fornisce un contributo modesto ma continuo. In ambienti reali, anche piccole variazioni del coefficiente di scambio convettivo, possono influire significativamente sulla distribuzione termica, se non opportunamente bilanciate dall'effetto tampone dei PCM. In assenza di ventilazione forzata, la convezione è limitata e il raffreddamento dell'aria interna dipende fortemente dall'efficacia dell'accumulo termico dei pannelli PCM.

Irraggiamento solare e scambi termici con l'esterno

L'irraggiamento solare diretto rappresenta la principale causa di surriscaldamento delle superfici esterne del container; in un contesto desertico come quello analizzato, il tetto in particolare, può raggiungere temperature molto elevate durante le ore centrali della giornata. Lo scambio radiativo netto con l'ambiente si esprime con la *legge di Stefan–Boltzmann*:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{amb}^4)$$

[45]

dove:

- ε è l'emissività della superficie (tipicamente tra 0.85 e 0.95 per vernici opache);

- $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m²·K⁴ è la costante di Stefan-Boltzmann;

- T_s e T_{amb} sono le temperature assolute della superficie e dell'ambiente esterno.

A questo si aggiunge l'assorbimento diretto della radiazione solare, modellato con:

$$q_{sol} = \alpha_s \cdot G$$

dove:

- α_s è l'assorbanza della superficie (tipicamente 0,6-0,9 per vernici scure);
- G è l'irraggiamento solare incidente [W/m²].

Le proprietà ottiche dei materiali, in particolare l'emissività e l'assorbanza solare, influenzano profondamente il bilancio energetico del container. Valori elevati di α_s favoriscono l'assorbimento solare, mentre un'alta ε facilita il raffreddamento radiativo notturno. In definitiva, i due contributi q_{rad} e q_{sol} combinati, determinano l'input termico giornaliero che il sistema deve compensare attraverso l'accumulo latente. I pannelli contenenti PCM, integrati nelle pareti, agiscono quindi come sistema tampone, assorbendo una quota significativa del calore in ingresso e contribuendo a mantenere la temperatura interna entro limiti di sicurezza.

Transizione di fase e capacità termica apparente

Il cuore del comportamento termico dei PCM è rappresentato dalla transizione di fase solido-liquido. Durante questo processo, l'energia immagazzinata sotto forma di calore latente di fusione non aumenta la temperatura, ma viene interamente utilizzata per modificare la struttura molecolare del materiale. Questo comportamento può essere modellato attraverso il concetto di *capacità termica apparente*, che introduce un picco in corrispondenza della temperatura di transizione:

$$c_{app}(T) = c_s + \frac{H}{\Delta T_m} \quad [46]$$

dove:

- c_{app} è la capacità termica apparente [J/kg·K];
- c_s è la capacità termica del PCM in fase solida [J/kg·K];
- H è il calore latente di fusione [J/kg];
- ΔT_m è l'intervallo di temperatura in cui avviene la transizione di fase.

L'elevata capacità termica apparente durante la transizione consente al sistema di "tamponare" gli sbalzi termici e rallentare l'innalzamento della

temperatura interna del container. Questa modellazione permette inoltre di trattare il PCM come materiale continuo con proprietà variabili in funzione della temperatura, semplificando l'integrazione nelle simulazioni.

L'energia accumulabile per unità di massa è pari a:

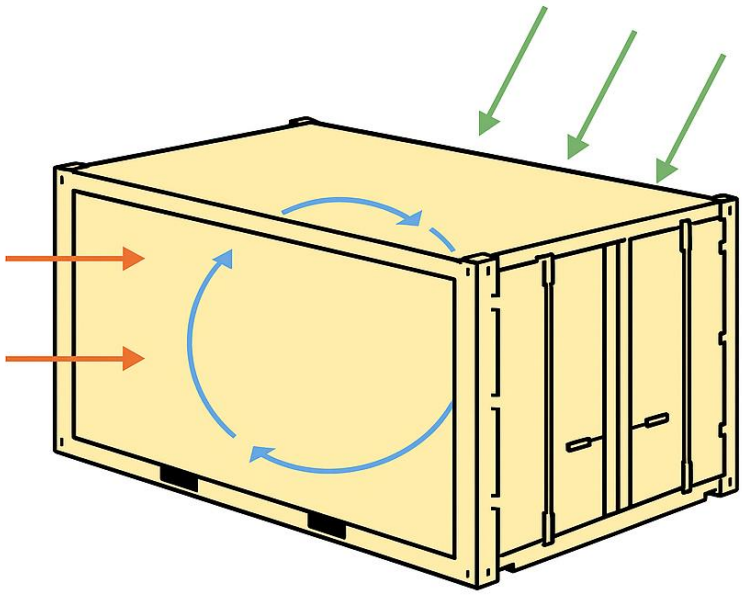
$$Q_{latente} = m \cdot H$$

dove:

- M è la massa del PCM.

La scelta del PCM con temperatura di fusione prossima al valore soglia desiderato (ad es. 21 °C o 25 °C) consente di ottimizzare la protezione dei materiali stoccati, evitando il superamento del limite termico senza ricorrere a sistemi attivi di raffrescamento.

In condizioni reali, i meccanismi di scambio termico descritti non agiscono in modo indipendente, ma interagiscono simultaneamente.



Conduzione termica nelle pareti e nei pannelli

Convezione naturale dell'aria interna

Irraggiamento solare e scambi termici con l'ambiente esterno

Figura 4 - Rappresentazione semplificata del comportamento termico del container durante l'esposizione alle condizioni ambientali.

La conduzione governa il flusso termico attraverso l'involucro del container, la convezione favorisce la ridistribuzione all'interno del volume d'aria, mentre l'irraggiamento solare rappresenta il principale carico termico esterno. In questo contesto, il PCM si comporta come un sistema tampone passivo, modulando la risposta dinamica del sistema, assorbendo parte del calore durante le ore di picco e riducendo la variazione della temperatura interna.

Nel presente lavoro, tuttavia, l'analisi è stata condotta considerando la temperatura massima giornaliera come valore rappresentativo per ciascun giorno simulato, al fine di verificare la capacità del sistema di contenere i valori di temperatura entro i limiti prestazionali richiesti nei momenti di massimo stress termico.

4.2.2 Definizione del modello fisico e numerico

4.2.2.1 Geometria del container e modellazione della stratigrafia

Il container oggetto di studio è un modulo monoblocco in acciaio destinato allo stoccaggio di apparecchiature tecnologiche sensibili al surriscaldamento. Al suo interno si presenta come un ambiente a volume unico, privo di suddivisioni spaziali o vani tecnici. I dispositivi elettronici e informatici ospitati al suo interno sono stati considerati termicamente ininfluenti, in quanto trascurabili rispetto alle dinamiche globali di scambio termico tra involucro ed esterno.

Figura 5 - Vista frontale e vista posteriore del container.

Figura 6 - Vista laterale e dettaglio vista superiore del container.

Per la modellazione tridimensionale è stato utilizzato il software DesignBuilder, che ha permesso di rappresentare l'intera geometria del container in scala reale, definendone con precisione le superfici opache, le aperture e le sub-superfici. Queste ultime rappresentano porzioni di involucro escluse dall'integrazione dei pannelli contenenti PCM, per ragioni funzionali o strutturali.

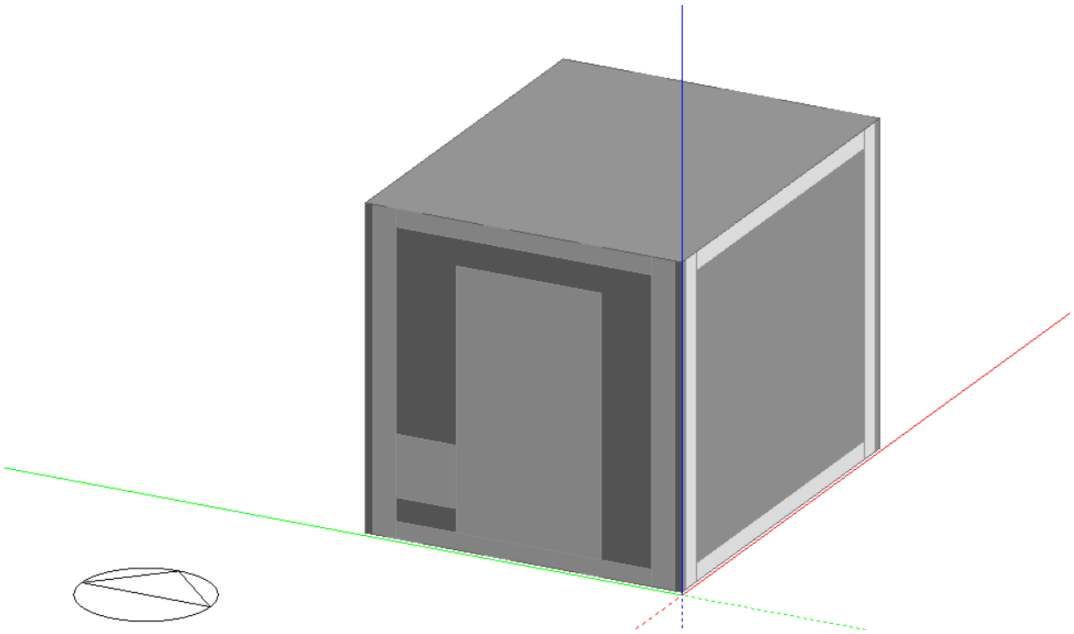


Figura 7 - Vista frontale del container modellato tridimensionalmente in Design Builder.

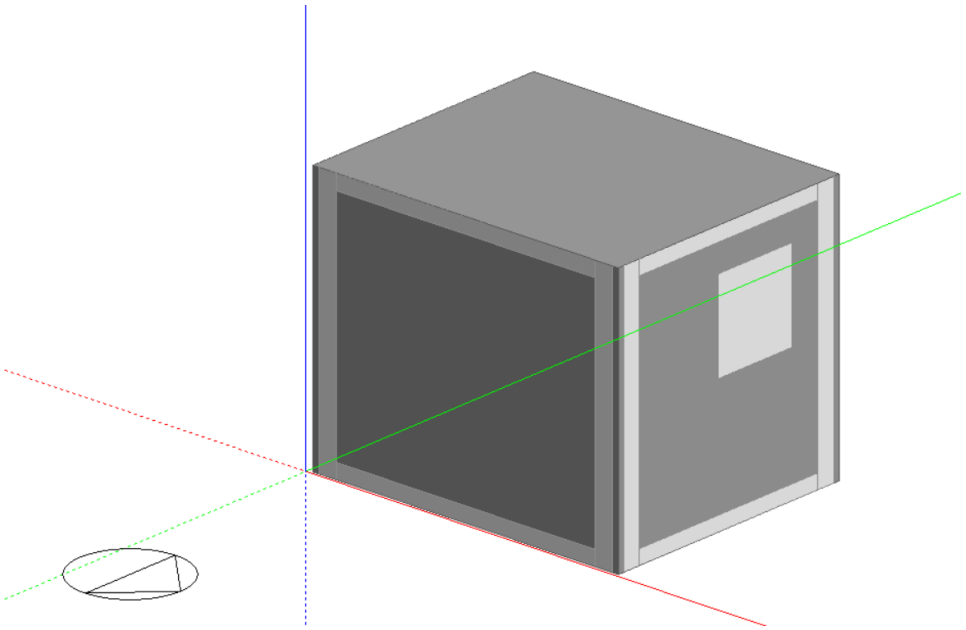


Figura 8 - Vista posteriore del container modellato tridimensionalmente in Design Builder.

Geometria complessiva del container

Il container ha dimensioni esterne pari a:

- 2990 mm di lunghezza;
- 2438 mm di larghezza;
- 2438 mm di altezza.

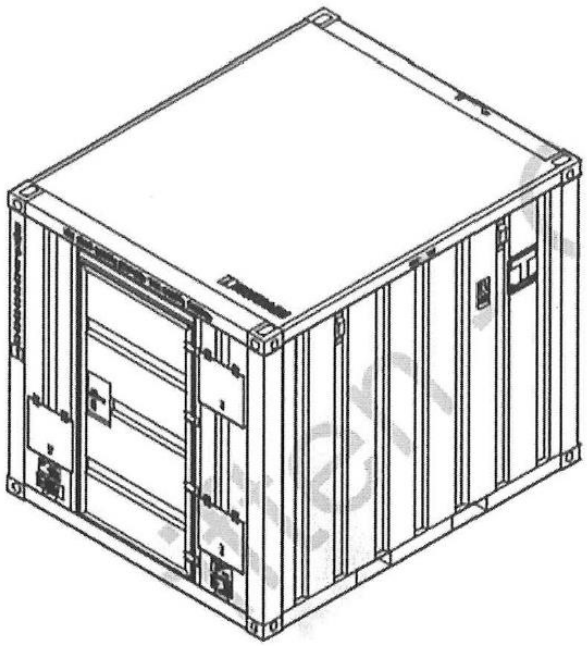


Figura 9 – Geometria del container.

Superfici e sub-superfici

Durante la definizione dell'involucro, sono state identificate le seguenti sub-superfici, in cui non sono stati previsti pannelli con PCM:

- il quadro elettrico in basso a sinistra del fronte;
- l'apertura per l'unità di condizionamento posta sul lato posteriore;
- le cornici strutturali metalliche lungo i bordi orizzontali e verticali del container (visibili anche nelle fotografie reali del tetto);
- l'intero pavimento, poiché inaccessibile per motivi costruttivi e funzionali.

Queste aree sono state modellate come sub-superfici opache all'interno del software, così da non includerle nei calcoli di accumulo latente nelle simulazioni con PCM. Le **Figure 10** e **11** mostrano le due viste del container con le sub-superfici evidenziate dalle linee di colore blu; la linea azzurra sottolinea la presenza della porta.

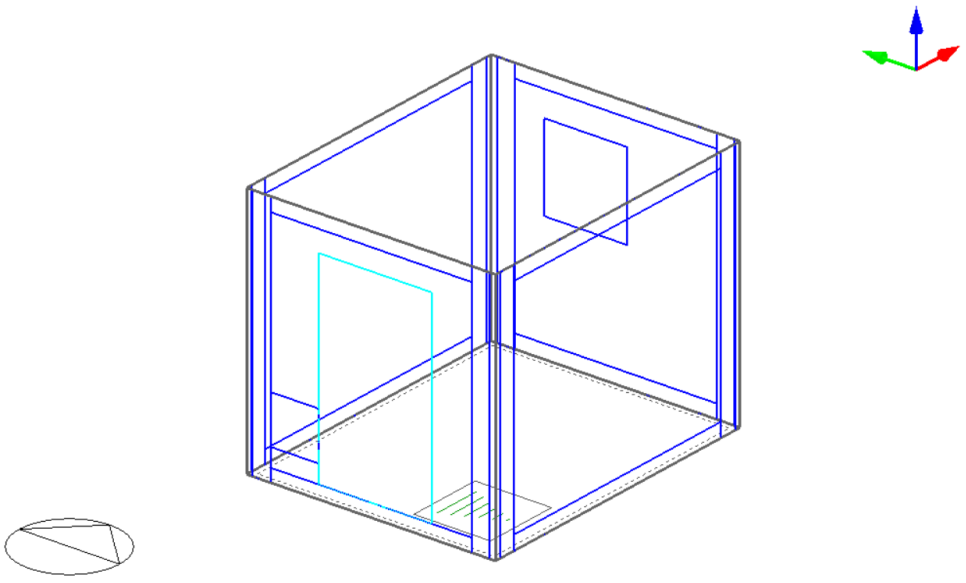


Figura 10 - Vista frontale del container modellato in Design Builder, con evidenza delle sub-superfici in blu, non trattate con PCM.

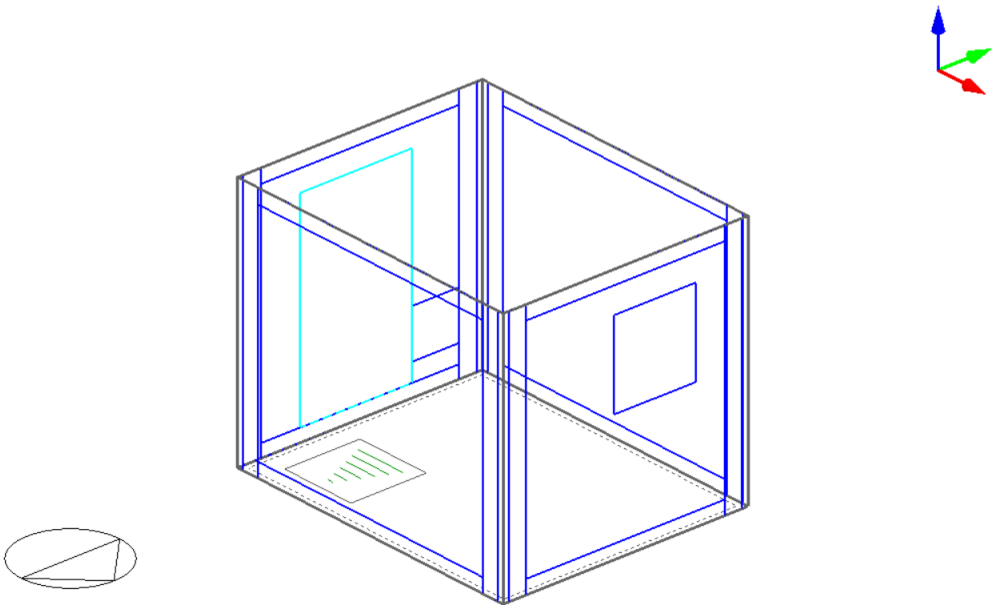


Figura 11 - Vista posteriore del container modellato in Design Builder, con evidenza delle sub-superfici in blu, non trattate con PCM.

