



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**Prospettive tecniche, applicazioni e analisi
economica dei materiali a cambiamento di fase
(PCM) nell'edilizia sostenibile.**

Relatore: Giulia Righetti

Laureando: Matteo Trolese
Matricola: 2003386

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

1. INTRODUZIONE [30]	2
2. SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO [19][20][21]	3
2.1. TIPOLOGIE DI ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA [2][21][22][23][24][25].....	4
2.2. ACCUMULO DI CALORE LATENTE [24]	6
2.3. CLASSIFICAZIONE E PROPRIETA’ DEI PCM [25][26][27][28][29].....	6
3. TES CON TECNOLOGIA ATTIVA/PASSIVA [1][2][3]	10
3.1. METODI DI INCORPORAZIONE [4][5][6][7]	10
4. TES CON TECNOLOGIA PASSIVA – APPLICAZIONI	12
4.1. APPLICAZIONI DEL PCM NEL MURO DI TROMBE [37][40][41][42]	12
4.2. PANNELLI DI RIVESTIMENTO PCM [8][9]	13
4.3. PARETI PCM [8][3][13].....	16
4.4. PAVIMENTI E SOFFITTI PER IL RISCALDAMENTO SOLARE PASSIVO [13][8][14][15][37]	22
4.5. PERSIANE PCM [16]	27
4.6. CONFRONTO FRA LE VARIE TIPOLOGIE DI APPLICAZIONE [38]	28
5. ANALISI ECONOMICA CONVENIENZA INSTALLAZIONE PCM	30
5.1. ANALISI ECONOMICA DEGLI EDIFICI INTEGRATI CON PCM NELLE VARIE ZONE MONDIALI [17]	30
5.2. ANALISI LCC E DEL PERIODO DI AMMORTAMENTO DI UN COMPLESSO DI UFFICI DOTATI DI PARETE TIM-PCM COLLOCATI IN DIVERSI CLIMI [34].....	34
5.2.1. DEFINIZIONE DEL MODELLO	34
5.2.2. ANALISI ECONOMICA	36
6. CONCLUSIONI	41
7. BIBLIOGRAFIA	43

1. INTRODUZIONE [30]

Con l'avvento della rivoluzione industriale e il relativo sviluppo della scienza e della tecnica, il fabbisogno di energia ha riscontrato un notevole incremento, vedendo nello sfruttamento del combustibile fossile la principale risorsa di approvvigionamento.

Come rilevato da un'indagine della commissione europea sull'energia e sull'ambiente [30], le fonti non rinnovabili dominano tutt'ora il mercato mondiale dell'energia con una quota del 81% circa, dimostrando ancora una volta la loro notevole importanza.

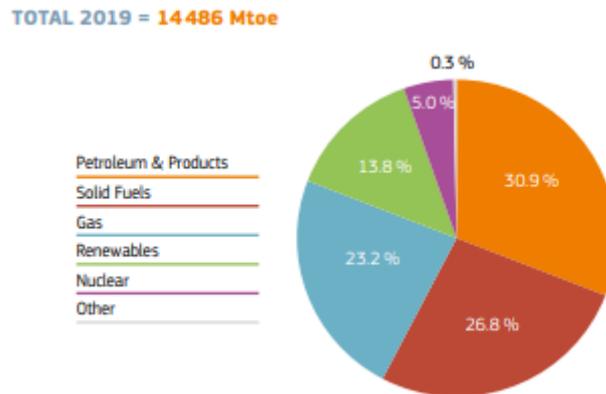


Figura 1.1 – Approvvigionamento energetico totale mondiale per tipologia di combustibile. [30]

Nonostante la loro popolarità, i problemi legati all'inevitabile esaurimento dei giacimenti e delle emissioni di sostanze inquinanti durante il loro utilizzo stanno spingendo sempre più ricercatori a cercare delle valide soluzioni al fine di ridurre il più possibile il loro impiego.

Il settore dell'edilizia è il principale consumatore di energia in tutto il mondo, con una quota totale del 30% del consumo energetico complessivo [4]; migliorare l'efficienza degli edifici significherebbe ridurre sia la dipendenza dai combustibili fossili, sia le emissioni totali di gas serra.

Questo studio analizza e affronta il tema dell'accumulo di energia termica con particolare attenzione allo stoccaggio latente mediante PCM (Phase Change Materials), particolari materiali in grado di accumulare un grande quantitativo di energia solidificando e fondendosi. Verranno dunque enunciate le loro principali applicazioni in ambito edilizio come soluzione per la riduzione dei consumi e dell'impatto ambientale, senza tralasciare il fattore economico.

2. SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO [19][20][21]

I sistemi di accumulo termico sono tecnologie in grado di immagazzinare energia termica per poterla utilizzare in un istante temporale successivo. L'obiettivo principale del TES (Thermal Energy Storage) è quello di superare il disallineamento tra la generazione di energia termica prodotta da fonti rinnovabili (come sole o vento) e l'uso di tale energia. La mancata corrispondenza può riguardare il tempo, la temperatura, la potenza e la posizione.

In questi sistemi, il processo mediante cui l'energia viene fornita ad un sistema di accumulo in modo da essere utilizzata in un secondo momento coinvolge tre distinte fasi: carico, stoccaggio, scarico. Tali fasi generano un ciclo di accumulo completo.

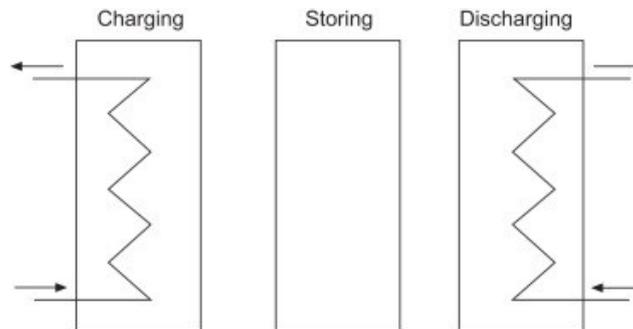


Figura 2.1 - Ciclo di accumulo completo di un sistema TES. [19]

I principali benefici che si possono ottenere implementando un sistema TES sono:

- Migliore economia, con una riduzione di costi operativi e capitale;
- Migliore efficienza, ottenendo un uso più efficiente dell'energia;
- Minore inquinamento ambientale e minori emissioni di CO₂;
- Migliori prestazioni e migliore affidabilità di sistema.

Per dare un'idea di quale possa essere l'impatto di questa tecnologia è interessante citare il seguente studio [19] risalente al 2011, il cui fine è calcolare il potenziale di energia risparmiata a livello europeo. Nella valutazione sono stati considerati sia l'ambito edilizio sia quello industriale, analizzandone i seguenti fattori:

- Riduzione del carico termico derivato; si riferisce alla diminuzione della domanda di energia termica che sarebbe stata necessaria se non fosse stato utilizzato un sistema di accumulo di energia.
- Risparmio di energia termica/elettrica in riferimento al calore o al freddo che viene immagazzinato e che può essere riutilizzato.
- Emissioni di CO₂ con riduzione mediante stoccaggio dell'energia.

I risultati ottenuti sono raffigurati nel seguente grafico:

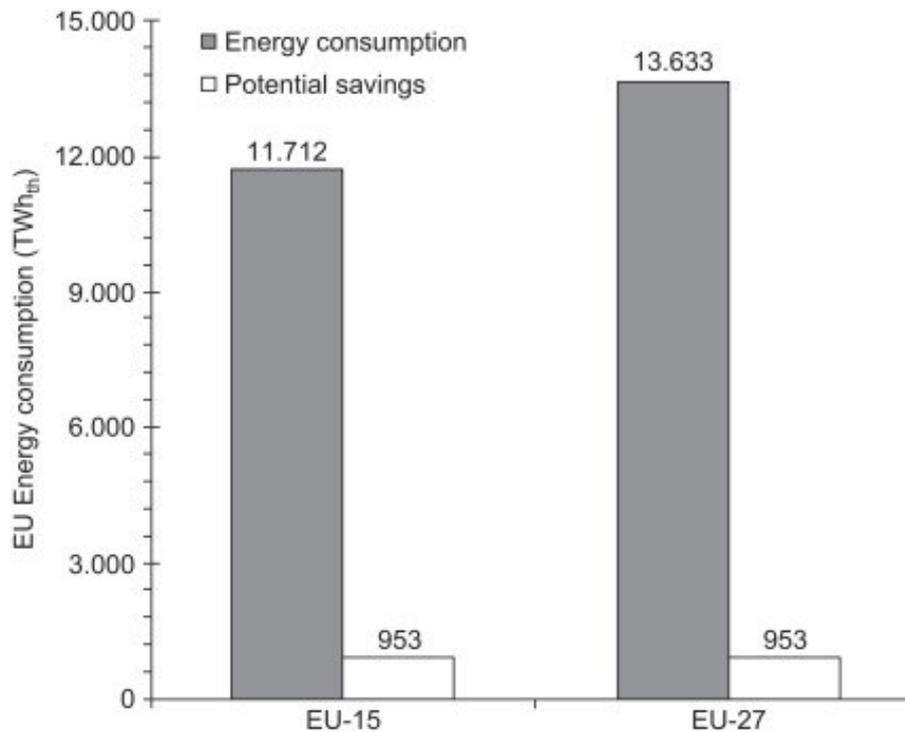


Figura 2.2 - Confronto dei potenziali risparmi energetici annuali e dei sistemi TES nell'UE-15 e nell'UE-27 utilizzando dati del 2005. [31]

È possibile notare come il risparmio energetico in EU-15 e UE-27 sia rispettivamente del 8% e del 7%, nel 2005.

Un altro studio condotto da IRENA [21] afferma come, entro il 2030, il mercato globale dei TES potrebbe triplicare le sue dimensioni passando da un gigawattora (GWh) di capacità installata nel 2019 a oltre 800 GWh entro il 2030. Di conseguenza, anche gli investimenti in queste tecnologie subirebbero un notevole incremento, passando dai 13 ai 28 miliardi di dollari.

Dunque, risulta evidente come gli investimenti in sistemi TES possano contribuire al raggiungimento degli obiettivi climatici e di sostenibilità a lungo termine, incentivando la transizione verso fonti di energia rinnovabili.

2.1. TIPOLOGIE DI ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA [2][21][22][23][24][25]

Esistono tre tipologie di accumulo di energia.

- Accumulo di calore sensibile: l'energia viene immagazzinata aumentando o diminuendo la temperatura di un materiale di stoccaggio liquido o solido (ad esempio, acqua, sabbia, sali fusi o rocce). Generalmente, il mezzo di accumulo viene scelto in base alla sua capacità termica e allo spazio disponibile per lo stoccaggio. I principali vantaggi dei sistemi TES SHS (Sensible Heat Storage) sono l'economicità e l'assenza di rischi associati all'uso di materiali tossici.
- Accumulo di calore latente: utilizza la transizione di fase di un materiale; viene utilizzato il cambiamento di fase solido-liquido, poiché fondendosi immagazzina grandi quantità di calore a temperatura costante, che viene rilasciato quando il materiale si solidifica. I materiali utilizzati per questa tipologia di accumulo prendono il nome di PCM.

- Accumulo termochimico: sfrutta una reazione chimica ad alta energia come mezzo di stoccaggio. È attualmente poco sviluppata e soffre di problemi riguardanti l'irreversibilità del processo e di instabilità chimica.

Confronto accumulo sensibile - latente

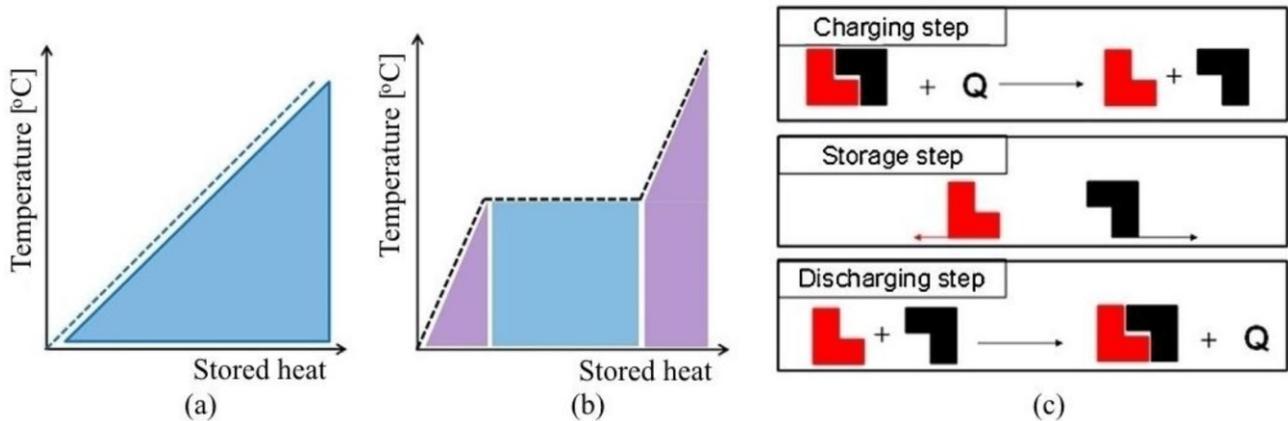


Figura 2.1.1 - Metodi di accumulo dell'energia termica. (a) Calore sensibile, (b) Calore latente, (c) Reazione termochimica. [2]

Come è possibile osservare dai grafici precedenti, la principale differenza tra tecnologie SHS e LHS (Latent Heat Storage) è che l'accumulo di calore sensibile causa un aumento di temperatura, mentre l'accumulo di calore latente avviene a temperatura costante.

Al giorno d'oggi, i sistemi di accumulo SHS sono quelli maggiormente diffusi e sviluppati essendo economici e in grado di garantire un impatto ambientale minore. Tuttavia, la scarsa capacità di accumulo di energia per unità di volume rende tali sistemi efficienti solo se caratterizzati da grandi dimensioni. Sono stati dunque introdotti sistemi di accumulo latente, caratterizzati da una densità di energia immagazzinabile più elevata rispetto ai sistemi SHS: in particolare, sono in grado di incrementare, a parità di volume, il calore di un fattore compreso fra le 5 e le 14 volte.

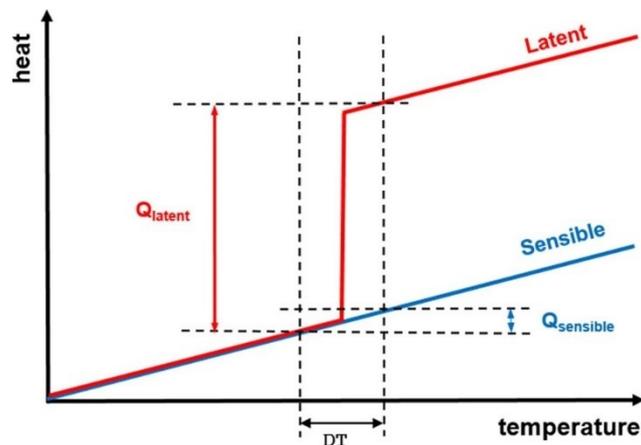


Figura 2.1.2 - Principio di funzionamento dell'accumulo di calore latente e sensibile. [25]

Il loro limite è la bassa conduttività termica, che può essere superata mediante:

- incapsulazione sottile;
- massimizzando l'aria di trasferimento del calore;
- utilizzo di una matrice di grafite.

2.2. ACCUMULO DI CALORE LATENTE [24]

Al giorno d'oggi, l'accumulo di calore latente avviene mediante un determinata tipologia di materiali detti PCM, acronimo di "Phase Change Materials".

Questi materiali trasferiscono energia termica mediante i cambiamenti di stato, i quali possono essere di vari tipi: solido-solido, solido-liquido, liquido-gassoso e solido-gassoso.

Nelle transizioni solido-solido il calore viene immagazzinato mentre il materiale cambia la propria struttura reticolare. Queste tipologie di PCM offrono requisiti di contenimento meno rigorosi e una maggiore flessibilità di progettazione; sono materiali caratterizzati da un basso calore latente, che li rende poco desiderabili.

Le transizioni solido-gas e liquido-gas sono in grado di fornire un'elevata densità di accumulo di energia, ma le grandi variazioni di volume sono collegate a problemi di contenimento, escludendone la loro potenziale utilità nei sistemi di accumulo termico.

