

---

# Materiali per la transizione del costruito

---

# Traiettorie di innovazione



---

# Materiali per la transizione del costruito

---

# Traiettorie di innovazione

# Colophon

Questo volume e gli esiti di ricerca in esso pubblicati sono stati finanziati dall'Unione europea - NextGenerationEU attraverso il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) Missione 4 "Istruzione e ricerca" Componente 2 "Dalla ricerca all'impresa" Investimento 1.5 - Ecosistema ECS\_00000043 "iNEST - Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem" (CUP F43C22000200006) - Spoke 4.

## Materiali per la transizione del costruito. Traiettorie di innovazione

a cura di  
Elisa Zatta  
Rosaria Revellini

ISBN (cartaceo)  
979-12-5953-173-5  
ISBN (digitale)  
979-12-5953-244-2  
DOI  
10.57623/979-12-5953-244-2



Il presente volume è pubblicato in modalità Open Access Gold. Il file è scaricabile dalla piattaforma Anteferma Open Books [www.anteferma.it/aob/](http://www.anteferma.it/aob/)

### editore

Anteferma Edizioni  
via Asolo 12, Conegliano, TV  
edizioni@anteferma.it

### progetto grafico

Giulia Ciliberto  
Luca Coppola  
Pietro Costa  
Giacomo Dal Prà

### copyright



Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

---

iNEST

Spoke 4  
Città, Architettura  
e Design Sostenibile

---

Coordinatore

Lorenzo Fabian

---

Coordinamento  
scientifico

Massimiliano Condotta (luav)  
Lorenzo Fabian (luav)  
Luciano Gamberini (UniPD)  
Elena Marchigiani (UniTS)  
Alberto Sdegno (UniUD)  
Lorenzo Bellicini (CRESME)  
Pierpaolo Campostrini (CORILA)

### Disclaimer

L'apparato iconografico presente è volto a supportare la comprensione dei prodotti della ricerca illustrati nel volume. Tutte le fonti delle figure sono state opportunamente segnalate dalle curatrici e dagli autori.

---

## GRUPPO DI LAVORO

### Università Iuav di Venezia (Spoke leader)

Massimiliano Condotta (coordinatore task 2.1), Martino Dereani, Giuseppe Emmi, Alice Rampazzo, Rosaria Revellini, Valeria Tatano, Elisa Zatta.

### Università degli Studi di Udine

Giovanni Comi, Vincenzo d'Abramo, Anna Frangipane, Giada Frappa, Margherita Pauletta, Claudia Pirina, Alberto Sdegno.

### Università degli Studi di Trieste

Thomas Bisiani, Gianfranco Guaragna, Paola Limoncin, Carlo Antonio Stival.



# Indice

---

	Introduzione Massimiliano Condotta	p. 7
	Circolare e <i>low-carbon</i> : soluzioni progettuali e costruttive per il territorio del Nord-Est Elisa Zatta, Rosaria Revellini	p. 11
<hr/>		
CAPITOLO 1 Esperienze sul campo	Progettare con il compensato strutturale Lorena Alessio	p. 18
<hr/>		
CAPITOLO 2 Traiettorie di innovazione	Design di transizione: adattabilità, flessibilità, trasformazione Thomas Bisiani, Gianfranco Guaragna, Paola Limoncin, Carlo Antonio Stival	p. 44
	Ripensare la dismissione. Riutilizzo dei materiali e pratiche innovative di intervento Giovanni Comi, Vincenzo d'Abramo, Anna Frangipane, Claudia Pirina, Alberto Sdegno	p. 60
	Calcestruzzo riciclato con elevate percentuali di aggregato riciclato: aspetti applicativi e casi studio Alice Rampazzo, Massimiliano Condotta	p. 78
	Malte innovative con fibre di origine naturale per il rinforzo delle strutture tramite TRC Margherita Pauletta, Giada Frappa	p. 92
	Componenti strutturali in legno per ridurre l'impronta ambientale delle costruzioni: analisi di applicazioni in LVL e multistrato Elisa Zatta, Martino Dereani	p. 104
	Architettura <i>rice-based</i> : dalla filiera risicola ai materiali e prodotti per l'edilizia Rosaria Revellini, Valeria Tatano	p. 120
	Materiali a cambiamento di fase: proprietà e applicazioni in edilizia Giuseppe Emmi	p. 134
<hr/>		
	Conclusioni Valeria Tatano	p. 148

# Materiali a cambiamento di fase: proprietà e applicazioni in edilizia

I materiali a cambiamento di fase (*Phase Change Materials* - PCM) sono sostanze che vengono comunemente adottate affinché nei processi di scambio termico questi possano subire un cambiamento di stato a delle prefissate temperature di fusione/solidificazione. Questi materiali se utilizzati in questa modalità sono in grado di scambiare (accumulare o rilasciare) grandi quantità di energia termica sotto forma del cosiddetto calore di scambio di tipo latente. Questo processo di scambio termico avviene durante la transizione/cambiamento di fase (es. da solido a liquido o da liquido a solido). Rispetto ai materiali convenzionali a basso costo, utilizzati ai fini dell'accumulo termico (come la semplice acqua ad esempio), i PCM offrono una capacità di stoccaggio termico sensibilmente superiore: infatti il calore latente tipico di un PCM può raggiungere valori dell'ordine di 100–250 kJ/kg (calore che viene scambiato con la particolare sostanza senza variazione della temperatura del mezzo), mentre la stessa quantità di acqua ad esempio, a parità di energia termica scambiata richiede una variazione di temperatura di oltre 50°C (dato che il calore specifico dell'acqua è di ~4,2 kJ/(kg·K)). Inoltre i PCM scambiano calore a temperatura pressoché costante durante il cambiamento di fase, mantenendo quindi invariata la differenza di temperatura presente tra due mezzi e che è alla base della forzante di scambio termico. Questa particolare caratteristica può contribuire a stabilizzare la temperatura del mezzo durante questo processo, contribuendo ad esempio a ridurre le oscillazioni della temperatura interna di un ambiente, nel caso di applicazioni legate all'edilizia (Zhou *et al.*, 2012). In pratica, un utilizzo dei PCM nel settore edilizio (sia a livello involucro che a livello impianto, o in entrambi gli ambiti) contribuisce positivamente ad incrementare l'inerzia termica del sistema. Ad esempio, in occasione del verificarsi di un picco della temperatura esterna che normalmente comporta un incremento del carico termico o uno scostamento significativo dei parametri microclimatici di comfort, la presenza del PCM nel sistema può ridurre gli effetti sull'impianto meccanico e/o sulle grandezze legate al comfort termico. Il PCM è infatti in grado di assorbire (o rilasciare) grandi quantità di energia termica ma utilizzando volumi di materiale decisamente meno significativi se paragonati alla semplice acqua o ai materiali da costruzione. Come definito in precedenza, sia le oscillazioni termiche interne da un lato che la potenza istantanea richiesta dai componenti di impianto e dai generatori a servizio dell'edificio riescono a beneficiare degli effetti positivi di questa soluzione tecnologica. Di conseguenza, rispetto a un sistema di accumulo tradizionale che sfrutta solo calore di tipo sensibile (come acqua o materiali edili tradizionali), il PCM garantisce maggiore densità energetica e un comportamento termico più uniforme (Pereira *et al.*, 2025).