Per analizzare l'incidenza dell'irraggiamento solare sull'involucro del container, è stato generato un diagramma solare (Sun Path) mediante il software DesignBuilder. Come mostrato in **Figura 12**, il tracciato solare evidenzia che le superfici più esposte al carico termico esterno sono la parete laterale destra (rispetto al fronte) e la copertura. Questa analisi è stata utile per comprendere la distribuzione dei flussi termici in ingresso e valutare l'efficacia dell'integrazione dei pannelli contenenti PCM su tutte le superfici opache dell'involucro, ad eccezione delle sub-superfici precedentemente elencate.

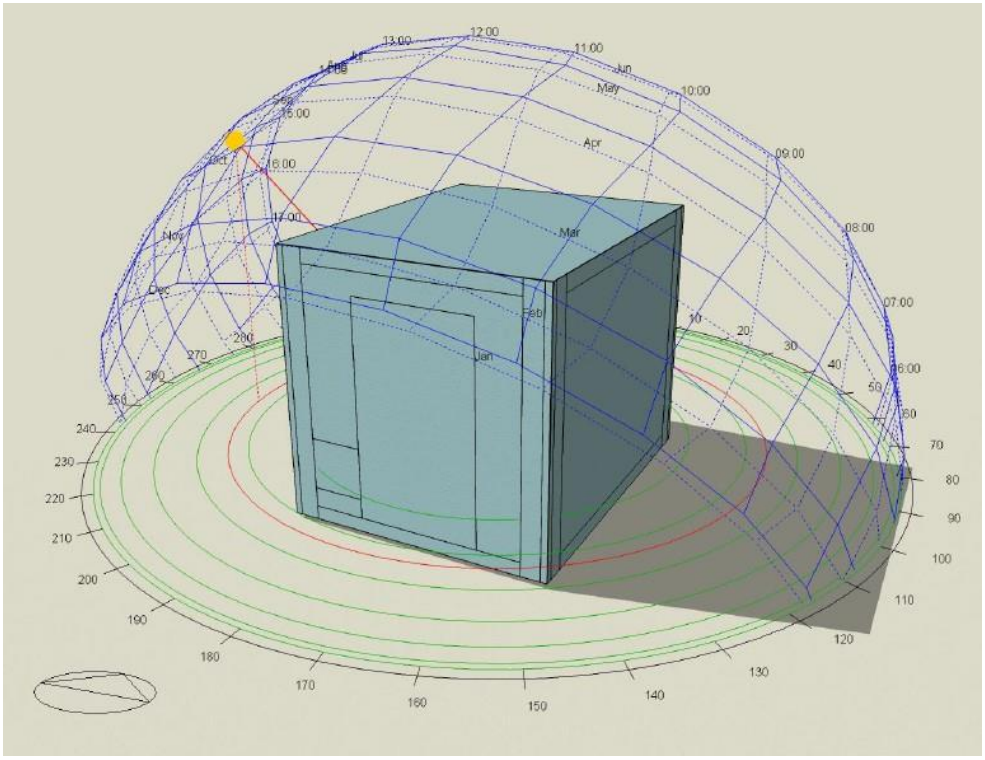


Figura 12 - Diagramma solare (Sun Path) generato con DesignBuilder.

Stratigrafia dell'involucro – configurazione senza PCM.

La simulazione iniziale considera il container privo di qualunque sistema di accumulo termico (PCM), rappresenta quindi il caso di riferimento. Tale configurazione viene utilizzata come base per il confronto con le successive versioni dotate di pannelli termici in polipropilene contenenti materiali a cambiamento di fase. Nella simulazione di riferimento, le superfici opache dell'involucro sono caratterizzate da una stratigrafia semplice, composta da materiali strutturali convenzionali. In particolare:

le pareti verticali, il tetto e i fronti presentano:

- strato interno in legno duro da 15 mm;
- strato esterno in acciaio da 7 mm.

Il pavimento è invece costituito da:

- strato superiore in legno duro da 20 mm;
- strato inferiore in acciaio da 7 mm.

La modellazione della stratigrafia è stata effettuata per ogni superficie opaca tramite l'editor dei materiali di DesignBuilder, e associata ai corrispondenti componenti geometrici. La **Figura 13** mostra schematicamente la configurazione stratigrafica utilizzata per le pareti, mentre la **Figura 14** riporta quella relativa al pavimento.

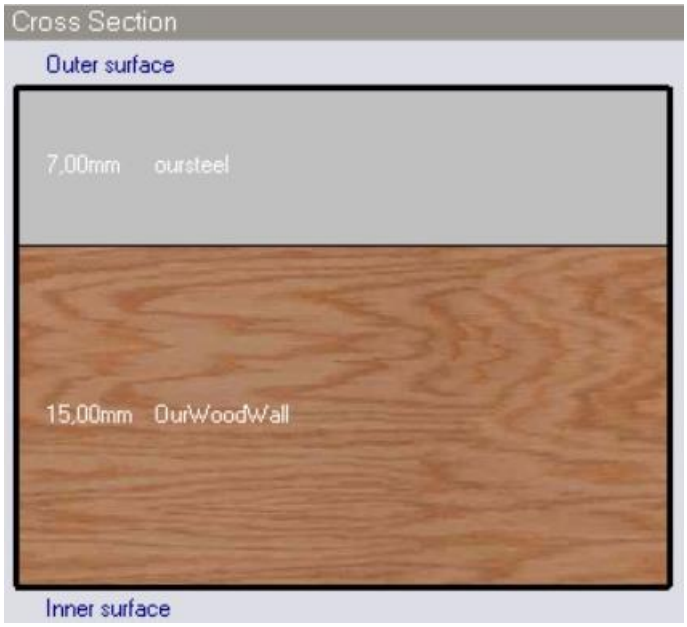


Figura 13 - Stratigrafia semplificata delle pareti verticali e del tetto: legno interno (15 mm) + acciaio esterno (7 mm).

Figura 14 - Stratigrafia semplificata del pavimento: legno superiore (20 mm) + acciaio inferiore (7 mm).

4.2.2.2 Materiali a cambiamento di fase selezionati

Nel caso studio analizzato, sono stati impiegati materiali a cambiamento di fase appartenenti alla categoria degli idrati di sale inorganici, sviluppati e forniti dalla startup MELT. Questi PCM sono stati progettati specificamente per applicazioni in ambito edilizio-passivo e risultano idonei per attenuare le oscillazioni termiche interne del container, contribuendo a contenere la temperatura al di sotto dei limiti critici.

In particolare, sono state selezionate due formulazioni distinte, identificate commercialmente come A21 e A25, caratterizzate da una temperatura di transizione pari rispettivamente a 21 °C e 25 °C, considerate ottimali per mantenere condizioni termo-igrometriche favorevoli all'interno dell'involucro, anche in assenza di sistemi attivi di climatizzazione. Altro aspetto caratteristico di questi PCM, notevolmente influente sulla scelta, consiste nella loro innocuità ambientale: classe di pericolosità pari a WGK 1, equivalente a una soluzione fisiologica salina.

Entrambe le versioni mostrano un elevato calore latente di transizione, pari a circa 160–170 kJ/kg e un comportamento termico efficiente grazie alla buona conducibilità intrinseca (circa 0,5 W/m·K), che facilita l'assorbimento e la redistribuzione del calore durante i cicli di carico e scarico termico. I due PCM sono caratterizzati inoltre da stabilità ciclica e buona efficienza energetica nell'intervallo operativo di interesse (circa 15–35 °C). I materiali sono stati formulati in modo da ridurre al minimo fenomeni indesiderati quali il sovraraffreddamento e la segregazione, problematiche comuni negli idrati di sale convenzionali [4].

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla compatibilità con sistemi di incapsulamento prefabbricati, in particolare i pannelli rigidi in polipropilene che saranno descritti nel paragrafo successivo. Grazie a queste caratteristiche, i materiali selezionati si prestano bene ad un'integrazione diretta nel pacchetto stratigrafico delle pareti del container, assicurando un buon contatto termico con l'ambiente interno e minimizzando le resistenze al trasferimento di calore [47].

È importante precisare che le proprietà termofisiche riportate si riferiscono al pannello composito finito, costituito da 79% in massa di PCM attivo e 21% di matrice in polipropilene, così come effettivamente utilizzato nei pannelli sandwich applicati alle superfici del container [48]. Di conseguenza, i valori di densità, capacità termica specifica e conducibilità termica risultano mediati tra i due componenti, e risultano identici per le due formulazioni (A21 e A25), mentre a variare è il calore latente associato al differente intervallo di transizione.

Nella **Tabella 9** sono riportate le proprietà termofisiche medie, ottenute attraverso modellazione numerica su pannelli compositi contenenti il 79% in massa di PCM e il 21% di polipropilene, così come effettivamente utilizzato nei pannelli sandwich applicati alle superfici del container. Di conseguenza, i valori di densità, capacità termica specifica e conducibilità termica risultano mediati tra i due componenti, e risultano identici per le due formulazioni (A21 e A25), mentre a variare è il calore latente associato al differente intervallo di transizione. Questi valori riflettono un equilibrio tra inerzia termica, velocità di propagazione del calore e stabilità meccanica, risultando adeguati all'impiego in strutture edilizie modulari sottoposte a sollecitazioni termiche cicliche.

Tabella 9 - Proprietà termofisiche medie dei pannelli compositi in polipropilene e PCM (79% PCM, 21% PP), per le due varianti a 21 °C e 25 °C.

Proprietà	PP+A21 (21 °C)	PP+A25 (25 °C)	Unità di misura
Densità media	1439	1439	kg/m³
Capacità termica specifica	2,076	2,076	kJ/kg·K
Conducibilità termica	1,03	1,03	W/m·K
Calore latente di fusione	169	172	kJ/kg
Intervallo di transizione	19–23	23–27	°C

Per una migliore comprensione del comportamento termico dei materiali selezionati, si riporta in **Figura 15** l'andamento dell'entalpia in funzione della temperatura per entrambe le formulazioni.

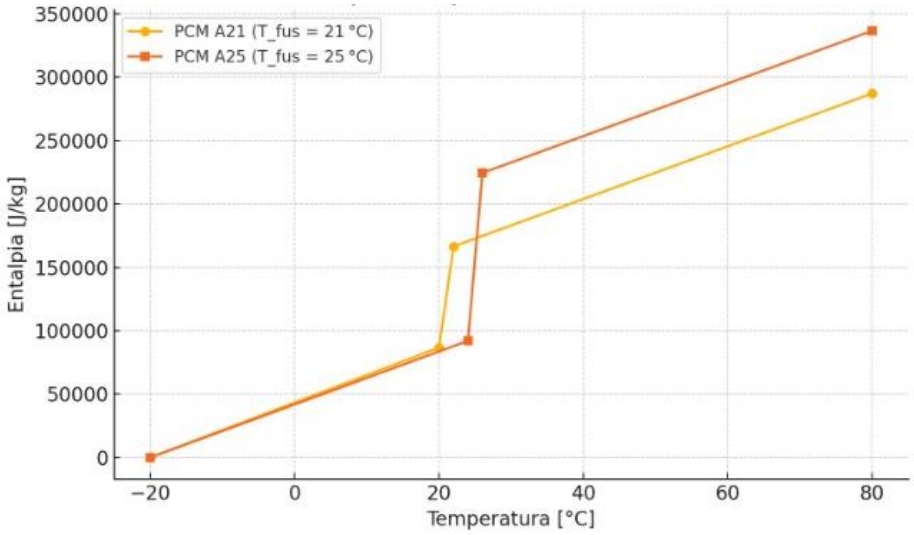


Figura 15 - Andamento entalpia-temperatura dei due PCM selezionati (A21 e A25).

Le curve entalpia-temperatura indicano che il salto entalpico significativo per il materiale A21 avviene tra 20 °C e 22 °C, mentre per il materiale A25 si colloca tra 24 °C e 26 °C. Al di fuori di tali intervalli, entrambi i PCM si comportano come solidi con capacità termica sensibilmente più bassa rispetto alla fase di transizione, contribuendo a minimizzare i trasferimenti termici indesiderati nelle fasi notturne o nelle condizioni di sottoriscaldamento. Il plateau evidenziato dalla curva rappresenta il contributo dell'energia immagazzinata senza aumento di temperatura e mostra la diversa collocazione della transizione per A21 e A25. Tale caratteristica consente di valutare quale dei due materiali offra prestazioni migliori in funzione delle specifiche condizioni operative del sistema.

4.2.2.3 Pannelli in polipropilene e integrazione del PCM

Per l'integrazione dei materiali a cambiamento di fase (PCM) all'interno del container, sono stati impiegati pannelli rigidi prefabbricati in polipropilene, appositamente sviluppati per garantire una distribuzione termica omogenea, un efficace incapsulamento e una buona compatibilità meccanico-chimica con il materiale attivo. Questi pannelli, già ottimizzati in una precedente fase di

sperimentazione, si presentano come elementi alveolari a struttura interna tubolare, nei quali viene iniettato il PCM in fase liquida e successivamente sigillato in modo permanente.

La struttura del pannello è costituita per il 21% in massa da polipropilene (PP) e per il 79% da PCM. Tale configurazione consente di unire la flessibilità e la leggerezza del PP con l'elevata capacità di accumulo energetico del materiale attivo. Il polipropilene impiegato come matrice strutturale dei pannelli risulta interamente riciclato, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale complessivo del sistema e a promuovere una maggiore sostenibilità nei cicli produttivi. Il polipropilene risulta particolarmente adatto per questo tipo di applicazioni grazie alla sua inerzia chimica, alla buona resistenza alla temperatura e alla facilità di lavorazione industriale, oltre che per la sua economicità. La configurazione interna è mostrata nella figura seguente:

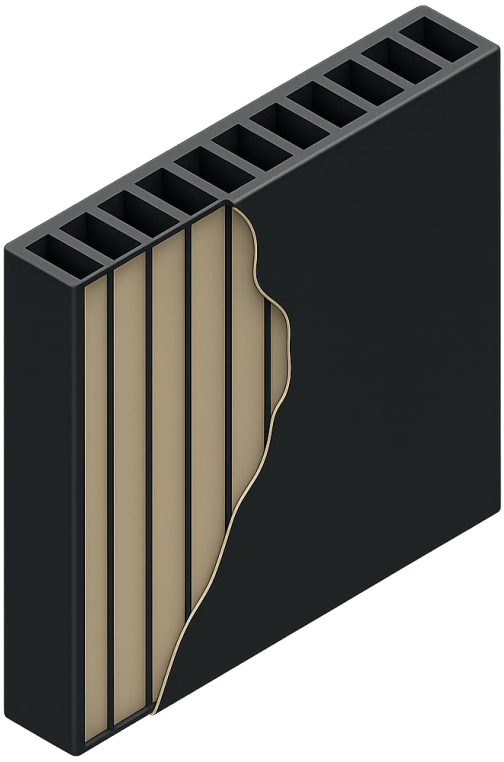


Figura 16 - Schema della struttura interna del pannello in polipropilene, con canali verticali.

A conferma della geometria adottata, la **Figura 17** mostra una vista reale della sezione di un pannello in PP, in cui si notano chiaramente gli alveoli vuoti prima dell'introduzione del PCM e la configurazione tubolare longitudinale.

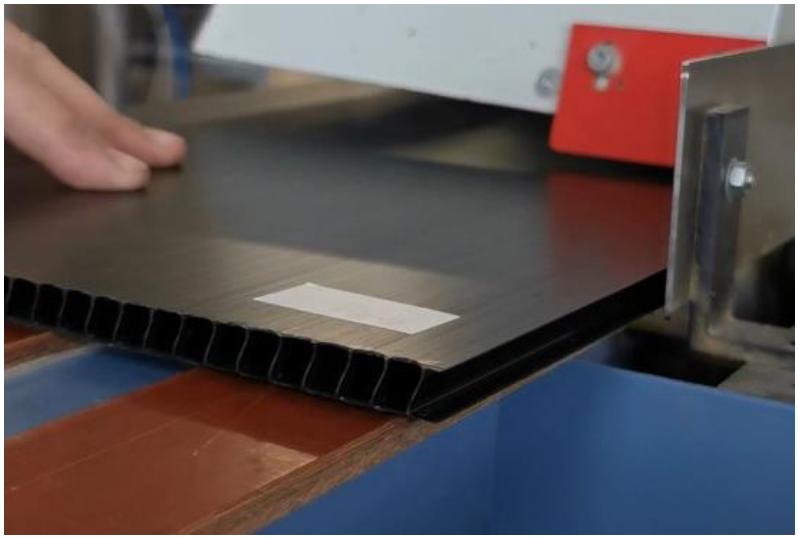


Figura 17 - Vista in dettaglio della sezione di un pannello in PP: si notano gli alveoli vuoti (prima dell'introduzione del PCM) e la struttura tubolare.