Le trasformazioni solido-liquido hanno una densità di accumulo relativamente più piccola rispetto al liquido-gas. Tuttavia, queste trasformazioni comportano una variazione del 10% di volume, dimostrandosi economicamente interessanti per l'uso nei sistemi di accumulo di energia termica. Dunque, il materiale a cambiamento di fase solido-liquido è quello maggiormente utilizzato poiché può immagazzinare una certa quantità di energia in un peso e in un volume di materiale relativamente piccoli rispetto alle altre tipologie di transizione di fase.

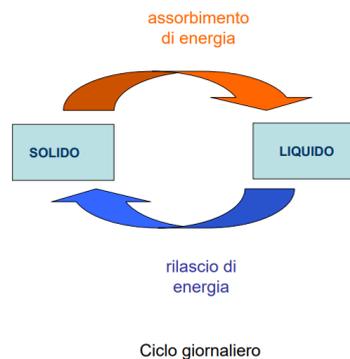


Figura 2.2.1 - Proprietà passaggi di stato dei PCM. [24]

2.3. CLASSIFICAZIONE E PROPRIETA' DEI PCM [25][26][27][28][29]

I PCM vengono classificati in tre diverse tipologie sulla base della loro composizione chimica. Possono essere:

- PCM organici;
- PCM inorganici;
- PCM eutettici.

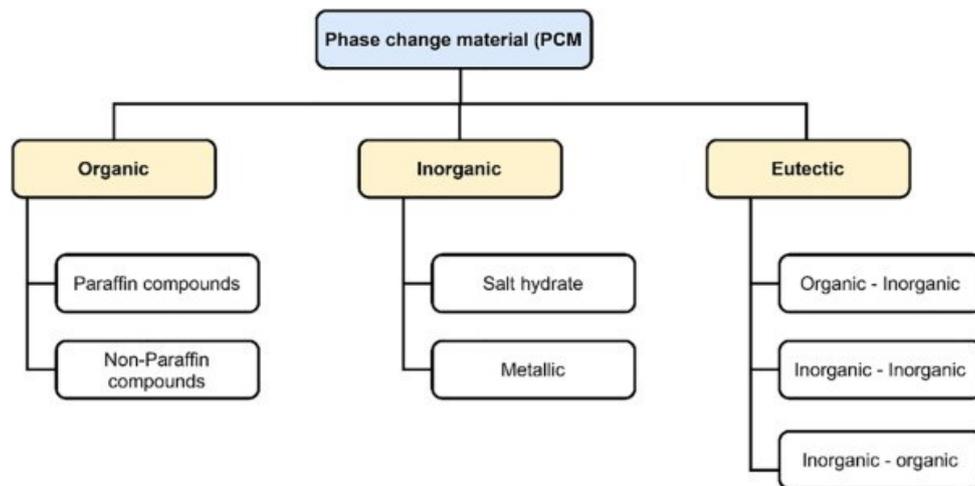


Figura 2.3.1 – Classificazione dei PCM. [44]

PCM organici [26]

La tipologia organica è stata utilizzata con successo in vari campi ed applicazioni, come il riscaldamento di ambienti, il raffreddamento di dispositivi elettronici, i sistemi di refrigerazione, le automobili, la lavorazione/stoccaggio di alimenti e nelle industrie spaziali.

Questi composti tendono comunque a dividersi in due categorie:

- Paraffina. Miscela di idrocarburi solidi, in prevalenza alcani, le cui molecole presentano catene con più di 20 atomi di carbonio. È un derivato del petrolio.
- Composti non paraffinici. Composti di idrocarburi che non contengono catene di atomi di carbonio saturi. Fra questi, gli acidi grassi sono il composto più popolare, poiché presenta caratteristiche molto simili (in alcuni casi perfino superiori) alla paraffina.

La principale caratteristica dei PCM organici è il loro basso punto di fusione, che ne consente l'uso in applicazioni a bassa temperatura. I vantaggi riguardano l'assenza di separazione di fase e un calore di fusione latente costante; tuttavia, sono caratterizzati da una bassa conducibilità termica. Per migliorarla, è necessario incrementare la velocità di trasferimento del calore, lavorando sull'ampiezza della superficie.

PCM inorganici

I PCM inorganici si dividono a loro volta in due categorie:

- Sali idratati. I più usati tra i PCM inorganici, sono sali che cristallizzando inglobano al loro interno molecole d'acqua, modificandone la struttura cristallina. Hanno alcuni limiti come la segregazione di fase e il superaffreddamento.
- Materiali metallici. Sono caratterizzati da un'elevata conducibilità termica, da elevato calore di fusione per unità di volume e una bassa tensione di vapore. Tuttavia, il basso calore specifico e l'elevato peso sono caratteristiche che non devono essere trascurate.

Più in generale, sono materiali caratterizzati da un'elevata densità di calore latente volumetrico, stabilità ciclica e conducibilità termica relativamente elevata. Il limite risulta essere l'elevata corrosività dei sali stessi, che induce l'utilizzo di materiali di alta qualità e, di conseguenza, dispendiosi.

PCM eutettici

I PCM eutettici sono dati dalla composizione di due o più componenti che possono essere organico-organico, organico-inorganico o inorganico-inorganico in cui ciascuno dei componenti cambia la sua fase in modo congruente e forma una miscela cristallizzata con punto di fusione e congelamento definito. La loro principale caratteristica sta nel fatto che non presentano segregazione di fase durante la fusione e il congelamento. Sono scarsamente utilizzati a causa del loro costo elevato.

Proprietà dei PCM

La scelta di un materiale per l'accumulo di calore latente dipende dalla tipologia di applicazione a cui si vuole ambire, poiché questi materiali presentano caratteristiche diverse. Per una corretta scelta è necessario considerare determinate proprietà desiderabili riguardanti l'ambito termodinamico, cinetico, fisico, chimico, economico ed ambientale.

Le principali caratteristiche per ambito sono:

- Termico
 - Elevato calore latente di transizione
 - Elevata conducibilità termica
 - Temperatura di fusione/congelamento adatta
- Fisico
 - Piccola variazione di volume
 - Bassa tensione di vapore
 - Alta densità
- Cinetico
 - Velocità di cristallizzazione sufficiente
 - Nessun superraffreddamento
- Chimico
 - Stabilità chimica a lungo termine
 - Nessuna tossicità
 - Non infiammabile
 - Non corrosivo
- Economico
 - Abbondante
 - Conveniente
 - Disponibile
 - Commercialmente valido

In ogni caso, non esiste un materiale in grado di soddisfare tutte le caratteristiche precedentemente elencate poiché spesso sono presenti lacune in grado di compromettere le loro prestazioni nei sistemi TES. Le principali sono:

- bassa conduttività termica. Influisce sulla velocità del processo di cambiamento di fase e porta a scarse prestazioni del sistema di accumulo. Questo vale per quasi tutte le classi di PCM puri, ad eccezione di quelli di tipo metallico. L'effetto della bassa conducibilità termica può manifestarsi durante i processi di carica (assorbimento di energia; fusione) e scarica (rilascio di energia; solidificazione). Può essere superata aumentando la superficie di scambio di calore.
- comportamento corrosivo. A contatto con il contenitore di stoccaggio o i condotti di trasporto, gli idrati di sale e i PCM a base di acidi grassi presentano potenziali problemi di corrosione.
- instabilità termica alle alte temperature.
- Superraffreddamento. Si manifesta quando un liquido inizia la sua solidificazione al di sotto della sua temperatura di congelamento. Ciò causa una riduzione dell'energia termica assorbita, con conseguente decadimento delle prestazioni del PCM stesso. Può essere superata mediante l'uso di agenti inoculanti, anche se la loro presenza potrebbe influenzare le proprietà termiche del PCM stesso.
- segregazione di fase. È un fenomeno chimico-fisico in cui una soluzione liquida solidifica in una soluzione solida avente struttura diversa rispetto alla soluzione liquida. Ciò è dovuto alla diversa temperatura di solidificazione dei due composti. Influenza negativamente la stabilità del ciclo termico del PCM. Si manifesta principalmente all'interno di PCM con multicomponenti a causa della diversa densità dei componenti stessi e nei sali idratati. Può essere ridotta usando addensanti.

3. TES CON TECNOLOGIA ATTIVA/PASSIVA [1][2][3]

In ambito edilizio, i sistemi di accumulo termico si dividono in due categorie: sistemi attivi e passivi.

I sistemi passivi non richiedono alcuna tecnologia per accumulare energia termica all'interno di un corpo (edificio) e tra il corpo stesso e l'ambiente (edificio-ambiente).

I sistemi attivi, invece, sono composti da meccanismi mediante i quali il corpo (edificio) controlla gli scambi termici al fine di mantenere la sua temperatura in un campo ristretto di valori.

Tecnologie attive

L'utilizzo di un TES come tecnologia attiva riguarda l'implementazione di fonti di energia rinnovabile nell'HVAC, ovvero impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

L'obiettivo di queste installazioni riguarda il miglioramento delle prestazioni degli impianti presenti nello stabile o la possibile applicazione di strategie per lo spostamento dei carichi di picco.

Tecnologie passive

L'utilizzo di un TES come tecnologia passiva ha come scopo la fornitura di comfort termico con un consumo minimo di HVAC per il riscaldamento e/o raffreddamento degli ambienti all'interno di edifici nuovi o ristrutturati.

In un'ottica di accumulo di calore latente possono essere sfruttati i materiali a cambiamento di fase, che possono essere implementati nei vari edifici con diversi metodi.

3.1. METODI DI INCORPORAZIONE [4][5][6][7]

In letteratura esistono diversi metodi di incorporazione dei PCM all'interno dell'involucro edilizio; in particolare, le principali tipologie riguardano:

- Incorporazione diretta. I PCM in polvere o liquidi vengono miscelati direttamente con i materiali da costruzione come malta, calcestruzzo, gesso e pasta cementizia. Nonostante sia un metodo semplice, economico e praticabile, bisogna comunque prestare attenzione in quanto si potrebbero alterare le proprietà meccaniche e di durabilità del sistema.
- Immersione. I componenti della struttura dell'edificio vengono immersi nel PCM liquido, assorbendolo mediante azione capillare. Con questa tecnica appare possibile convertire pannelli di rivestimento ordinari in pannelli PCM. Nel lungo termine, dopo aver sottoposto il materiale ad un gran numero di cicli termici, possono verificarsi delle perdite.
- Incapsulamento. Il PCM viene incapsulato prima di essere impiegato negli elementi costruttivi. Questo processo può avvenire mediante micro o macro incapsulazione. Nel primo caso, particelle di PCM sono racchiuse in un film polimerico sottile; nel secondo, il PCM viene confezionato in contenitori come tubi, sfere, pannelli o, più in generale, in recipienti. Il limite di tale tecnica consiste nella scarsa conducibilità termica e nella tendenza alla solidificazione dei bordi.

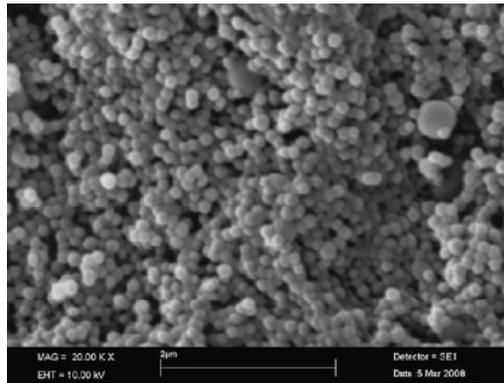


Figura 3.1.1 - Immagine SEM di microcapsule di polimetilmetacrilato/docosano. [4]

- PCM stabilizzati in forma. In questo modo, il PCM e il materiale di supporto vengono fusi e miscelati tra di loro a temperatura elevata, andando a formare un nuovo materiale stabile. Il principale vantaggio di questa tecnica è la mancanza di dispositivi o contenitori speciali per incapsulare il PCM. Inoltre, godono di un grande calore specifico apparente, di un'adeguata conduttività termica, della capacità di mantenere la forma stabilizzata nel processo di cambiamento di fase e di un'ottima affidabilità tecnica nel lungo periodo.

4. TES CON TECNOLOGIA PASSIVA – APPLICAZIONI

In letteratura sono presenti diversi metodi di applicazione delle tecnologie ad accumulo termico passive, ognuna delle quali presenta prestazioni termiche differenti con relativi vantaggi e svantaggi.

4.1. APPLICAZIONI DEL PCM NEL MURO DI TROMBE [37][40][41][42]

Il muro di trombe è un sistema a guadagno solare passivo indiretto caratterizzato da alcuni elementi fondamentali:

- un muro di grande spessore e densità costruito con un materiale a grande inerzia termica;
- una vetrata esterna e relativa intercapedine d'aria formatasi tra la vetrata ed il muro;
- due bocchette di areazione poste sia sulla vetrata, sia sulla parete di accumulo.

Durante la stagione invernale, il sistema funziona mediante la radiazione solare che scalda l'aria contenuta all'interno dell'intercapedine. Il riscaldamento dell'aria genera un moto convettivo che, una volta aperte le due bocchette della parete di accumulo, porta l'aria calda ad immettersi nell'ambiente mediante l'apertura superiore. La bocchetta inferiore, invece, consente l'ingresso nell'intercapedine all'aria fredda dall'ambiente dove, una volta riscaldata, verrà rimessa all'interno dell'ambiente stesso. Di notte, invece, è necessario chiudere le due bocchette per non ricevere l'effetto inverso; l'ambiente interno continuerà comunque a ricevere calore per conduzione.

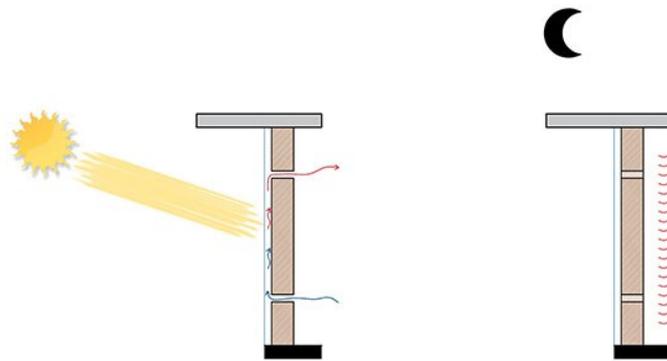


Figura 4.1.1 – Funzionamento del sistema durante la stagione invernale. [40]

Durante la stagione estiva, invece, vengono aperte le bocchette di areazione situate lungo la vetrata in modo da sfruttare la ventilazione ed espellere l'aria calda dall'intercapedine. Analogamente, per non ottenere l'effetto inverso, le bocchette dovranno essere chiuse durante la notte.

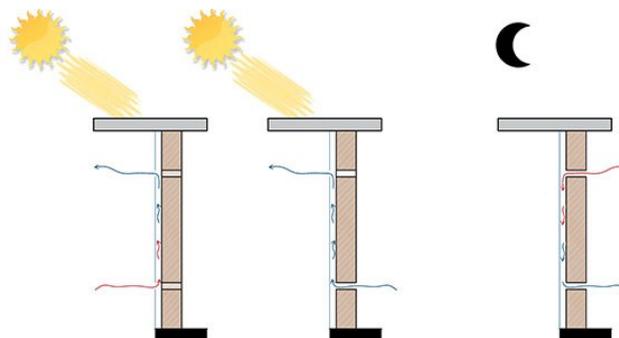


Figura 4.1.2 – Funzionamento del sistema durante la stagione estiva. [40]

In letteratura, vi sono vari esempi di implementazioni di muri di trombe con materiali PCM, i quali sono utilizzati per migliorare le prestazioni del sistema; in particolare consentono, a parità di accumulo di calore, di risparmiare spazio rispetto alle pareti di massa tradizionali (come quelle in calcestruzzo). Inoltre, sono caratterizzate da un peso inferiore.

Ad esempio, Le Bourdeau [37][40] ha testato due pareti di collettori di stoccaggio passivi utilizzando cloruro di calcio esaidrato (punto di fusione 29 °C) come materiale a cambiamento di fase, concludendo che una parete in PCM di 8,1 cm abbia prestazioni termiche leggermente migliori rispetto ad una parete in muratura spessa 40 cm.

4.2. PANNELLI DI RIVESTIMENTO PCM [8][9]

I pannelli di rivestimento PCM sono ottimi sostituti della massa termica standard per immagazzinare calore solare all'interno di un edificio poiché sono più convenienti dal punto di vista economico. La loro funzione principale è quella di ridurre le fluttuazioni di temperatura dei fabbricati di nuova costruzione o ristrutturati.