Riassumendo, grazie a queste sue particolari proprietà, l'uso di PCM in edifici consente di:

- ridurre e sfasare temporalmente i picchi di domanda termica;
- ridurre i consumi energetici in regime di riscaldamento e/o raffrescamento;
- incrementare e potenziare lo sfruttamento di fonti rinnovabili.

### **Tipologie di PCM: vantaggi e limiti**

I PCM possono essere suddivisi in tre classi principali. Gli organici (paraffine, acidi grassi) hanno elevate calori latenti e cicli di carica/scarica piuttosto stabili nel tempo. Presentano però delle problematiche legate alla sicurezza nel loro utilizzo in quanto sono spesso combustibili, sono attualmente costosi e presentano bassa conducibilità termica. Gli inorganici (sali idrati e miscele eutettiche di sali) offrono in genere calori latenti maggiori, densità superiori rispetto agli organici e minore costo. Differentemente dai precedenti possono subire fenomeni di sottoraffreddamento (lentezza nel cristallizzare) o separazione di fase dei componenti, richiedendo infatti additivi che ne consentano una stabilizzazione. Infine i PCM eutettici sono miscele progettate per cambiare di fase a temperature intermedie e puntuali, combinando vantaggi di entrambi. Per l'utilizzo nel campo dell'edilizia, i PCM vengono spesso incapsulati in microsfele o inseriti in pannelli compositi, per evitare dispersione del prodotto ed eventuali reazioni con altri materiali.

Tra i principali vantaggi figurano quindi:

- elevata densità di accumulo termico a parità di massa/volume rispetto ai fluidi/materiali normalmente utilizzati in ambito edilizio;
- scambio di calore a temperatura pressoché costante (nel range della temperatura di cambiamento di fase);
- contribuiscono a mantenere stabile la temperatura interna degli ambienti e riducono i carichi di picco cui deve far fronte l'impianto;
- minori oscillazioni termiche e di conseguenza miglior comfort abitativo.
- I limiti/svantaggi da prendere in considerazione includono:
  - variazione di volume durante il cambio di fase (possibile stress meccanico);
  - sottoraffreddamento e segregazione di fase (fenomeno che si presenta solitamente dei sali idrati);
  - infiammabilità per i PCM organici;
  - costo elevato;
  - degrado termico e stabilità nel lungo periodo.

### **Casi studio in edifici e impianti termici**

Di seguito si riportano alcuni esempi affrontati in letteratura sulle possibili pratiche di utilizzo dei PCM in ambito edilizio lavorando sulla parte involucro e negli impianti di riscaldamento/climatizzazione a servizio di edifici. Per ogni caso è stato descritto il contesto, l'applicazione e i risultati ottenuti.

*Edificio dimostrativo realizzato in Italia (Osterman et al., 2023).*

Questo caso di studio utilizza degli accumuli termici con PCM. La realizzazione di questo sistema rientra nell'ambito del progetto europeo H2020 HEART (Holistic Energy and Architectural Retrofit Toolkit). Un edificio multifamiliare esistente è stato dotato di un impianto sperimentale. L'obiettivo principale del progetto è la riqualificazione energetica degli edifici,

al fine di ridurre il divario tra produzione e consumo di energia attraverso una serie di tecnologie, tra cui l'accumulo termico con PCM. La sperimentazione ha utilizzato un sistema di accumulo tradizionale (solo acqua) con all'interno dei container di PCM (circa 30% del volume). È stato selezionato un PCM di tipo inorganico, con una temperatura di congelamento nominale di 24°C e una temperatura di fusione di 25°C. Il materiale è stato incapsulato in container sferici inseriti all'interno dei serbatoi di accumulo. Il materiale selezionato ha garantito un accumulo termico molto efficiente, anche con volumi limitati e piccole differenze di temperatura. I dati misurati in laboratorio restituiscono un accumulo di 3 kWh di energia termica ogni 100 L di volume, pari a circa 30 kWh per 1000 L. Considerando il volume dei tre serbatoi di accumulo inseriti nel sistema sperimentale si ottengono quindi circa 90 kWh. Questo risultato evidenzia un guadagno energetico notevole rispetto all'utilizzo della sola acqua. Inoltre, si è osservato che il serbatoio con PCM riesce a bilanciare meglio la domanda di acqua calda nelle ore di punta mattutine. In conclusione, l'integrazione di PCM ha aumentato la capacità complessiva di stoccaggio termico del sistema impiantistico e ha permesso di coprire la domanda energetica con flussi termici più stabili.

#### FIGURA 01 – P. 144

##### *Condominio esistente in Puglia (Stasi et al., 2024)*

Un edificio plurifamiliare edificato nella zona di Bari, Italia, durante gli anni '80, è stato oggetto di uno studio basato su simulazioni numeriche. Nelle ipotesi di intervento esaminate, sono stati adottati dei pannelli in cartongesso con all'interno del PCM. Il PCM utilizzato per le analisi ha una temperatura di cambio fase pari a circa 25°C per consentire un suo intervento passivo sia in inverno che in estate. Lo studio esamina l'applicazione dei pannelli con PCM in tre diversi spessori (74,2 mm, 37,1 mm e 20,8 mm) a pareti esterne, soffitti e a pareti e soffitti contemporaneamente. Tra le varie applicazioni, l'utilizzo del PCM solo sulle pareti ha massimizzato il risparmio di riscaldamento con l'aumentare dello spessore (26,6%), mentre l'applicazione a soffitto ha massimizzato il risparmio energetico in raffreddamento (17,5%). Le soluzioni combinate hanno offerto i benefici stagionali più equilibrati, consentendo di ottenere le maggiori riduzioni energetiche complessive (24,1%). Questi risultati dimostrano come l'uso di PCM con punti di fusione intorno a 25°C possono condurre a dei buoni risultati in termini di risparmio energetico sia in regime di raffrescamento che in regime di riscaldamento, modulando gli apporti solari in ingresso e migliorando l'inerzia termica complessiva dell'edificio rispettivamente. Lo studio ha inoltre messo in evidenza l'importanza dell'abbinamento dei PCM con sistemi di raffrescamento di tipo ibrido, in particolare durante i mesi estivi, soluzione quest'ultima utile per ottimizzare il ciclo di carica e scarica del materiale. È stato osservato infatti che periodi prolungati di temperature diurne estreme, abbinate a ridotte variazioni di temperatura sempre durante il periodo diurno, potrebbero compromettere la capacità di accumulo termico del PCM, riducendone così le prestazioni complessive. Questi risultati suggeriscono la necessità di un'attenta valutazione preliminare del contesto climatico in cui i PCM vengono impiegati e di come i sistemi ibridi siano necessari per mantenere l'efficacia del materiale anche in condizioni climatiche particolarmente difficili. In aggiunta, l'attuale elevato costo del materiale e la limitata accessibilità al mercato continuano a rendere i PCM una soluzione tecnologica di nicchia.