All'interno del modello utilizzato per la simulazione, le superfici del container ricoperte dai pannelli in polipropilene con PCM sono state descritte tramite una stratigrafia multilayer, rappresentativa della configurazione reale. Dall'interno verso l'esterno, la sequenza risulta la seguente:

- 15 mm di legno (rivestimento interno);
- 7 mm di acciaio (struttura del container);
- 10 mm di pannello in PP contenente PCM (21% PP, 79% PCM);
- 25 mm di schiuma poliuretanica isolante;
- 2 mm di rivestimento esterno in polipropilene con fibra di vetro.

Quest'ultimo strato, sebbene simulato nel software come PP+fibra di vetro, è termicamente equivalente al materiale effettivamente impiegato nel prototipo fisico, ovvero la vetroresina (Glass Reinforced Plastic, GRP). Si tratta di un materiale composito costituito da una matrice polimerica (es. resina poliestere o

vinilestere) rinforzata con fibre di vetro, largamente utilizzato per applicazioni edilizie e industriali grazie alla sua resistenza meccanica, alla leggerezza e alla bassa conducibilità termica [47].

Figura 18 - Stratigrafia delle superfici ricoperte dai pannelli in polipropilene con PCM, utilizzata nel modello di simulazione.

I pannelli adottati nel presente lavoro sono stati progettati con uno spessore di circa 10 mm, adeguato a garantire un buon compromesso tra capacità di accumulo termico, rigidità strutturale e compattezza. I pannelli vengono prodotti a partire da fogli di polipropilene estruso, accoppiati e saldati per formare strutture a canali paralleli longitudinali, ideali per l'introduzione e il confinamento stabile del PCM. Le prove sperimentali di laboratorio riportate nella tesi di Hahn [47] hanno evidenziato come l'iniezione del PCM liquido negli alveoli avvenga mediante un'apposita macchina automatizzata, in grado di controllare pressione e volume del fluido termicamente attivo. In seguito, i pannelli vengono sottoposti a un processo di sigillatura termica per impedire ogni possibile fuoriuscita del materiale durante le transizioni di fase.

Il processo di sigillatura è stato oggetto di ottimizzazione sperimentale. Inizialmente, si prevedeva l'impiego esclusivo di barrette in teflon; tuttavia, si è riscontrato che questo metodo non assicurava la completa tenuta meccanica nel

lungo periodo. Per questo motivo, è stata sviluppata una soluzione combinata come si può vedere in **Figura 19**: una barra di teflon viene inserita all'interno di una guida in acciaio che funge da supporto di contenimento, migliorando la distribuzione della pressione e della temperatura durante la fase di sigillatura [47].

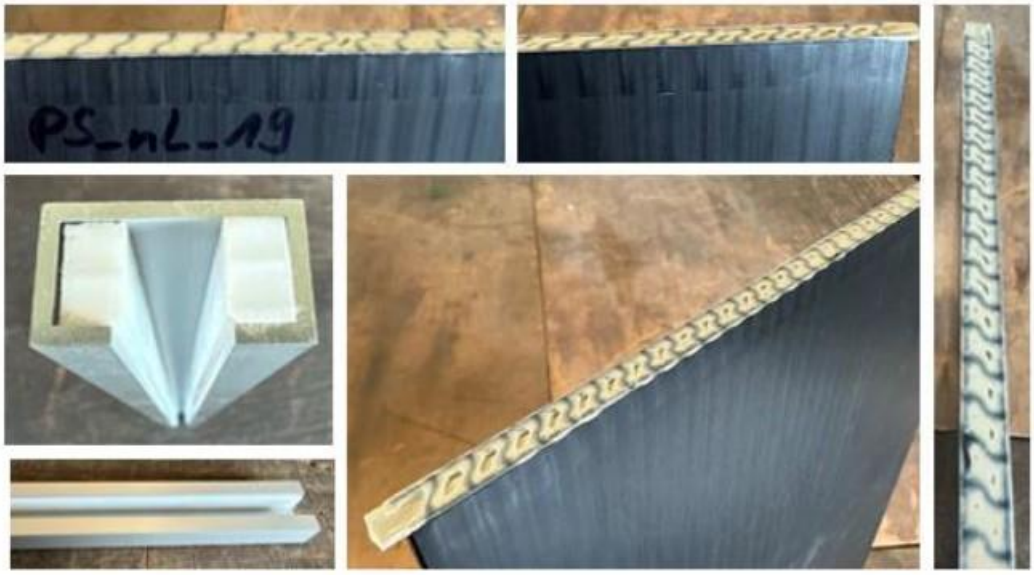


Figura 19 - Dettaglio della sigillatura ottimizzata: la barra in teflon (bianca) è inserita in un profilo in acciaio [47].

La fase di riempimento e sigillatura dei pannelli è realizzata mediante un processo robotizzato sviluppato internamente da MELT, che consente un'elevata precisione e adattabilità su scala industriale. Tale tecnologia, mostrata nelle immagini seguenti, attualmente in fase di brevettazione, rappresenta un elemento distintivo rispetto alle soluzioni tradizionali disponibili sul mercato, migliorando la qualità del prodotto finito e rendendo ripetibile il processo:

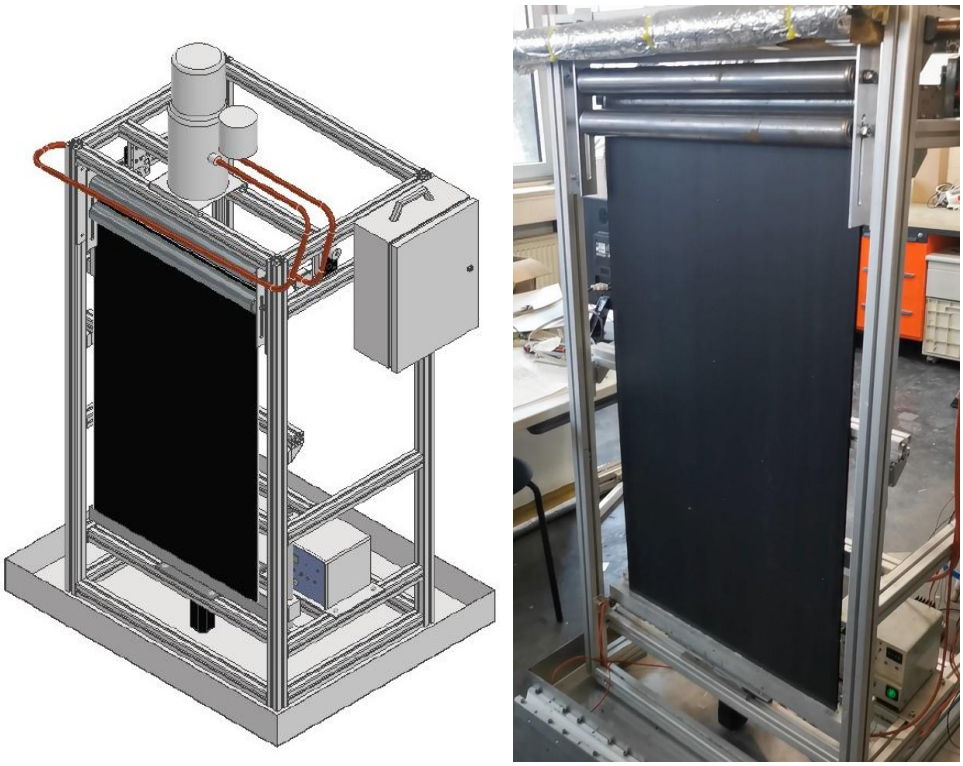


Figura 20 - Modello CAD [47] e vista fotografica del prototipo di macchina sviluppata per l'introduzione e la sigillatura del PCM nei pannelli in PP.

Per contestualizzare meglio le scelte progettuali adottate nel presente lavoro, si riporta nella **Tabella 10** un confronto tra i pannelli sviluppati da MELT e quelli proposti da altri produttori commerciali. La comparazione evidenzia le differenze in termini di materiali impiegati, caratteristiche geometriche e performance termiche dichiarate.

Tabella 10 - Confronto tra pannelli PCM MELT e altri sistemi disponibili sul mercato.

Caratteristiche	MELT	Va-Q-tec	Axio-Therm
Supporto	Polipropilene + PCM	Film in alluminio flessibile	Polimero o alluminio stampato
Tipo di pannello	Rigido, autoportante	Flessibile, richiede supporto	Flessibile o rigido
Integrazione edilizia	Diretta nei pacchetti edilizi	Richiede incapsulamento aggiuntivo	Richiede incapsulamento
Formati disponibili	Standard e personalizzati	Formati limitati	Formati variabili
Montaggio	Viti, incastro o incollaggio	Collocazione manuale	Collocazione manuale

Stabilità dimensionale	Alta (non deformabile)	Bassa	Media
Applicabilità prefabbricati	Alta	Limitata	Limitata

Come si può osservare, la soluzione adottata da MELT offre un equilibrio ottimale tra compattezza, capacità di accumulo termico e facilità di integrazione, risultando particolarmente adatta per applicazioni modulari come quelle studiate nel presente caso.

Nelle fotografie reali seguenti si può notare uno dei moduli destinati alla copertura della porta del container e altri esemplari di pannelli, già dimensionati per l'installazione in cantiere:

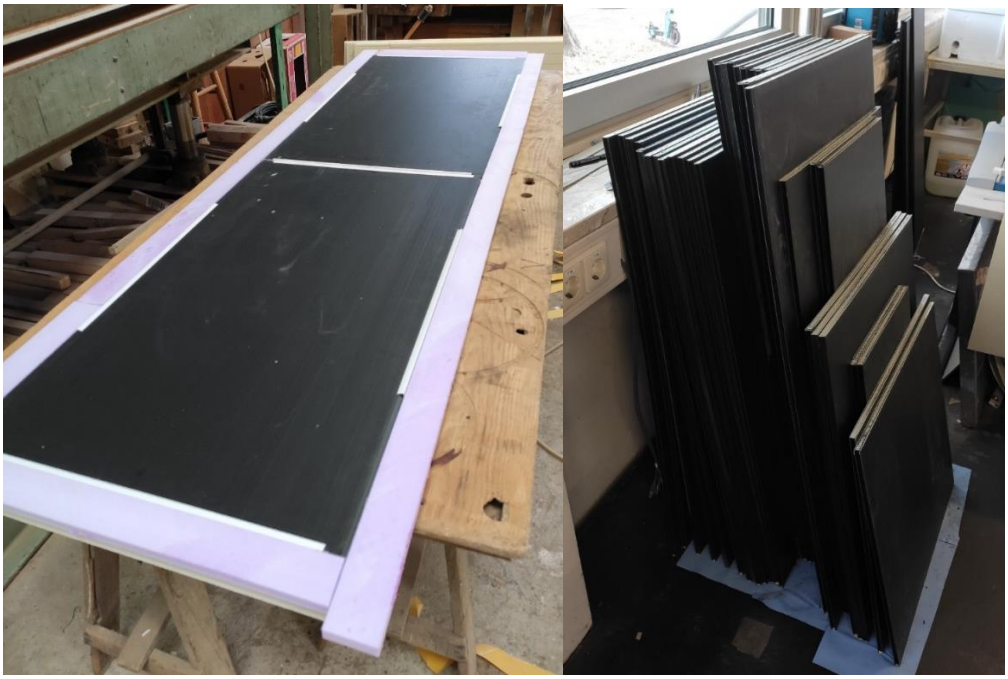


Figura 21 - Pannello in polipropilene già riempito, sigillato e implementato sulla porta del container; serie di pannelli in PP-PCM pronti per l'installazione presso il laboratorio MELT.

Il pannello così ottenuto offre diversi vantaggi funzionali: il confinamento del PCM in celle chiuse riduce il rischio di perdite anche in condizioni critiche, mentre la struttura modulare ne consente un'installazione semplice e veloce sulle pareti e sul soffitto del container. È importante ricordare che, come già illustrato nel paragrafo dedicato alla geometria del container (par. 4.2.2.1), i pannelli non sono stati installati su alcune sub-superfici, quali i profili di bordo (cornici), le zone

inferiori (pavimento) e i punti di connessione impiantistica, per evitare interferenze funzionali e garantire la corretta apertura/chiusura dei vani tecnici.

La progettazione della distribuzione dei pannelli è stata ottimizzata in modo da massimizzare l'interazione con i flussi termici in ingresso, posizionando il materiale attivo lungo le pareti laterali e sul tetto, dove l'irraggiamento solare e le dispersioni termiche risultano più rilevanti. In questo modo, è stato possibile sfruttare pienamente l'effetto di smorzamento termico garantito dai PCM, contribuendo a limitare le escursioni di temperatura all'interno del volume utile del container.

4.2.2.4 Condizioni iniziali e al contorno nel modello termico

Nella modellazione numerica dei fenomeni termici all'interno del container, un aspetto fondamentale per l'affidabilità delle simulazioni riguarda la corretta definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno, che specificano l'evoluzione della temperatura nel dominio di calcolo. Tali condizioni rappresentano vincoli matematici fondamentali nella soluzione dell'equazione della conduzione del calore e sono trattate in modo sistematico nella letteratura scientifica di riferimento [43].

Condizione iniziale

La condizione iniziale consiste nell'assegnare una distribuzione di temperatura all'istante iniziale t = 0 sull'intero dominio fisico. Matematicamente, si esprime come:

$$T(r,0) = F(r) \quad \forall\, r \in D$$

dove r è il vettore posizione e D rappresenta il dominio geometrico del sistema (in questo caso, l'intero container con pareti e volume d'aria).

Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno, invece, determinano come la temperatura o il flusso termico si comportano sulle superfici esterne ed interne del dominio durante l'intervallo di simulazione. Esse si suddividono in tre tipologie principali, ciascuna associata a specifici fenomeni fisici osservati nel caso studio.

Condizione al contorno di Dirichlet (I tipo)

Questa condizione impone il valore noto della temperatura su una superficie. È utilizzata, ad esempio, quando si vuole simulare una parete che mantiene una temperatura costante:

$$T(r,t) = f_i(r,t) \quad \forall\, r \in S_i, \forall\, t > 0$$

Un caso particolare è quello di temperatura costante T_o, indipendente da r e t. Nel modello in esame, questa condizione è stata applicata in modo selettivo per simulare vincoli ideali o semplificazioni di progetto.

Condizione al contorno di Neumann (II tipo)

In questo caso si impone il flusso termico entrante o uscente attraverso una superficie. In termini matematici:

$$n \cdot \nabla T(r,t) = f_i(r,t)$$

dove n è il versore normale alla superficie S_i.

Una condizione importante è il caso adiabatico, in cui il flusso termico attraverso la superficie è nullo:

$$n \cdot \nabla T(r,t) = 0$$

Condizione al contorno mista o di tipo Robin (III tipo)

Questa rappresenta la combinazione tra i due effetti precedenti e si applica, ad esempio, per modellare lo scambio termico convettivo tra una superficie e un fluido esterno a temperatura T_∞. L'equazione corrispondente è:

$$\eta_i\, n \cdot \nabla T(r,t) + h_i\, T(r,t) = f_i(r,t)$$

dove h_i è il coefficiente di scambio convettivo e η_i un coefficiente di proporzionalità (ad esempio η_i = k, la conducibilità). Se $f_i(r,t) = h_i\, T_\infty(t)$, si ottiene:

$$-q(r,t) + h_i\, T\infty(t) = f_i(r,t)$$

Questo tipo di condizione è stato impiegato per simulare le superfici esterne del container soggette a ventilazione naturale e irraggiamento, secondo le formulazioni standard descritte da Incropera e DeWitt [43].

Applicazione al caso studio

Nel modello implementato, le condizioni al contorno sono state assegnate con attenzione in base alla reale stratigrafia delle pareti e alle assunzioni semplificative adottate. Le pareti laterali e le estremità sono state modellate come superfici multistrato, applicando condizioni miste (di tipo Robin) che combinano lo scambio convettivo con l'ambiente esterno e l'irraggiamento solare. Anche il soffitto superiore è stato trattato con una condizione mista, con particolare attenzione all'incidenza della radiazione solare diretta durante i mesi estivi [47]. Il pavimento interno è stato invece considerato termicamente isolato, mediante una condizione di Neumann a flusso nullo (adiabatico), in quanto non sono presenti scambi significativi verso il suolo [47].

Lo strato contenente il PCM, situato esternamente rispetto alla parete metallica del container, è stato modellato come un livello conduttivo con proprietà termiche efficaci, ottenute come media ponderata tra quelle del polipropilene e del materiale a cambiamento di fase [48]. Il suo effetto tampone è stato valutato tramite l'analisi del profilo termico nell'intera stratigrafia.

L'involucro del container è stato considerato ermeticamente chiuso, privo di aperture, finestre o sistemi di ventilazione forzata, in modo da rappresentare un caso conservativo e penalizzante ai fini della simulazione. L'unica apertura presente, ovvero la porta d'accesso, è stata ipotizzata chiusa per l'intera durata dell'analisi [47]. Inoltre, non sono stati modellati dispositivi tecnologici o sorgenti di calore interne, in quanto ritenuti trascurabili. Le proprietà isolanti delle pareti sono state definite in dettaglio all'interno del software di simulazione, utilizzando le caratteristiche termofisiche dei materiali componenti [48].