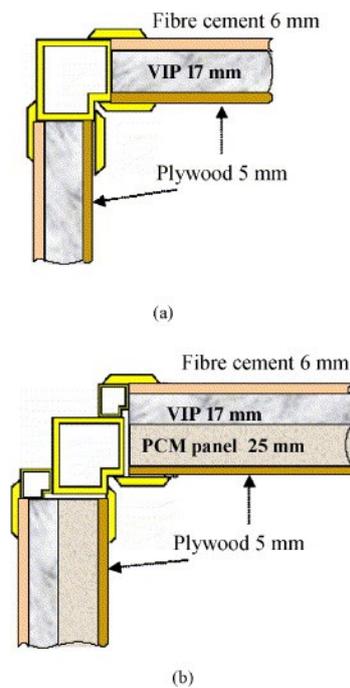


Figura 4.2.1 - Sezione trasversale di un pannello: (a) senza PCM e (b) con PCM. [33]

Nell'ultimo periodo numerosi ricercatori hanno focalizzato i loro sforzi sullo studio e sullo sviluppo di tali materiali; verranno dunque trattati alcuni esempi di applicazione con relative analisi.

4.2.1. IMPATTO DI UNA PARETE CON RIVESTIMENTO PCM SULL'AMBIENTE INTERNO D'INVERNO [8][10]

Tendenzialmente, l'aumento della domanda di comfort termico per ambienti interni comporta un aumento dei consumi energetici con relativo aumento dell'inquinamento ambientale.

Il caso studio in questione analizza come l'impiego di tale tecnologia possa migliorare il comfort termico, limitando l'aumento dei consumi energetici.

L'esperimento è stato condotto in inverno nel nord-est della Cina sfruttando due diverse stanze, la prima costruita in modo ordinario, la seconda mediante l'impiego di pannelli di gesso impregnati con PCM. Entrambe le stanze sono state testate in condizioni climatiche pressoché simili per tre giorni consecutivi. I risultati dell'analisi riguardano l'impatto sulle fluttuazioni di temperatura e sul flusso termico.

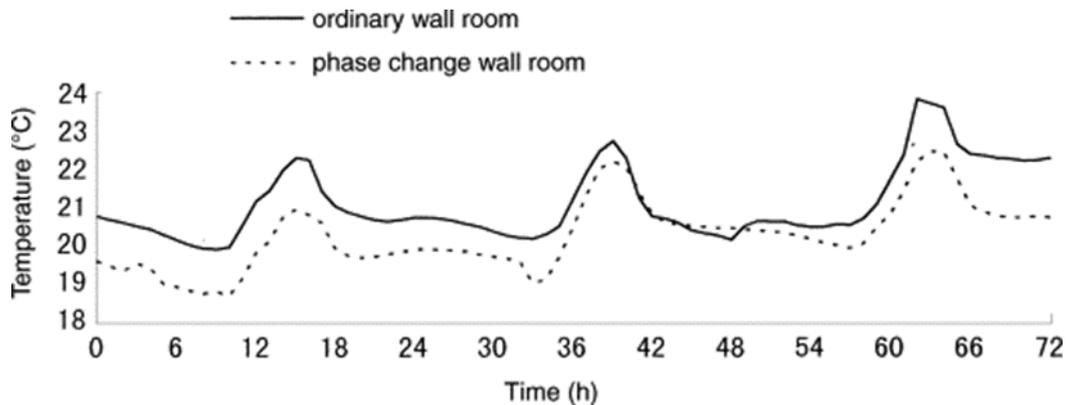


Figura 4.2.1.1 -Le curve della temperatura interna [10]

Come è possibile osservare dal grafico precedente, i risultati dimostrano come la fluttuazione massima di temperatura della stanza a parete ordinaria sia stata di $3,74\text{ C}^\circ$ il terzo giorno, contro una fluttuazione massima di $2,59\text{ C}^\circ$ raggiunta nella parete PCM.

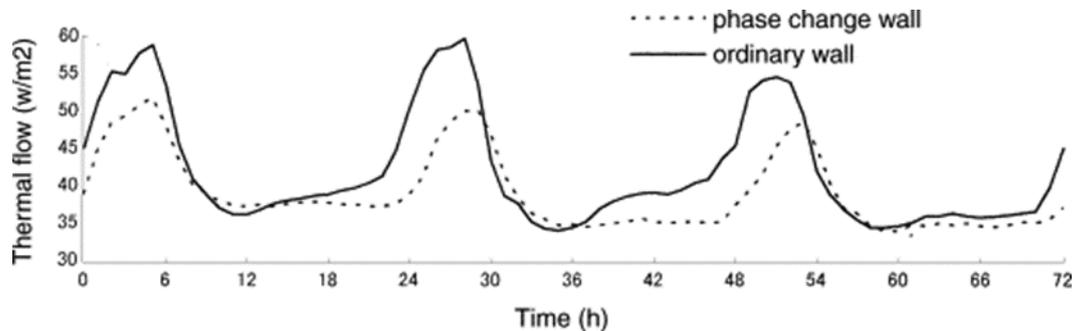


Figura 4.2.1.2 - Le curve del flusso termico attraverso la parete.[10]

Analogamente, i risultati dell'analisi sul flusso termico dimostrano come, nella parete ordinaria, abbia avuto una variazione compresa tra 34 e 60 W/m^2 . Nella parete PCM la variazione invece ha oscillato dai 33 ai 52 W/m^2 .

I risultati dell'analisi dimostrano dunque come i pannelli PCM possono:

- Ridurre le fluttuazioni di temperatura
- Limitare il trasferimento di calore verso l'esterno

Inoltre, durante la stagione fredda, i pannelli possono ridurre l'utilizzo delle apparecchiature di riscaldamento con i relativi costi, portando maggiori vantaggi dal punto di vista del risparmio energetico.

4.2.2. MIGLIORAMENTO DEL COMFORT TERMICO DI UN EDIFICIO RISTRUTTURATO [8][11]

Questo caso studio analizza le prestazioni di un edificio ristrutturato integrando pannelli PCM.

La sperimentazione è stata svolta a sud di Lione (FRA), monitorando due edifici congiunti con geometrie identiche, uno dei due implementato con pannelli PCM lungo pareti e controsoffitto.

Gli edifici sono stati testati nei fine settimana compresi tra febbraio e dicembre 2007. In particolare, l'analisi tende a soffermarsi sui dati di due fine settimana:

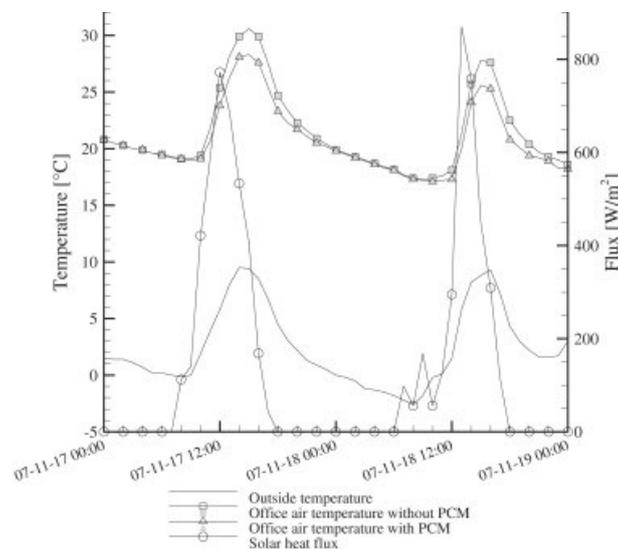


Figura 4.2.2.1 – Temperatura interna ed esterna; flusso di calore solare fine settimana 17/18 novembre. [11]

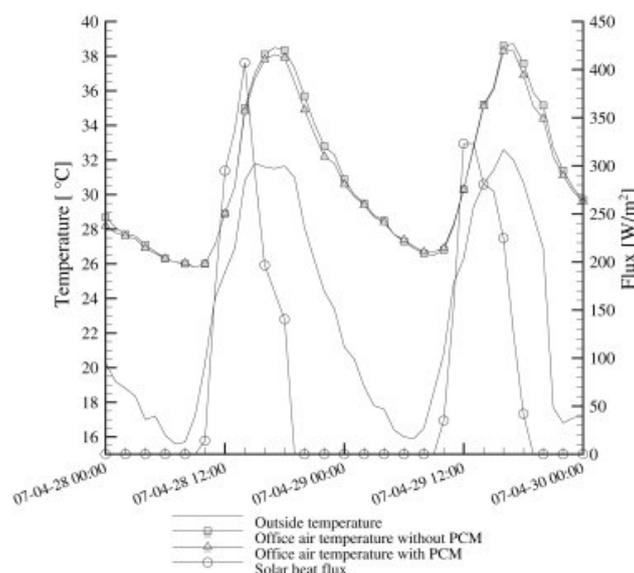


Figura 4.2.2.2 - Temperatura interna ed esterna; flusso di calore solare fine settimana 28/29 marzo. [11]

Dalla figura 4.2.2.1, è possibile notare come il picco di temperatura della stanza con PCM sia inferiore di 2,2 C° rispetto al picco della stanza senza PCM. Appare dunque nuovamente evidente come tale tecnologia limiti le fluttuazioni termiche.

Si potrebbe dunque immaginare il medesimo risultato anche per quanto riguarda la figura 4.2.2.2, ma non è così: in tali condizioni le due stanze hanno fluttuazioni pressoché uguali vicino al valore di punta di 40 C°.

Tale incongruenza può essere spiegata analizzando la temperatura superficiali delle pareti dotate di PCM durante i due fine settimana.

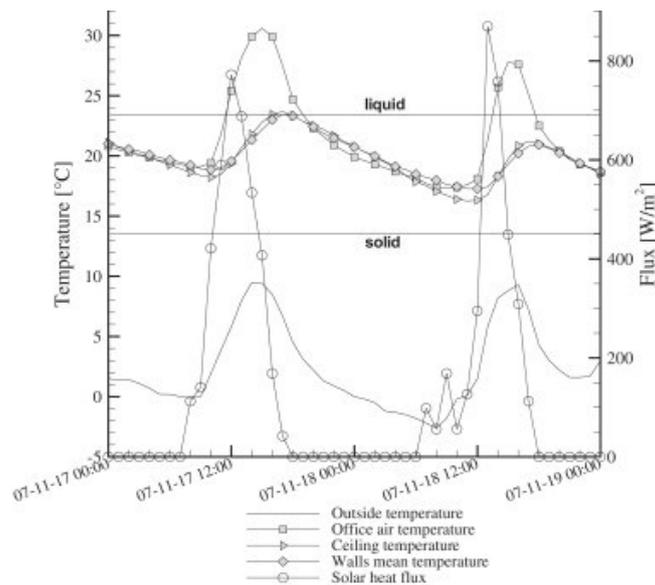


Figura 4.2.2.3 - Temperatura del soffitto, delle pareti e dell'aria per la stanza con PCM nel fine settimana del 17/18 novembre. [11]

Nella figura 4.2.2.3, le linee orizzontali di solido e liquido rappresentano le posizioni della temperatura di cambiamento di fase; è possibile notare come le temperature delle pareti e del soffitto variano tra queste due linee, ottenendo un PCM sia liquido che solido. Così facendo, il PCM assorbe e rilascia calore a seconda dell'aumento o della diminuzione della temperatura.

Ciò non avviene nel fine settimana del 28/29 marzo in quanto il PCM risulta totalmente liquido, non fornendo alcun effetto di accumulo di calore latente.

In conclusione, lo studio sottolinea come un pannello PCM risulti efficiente solamente nel caso in cui la temperatura esterna rimanga nell'intervallo della temperatura di fusione del PCM utilizzato.

4.3. PARETI PCM [8][3][13]

Per "pareti PCM" si intende l'incorporazione diretta dei PCM nella matrice di calcestruzzo o nei cementi a celle aperte. Se da un lato questa tecnica garantisce un miglioramento della capacità di accumulo termico del materiale, presenta come grande limite il possibile decadimento della resistenza meccanica del calcestruzzo stesso. Nonostante vi siano anche esempi in cui i PCM vengono mischiati a vari materiali come isolanti e malte, l'applicazione più comune appare quella con il calcestruzzo.



Figura 4.3.1 – Esempio di applicazione; il PCM è stato incorporato mediante incapsulazione all'interno dei mattoni. [3]

4.3.1. UTILIZZO DI PCM MICROINCAPSULATO NELLE PARETI IN CALCESTRUZZO PER IL RISPARMIO ENERGETICO [35]

Nel seguente studio si pongono a confronto le prestazioni di due cubicoli di dimensioni reali costituiti rispettivamente da calcestruzzo tradizionale e calcestruzzo integrato con PCM.

In particolare, il PCM prende il nome di Micronal[®]PCM (di BASF); è un composto commerciale in cui il PCM è implementato mediante microincapsulazione all'interno del calcestruzzo stesso.

Le cabine sono apparentemente identiche, costruite con l'unione di sei pannelli di cemento; una di esse contiene circa il 5% in peso di materiale a cambiamento di fase mescolato con il calcestruzzo in tre pannelli (sud, ovest e pareti del tetto). Le cabine sono non isolate, questo perché si vuole testare solo l'effetto del PCM.



Figura 4.3.1.1 – Veduta dei cubicoli. [35]

I primi esperimenti sono stati fatti tenendo le finestre delle pareti chiuse. Le misurazioni effettuate fanno riferimento ad un intervallo temporale di due settimane. I risultati raccolti sono i seguenti:

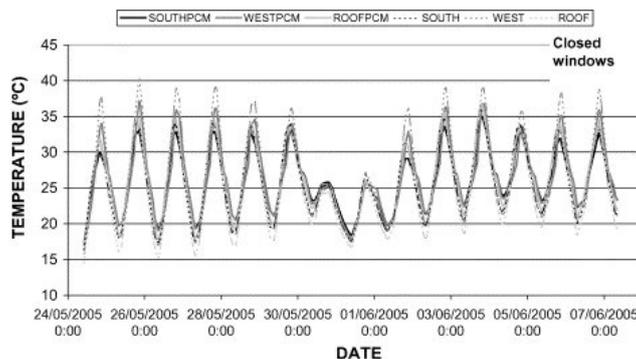


Figura 4.3.1.2 – Temperatura delle pareti. [35]

Al fine di eseguire delle analisi puntuali, consideriamo un intervallo temporale di due giorni. In tal caso, è possibile evidenziare come (vedi fig. 4.3.1.3):

- la cabina senza PCM ha una temperatura massima di 1 °C superiore alla cabina dotata di PCM e una temperatura minima inferiore di 2 °C.
- la temperatura massima nella parete PCM è raggiunta circa due ore dopo rispetto a quella senza; appare, dunque, evidente come l'inerzia termica della parete PCM sia maggiore. Inoltre, l'effetto dell'inerzia termica si ripropone anche nel pomeriggio in seguito al congelamento del PCM e alla mattina a causa della sua fusione.

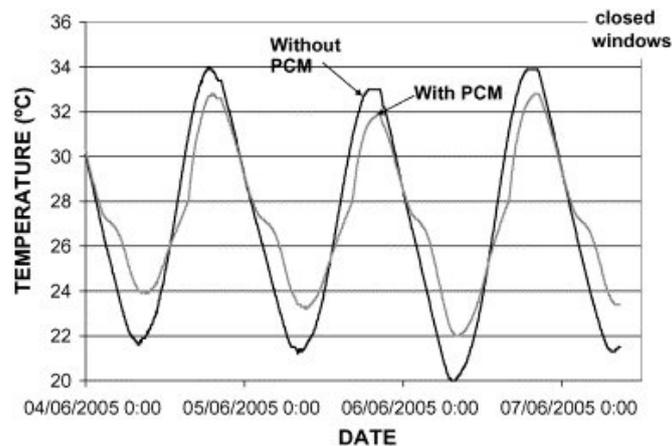


Figura 4.3.1.3 – Particolare della temperatura della parete sud. [35]

Volendo ora confrontare le prestazioni dei due cubicoli rispetto alla temperatura esterna (fig. 4.3.1.4), è possibile osservare come, nel momento in cui la temperatura esterna segnava 32 °C, la parete ovest della cabina senza PCM ha raggiunto i 39 °C contro i 36 °C raggiunti dalla medesima parete della cabina PCM, mostrando una differenza di temperatura di 3 °C. Questa differenza si è vista anche nelle temperature minime.