#### FIGURA 02 – P. 144

### *Casa residenziale in Australia (Kumar et al., 2021)*

Questo studio analizza la possibilità di efficientare le strutture edilizie di un edificio esistente migliorando l'isolamento termico con intonaco in aerogel e PCM. L'intonaco in aerogel contribuisce a migliorare la resistenza termica della struttura mentre il PCM migliora il comportamento dinamico della stessa, lavorando a temperature vicine alla temperatura di cambiamento di fase del PCM utilizzato. Sebbene diversi studi abbiano esaminato separatamente le prestazioni termiche e di risparmio energetico dell'intonaco in aerogel e del PCM, nessuno studio è stato condotto sulle prestazioni energetiche risultanti da un uso combinato delle due tecnologie.

Lo studio suggerisce 12 diverse strategie di retrofit, tra cui aerogel e PCM. Gli interventi proposti sono stati valutati numericamente in termini di stress termico, risparmio energetico, picco di raffreddamento, emissioni ambientali e costo del ciclo di vita. Il caso studio oggetto di indagine è una tipica casa australiana che si sviluppa su un unico piano. I risultati evidenziano che l'applicazione di intonaco in aerogel e PCM sul lato esterno delle pareti esterne e di PCM e isolamento nei soffitti è l'opzione migliore considerando tutti gli indicatori di prestazione e la facilità di applicazione. Rispetto al contesto di riferimento, questa strategia ha ridotto significativamente le ore di forte disagio percepito all'interno dell'edificio. Dal punto di vista energetico, lo stesso tipo di intervento ha ridotto il consumo di energia, il picco di richiesta di raffreddamento, le emissioni di CO<sub>2</sub> e i costi energetici operativi rispettivamente del 40%, 65%, 64% e 35%. Sebbene i risparmi sui costi del ciclo di vita per questa strategia siano stati inferiori rispetto al caso con soffitto isolato e parete intonacata senza PCM, la prima è stata considerata l'opzione migliore per le sue prestazioni superiori in termini di energia, emissioni e comfort. L'analisi parametrica ha dimostrato che 0,025 m è lo spessore ottimale sia per il PCM che per l'intonaco in aerogel, e il punto di fusione di 25 °C del PCM è ottimale per ottenere i migliori risultati tra tutti gli indicatori di prestazione per una tipica casa australiana nel clima di Melbourne.

### FIGURA 03 – P. 145

### *Analisi comparativa di edificio campione in clima subtropicale umido (Xiaoqin et al., 2020)*

In una località cinese situata in un clima subtropicale umido, sono stati costruiti due edifici leggeri affiancati con il fine di eseguire una sperimentazione orientata alla quantificazione degli effetti dei PCM inseriti all'interno delle strutture leggere. Un edificio è stato utilizzato come edificio di controllo/riferimento e quindi non dotato di accorgimenti particolari mentre il secondo è stato utilizzato come edificio campione oggetto di riqualificazione e dotato di PCM. La superficie in pianta di ciascun edificio campione è di 6,25m<sup>2</sup>, con un'altezza netta del soffitto di 2,2 m. La struttura presenta un controsoffitto e un sottotetto con doppia falda con pendenza di 16,5°. Una porta in alluminio di 0,9 m × 2,0 m è stata installata sulla parete esposta a nord, mentre una finestra in vetro monostrato rivestito di 0,76 m × 1,04 m è stata fissata sulla parete esposta a est. Il PCM utilizzato nell'edificio campione presenta una temperatura di fusione di 25 °C. Per la valutazione delle prestazioni è stata considerata la temperatura effettiva dell'aria esterna con un'umidità relativa del 40-90% e una velocità del vento variabile da 2 m/s a 6 m/s proveniente da est, ovest, sud e nord. Lo studio ha previsto la realizzazione di un modello di simulazione sviluppato in ambiente EnergyPlus che è stato verificato e tarato rispetto ai dati sperimentali acquisiti dalle attività sul campo. Dalle simulazioni effettuate

si è ottenuto un risparmio energetico dal 3,9% al 2,6% in corrispondenza ad un'umidità relativa variabile dal 40 al 90% nel periodo estivo, effetto positivo ottenuto grazie alla sola presenza del PCM. Diversamente nel periodo invernale non sono emersi risultati significativi in termini di risparmio energetico. Globalmente il risparmio energetico annuo è diminuito dall'1,64% all'1,32% con un aumento dell'umidità relativa dal 40 al 90%. Similmente il risparmio energetico medio si è ridotto dall'1,43% allo 0,92% con un aumento della velocità del vento da 2 m/s a 6 m/s. Dal punto di vista economico, il periodo di ammortamento dell'investimento è stato inferiore a 10 anni con un prezzo del PCM inferiore a 18,0 Yuan/kg.

*Confronto operativo di celle di prova passive in Portogallo (Figueiredo et al., 2024)*

Lo studio riassume i risultati di un'indagine sul comportamento termico di una soluzione costruttiva contenente PCM. In particolare, l'attività sperimentale ha previsto la realizzazione di una cella di prova a grandezza naturale, suddivisa in due zone simili una delle quali dotata di PCM incorporato nella malta del pavimento. L'indagine ha confrontato i dati di monitoraggio (temperatura) dei due ambienti. L'obiettivo principale di questa ricerca è valutare il potenziale di questo tipo di soluzione per la mitigazione del surriscaldamento degli ambienti. Lo studio numerico si è reso necessario per estendere l'analisi a condizioni variabili ma tipiche dei climi del Sud Europa. Lo studio numerico è stato condotto utilizzando il software EnergyPlus ed effettuando una serie di simulazioni parametriche. Mediante il *tool* di simulazione sono stati esaminati diversi tassi di ventilazione naturale come condizione al contorno del sistema analizzato.