Questa impostazione ha garantito una rappresentazione coerente dell'andamento termico giornaliero osservato nei risultati simulati.

5. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI

5.1 Premessa metodologica

L'analisi comparativa condotta in questo capitolo si basa sui risultati delle simulazioni numeriche svolte nel corso dello studio, con l'obiettivo di valutare

l’efficacia dei materiali a cambiamento di fase (PCM) nell’attenuare il surriscaldamento estivo all’interno di un container tecnologico, e di scegliere il PCM più idoneo. Il caso studio fa riferimento a un modulo containerizzato modellato tridimensionalmente tramite il software DesignBuilder, basato su motore EnergyPlus, riproducendo fedelmente geometria, materiali e proprietà termo-fisiche del sistema reale.

La simulazione ha considerato tre configurazioni principali:

- il container di riferimento, privo di pannelli PCM;
- container con PCM a 21 °C, ricoperto su tutte le superfici opache accessibili con pannelli in polipropilene contenenti un materiale a cambiamento di fase con transizione a 21 °C.
- Container con PCM a 25 °C, caratterizzato da un’analoga disposizione dei pannelli, ma con PCM di transizione a 25 °C.

Il periodo di simulazione analizza l’intera stagione estiva (giugno, luglio, agosto), durante la quale il rischio di surriscaldamento è massimo. I dati climatici orari (temperatura esterna, umidità, radiazione solare) sono stati inseriti nel modello tramite file meteo specifici per tre località:

- un’area desertica dell’Afghanistan (caso principale),
- la città di Monaco di Baviera (clima continentale temperato),
- e una località in Norvegia (clima freddo e umido).

I parametri monitorati comprendono le principali grandezze termoigrometriche rilevanti: temperatura dell’aria esterna (bulbo secco), temperatura interna operativa del container, temperatura radiante e umidità relativa. Tuttavia, per la valutazione delle prestazioni del sistema, si è scelto di considerare principalmente l’andamento della temperatura operativa interna, in quanto rappresentativa della percezione termica all’interno del volume abitabile. I risultati sono stati elaborati tramite fogli Excel, attraverso grafici orari e istogrammi, al fine di confrontare le tre configurazioni in termini di efficacia nel contenimento termico.

5.2 Risultati per il caso di studio in Afghanistan

L'area desertica dell'Afghanistan è stata selezionata come località di riferimento per l'analisi comparativa, in quanto rappresenta un contesto climatico particolarmente critico in termini di surriscaldamento estivo. L'obiettivo della simulazione è valutare in che misura i pannelli contenenti PCM siano in grado di mitigare le elevate temperature interne, garantendo condizioni termoigrometriche più favorevoli per lo stoccaggio di materiali tecnologici sensibili.

Le **Figure 22 e 23** mostra i risultati della simulazione oraria delle curve di temperatura per l'intero trimestre estivo (giugno–agosto), confrontando rispettivamente il container di riferimento (in acciaio e legno, privo di PCM) con le due configurazioni contenenti PCM a 21 °C e 25 °C. In entrambi i grafici è riportata anche la temperatura esterna di bulbo secco per confrontare l'andamento interno con le condizioni climatiche esterne.

La linea verde mostra la temperatura interna del container di riferimento senza l'uso di PCM o di altre misure di isolamento.

Il profilo della temperatura nel container senza PCM evidenzia picchi giornalieri, causati dalla radiazione solare, superiori ai 45 °C, con ampie fluttuazioni tra il giorno e la notte.

La curva azzurra per il PCM A21 e la curva arancio per il PCM A25, mostrano la curva prevista per il caso reale implementato. Le aree del container che non sono state ricoperte dai pannelli MELT a causa di restrizioni strutturali sono omesse. Poiché il container di prova non è stato costruito appositamente per l'integrazione dei pannelli, le diverse condizioni strutturali hanno reso impossibile un'implementazione completa.

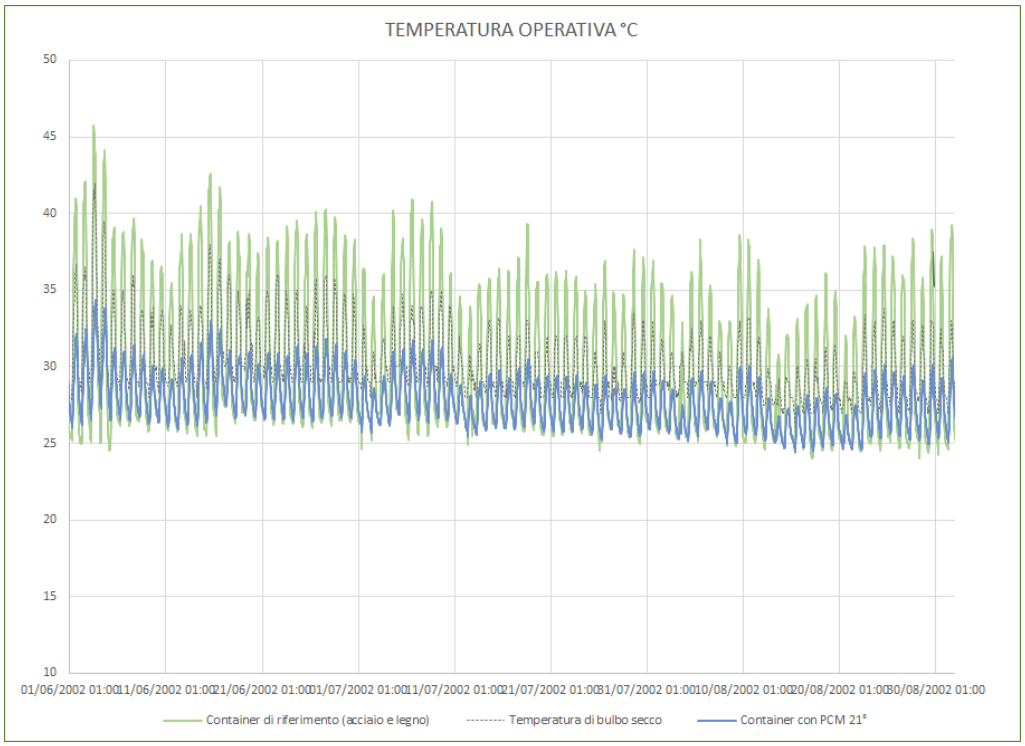


Figura 22 - Andamento orario della temperatura operativa interna: confronto tra container di riferimento (senza PCM) e container con pannelli PCM (transizione di fase a 21 °C) – periodo estivo, località: Afghanistan.

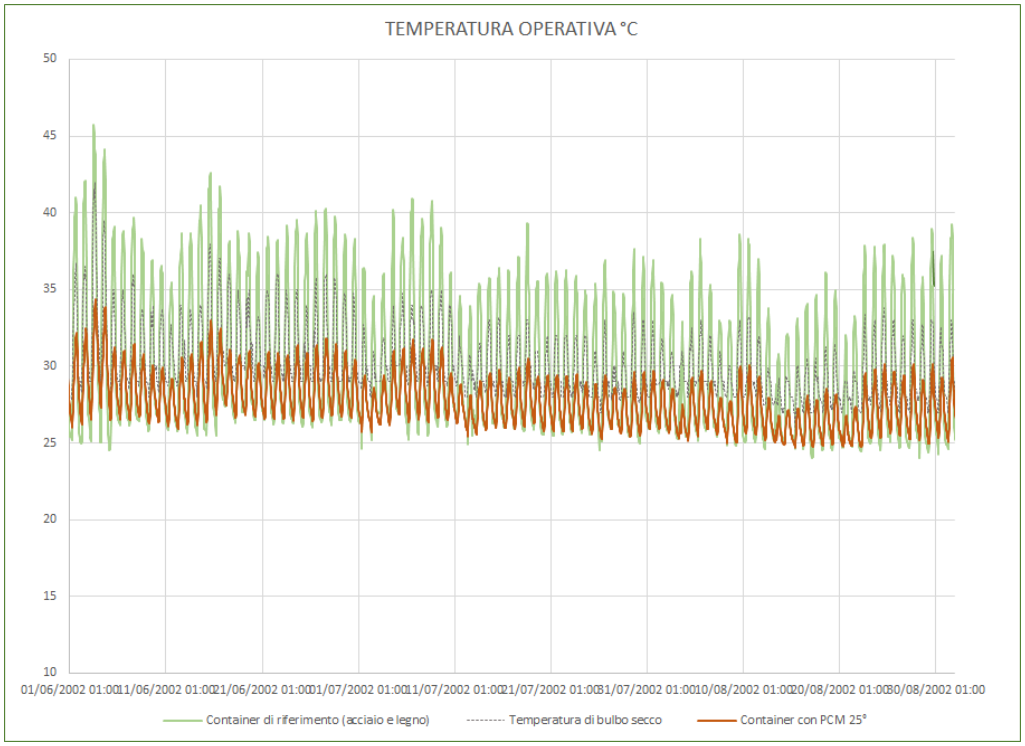


Figura 23 - Andamento orario della temperatura operativa interna: confronto tra container di riferimento (senza PCM) e container con pannelli PCM (transizione di fase a 25 °C) – periodo estivo, località: Afghanistan.

L’inserimento dei pannelli contenenti PCM determina una significativa attenuazione delle escursioni termiche e una riduzione dell’ampiezza dei picchi massimi. In particolare:

- Con PCM con transizione di fase a 21 °C si osserva un appiattimento dell’andamento termico nelle ore centrali della giornata, con temperature operative che raramente superano i 35 °C.
- Con PCM con transizione di fase a 25 °C, il contenimento dei picchi è ancora più marcato, e la temperatura interna si mantiene stabilmente più bassa durante i momenti più critici della giornata.

Per una valutazione più dettagliata dei fenomeni termici e dell’efficacia dei materiali a cambiamento di fase, è stato inoltre effettuato uno zoom sul periodo compreso tra il 1° e il 7 giugno (**Figure 24 e 25**), durante il quale si registra una delle settimane più calde dell’intera stagione estiva. In questa fase, la temperatura dell’aria esterna (bulbo secco) raggiunge i 42 °C, accentuando il rischio di surriscaldamento interno del container.

L’analisi dei grafici orari relativi a tale intervallo mostra chiaramente le escursioni termiche giornaliere, con picchi elevati nel pomeriggio e minimi notturni, e consente di evidenziare in maniera più nitida le differenze di risposta termica tra le configurazioni. In particolare, i container dotati di PCM A21 e A25 presentano un evidente smorzamento delle oscillazioni termiche rispetto al sistema di riferimento, con riduzioni dei picchi diurni fino a 10 °C nei momenti di massima esposizione solare. Questo comportamento conferma l’efficacia del meccanismo di accumulo latente nel contenere i valori estremi e nel migliorare la stabilità della temperatura interna anche in condizioni climatiche molto severe.

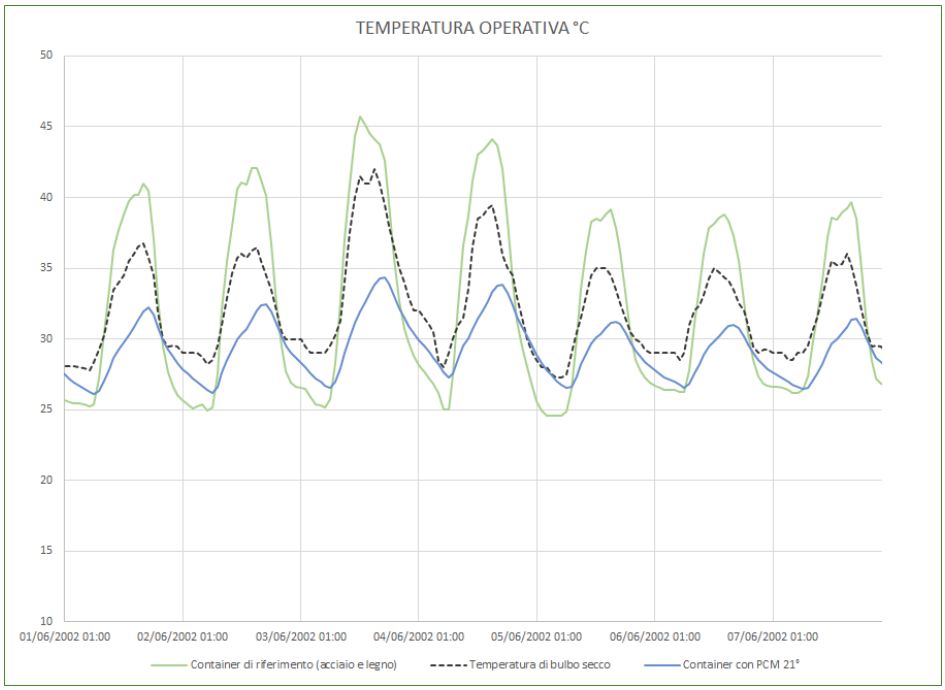


Figura 24 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container con PCM a 21 °C (1–7 giugno) confrontata con la configurazione di riferimento e la temperatura esterna (bulbo secco).

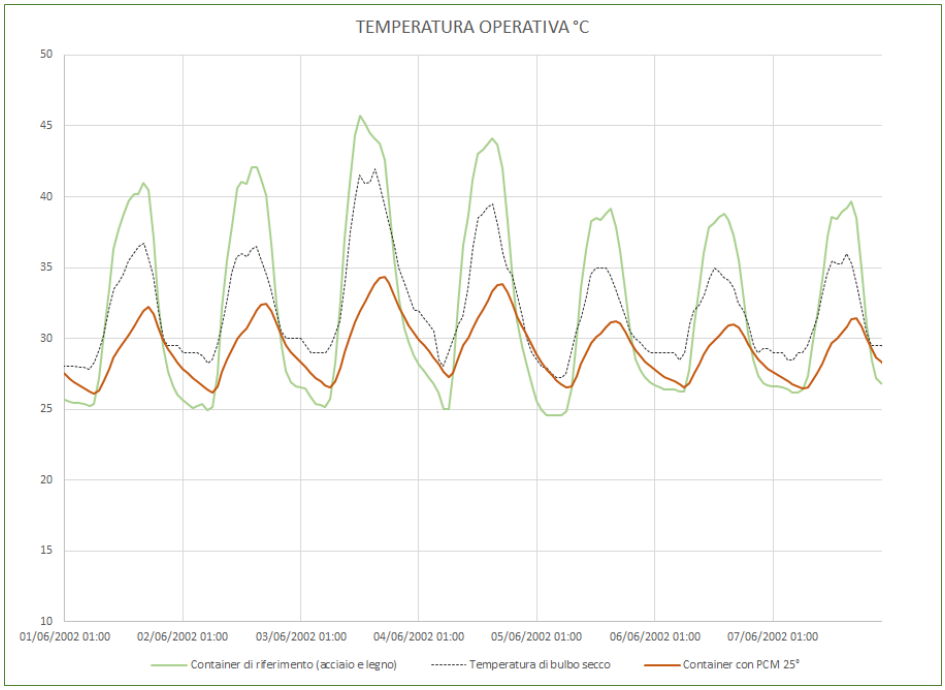


Figura 25 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container con PCM a 25 °C (1–7 giugno) confrontata con la configurazione di riferimento e la temperatura esterna (bulbo secco).

Per completare l'analisi nel contesto climatico estremo dell'Afghanistan, sono stati elaborati tre istogrammi (**Figure 26, 27 e 28**) che rappresentano la distribuzione oraria della temperatura operativa interna nel corso dell'intero anno solare, suddivisa in intervalli di temperatura. Questo consente di valutare in maniera più immediata l'efficacia delle diverse soluzioni nel limitare le condizioni di surriscaldamento all'interno del container.

Nel caso di riferimento, ovvero il container realizzato in acciaio e legno senza PCM (**Figura 26**), si osserva una marcata prevalenza di temperature elevate: ben 3006 ore annuali presentano valori superiori a 30 °C, equivalenti a circa il 34% del tempo totale, mentre solo il 22% circa (1923 ore) rientra nella fascia di comfort compresa tra 19 °C e 25 °C.

L'introduzione del PCM con temperatura di transizione a 25 °C (**Figura 27**) consente di migliorare sensibilmente il comportamento termico: le ore annuali oltre i 30 °C si riducono a 599, pari al 6,8% del totale, rispetto alle 3006 del caso di riferimento. Inoltre, circa il 47% delle ore (3307 ore) si concentra nell'intervallo tra 24,9 °C e 27,9 °C, compatibile con condizioni termiche accettabili per il materiale da proteggere.

Anche il PCM a 21 °C (**Figura 28**) mostra un comportamento efficace, con 655 ore oltre i 30 °C (7,5%) e circa 4781 ore comprese tra 22,2 °C e 28,2 °C.

In sintesi, entrambe le soluzioni con PCM migliorano drasticamente la performance termica rispetto al container privo di accumulo latente, ma in termini assoluti, il materiale con transizione a 25 °C si dimostra più efficace nel contenere il numero di ore oltre la soglia critica di 30 °C, che rappresenta il parametro chiave per la protezione del carico termicamente sensibile.