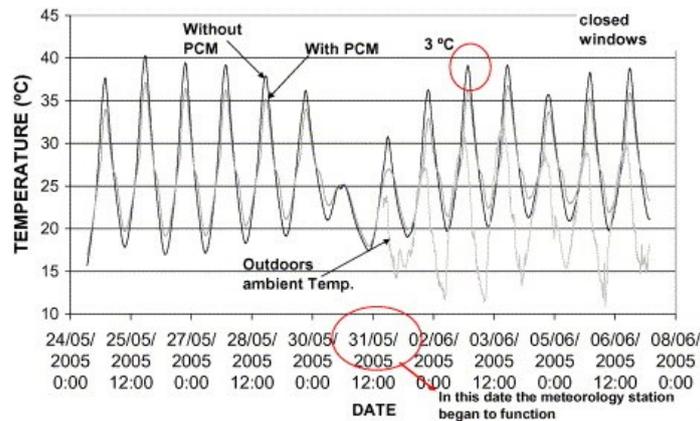


Figura 4.3.1.4 - Confronto tra la temperatura della parete ovest in entrambe le cabine e la temperatura ambiente esterna. [35]

In secondo luogo, sono stati eseguiti degli esperimenti al fine di misurare i seguenti parametri anche nel caso delle finestre aperte tutto il giorno (fig. 4.3.1.5) o in parte (fig. 4.3.1.6)

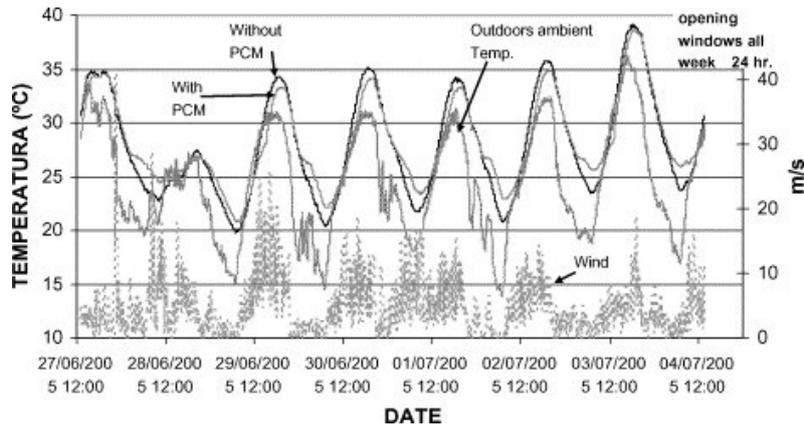


Figura 4.3.1.5 – Confronto tra la temperatura della parete sud in entrambi i cubicoli, la temperatura ambiente esterna e il vento esterno. Finestre aperte. [35]

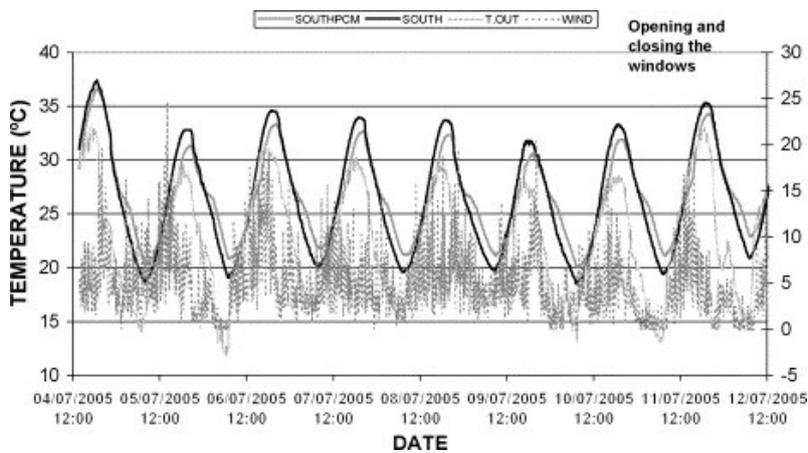


Figura 4.3.1.6 - Confronto tra la temperatura della parete sud in entrambi i cubicoli, la temperatura ambiente esterna e il vento esterno. Apertura e chiusura delle finestre. [35]

Confrontando i tre casi, è possibile osservare come le temperature mattutine siano le stesse, mentre tendono ad avere differenze di raffreddamento nelle ore pomeridiane: quando le finestre sono aperte l'inerzia termica dovuta al congelamento del PCM non è così evidente.

In conclusione, i risultati dimostrano come l'utilizzo di PCM porti a una migliore inerzia termica e a delle temperature interne più basse, con conseguente risparmio energetico all'interno dell'edificio; è necessario sottolineare come la sua efficacia sia notevolmente influenzata dal comportamento dell'utente.

4.3.2. APPLICAZIONE DI UN CALCESTRUZZO PCM SU EDIFICI SITUATI IN QUATTRO DISTINTE CITTA' [12]

In questo caso studio sono state costruite due case aventi medesime dimensioni, la prima costituita da un calcestruzzo normale, la seconda, invece, caratterizzata da calcestruzzo PCM. L'obiettivo è quello di testare le performance termiche dei due stabili durante lo scorrere di un intero anno considerando quattro città con climi diversi. I risultati sono basati su simulazioni numeriche.

La prima città in cui viene svolto l'esperimento è Parigi (FRA), la quale è caratterizzata da un clima marino temperato avente una temperatura media annua pari a 12,5 C°. Graficamente, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

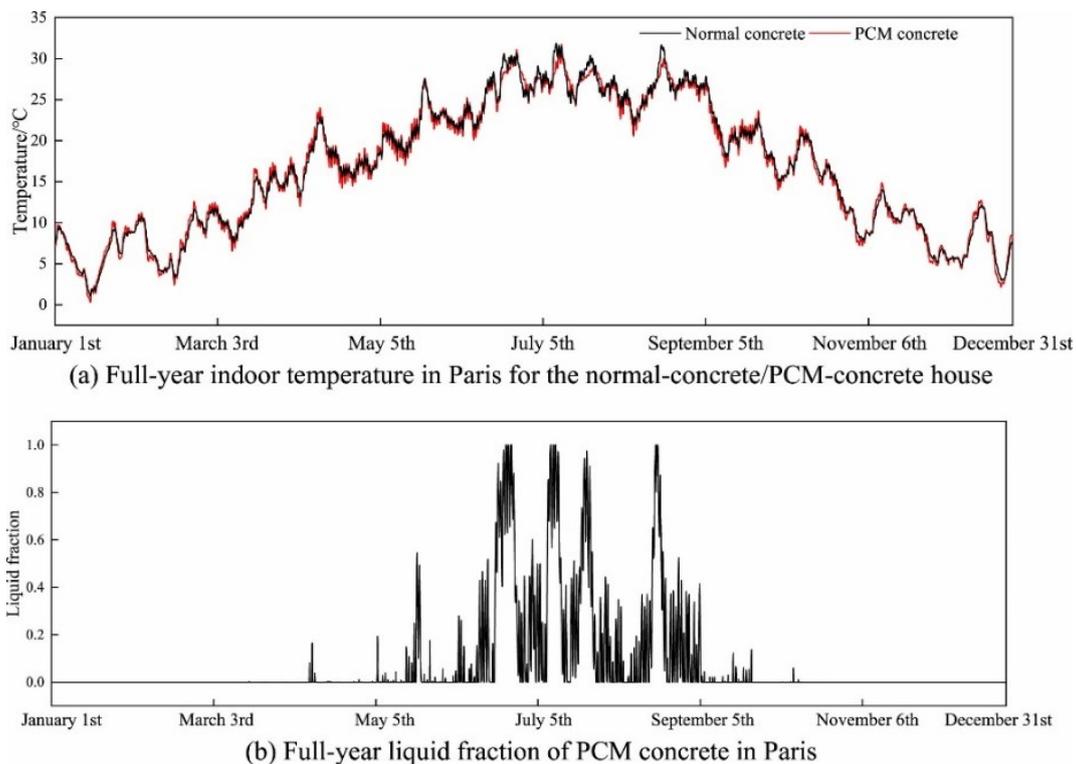
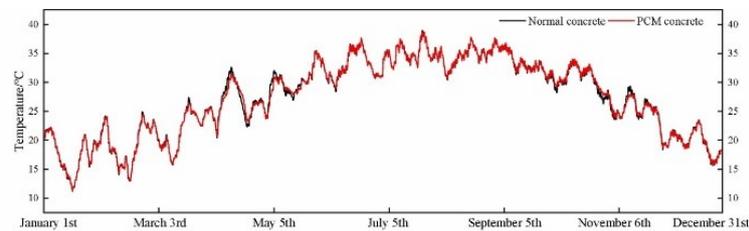


Figura 4.3.2.1 - Variazioni annuali della temperatura interna (a) e della frazione liquida (b) del calcestruzzo PCM a Parigi. [12]

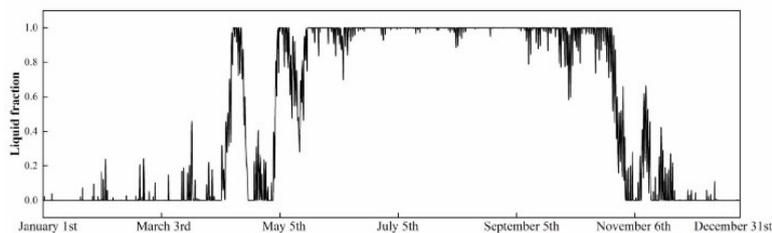
Il primo grafico (fig. 4.3.2.1 - a) rappresenta la temperatura interna di entrambe le case durante tutto l'anno, mentre il secondo analizza la percentuale di frazione liquida del PCM durante il medesimo arco temporale.

È possibile notare come la frazione di PCM liquido (fig. 4.3.2.1 - b) sia notevolmente aumentata tra giugno e settembre, portando all'interno della casa con calcestruzzo PCM temperature più basse ed oscillazioni di temperatura più contenute rispetto all'edificio tradizionale. Tuttavia, per il resto dell'anno, la frazione liquida di PCM è pressoché nulla a causa delle basse temperature, ma, ciononostante, è possibile notare come la temperatura interna sia più alta; ciò è dovuto alle proprietà fisiche del calcestruzzo modificato (come la conduttività termica inferiore).

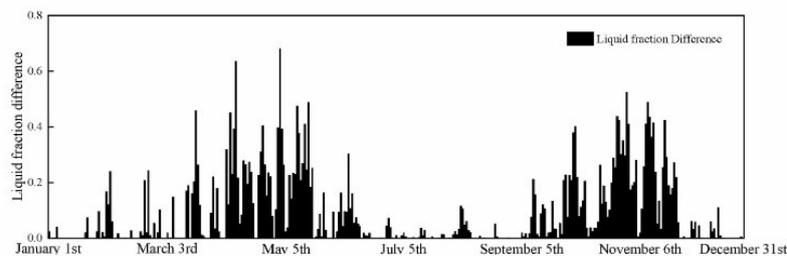
La seconda città presa in considerazione è Guangzhou (CINA), caratterizzata da un clima monsonico marittimo subtropicale con una temperatura media annua di 23 C°. Dall'analisi, sono stati ottenuti i seguenti risultati:



(a) Full-year indoor temperature in Guangzhou for the normal-concrete/PCM-concrete house



(b) Full-year liquid fraction of PCM concrete in Guangzhou



(c) Full-year daily liquid fraction difference of PCM concrete in Guangzhou

Figura 4.3.2.2 - Variazioni annuali della temperatura interna e della frazione liquida del calcestruzzo PCM a Guangzhou [12]

Partendo dal secondo grafico (fig. 4.3.2.2 – b), è possibile notare come da giugno fino a settembre la frazione liquida di PCM sia pressoché pari ad uno; la differenza di temperatura interna dei due stabili appare pressoché nulla durante questo periodo poiché il PCM non è in grado di solidificarsi ed assorbire calore.

Osservando invece le stagioni di transizione è possibile notare come la differenza di frazione liquida giornaliera sia superiore a quella dell'estate; di conseguenza, la temperatura interna della casa costruita con calcestruzzo PCM era costantemente più bassa rispetto alla casa tradizionale.

Dunque, in condizioni climatiche simili a queste, il calcestruzzo PCM funge da efficace regolatore di temperatura durante primavera ed autunno. Il medesimo risultato è stato ottenuto anche nelle due città rimanenti, Pechino e Hangzhou.

In conclusione, è possibile affermare come il calcestruzzo PCM sia in grado di regolare efficacemente la temperatura interna degli ambienti, anche se la sua efficacia pratica appare fortemente influenzata dalla temperatura diurna. Dunque, risulta fondamentale selezionare un PCM adeguato con la giusta temperatura di transizione in funzione della zona climatica considerata.

4.4. PAVIMENTI E SOFFITTI PER IL RISCALDAMENTO SOLARE PASSIVO [13][8][14][15][37]

Queste tipologie di pavimentazioni e soffitti sono in grado di assorbire l'energia solare durante il giorno e di rilasciarla durante la notte, in modo da ridurre il consumo di energia per il riscaldamento degli ambienti.

Pavimenti in PCM - applicazioni

Il seguente studio analizza il comportamento di un pavimento costituito da PCM stabilizzato alla forma, soffermandosi su come vari fattori siano in grado di influenzare le prestazioni. Il PCM è stato integrato nel pavimento mediante micro incapsulazione.

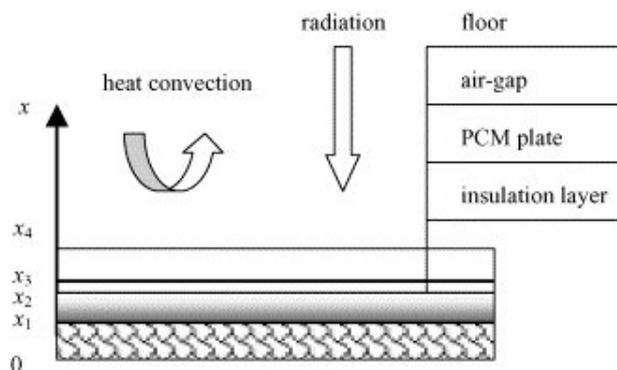


Figura 4.4.1 - Schema del pavimento in PCM stabilizzato di forma. [14]

Il primo fattore analizzato riguarda la temperatura di fusione del PCM. Per una data condizione climatica e per un dato edificio, se la temperatura di fusione è troppo alta, la quantità di calore della radiazione solare immagazzinata dal PCM risulta troppo piccola. Se, invece, la temperatura di fusione è troppo bassa, appare difficile mantenere la temperatura dell'aria interna a un livello confortevole durante lo scorrere della notte; dunque, come è già stato trattato ampiamente nelle sezioni precedenti, questo fattore risulta essere determinante per l'efficacia del PCM.

Il secondo fattore analizzato è la conducibilità termica: considerando valori pari a $0,2 W/(mK)$, $0,5 W/(mK)$ e $1 W/(mK)$, è stata calcolata la temperatura dell'aria interna nelle condizioni climatiche invernali della città di Pechino in diversi giorni. I dati ottenuti sono stati riassunti nel seguente grafico:

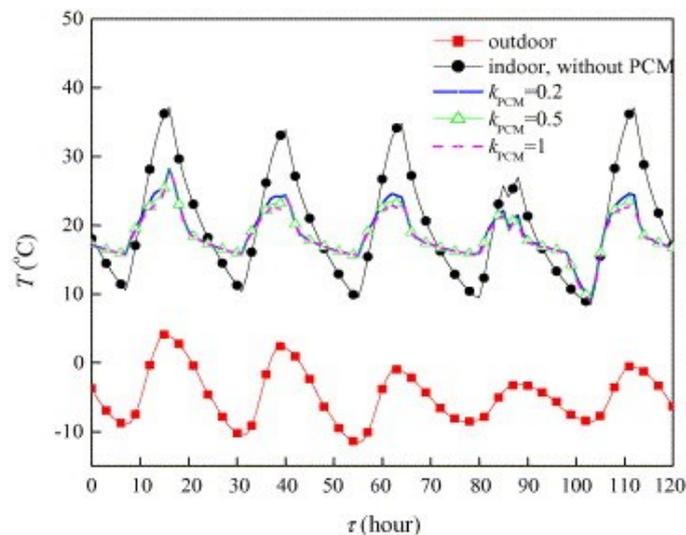


Figura 4.4.2 - Oscillazione della temperatura dell'aria interna per diverse conducibilità termiche. [14]

La conduttività termica non ha alcun effetto evidente sulla temperatura interna nel processo di rilascio del calore, bensì può influenzare la temperatura dell'aria interna nella fase di assorbimento; dal grafico (fig. 4.4.2), è possibile notare come vi sia un piccolo effetto sull'abbattimento del picco di temperatura durante le ore diurne nel caso in cui la conducibilità termica sia inferiore a $0,5 \text{ W/(mK)}$; in caso contrario, non si riscontra alcuna influenza evidente.