Parallelamente le attività sperimentali e i dati di monitoraggio sono stati utilizzati per la taratura del modello di simulazione di cui sopra. Dai dati sperimentali sono emersi periodi prolungati di discomfort termico in entrambe le celle di prova (con e senza PCM), in particolare si sono riscontrate problematiche di surriscaldamento. Tuttavia, è stato dimostrato che l'applicazione di PCM in una delle celle di prova ha portato a una riduzione di quasi 10°C del picco massimo di temperatura dell'aria. Nell'analisi della simulazione, l'aumento della portata di ventilazione ha evidenziato una riduzione lineare delle ore di surriscaldamento.

Il comportamento rilevato è dovuto all'effetto tampone del PCM. Nelle ore diurne il materiale fonde e assorbe calore a temperatura costante (limitando il riscaldamento dell'aria), mentre nelle ore notturne solidifica restituendo il calore accumulato. Questo caso studio conferma a livello sperimentale che i PCM inseriti nelle strutture di pavimentazione possono contribuire significativamente nel contenere le escursioni di temperatura interna in edifici solari passivi. Il lavoro svolto in questo studio ha dimostrato l'applicabilità e il potenziale del PCM in soluzioni costruttive, che dovrebbero essere fortemente incentivate per i climi dell'Europa meridionale.

*Pavimento radiante con PCM in Corea del Sud (Park and Kim, 2019)*

Lo studio proposto esamina inizialmente le precedenti attività di ricerca inerenti l'utilizzo dei PCM applicati a terminali di impianto del tipo radiante a pavimento affrontando anche gli sviluppi di tipo tecnico di questa tecnologia. Da questa prima indagine conoscitiva è emerso che lo stato attuale della ricerca teorica e sperimentale relativa al PCM in questo specifico settore è ancora in una fase iniziale. In particolare, nel periodo di pubblicazione dell'articolo non esistono ricerche orientate al miglioramento delle prestazioni energetiche negli ambienti interni combinando il PCM e una struttura del pavimento. Infatti, un sistema di riscaldamento a pavimento radiante basato su PCM che utilizza l'acqua come fluido termovettore

all'interno delle tubazioni dell'impianto può facilmente essere realizzato ed utilizzato come sistema innovativo. Questo studio ha dimostrato che la temperatura di cambio fase del PCM più adatta per il sistema studiato varia da circa 35°C a 45°C per uno spessore del pavimento di 70 mm e uno spessore del PCM di 10 mm. I risultati dei test simulati, volti a valutare le prestazioni del sistema di riscaldamento a pavimento radiante con e senza PCM, hanno evidenziato che la stanza dotata di PCM è in grado di mantenere una temperatura di 0,2°C superiore a quella della stanza senza PCM. Infatti, durante un ciclo di riscaldamento, la stanza dotata di PCM ha mantenuto temperature superficiali più elevate. Quattro ore dopo lo spegnimento, la temperatura superficiale del pavimento con PCM era di oltre 2°C più alta rispetto al pavimento senza PCM. In sintesi, la presenza del PCM ha consentito di estendere il rilascio di calore in ambiente nel tempo, garantendo così un minor decadimento della temperatura interna. Questi risultati ottenuti mostrano concretamente come un modulo PCM integrato in un sistema radiante possa migliorare l'accumulo e il rilascio di calore del pavimento migliorando allo stesso tempo in comfort percepito dall'utente.

#### FIGURA 04 – P. 145

##### *Edificio residenziale moderno in Australia (Alam et al., 2017)*

La ricerca proposta analizza l'effetto dell'uso dei PCM sul comfort percepito dagli occupanti. Il miglioramento delle condizioni di comfort mediante l'ausilio di PCM può essere ottenuto attraverso tre diversi approcci: passivo, attivo e *free-cooling*. Precedenti studi a quello in oggetto hanno evidenziato che tutti e tre i metodi possono migliorare significativamente l'efficienza energetica e/o il comfort termico. Tuttavia, non esiste in letteratura alcun studio che confronti l'efficacia dei diversi metodi di applicazione. L'obiettivo del presente studio è confrontare e analizzare l'efficacia dei metodi di applicazione dei PCM, passivi e *free-cooling*, in un edificio residenziale ubicato a Melbourne, in Australia. Il metodo di applicazione passiva utilizza un PCM macroincapsulato, i cosiddetti materassini BioPCM, installati nei soffitti dell'edificio. Nel *free-cooling*, l'aria esterna viene immessa nell'ambiente interno dopo essere passata attraverso uno scambiatore di calore potenziato con PCM. Lo studio comparativo è stato condotto utilizzando modelli numerici validati per entrambi i metodi di applicazione. I modelli di simulazione sono stati sviluppati utilizzando il *tool* di simulazione EnergyPlus e il software di fluidodinamica computazionale (CFD – Computational Fluid Dynamics) ANSYS. Per l'edificio oggetto di studio, l'uso dei PCM in modalità *free-cooling* è il più efficace nel ridurre la temperatura interna. Durante il periodo considerato di sette giorni, il PCM (con temperatura di transizione nominale di 25°C) utilizzato con una applicazione di tipo passivo ha comportato una riduzione fino a 0,44°C della temperatura di picco interna, rispetto a una riduzione di 2,63°C nel caso di applicazione del tipo *free-cooling*, ovvero circa sei volte la riduzione ottenuta nel caso passivo. Nonostante l'utilizzo di diverse strategie di uso dei PCM in applicazioni di tipo passivo, la loro efficacia nel ridurre la temperatura di picco è sempre risultata inferiore rispetto alle applicazioni del tipo *free-cooling*. Studi parametrici hanno inoltre dimostrato che la temperatura ottimale del PCM deve essere scelta con attenzione in base al metodo di applicazione, poiché i metodi di *free-cooling* e quelli di tipo passivo sono significativamente influenzati rispettivamente dalla temperatura dell'aria esterna e dalla temperatura interna.

*Analisi comparativa su quattro tipologie edilizie tipiche del Regno Unito* (Hepple *et al.*, 2024)

La ricerca propone l'utilizzo dei PCM integrati nelle murature esterne. Il posizionamento di un PCM in facciata è influenzato da molteplici fattori, tra cui le proprietà del PCM, la tipologia di edificio e le condizioni ambientali interne ed esterne.