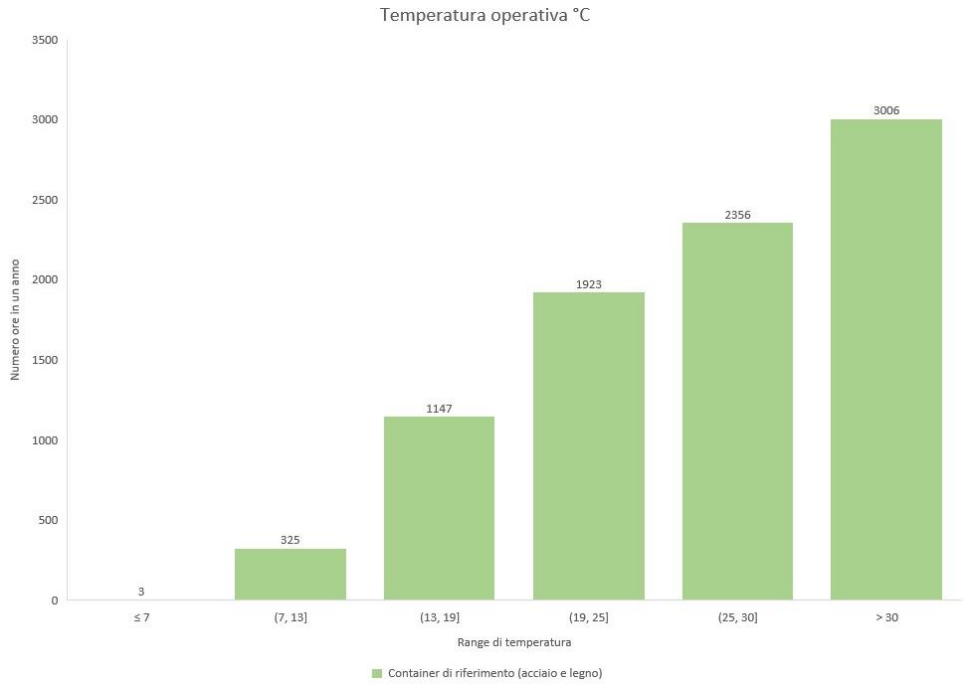


Figura 26 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale nel container privo di PCM (configurazione di riferimento in acciaio e legno).

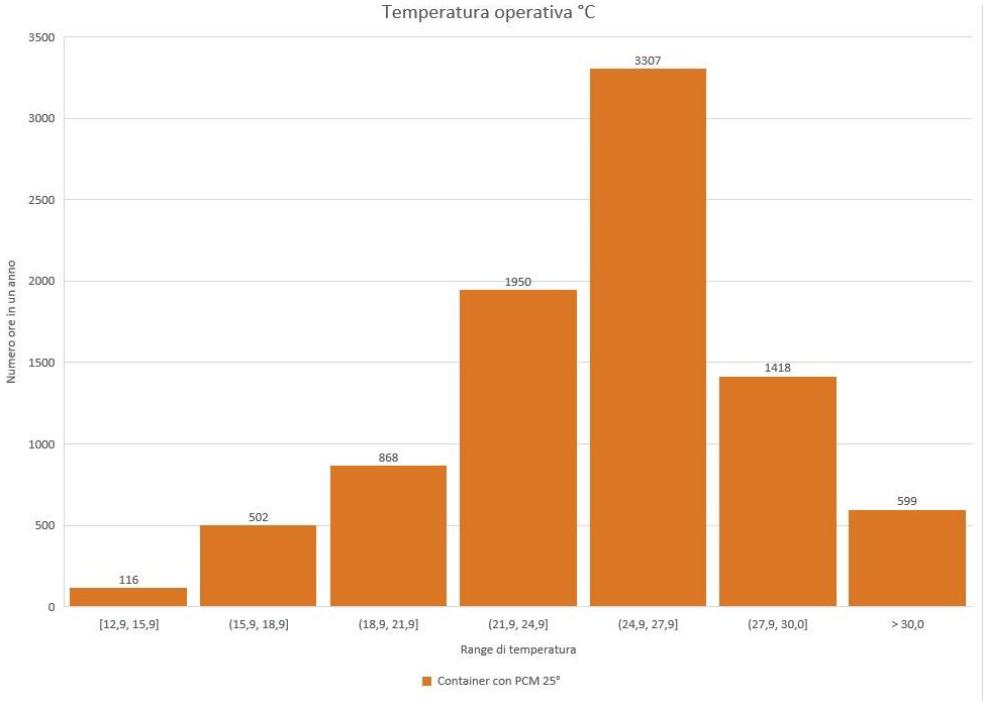


Figura 27 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale per la configurazione con PCM A25.

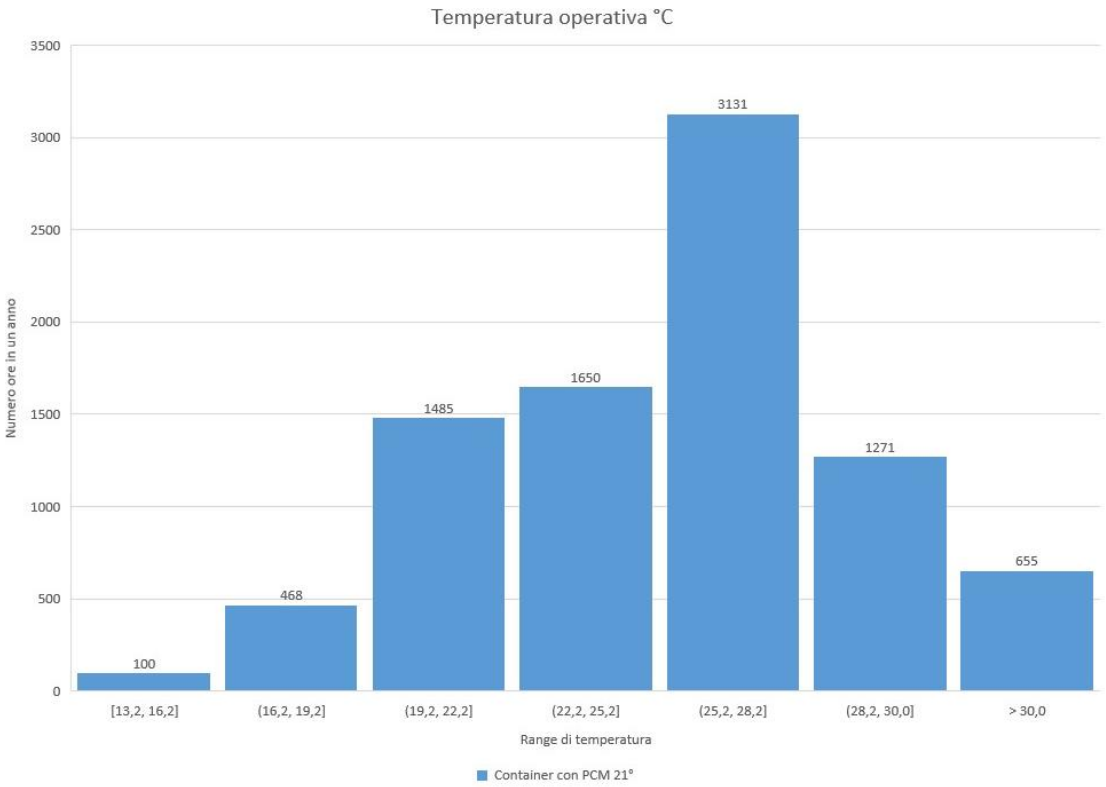


Figura 28 - Istogramma della temperatura operativa interna annuale per la configurazione con PCM A21.

Questi risultati sottolineano il ruolo cruciale dei PCM nel contenimento termico del container, con prestazioni sensibilmente superiori rispetto al sistema privo di accumulo latente. In particolare, il PCM con transizione a 21 °C risulta più efficace nel mantenere l'ambiente interno entro soglie conservative, mentre il materiale a 25 °C limita in modo efficace i picchi estremi sopra i 30 °C, seppur con una distribuzione leggermente spostata verso temperature più alte.

Nel complesso, il PCM A25 garantisce una protezione più efficace contro il superamento della soglia critica di 30 °C, mantenendo il comfort interno entro limiti accettabili per periodi di tempo più estesi.

Poiché questo era il requisito principale dello studio presentato, al fine di creare le condizioni ottimali per uno scenario di stoccaggio di oggetti sensibili alla temperatura, è stato scelto il materiale A25, quello con transizione di fase a 25 °C per il container.

5.3 Analisi dei risultati: località di Monaco di Baviera

La città di Monaco è stata selezionata come seconda località di simulazione per verificare il comportamento termico del container in un contesto climatico temperato, più mite rispetto all'ambiente desertico dell'Afghanistan. Sebbene le condizioni meteorologiche siano meno estreme, l'analisi di questa località riveste un'importanza strategica, in quanto il cliente finale è un'azienda tedesca, potenzialmente interessata a impiegare il container modificato in Germania. Pertanto, la selezione del materiale a cambiamento di fase più adatto è stata supportata anche dai risultati ottenuti in questo scenario, al fine di garantire prestazioni ottimali non solo in ambienti severi ma anche in contesti operativi reali.

Per rappresentare in maniera efficace le condizioni termiche interne, è stato elaborato un grafico temporale (**Figura 29**) riferito al periodo compreso tra il 15 e il 29 luglio, ovvero le due settimane in cui sono state registrate le temperature più elevate dell'intera stagione estiva. In esso sono riportati i valori orari della temperatura operativa interna per quattro configurazioni: il container privo di PCM (in acciaio e legno), la configurazione con pannelli PCM A21, quella con PCM A25 e infine una configurazione ibrida, nella quale è stato adottato il PCM a 25 °C per la copertura superiore e il PCM a 21 °C per le pareti verticali (linea lilla nel grafico). La temperatura esterna di bulbo secco è stata anch'essa riportata come riferimento climatico.

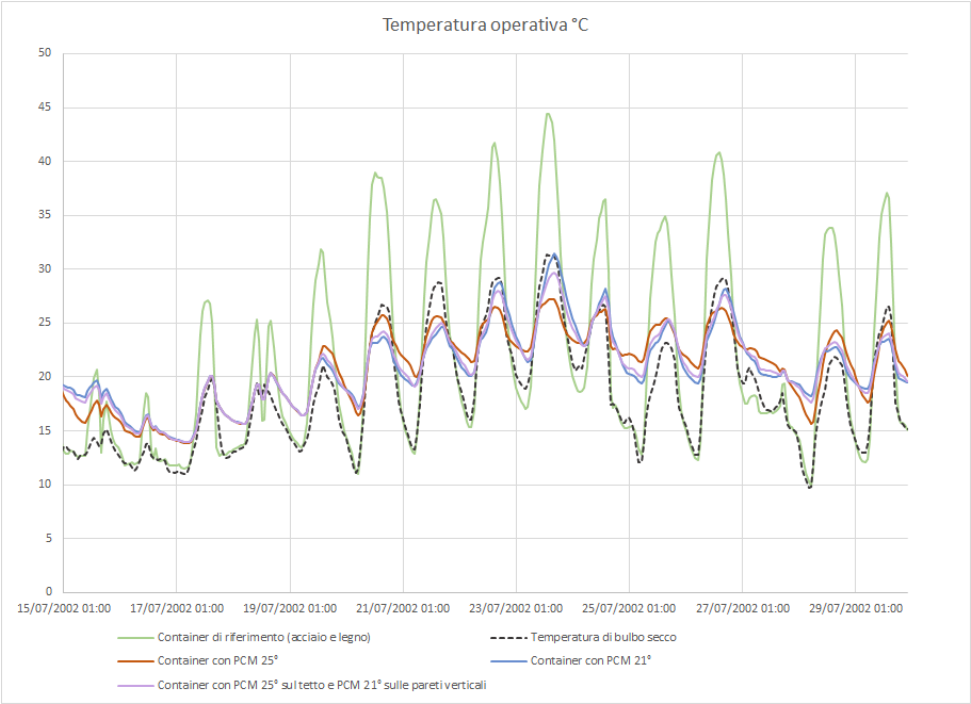


Figura 29 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container per le quattro configurazioni simulate (senza PCM, PCM A21, PCM A25 e configurazione mista), nel periodo più caldo registrato a Monaco (15–29 luglio).

Dall'osservazione delle curve emerge chiaramente l'efficacia dei PCM nel contenere le escursioni termiche: la configurazione priva di materiali a cambiamento di fase è soggetta a picchi superiori ai 32–33 °C, mentre le tre configurazioni con PCM mostrano un sostanziale smorzamento delle oscillazioni giornaliere, in particolare durante le ore pomeridiane. Il PCM a 21 °C tende a garantire temperature più basse durante le prime ore della giornata, mentre il PCM a 25 °C risulta più efficace nel contenere i picchi massimi nelle ore centrali, grazie al maggiore ritardo termico nella fase di fusione.

Anche gli istogrammi annuali della distribuzione oraria della temperatura interna (**Figure 30, 31, 32 e 33**) confermano il miglioramento ottenuto attraverso l'impiego dei PCM. Nel container privo di PCM, il numero di ore annue con temperatura operativa superiore a 30 °C risulta pari a 571 ore. Questo valore si riduce sensibilmente nelle configurazioni con PCM:

- PCM A21: 90 ore sopra i 30 °C;
- PCM A25: 166 ore sopra i 30 °C;
- Configurazione mista (A25 sul tetto, A21 sulle pareti): 97 ore sopra i 30 °C.

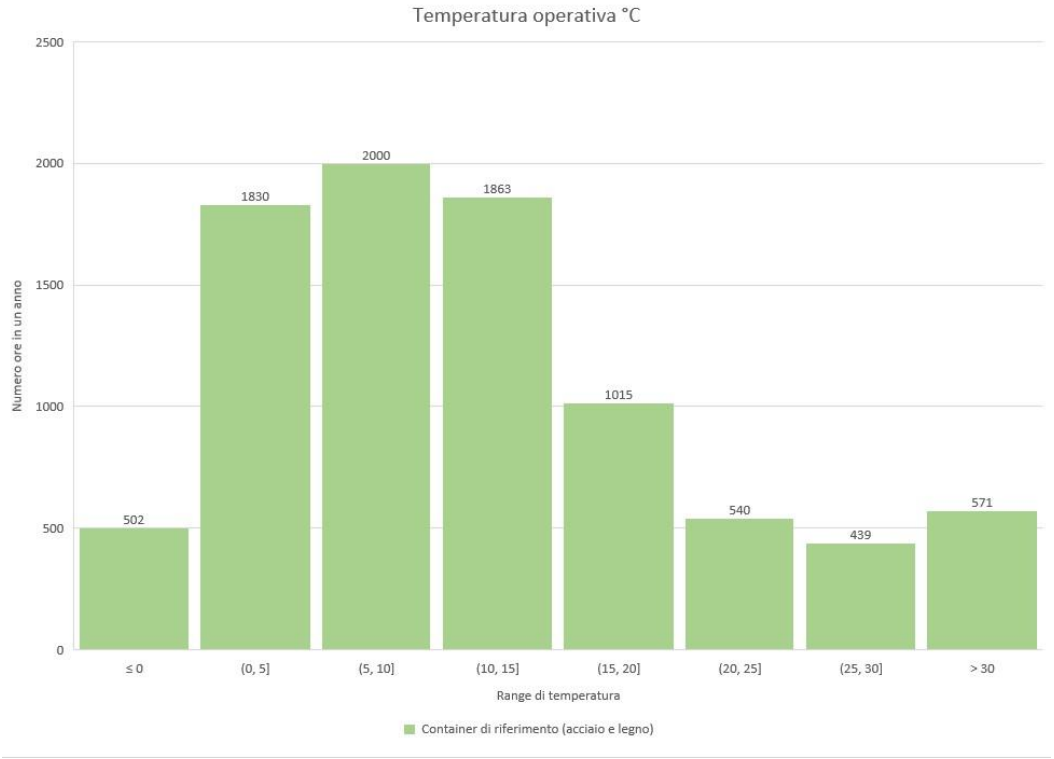


Figura 30 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione di riferimento, senza utilizzo dei PCM – località Monaco di Baviera.

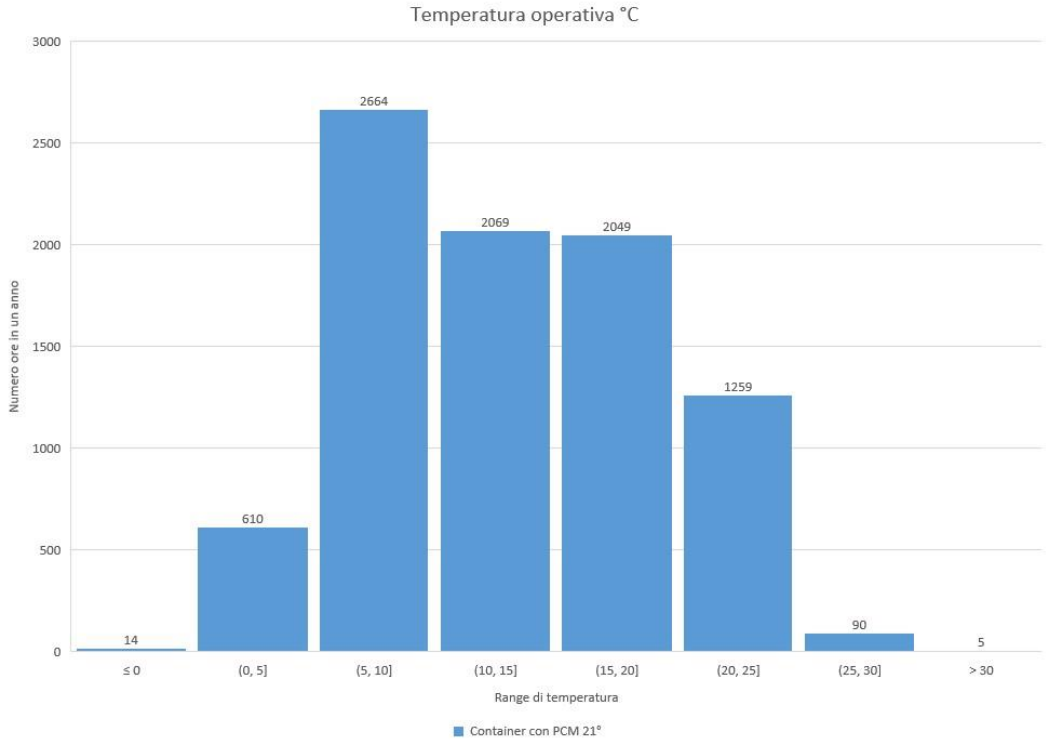


Figura 31 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 21°C – località Monaco di Baviera.