In relazione alla conducibilità termica, è importante considerare il rapporto che quest'ultima presenta con il calore di fusione. Le evidenze sperimentali constatano come vi sia uno stretto legame fra queste due proprietà al fine di ridurre l'oscillazione della temperatura dell'aria interna. Affinché la tecnologia risulti efficace, il calore di fusione dovrebbe essere superiore a 120 kJ/kg .

Il terzo fattore che si va a considerare è lo spessore dello strato PCM stabilizzato in forma. Analizzandolo assieme alle varie tipologie di conducibilità termiche, si sono ottenuti i seguenti risultati:

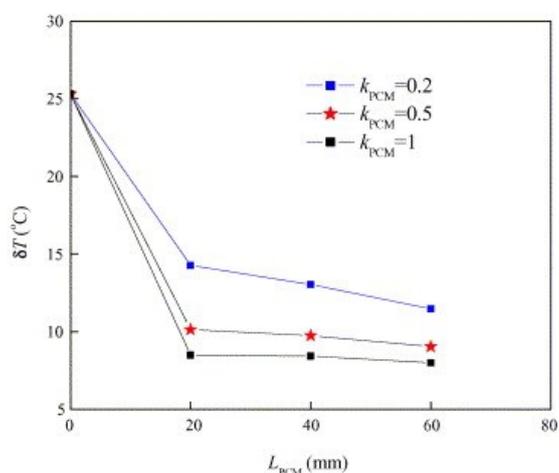


Figura 4.4.3 - Oscillazione della temperatura dell'aria interna per vari spessori dello strato PCM. [14]

È possibile notare come δT non sia influenzata nel caso in cui lo spessore sia maggiore o uguale ai 20 mm; dunque, lo spessore dovrebbe essere vicino, ma non superiore, a questo valore.

Tra le piastre PCM ed il rivestimento del pavimento tendono ad esserci delle intercapedini d'aria, che causano una resistenza termica aggiuntiva. Lo spazio in questione prende il nome di traferro e può ostacolare l'efficienza del PCM nell'immagazzinare energia solare e nell'aumentare l'oscillazione dell'energia interna. Per limitare tale aspetto, è necessario che le dimensioni del traferro siano le più piccole possibili.

Infine, le prestazioni termiche del pavimento PCM appaiono influenzate dai materiali di rivestimento per pavimenti. Nel caso studio, sono stati studiati tre rivestimenti ordinari in base alle loro proprietà termofisiche, in particolare:

Materiale pavimento	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg K)	k (W/m K)	L_f (mm)
Piastrella	2000	1	1,1	10
Legno	250	2	0,05	10
Metallo	5000	0,5	5	10

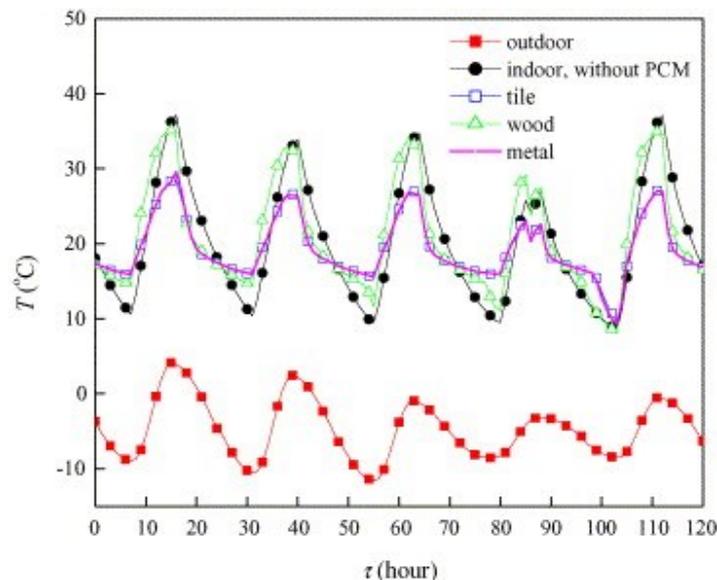


Figura 4.4.4 - Oscillazione della temperatura dell'aria interna per diversi materiali di rivestimento del pavimento. [14]

Da ciò è possibile dedurre come, in termini di prestazioni termiche, un pavimento a piastrelle o in metallo sia preferibile ad un pavimento in legno, a causa della loro conducibilità termica superiore.

Molto spesso, i pavimenti in PCM possono anche essere integrati assieme ai sistemi di riscaldamento; Sharma et al. [37] afferma come il riscaldamento radiante tenda a presentare maggiori vantaggi rispetto al riscaldamento convettivo poiché:

- risparmia spazio abitativo e lavorativo essendo implementato nell'involucro del fabbricato.
- la massa termica può essere utilizzata per il riscaldamento nelle ore non di punta.

Nella fig. 4.4.5 è possibile osservare un esempio di tale applicazione.

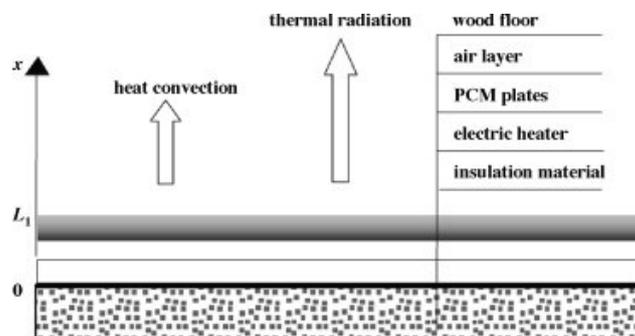


Figura 4.4.5 - Schema di sistema di riscaldamento elettrico a pavimento con piastre PCM a forma stabilizzata. [37]

Le piastre di riscaldamento scaldano il PCM sfruttando l'elettricità notturna (generalmente più economica) portandolo ad un successivo scioglimento. Il sistema, così facendo, immagazzina calore. Nel periodo diurno, il sistema viene spento ed il PCM tenderà a solidificarsi, con conseguente rilascio del calore immagazzinato. Il vantaggio economico, dunque, deriva dallo spostamento del consumo elettrico dai periodi di punta a quelli non di punta.

Tetti in PCM

Negli studi precedentemente trattati è stato possibile notare come lo strato PCM sia spesso più efficiente in un determinato periodo dell'anno solare; per esempio, Pasupathy e Velraj [15] hanno notato come un PCM in grado di ridurre l'oscillazione della temperatura dell'aria interna durante la

stagione invernale non sia adatto alla stagione estiva a causa della tendenza del materiale a rimanere liquido, non sfruttando l'effetto del calore latente.

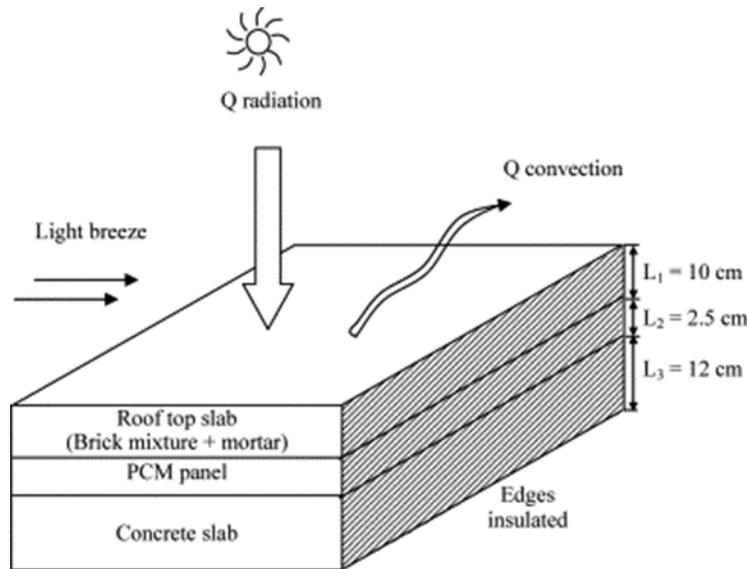


Figura 4.4.6 – Composizione del tetto. [15]

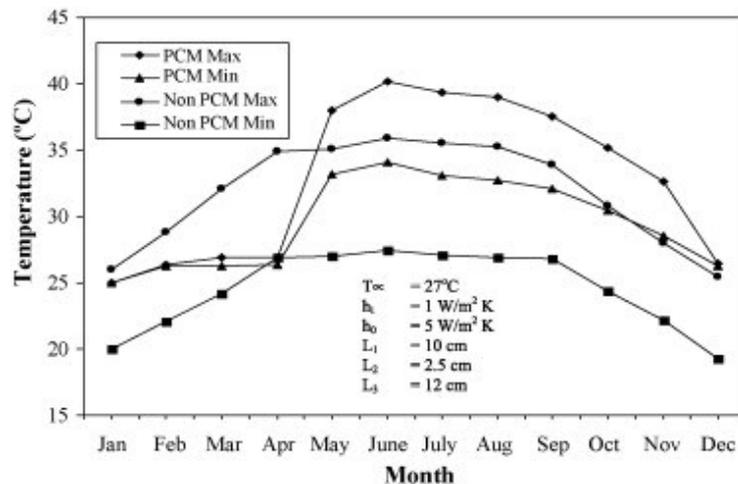


Figura 4.4.7 - Variazione mensile di temperatura massima e minima del soffitto della sala PCM e non PCM. [15]

L'analisi è basata sulla temperatura del soffitto (fig. 4.4.7) che risulta rimanere pressoché costante durante tutto il mese di gennaio, a differenza della temperatura del modello senza PCM. Tuttavia, durante la stagione estiva, la temperatura massima della stanza PCM risulta essere di ben quattro gradi superiore rispetto quella raggiunta nel modello standard; appare dunque evidente come, dal punto di vista del comfort termico, tale soluzione comporti effetti positivi durante i mesi invernali e negativi durante quelli estivi.

Al fine di superare questo aspetto, è stato introdotto un nuovo pannello superiore di PCM avente una temperatura di fusione differente dall'altro, in modo da consentire la totale solidificazione del PCM nel ciclo ripetuto durante le ore notturne per sfruttare il vantaggio della capacità di accumulo di calore latente.

Graficamente, sono stati raccolti i dati riguardanti la distribuzione della temperatura della superficie del tetto durante il mese di luglio per il caso monostrato e bistrato.

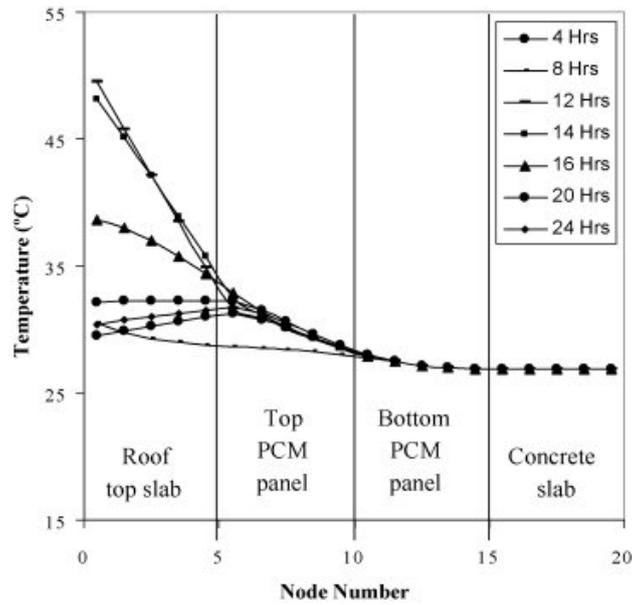


Figura 4.4.8 -Distribuzione della temperatura sulla copertura nel mese di luglio (PCM doppio strato). [15]

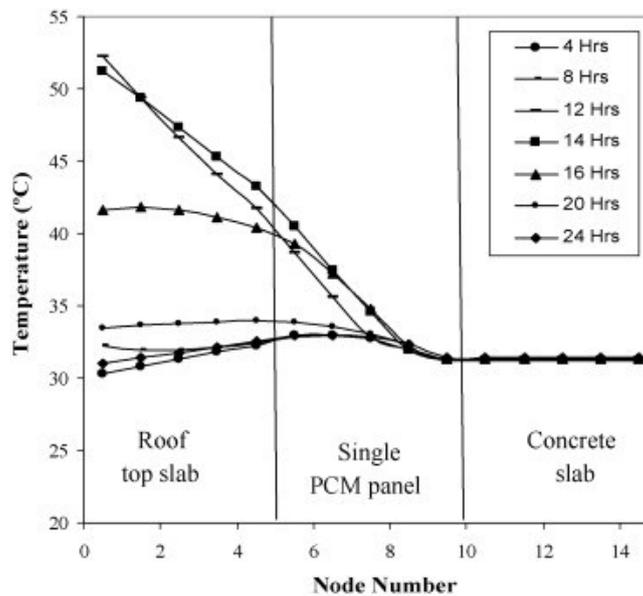


Figura 4.4.9 - Distribuzione della temperatura sul tetto nel mese di luglio (PCM a strato singolo). [15]

Dalle figure è possibile notare come la temperatura della lastra di calcestruzzo rimanga costante per tutto l'arco della giornata in entrambi i casi; nonostante ciò, l'oscillazione della temperatura appare più bassa nel caso del doppio strato PCM, dimostrando la sua maggiore predisposizione nel garantire miglior comfort termico durante la stagione estiva.

Dunque, al fine di ridurre l'oscillazione della temperatura dell'aria interna e incrementare l'adattamento in tutte le stagioni, si consiglia un PCM a doppio strato incorporato nel tetto.

4.5. PERSIANE PCM [16]

In generale, la ricerca finora si è prevalentemente concentrata sull'applicazione di PCM mediante incapsulamento all'interno delle vetrate. In ogni caso, l'applicazione di PCM mediante tende, persiane, tapparelle sembra altrettanto promettente in quanto uno studio [16] rivela come una persiana parzialmente aperta comporti un aumento del guadagno di calore dall'11,15 al 73,4% rispetto ad una finestra con la tenda completamente chiusa. In ogni caso, gli alti costi di realizzazione hanno fermato gli studi di queste tecnologie.



Figura 4.5.1 – Esempio di persiana in PCM. [5]

Nel seguente caso studio, vengono analizzate le prestazioni termiche di un sistema di finestre con una copertura ombreggiante realizzate in PCM mediante uno studio numerico in cui è stato considerato il trasferimento di calore del sistema finestra – persiana PCM. La modellazione è stata eseguita in condizioni climatiche relativamente calde (città di Merida, Messico) e fredde (città di Toluca, Messico) durante il giorno più caldo e quello più freddo, usando diverse tipologie di PCM.

- Città di Mérida (MG29)
 - Giornata calda: l'otturatore ha ridotto la temperatura interna massima di 7,7 C° contribuendo a ridurre il flusso di calore totale del 71,6% rispetto ad una finestra convenzionale.
 - Giornata fredda: l'otturatore ha ridotto di circa 1,6 C° la temperatura interna rispetto ad un sistema tradizionale, riducendo del 5,5% il flusso di calore totale verso l'interno.
- Città di Mérida (n-octadecano)
 - Giornata calda: la temperatura interna della stanza è stata ridotta di circa 1,4 C° rispetto ad una finestra convenzionale, riducendo il flusso di calore totale di circa 67,3 %.
 - Giornata fredda: la temperatura interna della stanza è stata ridotta di circa 1,4 C° rispetto ad una finestra convenzionale; tuttavia, il flusso interno totale è aumentato del 31,8%.
- Città di Toluca (MG29)
 - Giornata calda: la temperatura minima interna della stanza è aumentata di circa 8,9 C° con una diminuzione delle perdite di calore totali all'interno pari a 82,7 % rispetto ad una finestra convenzionale.

- Giornata fredda: la temperatura minima interna è aumentata di 14,54 °C rispetto al sistema di finestre convenzionale, riducendo le perdite totali di calore del 77,7% dall'interno.
- Città di Toluca (n-octadecano)
 - Giornata calda: sistema di finestre con PCM ha aumentato di 8,85 °C la temperatura minima interna e ha anche mostrato una diminuzione delle perdite di calore totali dall'interno dell'82,7% rispetto alla finestra convenzionale.
 - Giornata fredda: la temperatura interna minima è aumentata di 14,54 °C e le perdite di calore totali dall'interno sono diminuite del 77,2% rispetto al sistema di finestre convenzionale.