Questo lavoro riporta i risultati uno studio numerico basato sulla simulazione di un edificio campione confrontando le prestazioni termiche di quattro tipologie abitative tipiche del Regno Unito (villetta bifamiliare, villetta a schiera, villetta unifamiliare e appartamento) situate nel Nord-Est dell'Inghilterra. Il PCM è stato installato nella parete esterna delle abitazioni, modificandone la posizione nella stratigrafia per determinare quella più efficace. Dai risultati ottenuti è emerso che il PCM posizionato internamente risulta essere il più efficace per tutte le tipologie abitative. In tutti i casi analizzati, dal punto di vista energetico, il PCM ha prodotto riduzioni minime delle dispersioni termiche. È stato inoltre riscontrato che l'ampia superficie delle pareti esterne della casa unifamiliare ha avuto un buon impatto dal punto di vista dell'accumulo di energia termica, in grado di compensare la trasmissione del calore e stabilizzare le condizioni di temperatura interne.

FIGURA 05 – P. 146

*Muratura tradizionale a Il Cairo* (Kamel *et al.*, 2022)

La presente ricerca affronta e approfondisce due tematiche specifiche. La prima tematica riguarda la scelta del PCM ottimale che dipende fortemente dalle condizioni ambientali (irradiazione solare e temperatura ambiente). Lo studio utilizza un modello verificato per l'irradiazione solare e una distribuzione accettabile della temperatura ambiente nella città Il Cairo, in Egitto. Per il caso analizzato è stata utilizzata la tipica costruzione muraria come muro di base di riferimento. Pertanto, i risultati sono utilizzabili per l'applicazione in città con condizioni climatiche simili a quella oggetto di studio. La seconda tematica affrontata ha considerato la reale dipendenza del calore specifico dalla temperatura, ottenuta tramite calorimetria a scansione differenziale (DSC).

L'integrazione di PCM negli involucri edilizi può ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio e le conseguenti emissioni di gas serra. Lo studio esamina l'impatto del PCM integrato in una parete tradizionale sul consumo energetico di picco e medio per il raffrescamento. L'analisi è stata condotta mediante un codice di calcolo sviluppato in ambiente MATLAB e basato sulla tecnica dei volumi finiti. Diversi casi di riferimento e risultati sperimentali sono stati utilizzati per la taratura e validazione del codice. Le condizioni al contorno dipendenti dal tempo utilizzano la radiazione solare e la temperatura misurate a Il Cairo. Le simulazioni sono state eseguite considerando otto diversi PCM. Lo studio mira a valutare le prestazioni di ciascun PCM in diverse posizioni e con diversi spessori e orientamenti delle pareti. I calcoli hanno rivelato che l'utilizzo del tipo di PCM e della posizione corretti potrebbe ridurre in media i consumi del 38%. Similmente anche il picco termico può raggiungere riduzioni dell'ordine del 50-60%. Ciò significa che un muro tradizionale potenziato con PCM ben selezionato può attenuare significativamente l'onda termica, limitando notevolmente la trasmissione del calore verso l'interno dell'edificio. Anche in questo clima molto caldo, i PCM dimostrano un buon potenziale, a patto di usare materiali con temperatura di cambiamento fase adeguata.

FIGURA 6 – P. 147

### *Edificio di ricerca in Iran (Esbati et al., 2020)*

In questo studio, un edificio residenziale, frutto di una ricerca, viene considerato come caso da studiare per l'ottimizzazione energetica mediante l'utilizzo di PCM. La prima parte delle attività di ricerca ha avuto come obiettivo lo studio del comportamento termico dell'edificio mediante simulazioni dinamiche e il calcolo del suo fabbisogno energetico. Successivamente, con misure sperimentali sull'edificio campione, il consumo effettivo è stato confrontato con i risultati del fabbisogno energetico ottenuti dal software di calcolo dinamico. Questa procedura ha consentito di tarare e validare il modello di calcolo dell'edificio da utilizzare successivamente per le attività di ottimizzazione. Grazie all'utilizzo del software di simulazione dinamico, sono stati valutate differenti ipotesi di isolamento termico così come l'utilizzo di un particolare PCM, questi ultimi in grado di accumulare e rilasciare calore a specifiche temperature durante il processo di cambio fase. Pur avendo caratteristiche simili, questi materiali si differenziano infatti per il punto di fusione, e proprio grazie alla loro capacità di trattenere calore durante il giorno e rilasciarlo quando necessario, contribuiscono all'efficienza energetica dell'edificio, comportandosi come veri e propri isolanti. Il software utilizzato, DesignBuilder, include diverse tipologie di PCM con caratteristiche differenti. I risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate evidenziano che l'impiego di questi materiali può portare a un risparmio energetico fino al 30% in regime di riscaldamento e fino all'8% in regime di raffrescamento.

### **Conclusioni**

L'impiego dei PCM rappresenta una soluzione tecnologica avanzata ed estremamente promettente per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Grazie alla loro capacità di accumulare e rilasciare calore durante la fase di scambio latente, i PCM permettono di gestire in maniera più efficiente i carichi termici, riducendo le oscillazioni di temperatura interna e migliorando il comfort abitativo. A parità di volume, offrono una densità di accumulo termico nettamente superiore rispetto ai materiali convenzionali, contribuendo inoltre a stabilizzare la temperatura del mezzo durante il processo di scambio termico.

I casi studio analizzati, sia su edifici reali che attraverso simulazioni numeriche, evidenziano chiaramente i benefici ottenibili: riduzione dei consumi energetici sia in riscaldamento che in raffrescamento, sfasamento e attenuazione dei picchi di domanda termica, maggiore efficienza degli impianti e minore impatto ambientale. Tuttavia, per garantire prestazioni ottimali, è necessario selezionare attentamente la tipologia di PCM più adatta in funzione del contesto climatico e delle caratteristiche dell'edificio, nonché integrare questi materiali con tecnologie complementari (come l'isolamento aerogel o impianti ibridi).

Nonostante gli attuali limiti legati ai costi, alla stabilità nel lungo periodo e alla complessità di integrazione, i PCM rappresentano una risorsa chiave nella transizione verso edifici a energia quasi zero (nZEB) e un sistema edilizio più resiliente e sostenibile. Le prospettive future risiedono nello sviluppo di materiali più stabili, sicuri ed economicamente accessibili, nonché nell'incremento delle applicazioni su scala reale, supportate da un quadro normativo e incentivante adeguato.

In definitiva, l'integrazione dei PCM nel settore edilizio non è soltanto una possibilità tecnologica, ma una concreta opportunità per promuovere un nuovo approccio alla progettazione energetica degli edifici, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione e adattamento climatico.