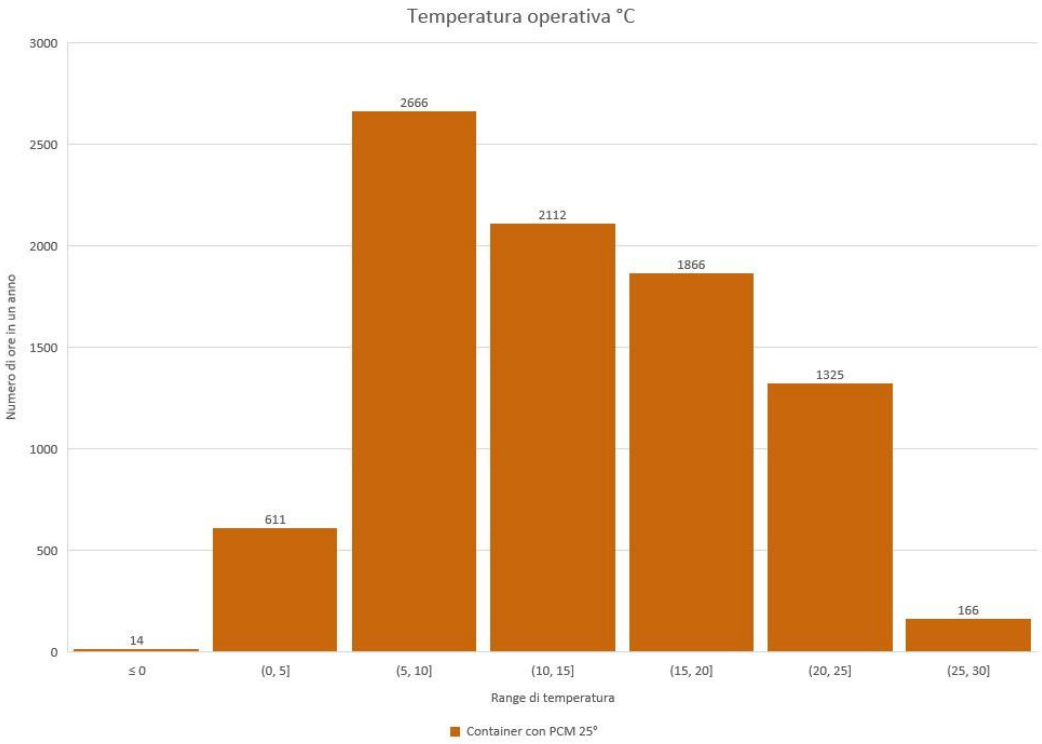


Figura 32 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 25°C – località Monaco di Baviera.

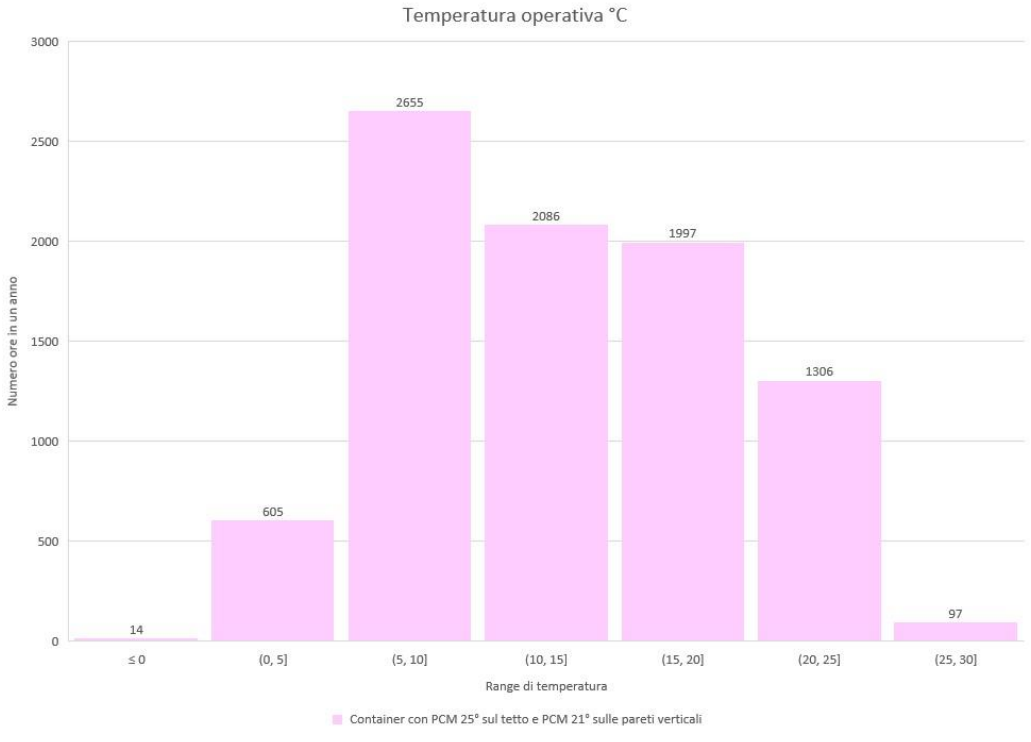


Figura 33 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione mista (PCM a 25 °C sul tetto e PCM a 21 °C sulle pareti verticali)– località Monaco di Baviera.

Sebbene il PCM con transizione a 21 °C abbia registrato le migliori prestazioni in termini di contenimento dei valori termici estremi nel contesto climatico di Monaco, la differenza rispetto alla configurazione mista e al PCM A25 risulta marginale. Considerando che i container vengono prodotti a Monaco e in parte utilizzati anche in ambito locale, ma sono spesso destinati a essere impiegati in aree caratterizzate da condizioni ambientali ben più severe – come nel caso dello scenario afghano – la scelta del materiale a 25 °C rappresenta una soluzione più equilibrata e versatile.

A ciò si aggiunge la valutazione economica e logistica: la differenziazione dei pannelli, necessaria per implementare configurazioni miste, comporterebbe costi aggiuntivi legati alla produzione, allo stoccaggio e alla fase di installazione. Al contrario, l'impiego di un unico materiale semplifica l'intero processo costruttivo, riducendo tempi e complessità operative.

In questo senso, la soluzione monomateriale basata interamente sul PCM A25 si è dimostrata la più vantaggiosa. Non solo essa ha consentito, nel contesto tedesco, di ridurre di circa il 71% le ore oltre soglia (>30 °C) rispetto al container privo di PCM, ma ha anche garantito ottimi risultati nel caso studio condotto per l'Afghanistan, confermandosi adatta a un ampio spettro di condizioni climatiche.

Nel complesso, l'adozione del PCM a 25 °C rappresenta una scelta progettuale solida, capace di coniugare buone prestazioni tecniche con sostenibilità economica e semplicità di integrazione, sia in contesti temperati come quello bavarese, sia in ambienti caldi e critici dal punto di vista termico.

5.4 Analisi dei risultati: località in Norvegia

Per disporre di un quadro completo dell'analisi comparativa e valutare il comportamento del container anche in contesti climatici freddi, è stata condotta una simulazione nella regione settentrionale della Norvegia, rappresentativa di un ambiente con estati miti e inverni rigidi. Sebbene il rischio di surriscaldamento sia qui nettamente inferiore rispetto allo scenario afghano o a quello bavarese, l'integrazione dei PCM può offrire vantaggi anche in termini di stabilizzazione termica e attenuazione delle escursioni giornaliere, soprattutto nei mesi estivi.

Come per le località precedenti, è stato elaborato un grafico temporale riferito al periodo compreso tra il 19 e il 26 giugno (**Figura 34**), in cui si osservano le variazioni orarie della temperatura operativa interna in quattro diverse configurazioni: container senza PCM, container con PCM A21, container con PCM A25 e container con configurazione mista. La temperatura esterna di bulbo secco è ancora una volta riportata come curva di riferimento climatico.

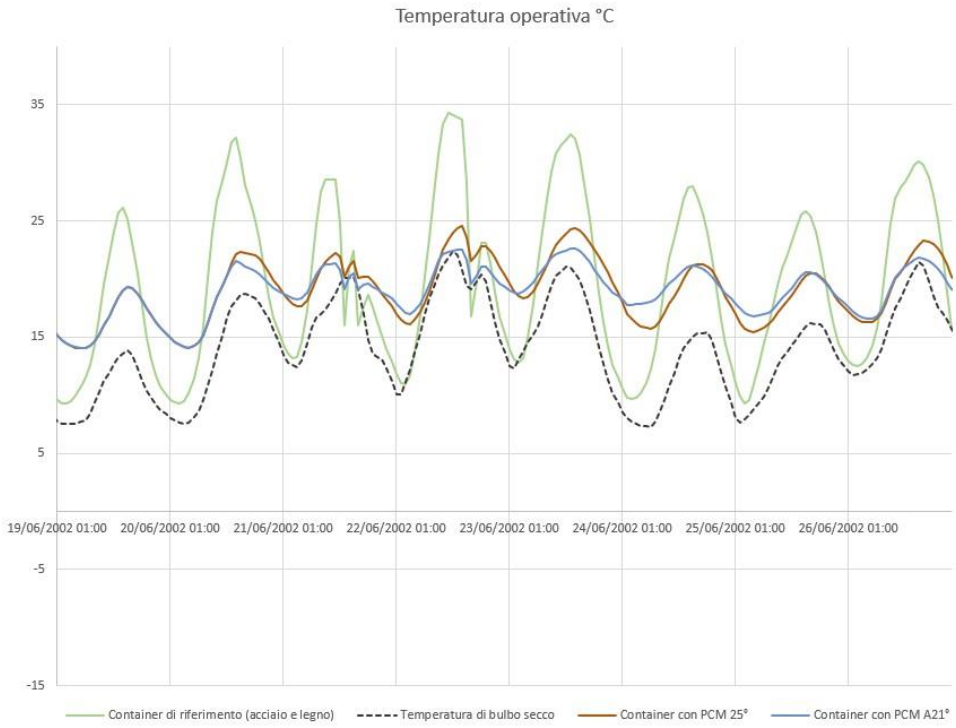


Figura 34 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container nel periodo 19–26 giugno, in località norvegese, per le quattro configurazioni.

Dall'analisi del grafico emerge che, anche in un contesto climatico più fresco, l'effetto dei PCM resta visibile. Le configurazioni con accumulo latente tendono a smorzare i picchi giornalieri, limitando le oscillazioni nelle ore centrali della giornata e contribuendo a un andamento più regolare della temperatura interna. Tuttavia, le differenze tra le tre soluzioni con PCM risultano contenute: le temperature operative rimangono quasi sempre al di sotto dei 25 °C, e in nessun caso si supera la soglia critica dei 30 °C.

Per una visione d'insieme più ampia, è stato inoltre considerato l'intero trimestre estivo (giugno–agosto), con un confronto dettagliato su scala stagionale

(**Figura 35**). Anche in questo caso, i PCM contribuiscono a ridurre l'ampiezza delle oscillazioni termiche, con un effetto più evidente nei momenti di maggiore irraggiamento solare.

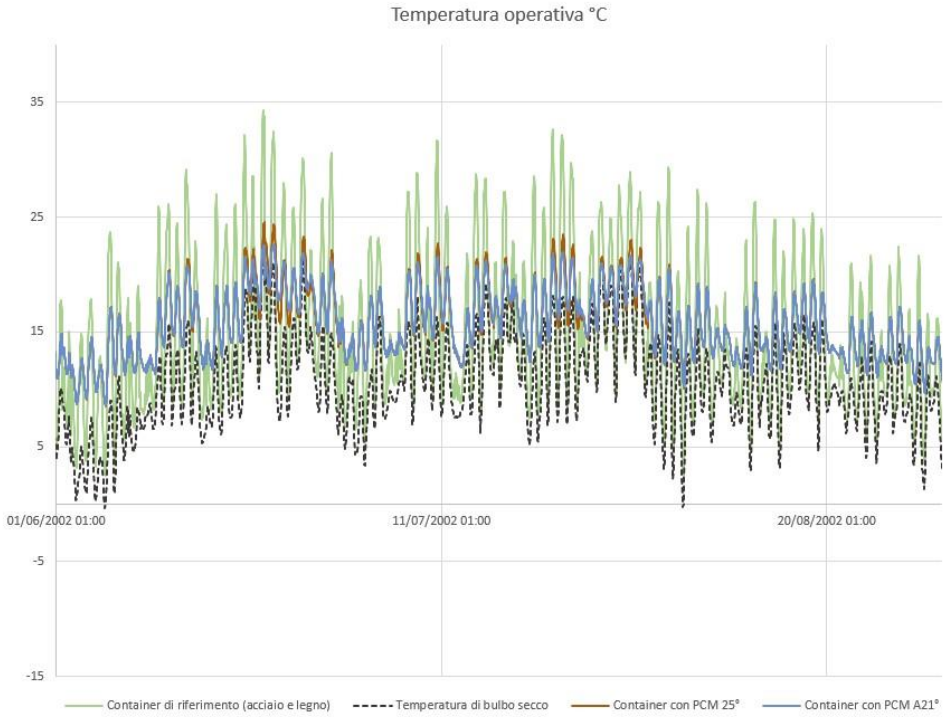


Figura 35 - Andamento orario della temperatura operativa interna del container nel corso dell'intero trimestre estivo (giugno–agosto) in Norvegia.

Gli istogrammi relativi alla distribuzione annuale delle temperature operative interne (***Figure 36, 37 e 38***) confermano quanto osservato. La maggior parte delle ore si concentra in intervalli compresi tra 10 e 20 °C, con un numero di ore superiori ai 25 °C molto limitato. Solo nella configurazione senza PCM si registrano 37 ore oltre i 30 °C, mentre tali condizioni risultano completamente assenti nei casi con PCM A21 e A25.

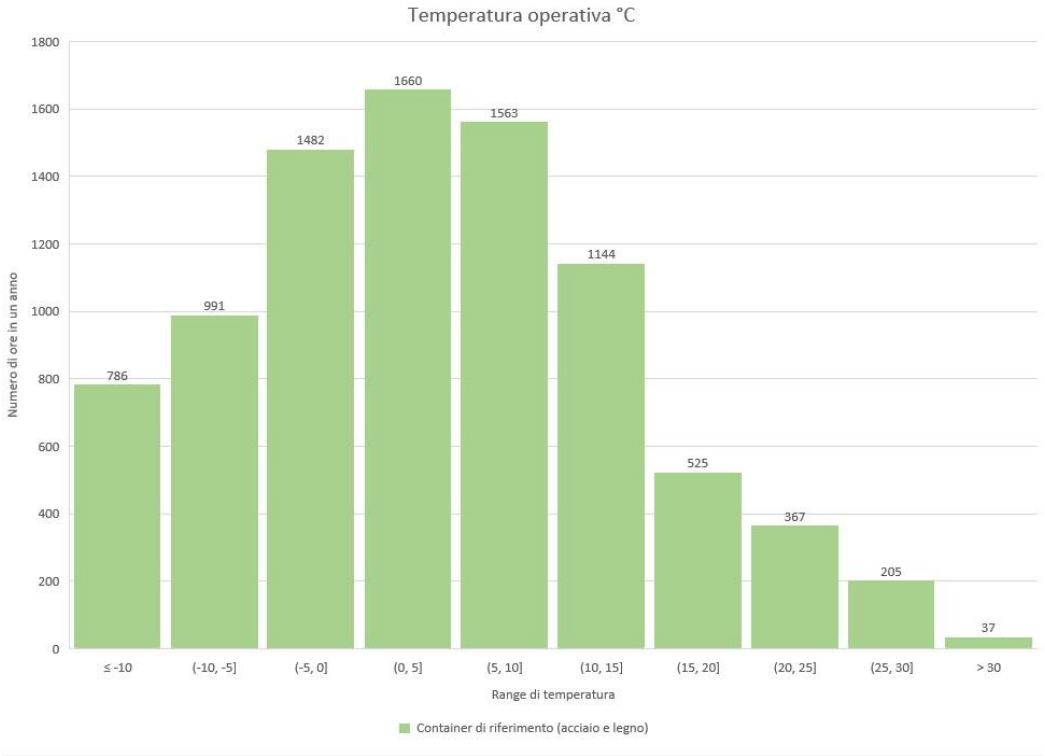


Figura 36 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna per la configurazione di riferimento, priva di PCM, in località norvegese.