In conclusione, l'aggiunta del PCM sembra promettente come protezione solare passiva poiché ha mostrato un'attenuazione delle curve di temperatura e dei flussi nella superficie interna della lastra di vetro e consente anche a una frazione dell'energia immagazzinata dal PCM di fluire verso l'interno della finestra mantenendo le temperature di comfort. Tuttavia, nei climi freddi non è in grado di mantenere il comfort termico poiché i valori di radiazione solare misurati in questi giorni non erano tali da causare il cambiamento di fase. Si potrebbe dunque pensare che il sistema non sia adatto ad un clima freddo, però è stato dimostrato come il modello sia in grado di incrementare la temperatura della superficie interna della lastra di vetro. Ciò significa che la sua implementazione in climi freddi ha comunque risultati promettenti, ma la tipologia di PCM utilizzata in questa sperimentazione non è adeguata alla tipologia di clima. Appare dunque evidente come, ancora una volta, sia fondamentale scegliere un materiale con la giusta temperatura di transizione in funzione del clima nel quale verrà impiegato.

Il sistema di finestre con otturatore-PCM con il PCM MG29 ha mostrato le migliori prestazioni per entrambi i tipi di clima durante i giorni di prova.

4.6. CONFRONTO FRA LE VARIE TIPOLOGIE DI APPLICAZIONE [38]

Analizzate le varie tipologie di applicazioni passive, riassumiamo brevemente i vari vantaggi:

- Possibilità di ottenere un maggiore risparmio energetico mediante la combinazione dell'accumulo di calore solare e del freddo notturno.
- Incremento della stabilità termica interna dell'edificio, da cui deriva un maggiore comfort termico.
- Diminuzione o ritardo dei carichi termici richiesti negli ambienti con conseguente riduzione dell'utilizzo degli impianti di raffreddamento o riscaldamento (o riduzione delle loro dimensioni).

Entrando più nel dettaglio, muri e pannelli PCM risultano avere i medesimi vantaggi; ci si potrebbe dunque domandare quale fra le due tecniche risulti maggiormente conveniente. Il fine ultimo è quello di aumentare la massa termica di un edificio, scopo che viene raggiunto in costruzioni leggere come fabbricati in legno; i risultati invece appaiono più dubbi negli edifici in calcestruzzo, essendo generalmente noti per la loro alta massa termica.

Mettiamo dunque a confronto le proprietà di un pannello in cartongesso e di cemento.

	Capacità termica ($J/kg\ k$)	Densità (Kg/m^3)	Spessore tipico (mm)	Capacità complessiva (kJ/m^2k)	Valorizzazione PCM massa termica alla temperatura di fusione ($\frac{kJ}{m^2k}$)
Pannello cartongesso	840	950	12,5	10	550-800
Calcestruzzo	1000	2300	240	552	8000

Dai dati soprastanti, è possibile notare come un edificio in calcestruzzo parta già da una base elevata di massa termica; il suo miglioramento comporterebbe un aumento significativo della capacità termica dieci volte superiore a quello raggiunto da una lastra in cartongesso. Nonostante ciò, sono comunque caratterizzati da alti costi di applicazione e da problemi riguardanti il metodo di incapsulazione:

- l'immersione diretta, nonostante la sua economicità, può portare un'interazione con la struttura dell'edificio, causando una modifica delle proprietà della matrice.
- La macro incapsulazione richiede molto lavoro per poter essere integrata nell'edificio, il che si traduce in maggiori costi. Comporta inoltre notevoli problemi di trasferimento del calore, poiché ne diminuisce velocità.

Il micro incapsulamento potrebbe essere una soluzione per superare questi limiti, ma la spesa che deve essere sostenuta per applicare i PCM rimane comunque un fattore non trascurabile.

I pavimenti e i soffitti PCM si sono dimostrati molto efficaci nello spostare il carico di riscaldamento e raffreddamento dalle fasce orarie di punta dell'elettricità a quelle non di punta, o nell'immagazzinare la radiazione solare per l'uso durante le ore senza sole. Possono inoltre essere facilmente combinati con sistemi attivi come pompe di calore o collettori solari, anche se gli sforzi futuri dovranno necessariamente concentrarsi sulla loro ottimizzazione.

Gli otturatori PCM sono scarsamente diffusi e studiati a causa degli elevati costi di realizzazione e della loro limitata efficacia nei climi freddi durante la stagione invernale.

5. ANALISI ECONOMICA CONVENIENZA INSTALLAZIONE PCM

Il paragrafo precedente dimostra come le applicazioni di PCM passive siano in grado di fornire vantaggi in termini di risparmio energetico negli edifici garantendo comunque il comfort termico. Ci si potrebbe domandare se tali tecnologie siano in grado di portare anche benefici finanziari o, più in generale, se la loro installazione sia economicamente conveniente.

5.1. ANALISI ECONOMICA DEGLI EDIFICI INTEGRATI CON PCM NELLE VARIE ZONE MONDIALI [17]

Questo studio effettua delle valutazioni economiche relative all'integrazione di materiale PCM all'interno di edifici residenziali. L'analisi prende in considerazione quindici zone climatiche e sessanta differenti città.

5.1.1 DEFINIZIONE DEL MODELLO DI ANALISI

Definizione delle condizioni climatiche [17][18]

In questa analisi viene utilizzata la mappa mondiale di Köppen - Geiger, la quale utilizza principalmente cinque zone climatiche: A: equatoriale, B: arido, C: temperato caldo, D: continentale ed E: polare. Vi sono inoltre altre trenta sotto classificazioni basate sulla temperatura (h = arido caldo, k = arido freddo, a = estate molto calda, b = estate calda, c = estate fresca, d = continentale estremo e F = gelo polare) e sulle precipitazioni (W = deserto, S = steppa, f = completamente umido, s = secco estivo, w = secco invernale e m = monsonale).

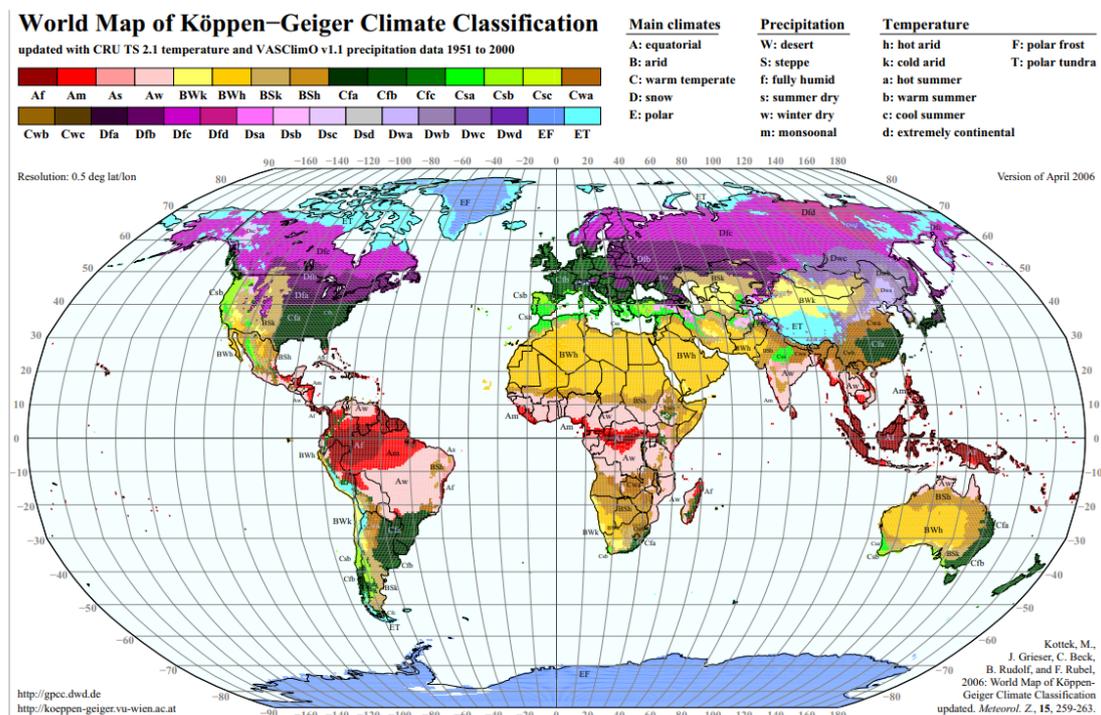


Figura 5.1.1.1 - Mappa mondiale della classificazione climatica di Köppen-Geiger. [18]

Definizione del modello dell'edificio

In questa analisi è stato utilizzato un edificio di quattro piani avente una superficie di circa 3100 m² di forma rettangolare. Il PCM è stato implementato nel lato interno del tetto, nelle pareti esterne e nel tetto stesso.

Le caratteristiche del PCM utilizzato tendono a variare in relazione alla zona climatica considerata, come è già stato ampiamente discusso nei paragrafi precedenti. La temperatura di transizione è un fattore determinante per la corretta performance del materiale.

Per quanto concerne spessore e capacità termica latente, i valori vengono considerati costanti e pari rispettivamente a 20 mm e 330 kJ/m².

Analisi economia dell'integrazione del PCM

A tal proposito, è possibile sfruttare lo *Static Payback Period* (SPP), ovvero il tempo impiegato per recuperare i costi atti a sostenere l'integrazione del PCM.

In questa analisi, l'SPP è definito come rapporto fra l'intero costo del PCM (PCM e le sue spese di installazione) e il risparmio energetico complessivo dato da prodotto fra risparmio energetico propriamente detto e costo dell'elettricità.

$$SPP = \frac{C_{PCM}}{S} = \frac{costatotalePCM}{risparmioenergetico * costoelettricità}$$

Il costo totale del PCM è stato ottenuto dalla seguente relazione:

$$C_{PCM} = (Vx\rho xC_1) + (Ax C_2)$$

Dove:

- V: volume del PCM [m³].
- ρ : densità del PCM $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- C₁: costo del PCM per kg $\left[\frac{USD}{kg}\right]$
- A: area del PCM [m²].
- C₂: costo di installazione del PCM $\left[\frac{USD}{m^2}\right]$

In particolare:

- l'area del PCM è stata calcolata considerando il muro ed il tetto, senza le sue aperture.
- il volume è stato ottenuto moltiplicando l'area del PCM per il suo spessore.
- il costo del PCM viene fissato costante a 0,7 \$/kg, mentre i costi di installazione e dell'energia elettrica tendono a variare da caso a caso.

5.1.2 ANALISI ECONOMICA

Si considerano 60 differenti città collocate in tutte le regioni climatiche, dividendole in tre gruppi:

- a) Zona A & B
- b) Zona C
- c) Zona D

Scelte le città, si esegue l'analisi sull'edificio andando ad applicare l'indice SPP, che verrà poi confrontato con la durata media di vita degli edifici. L'incorporazione risulterà economicamente conveniente se il periodo di ammortamento è inferiore alla durata media dell'edificio; in caso contrario, non risulta vantaggioso. Per praticità, la vita media dell'edificio utilizzato in questa ricerca è pari a cinquant'anni.

Nell'analisi sono stati valutati due tipologie di costo per i PCM: 1 \$/m² per i paesi in via di sviluppo e \$5/m² per i paesi sviluppati. Il prezzo dell'elettricità invece è stato valutato in funzione della tariffa energetica del singolo stato.

Nei seguenti grafici verrà mostrato il periodo di ammortamento statico per le varie zone climatiche, andando a considerare il duplice prezzo di installazione del PCM.

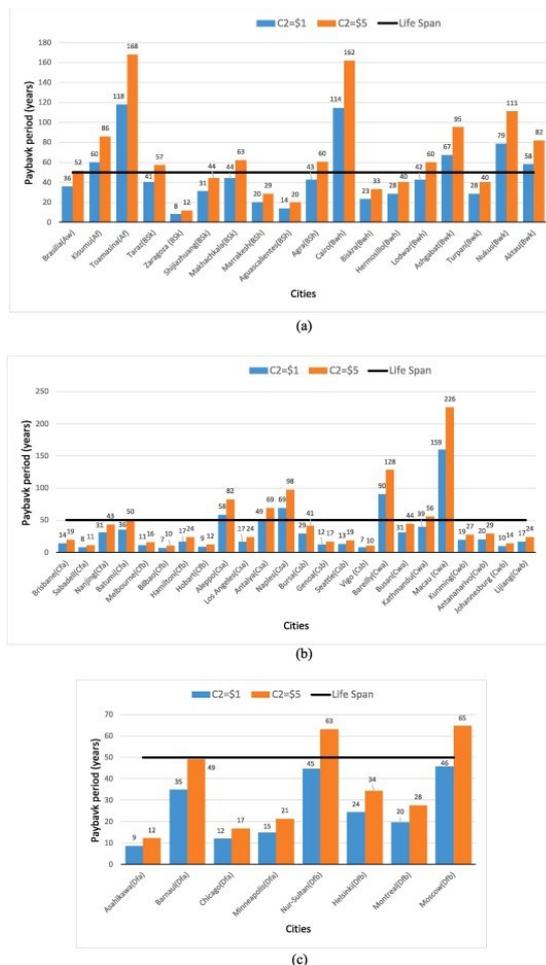


Figura 5.1.2.1 - Periodi di rimborso: a) Zona A e B; b) Zona C; e c) Zona D. [17]

Analizziamo la zona climatica A: considerando ad esempio la città di Toamasina, il suo periodo di ammortamento è pari a centodiciotto anni. Ciò è dovuto al basso risparmio energetico (1673 kWh) e

al basso costo dell'elettricità (0,14 USD/kWh). Brasilia, invece, presenta un periodo di ammortamento pari a 36 anni se il costo di installazione è pari 1 $\$/m^2$, 50 se il costo è di 5 $\$/m^2$, a causa dell'alto risparmio energetico (4373 kWh) e del costo relativamente più elevato dell'elettricità (0,198 USD/kWh), rendendone l'installazione più conveniente rispetto alle altre città considerate.

Analizziamo la zona climatica B, dove il periodo di ammortamento varia tra 8,15 e 114 anni per 1 $\$/m^2$ e tra i 12 e i 162 anni per 5 $\$/m^2$.

In ogni caso, come è possibile notare dal grafico (fig. 5.1.2.1), l'implementazione della tecnologia PCM risulta fattibile nella maggior parte delle città della zona B, ad eccezione di Cairo, Ashgabat, Nukus e Aktau. Saragozza invece risulta essere quella più conveniente dal punto di vista economico, poiché è caratterizzata da notevoli risparmi (11807kWh) e costi energetici (0,319 USD/kWh).

Osservando la zona climatica C, si può notare come il periodo di ammortamento risulti più basso della vita utile dell'edificio nella maggior parte delle città, ad eccezione di quelle inserite all'interno delle zone climatiche classificate come Csa e Cwa. Bilbao è la città avente un periodo di ammortamento più breve, sempre dovuto ai notevoli risparmi energetici (13376 kWh) e ai costi relativamente alti dell'elettricità (0,319 USD/kWh). D'altra parte, Macao ha il periodo di ammortamento maggiore di tutta la zona C, a causa dei prezzi relativamente economici della tariffa energetica (0,07 USD/kWh).

Per quanto riguarda la zona climatica D, il ritorno sull'investimento risulta sempre conveniente se il costo di installazione è pari a 1 $\$/m^2$; se invece il costo è pari a 5 $\$/m^2$, le città di Nur-Sultan e Mosca non hanno periodi di ammortamento più brevi di 50 anni, rendendo l'installazione economicamente non conveniente.

Infine, viene considerato l'impatto economico mondiale del PCM con costi di installazione pari ad:

- a) 1 $\$/m^2$
- b) 5 $\$/m^2$

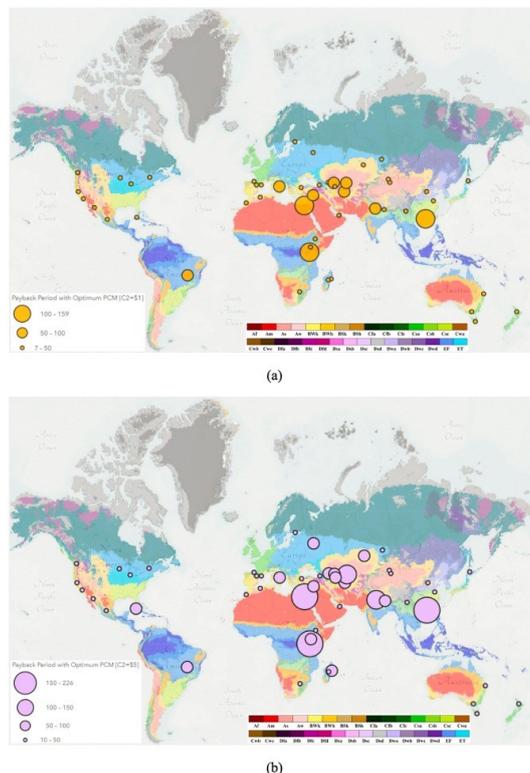


Figura 5.1.2.2 - Impatto economico globale dell'integrazione del PCM con costi di installazione di a) 1 $\$/m^2$; b) 5 $\$/m^2$. [17]

Si può notare la possibilità di ottenere diversi periodi di ammortamento per le città della stessa zona climatica in base al risparmio energetico e ai costi dell'elettricità, potendo concludere che la redditività finanziaria dell'integrazione del PCM dipende da questi due fattori essenziali.