## Riferimenti bibliografici

- Alam, M., Sanjayan, J.G., Zou, P.X.W., Ramakrishnan, S., Wilson, J.L. (2017) 'A Comparative Study on the Effectiveness of Passive and Free Cooling Application Methods of Phase Change Materials for Energy Efficient Retrofitting in Residential Buildings', in *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 993–1002. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.259>
- Esbati, S., Amooie, M.A., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M.H., Pourfayaz, F., Ming, T. (2020) 'Investigating the Effect of Using PCM in Building Materials for Energy Saving: Case Study of Sharif Energy Research Institute', in *Energy Science & Engineering*, vol. 8, n. 4, pp. 959–972. <https://doi.org/10.1002/ese3.328>
- Figueiredo, A., Silva, T., Gonçalves, M., Samagaio, A. (2024) 'Application of Novel Phase Change Material Constructive Solution for Thermal Regulation of Passive Solar Buildings', in *Buildings*, vol. 14, n. 2, 493. <https://doi.org/10.3390/buildings14020493>
- Heppele, R., Zhao, Y., Yang, R., Zhang, Q., Yang, S. (2024) 'Investigating the Effects of PCM-Integrated Walls on Thermal Performance for UK Residential Buildings of Different Typologies', in *Buildings*, vol. 14, n. 11, 3382. <https://doi.org/10.3390/buildings14113382>
- Kamel, J.A., Mina, E.M., Elsabbagh, A.M. (2022) 'Implementation of Phase Change Material for Cooling Load Reduction: A Case Study for Cairo, Egypt', in *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 30, 13. <https://doi.org/10.1007/s44189-022-00013-5>
- Kumar, D., Alam, M., Sanjayan, J.G. (2021) 'Retrofitting Building Envelope Using Phase Change Materials and Aerogel Render for Adaptation to Extreme Heatwave: A Multi-Objective Analysis Considering Heat Stress, Energy, Environment, and Cost', in *Sustainability*, vol. 13, n. 19, 10716. <https://doi.org/10.3390/su131910716>
- Osterman, E., Del Pero, C., ZavrI, E., Leonforte, F., Aste, N., Stritih, U. (2023) 'Phase-Change Material Thermal Energy Storage for the Smart Retrofitting of Existing Buildings', in *Energies*, vol. 16, n. 17, 6127. <https://doi.org/10.3390/en16176127>
- Park, J., Kim, T. (2019) 'Analysis of the Thermal Storage Performance of a Radiant Floor Heating System with a PCM', in *Molecules*, vol. 24, n. 7, 1352. <https://doi.org/10.3390/molecules24071352>
- Pereira, J., Souza R., Oliveira, J., Moita, A. (2025) 'Phase Change Materials in Residential Buildings: Challenges, Opportunities, and Performance', in *Materials*, vol. 18, n. 9, 2063. <https://doi.org/10.3390/ma18092063>
- Stasi, R., Ruggiero, F., Berardi, U. (2024) 'Assessing the Potential of Phase-Change Materials in Energy Retrofitting of Existing Buildings in a Mediterranean Climate', in *Energies*, vol. 17, n. 19, 4839. <https://doi.org/10.3390/en17194839>
- Xiaoqin, S., Ziyang, Z., Siyuan, F., Jie, L. (2022) 'Thermal performance of a lightweight building with phase change material under a humid subtropical climate', in *Energy and Built Environment*, vol. 3, n. 1, pp. 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.11.001>
- Zhou, D., Zhao, C.Y., Tiana, Y. (2012) 'Review on thermal energy storage with phase change materials (PCM) in building applications', in *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>



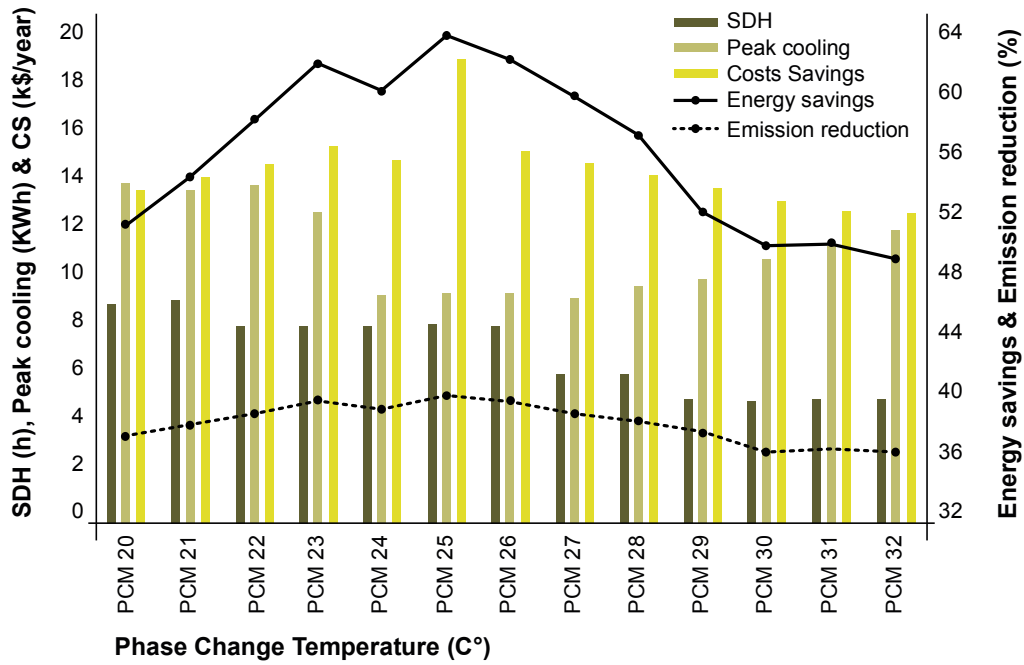
**FIGURA 01**

Sistemi di accumulo e uno dei container di PCM inseriti all'interno.  
Osterman *et al.*, 2023.