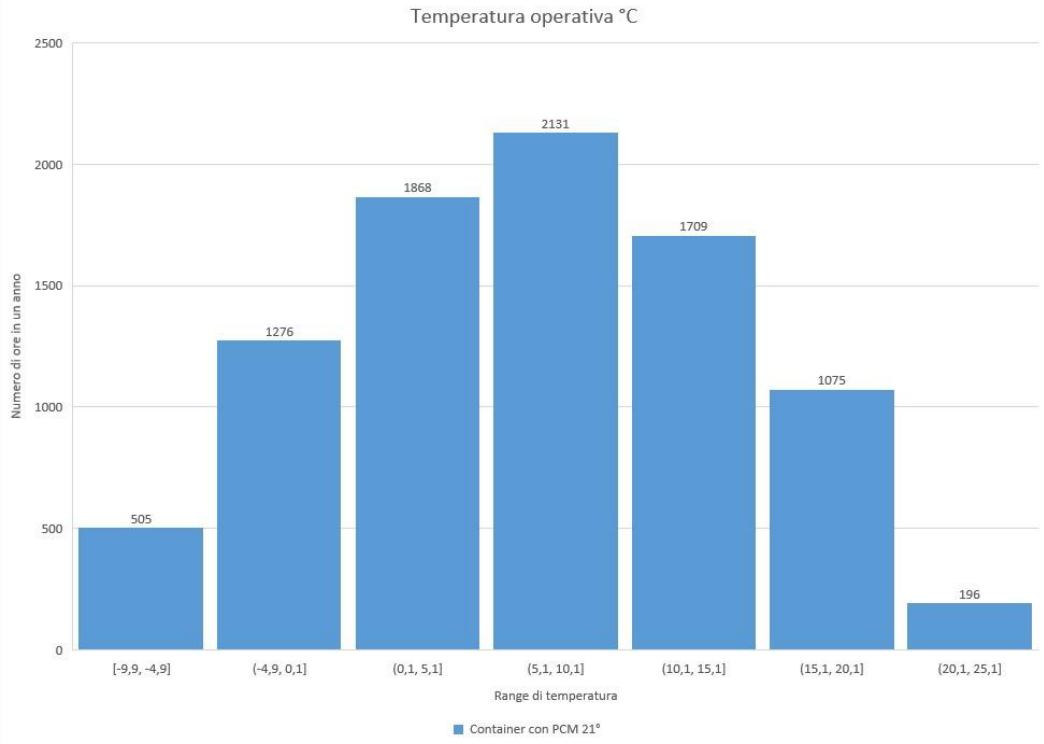


Figura 37 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 21 °C – località Norvegia.

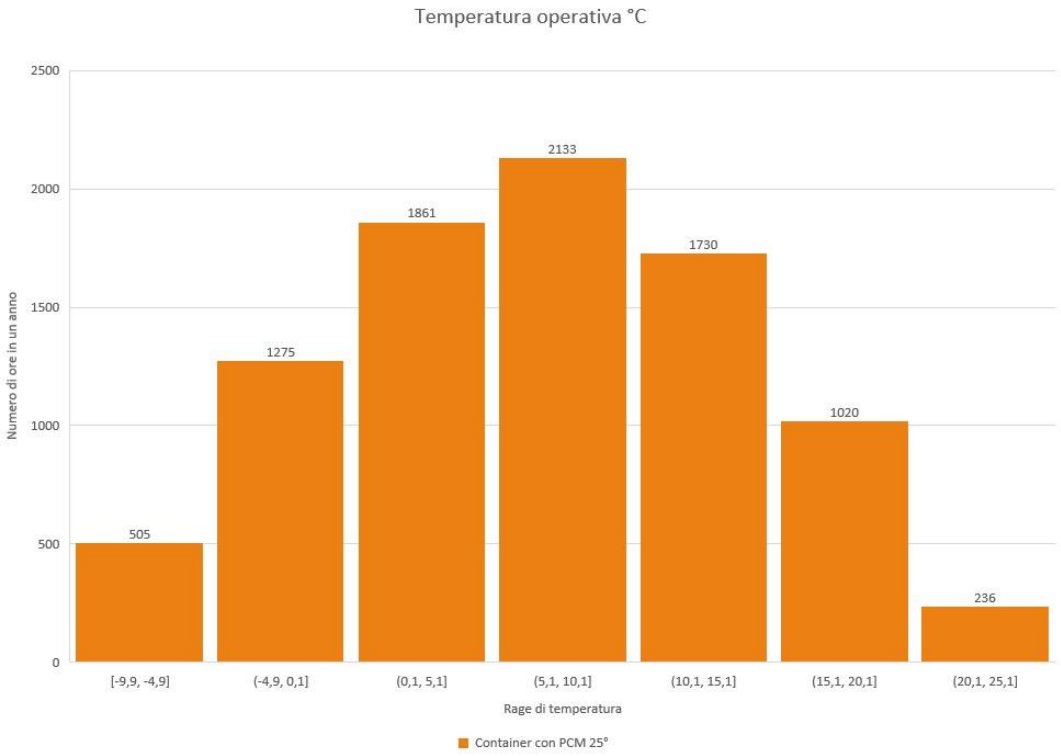


Figura 38 - Istogramma annuale della temperatura operativa interna nella configurazione con pannelli contenenti PCM a 25 °C – località Norvegia.

In questo scenario, più che evitare il superamento di soglie termiche elevate, l'impiego dei PCM si rivela utile nel contenere l'eccessivo raffreddamento durante le ore notturne o in giornate particolarmente fredde. Il lento rilascio del calore accumulato, infatti, contribuisce a mantenere la temperatura interna sopra i livelli critici per lo stoccaggio di materiali tecnologici o elettronici sensibili, evitando sbalzi termici troppo marcati.

Va tuttavia osservato che, per climi caratterizzati da temperature più basse per la maggior parte dell'anno, potrebbero risultare più adatti materiali a cambiamento di fase con temperatura di transizione inferiore ai 25 °C, in grado di attivarsi in modo più efficace nei range tipici delle condizioni operative. Tuttavia, l'impiego del PCM A25 si dimostra comunque vantaggioso: non solo offre una buona stabilizzazione della temperatura interna, ma garantisce anche una certa versatilità applicativa, evitando il rischio di inefficienza stagionale e mantenendo una configurazione unica per tutte le destinazioni d'uso del container.

Nel complesso, l'esperienza condotta nel contesto norvegese conferma che, pur in assenza di condizioni estreme, l'adozione del PCM A25 apporta benefici anche in termini di comfort termico passivo e continuità prestazionale, rafforzando ulteriormente la validità della scelta progettuale per un utilizzo flessibile in diverse fasce climatiche.

5.5 Realizzazione del prototipo fisico

A seguito dell'analisi numerica condotta nelle sezioni precedenti, è stata avviata la realizzazione di un prototipo fisico del container, al fine di validare sperimentalmente la soluzione progettuale adottata e verificarne la fattibilità costruttiva in condizioni reali. Il sistema testato impiega pannelli contenenti PCM con temperatura di transizione a 25 °C, come risultato della scelta del PCM più idoneo.

La realizzazione è stata curata dalla startup MELT, che ha implementato la soluzione direttamente su un container dimostrativo, replicando le condizioni di simulazione e adottando un sistema costruttivo industrializzabile. I pannelli applicati sono stati progettati con una stratigrafia ottimizzata, costituita da 12 mm di pannello MELT (contenente il PCM), 22,8 mm di schiuma poliuretanica (PU) e 2 mm di pannello in vetroresina (GRP), per uno spessore totale di 36,8 mm, con una tolleranza di ±1 mm.

È importante notare che, diversamente da quanto modellato in simulazione, l'unione tra pannelli non può essere realizzata in opera con accoppiamento completamente a filo, il che può comportare un leggero peggioramento del contatto termico tra le superfici. Inoltre, alcune sub-superfici – ossia aree non rivestite con il sistema composito MELT Plate – sono chiaramente visibili in fotografia grazie alla loro colorazione giallina, in contrasto con il rivestimento bianco esterno in vetroresina.

Le immagini seguenti documentano il prototipo in fase di installazione e collaudo (**Figure 39, 40 e 41**):

Figura 39 - Vista frontale del container dimostrativo con pannelli PCM a 25 °C. Sono visibili le sub-superfici non rivestite.

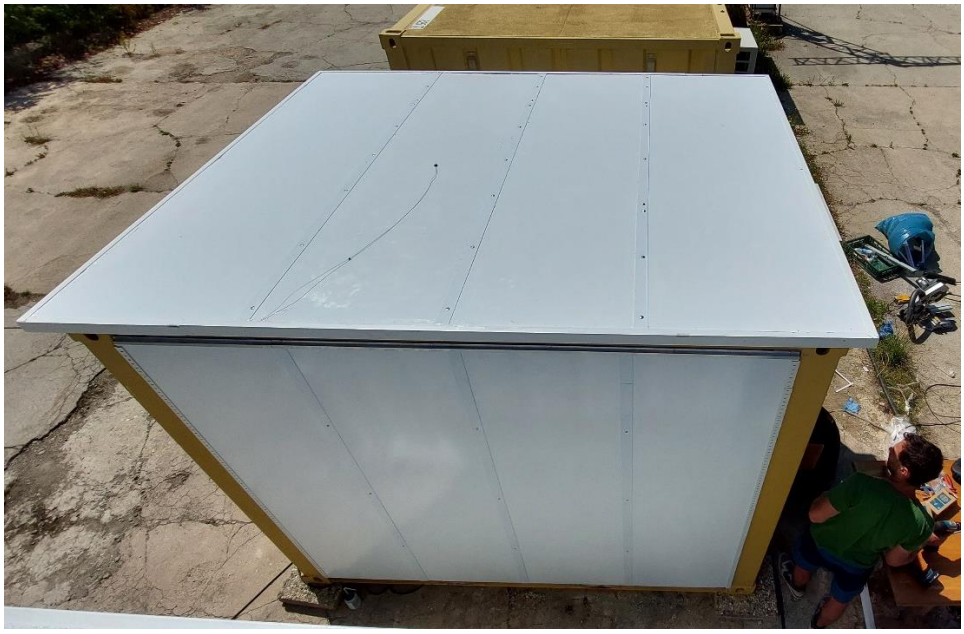


Figura 40 - Vista dall'alto del tetto del container. È evidente la continuità della copertura, realizzata con pannelli MELT e rivestimento protettivo in GRP.

Figura 41 - Vista laterale e posteriore del prototipo installato. Il container è dotato di unità HVAC e rivestimento integrale delle superfici verticali principali.

L'adozione di un sistema modulare, preassemblato e basato su materiali già disponibili sul mercato, unita all'impiego di tecnologie di produzione semi-automatizzate, conferma la replicabilità della soluzione in scenari applicativi diversi, anche su scala industriale.

5.6 Considerazioni finali, limiti e prospettive future

I risultati delle simulazioni energetiche condotte in questo studio hanno dimostrato l'efficacia dell'impiego di materiali a cambiamento di fase per la mitigazione del surriscaldamento in container destinati allo stoccaggio di apparecchiature sensibili. La realizzazione di un prototipo fisico ha permesso di verificare l'effettiva applicabilità di questa soluzione, dimostrando la fattibilità tecnica e costruttiva del sistema. Tuttavia, l'interesse per questa tecnologia non si limita al singolo caso studio: al contrario, i dati ottenuti aprono la strada a una serie di applicazioni potenzialmente strategiche in ambito edilizio e industriale. I pannelli PCM risultano particolarmente adatti in contesti dove le fluttuazioni termiche possono compromettere la stabilità ambientale interna: dai container abitativi e tecnici, alle serre, ai veicoli refrigerati, fino agli edifici prefabbricati alimentati da fonti rinnovabili. In tutte queste configurazioni, la possibilità di

disaccoppiamento temporale tra domanda ed erogazione di energia termica si traduce in un potenziale incremento dell'efficienza, in un risparmio sui costi energetici e in una riduzione delle emissioni di CO_2. Tali benefici sono amplificati se si considera l'impiego sinergico dei PCM con altri sistemi passivi o semi-attivi, come le pompe di calore o le superfici radianti.

In termini di limiti, è opportuno sottolineare che l'efficacia dei PCM dipende fortemente dal corretto dimensionamento, dalla posizione all'interno della stratigrafia e dalla scelta della temperatura di transizione in funzione del clima specifico. Le simulazioni si basano su modelli ideali, in cui alcuni fattori – come i ponti termici, le tolleranze di montaggio, la presenza di carichi interni o le variazioni di ventilazione – sono stati semplificati o trascurati. Inoltre, l'inerzia del materiale durante le transizioni di fase e la possibile stratificazione termica sono aspetti che richiedono ulteriori approfondimenti modellistici e sperimentali.

In un'ottica di prospettive future, sarebbe opportuno sviluppare un monitoraggio sperimentale a lungo termine del prototipo, in modo da confrontare i dati reali con quelli ottenuti in fase di simulazione. Tale confronto potrebbe portare a una calibrazione più accurata del modello e a un eventuale affinamento dei parametri di progetto. Allo stesso tempo, si potrebbero valutare soluzioni alternative di distribuzione del PCM, ad esempio pannelli ad alta densità solo su determinate superfici o configurazioni ibride in funzione dell'esposizione solare.

In un contesto di crescente domanda di soluzioni sostenibili per la logistica e l'edilizia modulare, l'impiego dei pannelli PCM si conferma una scelta strategica, in grado di coniugare risparmio energetico, replicabilità e resilienza, contribuendo alla progettazione di spazi efficienti e adattabili alle sfide climatiche future.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro DI TESI ha analizzato in modo approfondito l'impiego di materiali a cambiamento di fase (PCM) come strategia passiva per il controllo termico all'interno di un container destinato allo stoccaggio di apparecchiature sensibili alle alte temperature. Dopo una prima fase teorica dedicata ai principi di accumulo termico, alla classificazione dei PCM e alle tecniche di incapsulamento e integrazione nei moduli edilizi, con particolare attenzione ai sistemi prefabbricati e mobili, è stata condotta una modellazione energetica del sistema container-PCM mediante software DesignBuilder ed EnergyPlus, considerando diversi scenari climatici e configurazioni.

Sono state modellate tre configurazioni del container: senza PCM, con PCM avente transizione di fase a 21 °C e con PCM a 25 °C. Le simulazioni sono state eseguite in diversi scenari climatici (Afghanistan, Monaco, Norvegia), con particolare attenzione alle condizioni più critiche. I risultati ottenuti per il contesto desertico afghano hanno evidenziato in modo chiaro l'efficacia dei PCM nella mitigazione passiva del surriscaldamento interno, con una significativa riduzione delle ore in cui la temperatura operativa supera la soglia critica di 30 °C. In particolare, il materiale con transizione di fase a 25 °C (PCM A25) ha mostrato un comportamento ottimale, riuscendo a contenere i picchi termici in modo più efficace rispetto alla configurazione con PCM a 21 °C (A21) e dimostrandosi idoneo anche in climi temperati come quello di Monaco di Baviera. La configurazione con PCM a 25 °C ha garantito quindi un buon equilibrio tra prestazioni termiche, versatilità climatica e sostenibilità logistica, costituendo la scelta progettuale più efficace per una futura applicazione reale. Per dimostrare concretamente la validità delle simulazioni svolte, è stato realizzato un prototipo fisico del container, equipaggiato con pannelli contenenti PCM a 25 °C, sviluppati dalla startup MELT. Questo prototipo, costruito secondo una stratigrafia ottimizzata, rappresenta un esempio reale di trasferimento dalla modellazione numerica all'implementazione tecnologica su scala operativa.

Complessivamente, il lavoro svolto conferma il potenziale dei PCM come soluzione sostenibile e tecnicamente affidabile per il controllo passivo della temperatura in moduli prefabbricati e container mobili. Le prospettive future includono l'ottimizzazione della distribuzione del materiale all'interno dell'involucro, l'integrazione con altre strategie passive o attive e l'estensione dell'approccio a nuovi ambiti applicativi e climatici. Considerando la crescente esigenza di soluzioni resilienti e a basso impatto energetico, e grazie alla loro intrinseca flessibilità progettuale, i materiali a cambiamento di fase si configurano come una tecnologia chiave per l'efficienza energetica del futuro.

BIBLIOGRAFIA

[1] Alassaad, F., Touati, K., Levacher, D., & Sebaibi, N. (2022). Effect of latent heat storage on thermal comfort and energy consumption in lightweight earth-based housings. *Building and Environment*, 229, 109915.

[2] Da Cunha, J. P., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, *177*, 227–238.

[3] Jankowski, N. R., & McCluskey, F. P. (2013). A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering. *Applied Energy, 113*, 1525–1561.

[4] Sonnick, S., Erlbeck, L., Gaedtke, M., Wunder, F., Mayer, C., Krause, M. J., Nirschl, H., & Rädle, M. (2020). Passive room conditioning using phase change materials—Demonstration of a long-term real size experiment. *International Journal of Energy Research*, *44*(8), 7047–7056.

[5] E. Lippa, "Application of Phase Change Materials for Heat Storage in Water Tanks", Tesi di Laurea Magistrale, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, a.a. 2018/2019.