In conclusione, questa analisi economica suggerisce che l'incorporazione del PCM è più fattibile nella zona climatica C, seguita da B e D, considerando una durata di vita dell'edificio di 50 anni.

5.2. ANALISI LCC E DEL PERIODO DI AMMORTAMENTO DI UN COMPLESSO DI UFFICI DOTATI DI PARETE TIM-PCM COLLOCATI IN DIVERSI CLIMI [34]

Nello studio precedente, le analisi economiche relative all'applicazione del PCM negli edifici venivano condotte sulla base del periodo di ammortamento. Oltre a tale dato, lo studio analizza anche il costo del ciclo di vita.

L'economicità della parete viene posta a confronto con l'uso di una finestra a doppio vetro, valutando quale opzione sia maggiormente conveniente nei vari climi considerati.

5.2.1. DEFINIZIONE DEL MODELLO

Definizione del modello dell'edificio

Lo studio si basa su un edificio per uffici ad un piano dotato di pareti TIM-PCM (fig. 5.2.1.1) composte, dall'esterno verso l'interno, da una lastra di vetro spessa 0,8 cm, da un letto di aerogel di silice granulare spesso 4 cm, e da un eutettico di acidi grassi come PCM incorporato in mattoni di vetro.



Figura 5.2.1.1 - Parete TIM-PCM dall'esterno e relativo schema di composizione della parete. [34]

Climi indagati

Come nel precedente studio, viene utilizzata la classificazione Köppen-Geiger. In particolare, sono state selezionati sei diversi climi per diverse città. In dettaglio:

CITTÀ	CLIMA
Sacramento, California, (USA)	Clima mediterraneo (Csa)
Parigi, (Francia)	Clima oceanico (Cfb)
Toronto (Canada)	Continentale umido (Dfa)
Dras (India)	Continentale (Dsb)
Kiruna (Svezia)	Subartico continentale (Dfc)
Barentsburg (Norvegia)	Clima polare (ET)

Analisi costi del ciclo di vita (LCC)

L'analisi LCC consente di calcolare il costo totale del ciclo di vita di un bene ed è definito dalla seguente equazione:

$$LCC = IC + PWF * EC$$

Dove:

- *IC* indica il costo iniziale per la realizzazione della parete, comprendendo il prezzo dei materiali, il costo della manodopera e i costi di installazione.
- *EC* è il costo energetico annuale richiesto per mantenere il comfort termico all'interno dell'edificio. Tiene conto del costo annuale di riscaldamento e raffreddamento degli ambienti, del costo del gas naturale, del costo dell'elettricità, dell'efficienza del sistema di riscaldamento e del coefficiente di prestazione del sistema di raffreddamento.
- *PWF* è il fattore di valore attuale; converte le spese ricorrenti future in costi attuali riguardanti le prospettive economiche del paese. Dipende dal tasso di sconto *r* e dalla durata *N*. Il tasso di sconto è il tasso di interesse generale del paese.

Dunque, l'efficacia di questo approccio è principalmente influenzata dai carichi annuali di riscaldamento e raffreddamento, dai costi del gas naturale e dell'elettricità, dalla vita utile stimata dell'edificio e dal tasso di sconto applicato. Tali valori tendono a variare di stato in stato e l'analisi prende come riferimento i seguenti prezzi: [34]

Città	Prezzo dell'elettricità (\$) per kWh	Prezzo del gas naturale (\$) per kWh	Tasso di sconto (%)	PWF
Borgo di Barents (Norvegia)	0,1786	0,078	0,5	27,79
Kiruna (Svezia)	0,22	0,121	-0,5	32,45
Dras (India)	0,08	0,02	6	13,76
Toronto (Canada)	0,16	0,0113	1	25,81
Parigi, (Francia)	0,2	0,064	0,05	29,76
Sacramento (Stati Uniti)	0,21	0,011	1,25	24,88

Analisi periodo di ammortamento

Il periodo di ammortamento è definito come:

$$PP = \frac{IC}{ESC}$$

Dove:

- IC è il costo dell'investimento iniziale, il quale tiene conto dei costi dei vari materiali e dei costi di installazione con relativa manodopera.
- ESC è il costo di risparmio energetico.

Per quanto riguarda il costo dell'investimento iniziale in PCM, in questo studio è stato fissato pari a 54 \$/m²/cm nelle città indagate, mentre il periodo di ammortamento è stato fissato a dieci anni.

5.2.2. ANALISI ECONOMICA

Per la parete TIM-PCM e la finestra con doppi vetri isolanti convenzionali saranno esaminati il costo del ciclo di vita e il periodo di ammortamento. Successivamente, saranno discusse le raccomandazioni economiche per ciascun ambiente climatico.

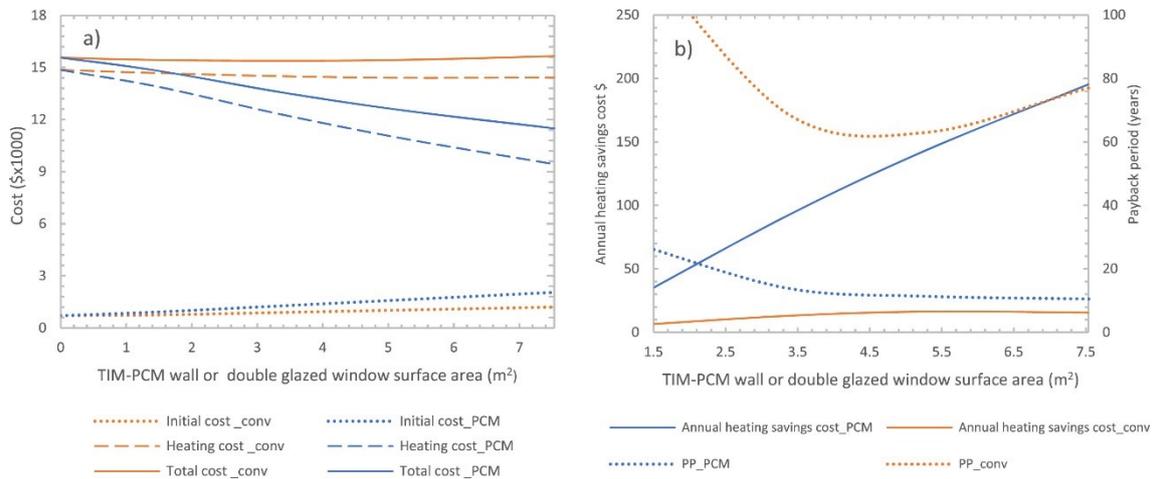


Figura 5.2.2.1 - a) Costo del ciclo di vita e b) periodo di ammortamento per entrambi i casi per Barentsburg (ET). [34]

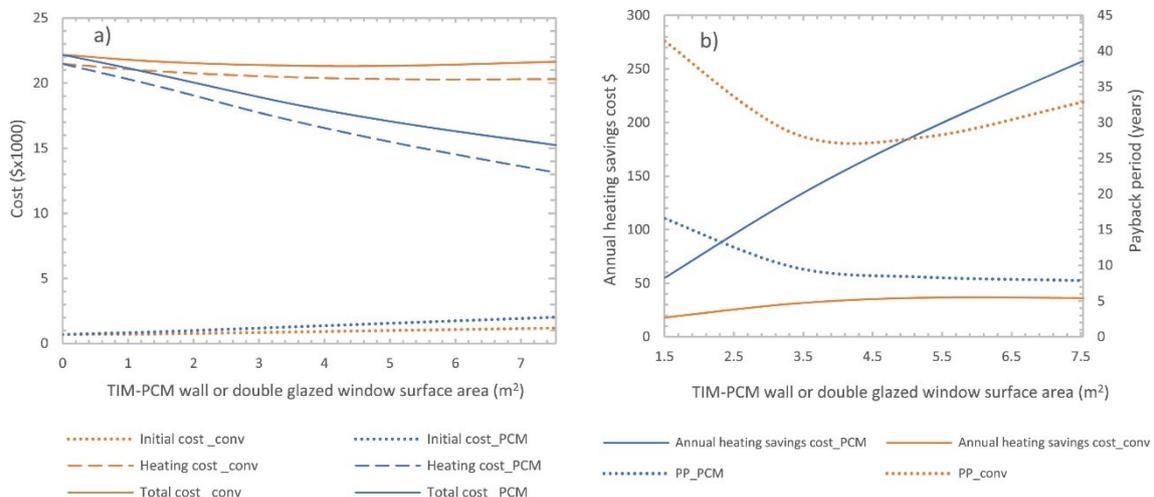


Figura 5.2.2.2 - a) Costo del ciclo di vita e b) periodo di ammortamento in entrambi i casi per Kiruna (Dfc). [34]

Nelle regioni caratterizzate da climi più freddi come Barentsburg (ET) e Kiruna (Dfc), l'adozione di pareti TIM-PCM si dimostra più vantaggiosa rispetto all'utilizzo di finestre con doppio vetro, come indicato nelle Figure 5.2.2.1 e 5.2.2.2. In particolare, l'analisi evidenzia come la soluzione ottimale con TIM-PCM sia associata a un'area specifica della parete, quantificata in 7.532 m². Questa dimensione si traduce in costi del ciclo di vita (LCC) e periodi di recupero dell'investimento (PP) minimi.

La scelta di preferire le pareti TIM-PCM è motivata dalla presenza di elevati carichi di riscaldamento in questi contesti climatici, unitamente ai costi relativamente elevati del gas naturale e del PWF. In questa prospettiva, il costo totale è strettamente dipendente dai costi di riscaldamento, sottolineando l'importanza di strategie che mirano a ridurne i costi.

Un elemento chiave emerso dall'analisi è il potenziale di ottimizzazione dei costi energetici attraverso l'espansione dell'area delle pareti TIM-PCM. Questo suggerisce che investire in questa soluzione può contribuire in modo significativo all'efficienza energetica complessiva, riducendo i costi di consumo energetico.

I periodi minimi di ammortamento risultano essere di 10,5 anni a Barentsburg (ET) e 7,8 anni a Kiruna (Dfc), confermando l'aspetto economicamente favorevole dell'applicazione delle pareti TIM-PCM in queste località caratterizzate da climi freddi.

Nell'analisi economica, è stato trascurato il costo dell'illuminazione in quanto marginale rispetto a quello del riscaldamento nelle città prese in considerazione.

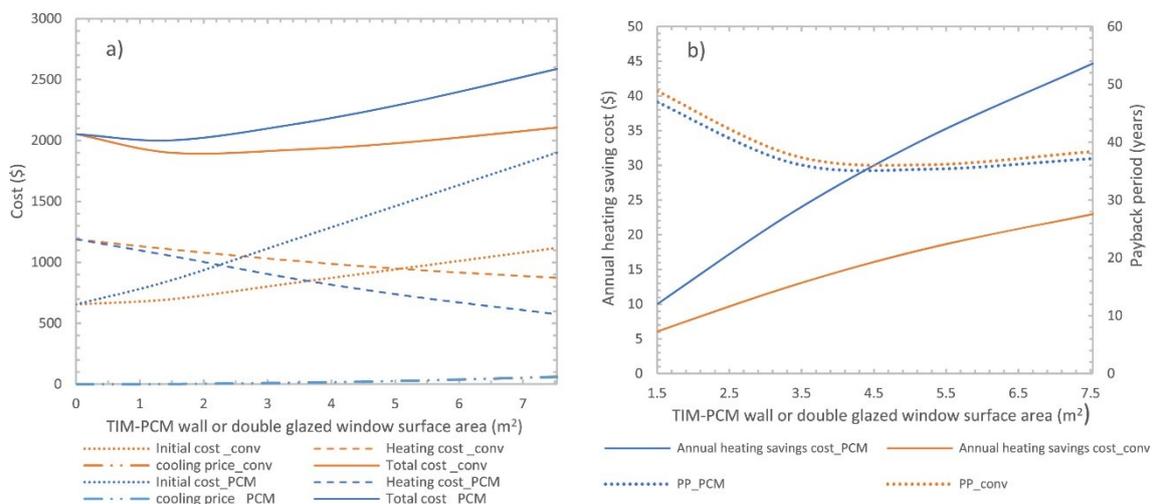


Figura 5.2.2.3 - a) Costo del ciclo di vita e b) periodo di ammortamento in entrambi i casi per Dras (Dsb). [34]

A Dras (Dsb), nonostante gli elevati carichi termici e i benefici in termini di risparmio energetico derivanti dall'utilizzo della parete TIM-PCM, emerge che la finestra con doppio vetro risulti essere la più economica. Questa constatazione è principalmente attribuibile ai prezzi dell'energia (2 centesimi/kWh per il gas naturale) e del PWF relativamente bassi, quest'ultimo caratterizzato da un tasso di sconto elevato.

Il costo iniziale gioca un ruolo fondamentale nel determinare il costo totale del ciclo di vita, poiché il risparmio energetico apportato dalla parete TIM-PCM non è sufficientemente significativo rispetto ai costi iniziali. L'area ottimale per le pareti TIM-PCM è calcolata essere di 1,51 m², con un costo del ciclo di vita minimo di 2002 dollari. In confronto, l'area ottimale per le finestre con doppio vetro è di 2,45 m², con un costo del ciclo di vita minimo di 1892 dollari.

Per quanto riguarda il periodo minimo di ammortamento, si attesta a circa 35 anni per una superficie ottimale della parete TIM-PCM di 4,57 m². Questo periodo elevato è principalmente dovuto al fatto che il costo del risparmio energetico è trascurabile rispetto al costo iniziale, rendendo economicamente poco praticabile l'adozione delle pareti TIM-PCM.

A Dras (India), sarebbero necessari prezzi più elevati del gas naturale e costi di investimento più bassi per rendere fattibile economicamente l'utilizzo del muro TIM-PCM.

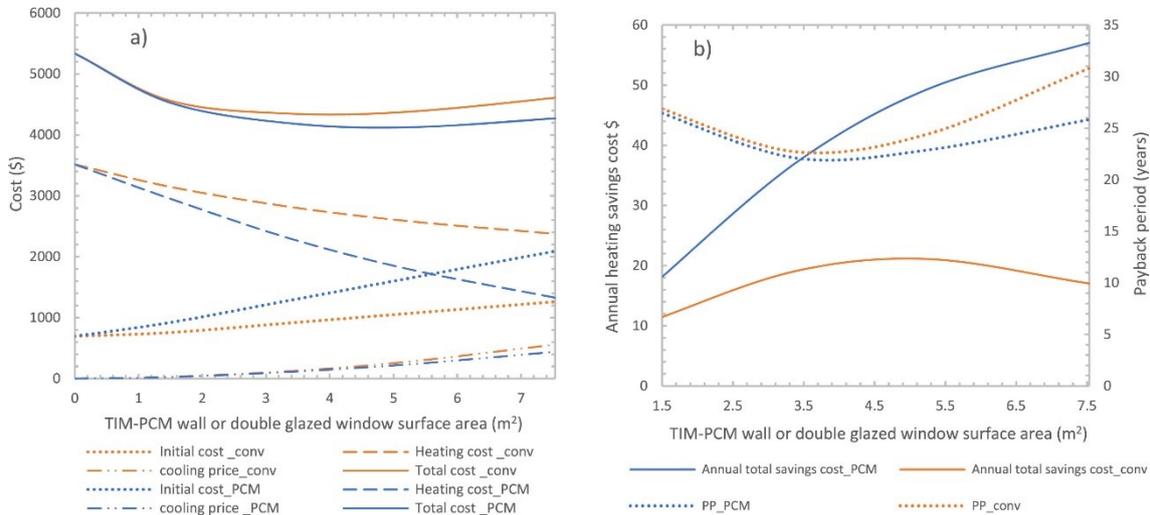


Figura 5.2.2.4 - a) Costo del ciclo di vita e b) periodo di ammortamento in entrambi i casi per Parigi (Cfb). [34]

A Parigi (Cfb), la scelta di adottare la parete TIM-PCM si dimostra più vantaggiosa rispetto all'utilizzo di finestre con doppio vetro, risultando in costi del ciclo di vita (LCC) e periodi di recupero dell'investimento (PP) inferiori (Figura 5.2.2.4). L'analisi indica che l'area ottimale per la parete TIM-PCM è di 5 m², con un LCC minimo di 4100 dollari.