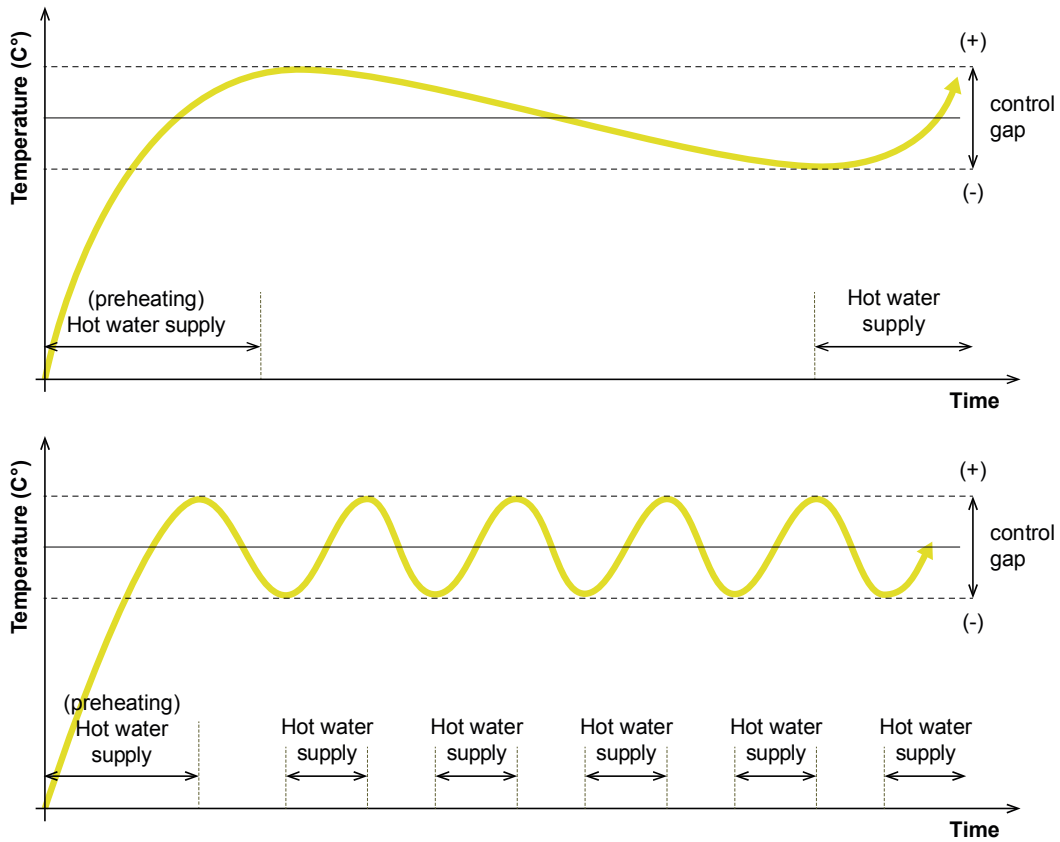
**FIGURA 02**

Esempio di applicazione di pannelli in PCM.  
Stasi *et al.*, 2024.



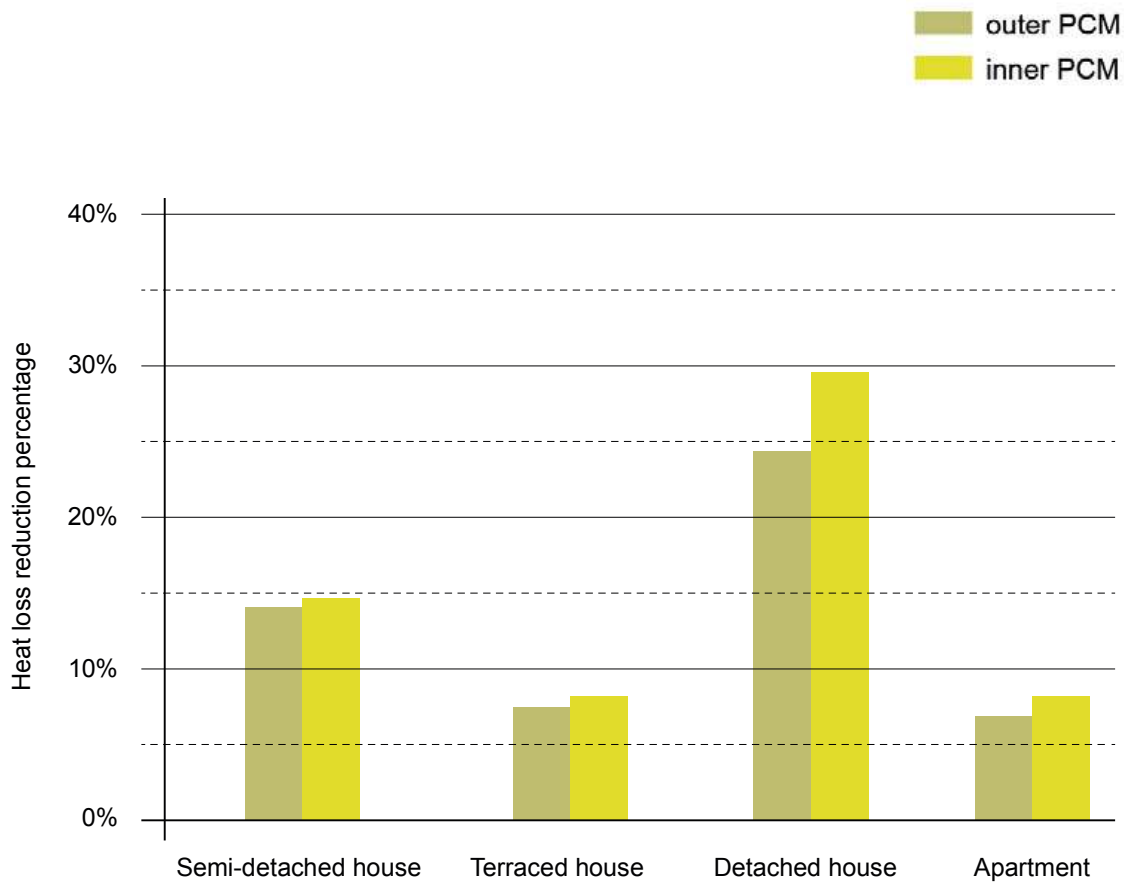
**FIGURA 03**

Risultati delle simulazioni per differenti tipi di PCM.  
Kumar *et al.*, 2021.