[6] F. Gatti, "Phase Change Materials: Study of an Innovative Application for Water Heat Storage", Tesi di Laurea, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, a.a. 2019/2020.

[7] Sharma, S., & Sagara, K. (2005). Latent Heat Storage Materials and Systems: A review. *International Journal of Green Energy*, *2*(1), 1–56.

[8] Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S., & Zalewski, L. (2010). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 112–130.

[9] Giulia, R., Kamel, H., Claudio, Z., Dario, G., & Simone, M. (2025). Commercially focused strategies to enhance PCM thermal conductivity in latent thermal energy storage systems. *Science Talks*, 100439.

[10] NematpourKeshteli, A., Iasiello, M., Langella, G., & Bianco, N. (2022). Enhancing PCMs thermal conductivity: A comparison among porous metal foams, nanoparticles and finned surfaces in triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, *212*, 118623.

[11] Zhang, Q., Sazon, T. a. S., Fadnes, F. S., Peng, X., Ahmed, N., Nikpey, H., Mansouri, M., & Assadi, M. (2024). Design optimization of the cooling systems with PCM-to-air heat exchanger for the energy saving of the residential buildings. *Energy Conversion and Management X*, *23*, 100630.

[12] Kiros, A. K., Zeru, B. A., Desisa, D. G., & Tewolde, D. G. (2025). FIN Geometry Optimization for enhanced PCM solidification in solar cooking thermal storage System: numerical simulation and experimental validation. *International Journal of Thermofluids*, 101243.

[13] NematpourKeshteli, A., Iasiello, M., Langella, G., & Bianco, N. (2024). Using metal foam and nanoparticle additives with different fin shapes for PCM-based thermal storage in flat plate solar collectors. *Thermal Science and Engineering Progress*, *52*, 102690.

[14] Subramaniyan, M., & Ponnusamy, C. (2024). Predictive modelling techniques on the encapsulation size of spherical capsules for rapid cool thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, *83*, 110810.

[15] Ajithkumar, A., & GaneshKumar, P. (2025). Recent advancements in solar drying: Role of absorber plate geometry, PCM thermal enhancement, and encapsulation for improved energy storage and drying efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *222*, 115952.

[16] Khadiran, T., Hussein, M. Z., Zainal, Z., & Rusli, R. (2015). Encapsulation techniques for organic phase change materials as thermal energy storage medium: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *143*, 78–98.

[17] Ferencz, M., Nemeth, B., Gyenis, J., & Feczko, T. (2024). Statistical evaluation of PCM plaster lining impact on indoor temperature fluctuation due to variability of outdoor temperature and solar radiation along a whole spring season. *Journal of Building Engineering*, 111626.

[18] Skalar, T., Dovjak, M., Marinšek, M., Korošin, N. Č., Bosiljkov, V. B., & Štukovnik, P. (2025). Optimized Composite Lime Cement Plasters with Phase Change Materials for Enhanced Building Energy Efficiency and Comfort. *Ceramics International*.

[19] Al-Absi, Z. A., Asif, M., & Hafizal, M. I. M. (2024). Optimization study for PCM application in residential buildings under desert climatic conditions. *Journal of Energy Storage*, *104*, 114399.

[20] Ji, R., & Li, X. (2023). Numerical analysis on the energy performance of the PCMs-integrated thermochromic coating building envelopes. *Building and Environment*, *233*, 110113.

[21] Mohajerzadeh, Z., Azari, R., & Nozariasbmarz, A. (2025). Review: Enhancing Building Energy Efficiency through the Integration of Phase Change Materials (PCMs) and Thermoelectric Generators (TEGs) Into the Building Envelope. *Journal of Building Engineering*, 112919.

[22] Maleki, B., Khadang, A., Maddah, H., Alizadeh, M., Kazemian, A., & Ali, H. M. (2020). Development and thermal performance of nanoencapsulated PCM/ plaster wallboard for thermal energy storage in buildings. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101727.

[23] Hosseini, M., Tasnim, S. H., & Mahmud, S. (2024). Application of PCM for radiant heating of residential buildings in Canada towards achieving nearly zero energy buildings. *Journal of Energy Storage*, *102*, 114030.

[24] Li, W., Rahim, M., Wang, B., Ganaoui, M. E., & Bennacer, R. (2025). Enhancing building envelope performance via dynamic PCM integration in biomaterial concrete walls: a numerical Evaluation and Multi-Objective Optimization study. *Building and Environment*, 113141.

[25] Baskar, I., & Chellapandian, M. (2022). Experimental and finite element analysis on the developed real-time form stable PCM based roof system for thermal energy storage applications. *Energy and Buildings*, *276*, 112514.

[26] Georgiou, L., Konatzii, P., Morsink-Georgali, P., Klumbyte, E., Christou, P., & Fokaides, P. A. (2022). Numerical and environmental analysis of post constructive application of PCM coatings for the improvement of the energy performance of building structures. *Construction and Building Materials*, *364*, 129984.

[27] Del Rio, D. D. F., Kez, D. A., Wong, F. W. B. H., Dolfi, A., Srinivasan, G., & Foley, A. M. (2024). “Encapsulating” experts’ knowledge: An exploration of benefits, risks, barriers and future opportunities of PCMs. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *71*, 103980.

[28] Arinaitwe, E., McNamee, M., & Försth, M. (2024). Is the fire performance of phase change materials a significant barrier to implementation in building applications? *Journal of Energy Storage*, *94*, 112421. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112421

[29] Yun, B. Y., Kang, Y., Kim, Y. U., Wi, S., & Kim, S. (2021). Practical solutions with PCM for providing thermal stability of temporary house, school and hospital in disaster situations. *Building and Environment*, *207*, 108540.

[30] Almtuly, O. S., Wahid, M. A., Ardani, M. I., Hussen, H. M., & Al-Dhief, F. T. (2025). A Comprehensive Review of Integrating Phase Change Materials with Radiant Cooling Panel Systems for Energy Savings and Improved Thermal Comfort Designs. *Results in Engineering*, 105169.

[31] Farouq, M. M., Jimenez-Bescos, C., Riffat, S., & Mirzaei, P. A. (2023). Development and thermal characteristic study of an integrated phase change material earthbag unit for temporary housings. *Energy and Buildings*, *284*, 112852.

[32] Zhu, L., Yang, Y., Chen, S., & Sun, Y. (2018). Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, *138*, 35–47.

[33] Tong, S., Nie, B., Li, Z., Li, C., Zou, B., Jiang, L., Jin, Y., & Ding, Y. (2021). A phase change material (PCM) based passively cooled container for integrated road-rail cold chain transportation – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, *195*, 117204.

[34] Xu, X., Zhou, Y., Zhang, S., Zhai, X., & Zhang, X. (2023). Preparation and heat transfer model of stereotyped phase change materials suitable for cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, *60*, 106610.

[35] Michel, B., Glouannec, P., Fuentes, A., & Chauvelon, P. (2017). Experimental and numerical study of insulation walls containing a composite layer of PU-PCM and dedicated to refrigerated vehicle. *Applied Thermal Engineering*, *116*, 382–391.

[36] Umate, T. B., & Sawarkar, P. D. (2023). A review on thermal energy storage using phase change materials for refrigerated trucks: Active and passive approaches. *Journal of Energy Storage*, *75*, 109704.

[37] Zhao, L., Yu, Q., Li, M., Wang, Y., Li, G., Sun, S., Fan, J., & Liu, Y. (2022). A review of the innovative application of phase change materials to cold-chain logistics for agricultural product storage. *Journal of Molecular Liquids*, *365*, 120088.

[38] Mellouli, S., Askri, F., Alqahtani, T., Algarni, S., Alshammari, B. M., & Kolsi, L. (2025). Evaluating phase change materials vs. metal hydrides for energy storage in flat plate solar collectors: A performance comparison. *Journal of Energy Storage*, *113*, 115618.

[39] Manikandan, S., Devarajan, Y., & Vickram, S. (2025). Advancing Thermal Energy Storage with Industrial and Agricultural Waste-Derived Phase Change Materials: A Path Towards Sustainable Energy Systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 107068.

[40] Wang, J., Li, H., Bingwa, N., Yu, H., Li, G., Xiao, Q., Li, S., Guo, M., & Ma, X. (2024). Comparison of UiO-66(Zr) and its derivate in shape stabilized phase change materials: Thermal storage performance and characterizations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *277*, 113127.

[41] Selvam, D. C., Devarajan, Y., Beemkumar, N., Bhanot, D., Acharya, S. K., Sukhdev, A., & Agrawal, T. (2025). Advances in Nano-Enhanced phase change materials and hybrid thermal energy storage systems: paving the way for sustainable energy solutions. *Results in Engineering*, 105729.

[42] Noro, M., Lazzarin, R., & Busato, F. (2013). Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage. *International Journal of Refrigeration*, *39*, 104–116.

[43] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed., *Wiley*, 2007.

[44] Y.A. Çengel, A.J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed*., McGraw-Hill*, 2015.

[45] M.F. Modest, Radiative Heat Transfer, 3rd ed., *Academic Press*, 2013.

[46] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering, 23* (2003), 251–283.

[47] F. Wunder, S. Sonnick, T. Vetter, T. Walch, H. Kaufmann, M. Rädle (2024). MELT Plates: The Abolition of Overheating in Lightweight Buildings through an Optimised form of Latent Heat Storage. *Reviewed paper*, *REAL CORP 2024: KEEP ON PLANNING FOR THE REAL WORLD*

[48] H. Justin, “Optimierung einer Polypropylen-Verschweißungsanlage”, Tesi di Laurea Triennale, Hochschule Mannheim (Germania), Anno accademico 2022/2023

Ringraziamenti

Al termine di questo elaborato vorrei ringraziare il mio relatore, il Prof. Domiziano Mostacci, perché mi ha dato la possibilità di svolgere questo studio all'estero, confrontandomi con realtà più grandi e ben diverse, e di trascrivere ciò che ho toccato con mano in Germania. Un ringraziamento va anche al Prof. Matthias Rädle e ai tutor che mi hanno seguito durante il mio percorso a Mannheim, l'Ing. Sebastian Sonnick e l'Ing. Fredrick Wunder, per avermi aiutato con professionalità ed entusiasmo, risolvendo tutti i miei dubbi.

Grazie alla mia famiglia, vi voglio bene! Con il vostro supporto costante ho raggiunto questo nuovo traguardo, anche se, come direbbe mamma, questo non è l'arrivo ma è il punto di partenza. Qualsiasi sia la direzione della mia vita, ho la certezza che quando mi volterò indietro vi troverò lì, pronti a sostenermi in un'altra pazzia e a farmi credere nei miei sogni (se non sto attenta arriverete prima di me; in macchina, in aereo, in treno, mi raggiungete ovunque). Mamma e papà, grazie per avermi permesso di vivere Bologna, una città che mi è entrata nel cuore, che mi ha accolto con tante opportunità e anche tanto cibo (il super panino con la mortadella post-esame era d'obbligo). Mamma, grazie per i mille pacchi da giù, consegnati tramite i corrieri più disparati, pieni di frutta e verdura dal sapore vero, di carne buona già pronta per essere congelata, di coccole cioccolatose, regalini per le mie coinquiline e calendari dell'avvento personalizzati. Grazie per tutti i vostri sforzi e sacrifici, economici, fisici (papi quante volte abbiamo percorso quella strada per la stazione di Afragola?!) e anche soprattutto mentali, perché sopportarmi durante il periodo esami e tesi non credo sia stato facile. Grazie a mia sorella Simona, anche se ultimamente il nostro rapporto è diventato un po' più tortuoso, potrai contare sempre su di me perché il bene che si prova tra sorelle va oltre ogni discussione.

Ho la fortuna di provare ancora l'amore incondizionato dei miei nonni e per questo vorrei ringraziarli. Grazie nonna Rosalia, per tutto, per essere semplicemente te stessa, mi fai sentire sempre piena d'amore con i tuoi mille baci. Nonno Umberto grazie per dimostrarmi il tuo affetto con le ricariche di cibo che mi dai ogni volta che scendo a salutarvi, guai a cambiare gusto preferito di

succo di frutta, per te sarà sempre pera. Grazie nonna Rita, ad ogni esame mi hai sempre fatto sentire invincibile con le tue parole, i tuoi baci telefonici mi sono sempre arrivati carichi di amore. Grazie zio Alessandro, i tuoi abbracci sono pochi, ma pieni di affetto e orgoglio nei miei confronti, ti voglio bene. Un pensiero speciale va a due persone che fanno parte della mia vita anche se solo con l'anima, non servono tante parole: Nonno Antonio e Zio Antonio, mi mancate!

Grazie ad un'altra famiglia, che da un paio di anni mi ha accolto come se ne facessi parte da una vita intera. Grazie Signor Angelo e Signora Maria, perché i vostri figli praticamente adesso sono diventati 6, non saprei da dove partire per ringraziarvi, il vostro affetto, la vostra bontà e la vostra disponibilità mi travolgono ogni giorno. Vorrei dire grazie anche a tutta la mia sfilza di cognate e cognati; grazie Grazia e Tony, Tiziana e Michele, Adriano e Laura, Renato e Tina, perché non mi è mai capitato di sentirmi così accolta e ben voluta da qualcuno in così poco tempo. Ognuno di voi mi dà qualcosa di diverso ma tutti mi trattate come una sorella, specialmente le mie cognate! Grazie anche a tutti i miei nipotini acquisiti: Irene, Maria, Noemi, Giorgia, Francesco, Azzurra, Angelo e Giuseppe. Sentirmi chiamare zia 'Checherica' la prima volta mi ha fatto sciogliere il cuore, e ogni volta mi emoziona, vi voglio bene!

Parlando di famiglie, vorrei ringraziare la mia famiglia del Nord, i padovani!! Grazie Paolo, Katia, Eleonora, Maddalena e Francesco, non so per cosa ringraziarvi di più, per la vostra presenza costante sicuramente, per il vostro supporto a distanza e per tutte le volte che mi avete ospitata lì da voi. Grazie per avermi accolta e coccolata ogni volta (specialmente con l'asiago), con voi non serve dire neanche una parola perché ormai mi conoscete e mi capite a volo!

Grazie a tutte le mie amicizie, dalle più storiche alle più recenti, ai miei cugini di secondo grado, grazie a chi c'è sempre, anche se ci sentiamo pochissimo, e ci vediamo meno, vero Vale?! Promesso che adesso andremo a mangiare quella famosa pizza, lo so che mi vuoi bene così come sono! Grazie semplicemente per esserci ad Antonella, Vera, Maria, Alessandra, Rinaldo, Toni e Shafna, e grazie ai ragazzi con i quali ho condiviso la triennale, Roberta, Grazia, Raffaele, Giuseppe e Tony per essere ancora qui a festeggiare insieme. Grazie ad AC4, le mie

coinquiline Rita, Selene e Giulia, avete riempito i miei due anni a Bologna di ricordi e momenti indimenticabili. Grazie Carmine e Marco perché non mi avete mai trattato come la fidanzata del vostro migliore amico, ma come amica fin dall'inizio. Un grazie speciale va alle mie amiche di una vita intera, Chiara, Alessia e Andreana; l'università ci ha allontanate fisicamente per un po' di tempo, ma voi ci siete state per le lagne pre- e post- esami, per spronarmi a fare sempre di più e oggi siete qui per festeggiare insieme, vi voglio bene!

Si dice che ciò che viene scritto alla fine di un discorso è ciò che rimane più impresso e per questo ho lasciato per ultimo i ringraziamenti ad una persona che fa parte della mia vita da un tempo relativamente breve, ma che sono sicura rimarrà per sempre. Grazie a te, Antonio. Non riesco a trovare parole che possano davvero ringraziarti per tutto l'appoggio che mi hai dato durante questo percorso. La prima telefonata dopo ogni esame era solo ed esclusivamente per te, e non mi serviva parlare, perché dal mio tono di voce tu avevi già capito. Sei stato l'instancabile forza della natura che mi ha permesso di continuare anche quando la mia mente non reggeva più. Il tuo gioire ogni volta per un mio successo, il tuo essere fiero di me sono ciò che mi hanno spronato. Sei stato la mia motivazione più grande, mi hai fatto capire quanto fosse importante fare questo percorso per rendere orgogliosa solo ed esclusivamente me stessa. Bologna, la Germania, qualsiasi luogo non è troppo lontano per te, mi hai raggiunto e mi hai fatto capire quanto ciò che stavamo costruendo fosse importante. Non ho mai provato un senso di tristezza come quando ci salutavamo in stazione, in attesa di un treno o vicino ad un bus, anche se sapevo che al mio ritorno tu saresti stato lì. Sei entrato nella mia vita come un uragano, un uragano carico di emozioni, che mi ha stravolto e mi ha fatto scavare dentro di me come mai avevo fatto prima. Sei la persona più buona che io abbia mai conosciuto, riesci a leggermi dentro anche quando non riesco ad esprimermi. Quando il mio mondo crolla io mi giro a guardarti e tu mi stai sostenendo per non far cadere nulla, tra le tue braccia tutte le mie preoccupazioni spariscono completamente, sei l'unico posto in cui tornare ogni volta mi fa rinascere, sei la mia casa, sei il mio tutto. Resta sempre al mio fianco, per gioire dei nostri traguardi futuri, insieme. Ti amo.