Per quanto riguarda il periodo di ammortamento, il valore minimo è di 22 anni, corrispondente a una superficie di 3,87 m². Tuttavia, per rendere l'adozione delle pareti TIM-PCM economicamente più fattibile a Parigi (Francia), si suggerisce di ridurre il costo iniziale di questa soluzione. Ciò potrebbe favorire una maggiore adozione di questa tecnologia, contribuendo così a una migliore efficienza energetica e sostenibilità ambientale nella città.

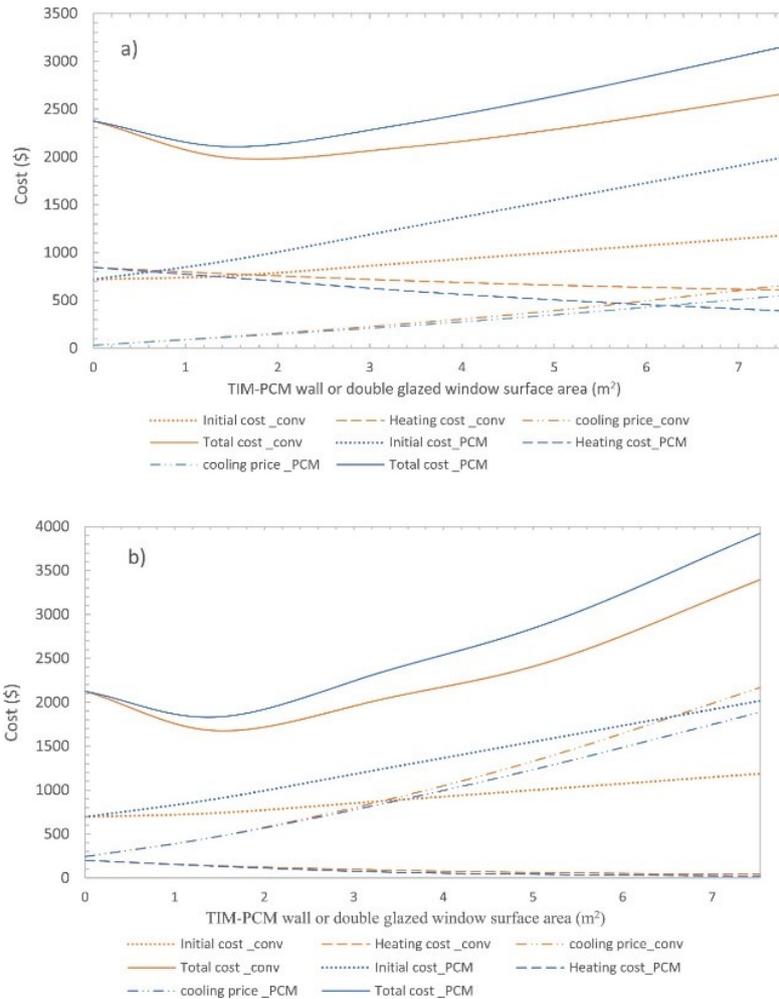


Figura 5.2.2.5 - Costo del ciclo di vita per a) Toronto (Dfa) eb) Sacramento (Csa). [34]

Sacramento (Csa) e Toronto (Dfa), caratterizzate da estati calde (Figura 5.2.2.5), l'adozione di finestre con doppi vetri si rivela più efficiente dal punto di vista economico rispetto alle pareti TIM-PCM. Nel dettaglio, a Sacramento (Csa), l'area ottimale per le pareti TIM-PCM è di 1,5 m², con un costo del ciclo di vita (LCC) minimo di 1833 dollari, mentre per le finestre con doppi vetri è di 1,5 m² con un LCC minimo di 1675 dollari.

A Toronto (Dfa), il risparmio limitato sui costi di riscaldamento a causa dei prezzi bassi del gas naturale (1,1 centesimi/kWh), fa sì che il costo totale sia principalmente influenzato dal costo iniziale. L'area ottimale per le pareti TIM-PCM è di 1,51 m², con un LCC minimo di 2106 dollari, mentre per le finestre con doppi vetri è di 1,5 m² con un LCC minimo di 1988 dollari. In termini di periodo minimo di ammortamento, l'investimento nelle pareti TIM-PCM richiede 45 anni a Sacramento e 51 anni a Toronto per essere recuperato, rendendo l'applicazione di tali pareti economicamente impraticabile e sconsigliata in questi climi.

Dall'analisi economica emerge una serie di conclusioni significative:

1. Fattibilità in climi ET e Dfc. L'applicazione della tecnologia delle pareti TIM-PCM risulta economicamente vantaggiosa nei climi classificati come ET e Dfc. La capacità di regolare il flusso termico sembra adattarsi bene a tali contesti.
2. Variazione in climi più freddi. Risulta interessante notare che, all'aumentare della rigidità del clima, si osserva un aumento della superficie ottimale per la parete TIM-PCM. Ciò suggerisce un potenziale incremento di efficienza in condizioni climatiche più fredde.

3. Edificio a Dras (Dsb). Il risparmio di riscaldamento in un edificio adibito ad uffici a Dras (Dsb) non è sufficiente per giustificare l'investimento. Questa situazione è influenzata dai bassi prezzi dell'energia e dai tassi di sconto elevati.
4. Convenienza a Parigi (Cfb). L'utilizzo della parete TIM-PCM si rivela più conveniente rispetto alle tradizionali finestre con doppi vetri, considerando sia il costo minimo del ciclo di vita che il periodo di ammortamento.
5. Svantaggio in climi Csa e Dfa. Nei climi Csa e Dfa, la parete TIM-PCM non risulta vantaggiosa economicamente, dato l'attuale scenario di prezzi dell'energia e costi degli investimenti.
6. Criteri di selezione. L'efficacia economica della parete TIM-PCM è più evidente in luoghi con prezzi energetici per il riscaldamento relativamente elevati. In tali circostanze, il costo iniziale del capitale diventa trascurabile rispetto ai notevoli risparmi energetici.
7. Fattori influenti sulla fattibilità economica. La fattibilità economica dell'implementazione delle pareti TIM-PCM è influenzata da diversi fattori, tra cui le condizioni climatiche, il livello di risparmio energetico, i costi dell'energia, la situazione economica del paese (riflessa nel tasso di sconto) e i costi degli investimenti. La valutazione complessiva deve considerare attentamente questi parametri per giungere a decisioni informate sull'adozione di questa tecnologia.

6. CONCLUSIONI

Questo studio dimostra che i materiali a cambiamento di fase (PCM) rappresentano una delle soluzioni più efficaci per l'accumulo termico, offrendo prestazioni superiori rispetto ai tradizionali sistemi di stoccaggio a calore sensibile. Sebbene l'applicazione dei PCM in ambito edilizio presenti alcune limitazioni, principalmente la bassa conducibilità termica e il ridotto tasso di diffusione termica, il loro utilizzo è promettente. I PCM possono contribuire significativamente al mantenimento del comfort termico negli ambienti interni, riducendo l'uso di apparecchiature HVAC e garantendo notevoli risparmi energetici e minori emissioni nocive. Gli sviluppi futuri dei PCM per applicazioni edilizie si concentrano su diverse aree chiave.

- **Integrazione con Materiali da Costruzione Tradizionali:** l'obiettivo è realizzare compositi che possano fungere da componenti strutturali e, contemporaneamente, offrire capacità di accumulo termico. Questo approccio può ridurre la dipendenza dai sistemi di riscaldamento e raffreddamento attivi, migliorando l'efficienza energetica complessiva degli edifici.
- **Aumento della capacità di accumulo di energia:** la ricerca si focalizza sull'incremento della capacità di accumulo energetico dei PCM. Questo obiettivo può essere raggiunto sviluppando nuovi PCM con una capacità termica latente più elevata e migliorando la loro stabilità termica e chimica, garantendo così un funzionamento efficiente nel lungo periodo.
- **Miglioramento della stabilità e della durabilità:** la durabilità e la stabilità dei PCM sono fondamentali per la loro applicazione su larga scala. I futuri sviluppi mirano a creare PCM con una maggiore resistenza alla degradazione chimica e meccanica. Ciò include anche la ricerca di soluzioni di incapsulamento più robuste, in grado di proteggere efficacemente i PCM all'interno dei materiali compositi.
- **Tecnologie di incapsulamento avanzate:** micro e macro incapsulamento possono ottimizzare la gestione del calore e prevenire perdite di materiale. Questi metodi permettono di integrare i PCM in diversi materiali da costruzione senza compromettere la stabilità strutturale.
- **Applicazioni domotiche:** un altro campo di sviluppo è l'integrazione dei PCM con sistemi di domotica e smart building. Combinando i PCM con sensori e sistemi di gestione dell'energia, è possibile ottimizzare l'uso del calore in tempo reale, migliorando così l'efficienza energetica e il comfort degli edifici.

Per quanto riguarda l'ambito economico, si è visto come il costo dell'investimento iniziale non sempre venga ammortizzato dai risparmi energetici che questa tecnologia garantisce durante la fase operativa, motivo per cui in futuro bisognerà soffermarsi sui seguenti aspetti:

- **Riduzione dei costi di produzione.** È cruciale ridurre i costi di produzione dei PCM per favorirne la diffusione su larga scala. La ricerca e lo sviluppo si concentrano su processi di produzione più economici e sull'uso di materiali di base meno costosi, rendendo i PCM più accessibili per il mercato edilizio.
- **Efficienza energetica e risparmi a lungo termine.** Mostrare i risparmi a lungo termine sulle bollette energetiche derivanti dall'utilizzo dei sistemi di accumulo termico (TES) ed evidenziare l'aumento del valore dell'immobile grazie all'adozione di tecnologie efficienti dal punto di vista energetico risulta cruciale per promuovere la diffusione dei TES nel settore edilizio.
- **Incentivi governativi e sgravi fiscali.** Per promuovere l'adozione dei sistemi di accumulo termico (TES), è fondamentale fornire incentivi come sussidi governativi e finanziamenti

agevolati. Inoltre, è possibile offrire crediti d'imposta o detrazioni fiscali per le installazioni di TES, incentivando così gli investimenti iniziali nel settore dell'efficienza energetica.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Martellotta, M. (2016, August 24). *PAHSS, sistema passivo di accumulo termico del calore*. Architettura Ecosostenibile: Bioarchitettura E Sostenibilità. <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/pahss-sistema-passivo-accumulo-termico-calore-483>
2. De Gracia, Á., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>
3. Sârbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability (Basel)*, 10(1), 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>
4. Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 31, 870–906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>
5. Zhou, D., Zhao, C., & YiShui, T. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
6. Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197–2209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.023>
7. Casalena, A. U. (2019, January 25). Integrazione dei Materiali a Cambiamento di Fase con l'Involucro Edilizio. MyGreenBuildings. <https://www.mygreenbuildings.org/2014/12/14/materiali-a-cambiamento-di-fase-e-involucro-edilizio.html>
8. Zhou, D., Zhao, C., & YiShui, T. (2012c). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
9. Pomianowski, M. Z., Heiselberg, P., & Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*, 67, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.006>
10. Lv, S., Zhu, N., & Guo, F. (2006). Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Buildings*, 38(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.007>
11. Kuznik, F., Virgone, J., & Johannes, K. (2011). In-situ study of thermal comfort enhancement renovated building equipped with phase change material wallboard. *Renewable Energy*, 36(5), 1458–1462. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.008>
12. Liu, X., Yang, Y., Sheng, Z., Wu, W., Wang, Y., & Dumoulin, J. (2023). Study on thermal storage effectiveness of a novel PCM concrete applied in buildings located at four cities. *Renewable Energy*, 218, 119262. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119262>
13. Bærens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
14. Xu, X., Zhang, Y., Lin, K., Di, H., & Yang, R. (2005c). Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. *Energy and Buildings*, 37(10), 1084–1091. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.016>

15. Pasupathy, A., & Velraj, R. (2008). Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. *Energy and Buildings*, 40(3), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.016>
16. Che-Pan, M., Sima, E., Ávila-Hernández, A., Uriarte-Flores, J., & Vargas-López, R. (2023). Thermal performance of a window shutter with a phase change material as a passive system for buildings in warm and cold climates of México. *Energy and Buildings*, 281, 112775. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112775>
17. Abilkhassenova, Z., Memon, S. A., Ahmad, A., Saurbayeva, A., & Kim, J. (2023). Utilizing the Fanger thermal comfort model to evaluate the thermal, energy, economic, and environmental performance of PCM-integrated buildings in various climate zones worldwide. *Energy and Buildings*, 297, 113479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113479>
18. World Maps of Köppen-Geiger climate classification. (n.d.). <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>
19. Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., Barreneche, C., Cabeza, L. F., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2021). Introduction to thermal energy storage systems. In Elsevier eBooks (pp. 1–33). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819885-8.00001-2>
20. Torchiani, G. (2023, July 12). Centrali termiche: normative, tecnologia, funzionamento. *Lumi*. <https://www.lumi4innovation.it/sistemi-accumulo-termico/>
21. Energy storage. (n.d.). <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Energy-Storage>
22. [volume-marchapril-utilizzo-materiali-cambiamento-fase-3224allasp1.pdf \(aicarrjournal.org\)](https://www.aicarrjournal.org/volume-marchapril-utilizzo-materiali-cambiamento-fase-3224allasp1.pdf)
23. Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
24. <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/132473>
25. Javadi, F., Metselaar, H. S. C., & Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206, 330–352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.106>
26. contributori di Wikipedia. (2024, February 20). Paraffina. Wikipedia. <https://it.wikipedia.org/wiki/Paraffina>
27. [Zuanetto_Roberta_1128536.pdf \(unipd.it\)](https://www.unipd.it/zuanetto_roberta_1128536.pdf)
28. Sarier, N., & Önder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>
29. Bland, A., Khzouz, M., Statheros, T., & Gkanas, E. I. (2017). PCMs for Residential Building Applications: A short review focused on disadvantages and proposals for future development. *Buildings*, 7(3), 78. <https://doi.org/10.3390/buildings7030078>
30. Publications Office of the European Union. (2021). EU energy in figures: statistical pocketbook 2021. Publications Office of the EU. <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/41488d59-2032-11ec-bd8e-01aa75ed71a1>

31. Arce, P., Medrano, M., Gil, A., Oró, E., & Cabeza, L. F. (2011b). Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Applied Energy*, 88(8), 2764–2774.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.067>
32. Javadi, F., Metselaar, H. S. C., & Ganesan, P. (2020b). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206, 330–352.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.106>
33. Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., & Quénard, D. (2006). Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, 38(6), 673–681.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.002>
34. Souayfane, F., Biwolé, P. H., Fardoun, F., & Achard, P. (2019). Energy performance and economic analysis of a TIM-PCM wall under different climates. *Energy*, 169, 1274–1291.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.116>
35. Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39(2), 113–119.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030>
36. Schossig, P., Henning, H., Gschwander, S., & Haussmann, T. (2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells/Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2–3), 297–306.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.017>
37. Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009c). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
38. Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197–2209.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.023>
39. L'edilizia di domani è già oggi: i P.C.M., nuova frontiera dell'edificare efficiente. (2014, April 7). *Ingenio*.
<https://www.ingenio-web.it/articoli/l-edilizia-di-domani-e-gia-oggi-i-p-c-m-nuova-frontiera-dell-edificare-efficiente/>
40. Bourdeau, L. E. (1980). Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage. In Los Alamos Scientific Lab., NM (USA).
<https://www.osti.gov/biblio/5166853>
41. Bisbano, L. (2018, December 11). Muro di Trombe: origini e applicazioni più innovative. *Architettura Ecosostenibile: Bioarchitettura E Sostenibilità*.
<https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/muro-trombe-applicazioni-784#:~:text=Il%20muro%20di%20Trombe%20con,il%20laterizio%20o%20l'adobe> (?)
42. contributori di Wikipedia. (2023, July 18). Muro di Trombe-Michel. Wikipedia.
https://it.wikipedia.org/wiki/Muro_di_Trombe-Michel
43. Kunwer, R., & Bhurat, S. S. (2022). Thermal characterization of phase change materials (PCM) for heating applications. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1690–1696.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.164>
44. Kunwer, R., & Bhurat, S. S. (2022b). Thermal characterization of phase change materials (PCM) for heating applications. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1690–1696.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321059617>