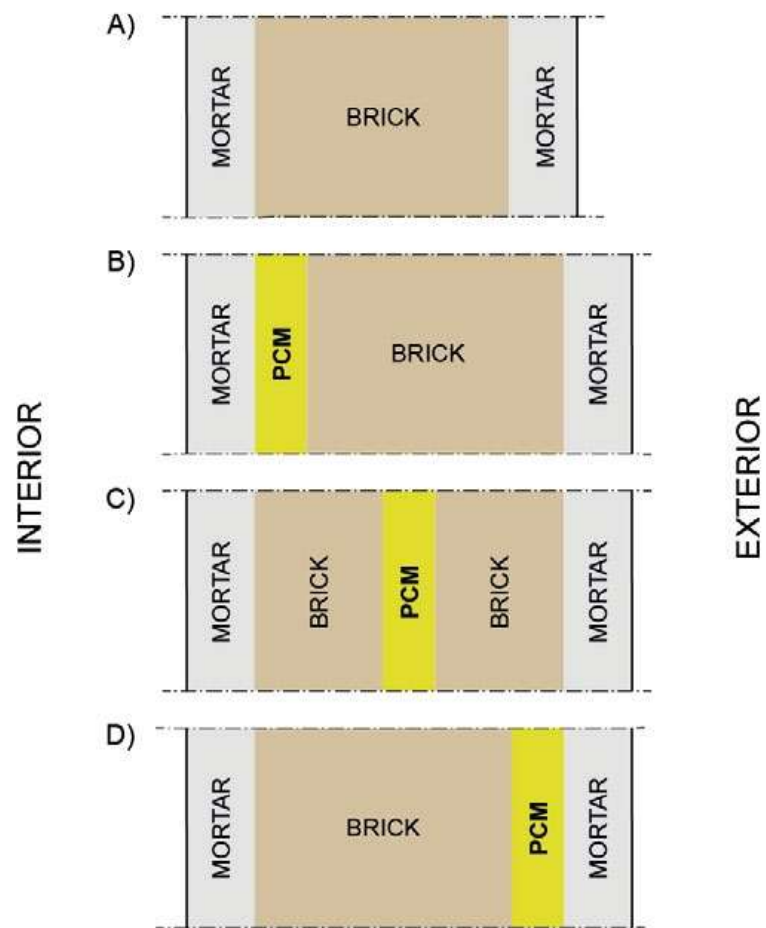
**FIGURA 04**

Comportamento termico del pavimento radiante con PCM (a) e senza PCM (b).  
Park and Kim, 2019.



**FIGURA 05**

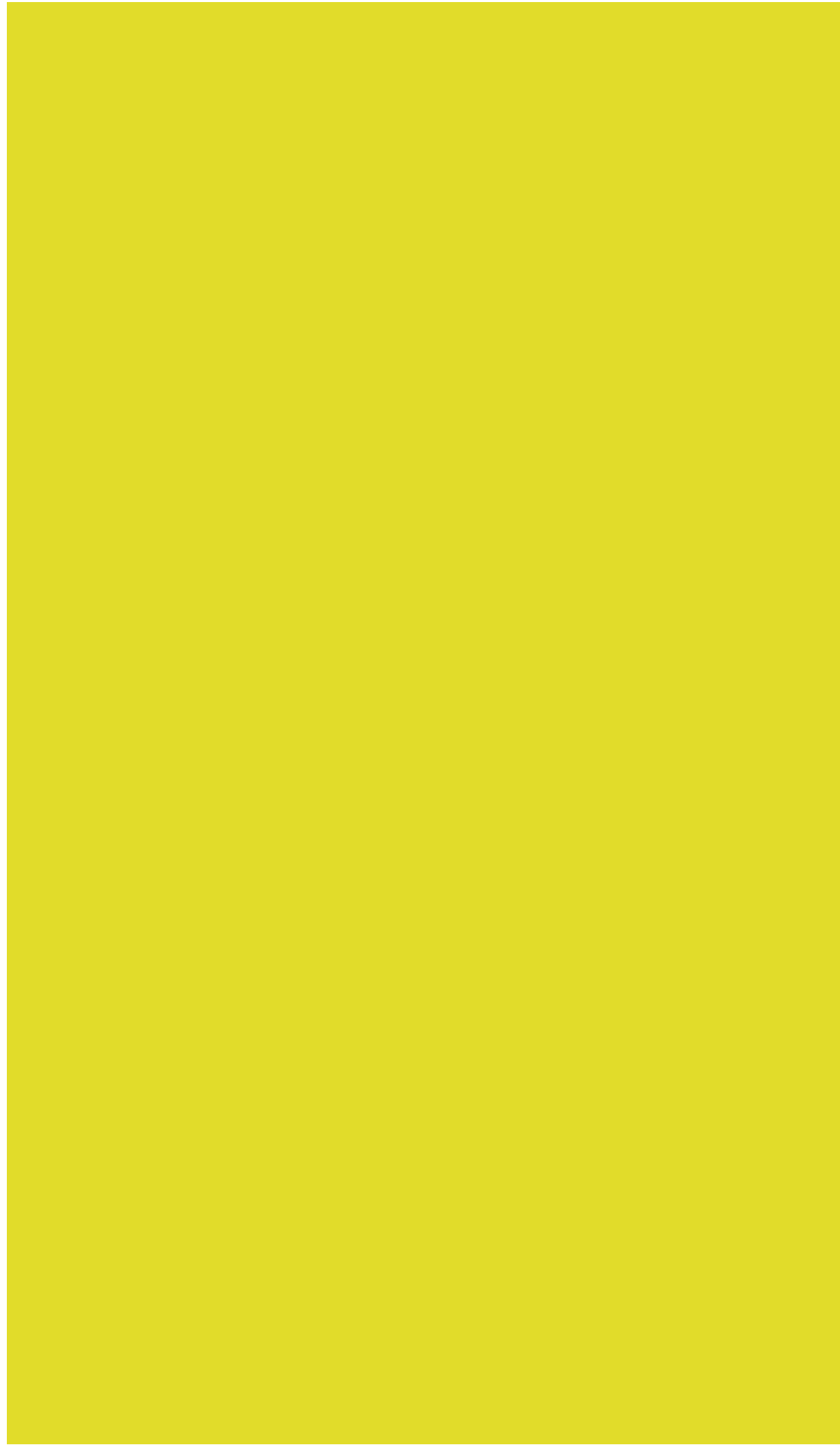
Risultati ottenuti in termini di riduzione percentuale delle perdite di calore. Hepple *et al.*, 2024.



**FIGURA 6**

Composizione della parete tipo: a) Base senza PCM, b) PCM interno, c) PCM in mezzeria, d) PCM esterno. Kamel *et al.*, 2022.





---

Volume 2

Spoke 4  
City, Architecture,  
Sustainable design

---

A cura di

Elisa Zatta  
Rosaria Revellini

Il volume presenta gli esiti dell'attività "New Materials" dello Spoke 4 "Città, Architettura e Design Sostenibile" del progetto iNEST. Il lavoro affronta il tema della sostenibilità su scala urbana e edilizia, focalizzandosi sull'impiego di materiali e tecniche costruttive innovativi volti a supportare una transizione del territorio del Nord-Est a partire dal suo edificato.

Le sette traiettorie di ricerca illustrate presentano soluzioni che, nel rispetto dei principi dell'economia circolare, mirano a migliorare l'efficienza energetica degli edifici e ridurre l'impatto ambientale del costruito esistente e futuro.

Collocandosi nello specifico contesto del Nord-Est italiano, la ricerca intende promuovere strategie coerenti con le fragilità e peculiarità dello stesso, proponendo strumenti operativi a supporto di un approccio consapevole del territorio.

€ 20.00



9 791259 531735