

**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica**

**ACCUMULO TERMICO IN EDIFICI RESIDENZIALI CON  
MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE**

*Relatore:*

Prof.ssa Anna Stoppato

*Laureanda:*

Roberta Zuanetto

*Anno accademico 2017-2018*



*Ai miei genitori e a mio fratello*



## **INDICE**

<i>INDICE</i> .....	5
<i>INTRODUZIONE</i> .....	7
<b>1</b> <i>L'ACCUMULO DI ENERGIA</i> .....	9
<b>2</b> <i>L'ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA TES</i> .....	13
<b>2.1</b> <i>CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI D'ACCUMULO TERMICO</i> .....	16
<b>2.1.1</b> <i>ACCUMULO DI CALORE SENSIBILE</i> .....	16
<b>2.1.2</b> <i>ACCUMULO DI CALORE LATENTE</i> .....	20
<b>2.1.3</b> <i>ACCUMULO TERMOCHIMICO</i> .....	20
<b>2.2</b> <i>ACCUMULO ATTIVO E PASSIVO</i> .....	21
<b>3</b> <i>MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE</i> .....	27
<b>3.1</b> <i>INTRODUZIONE</i> .....	27
<b>3.2</b> <i>TIPOLOGIE DI PCM</i> .....	30
<b>3.2.1</b> <i>PCM ORGANICI</i> .....	31
<b>3.2.2</b> <i>PCM INORGANICI</i> .....	32
<b>3.2.3</b> <i>PCM EUTETTICI</i> .....	33
<b>3.3</b> <i>APPROFONDIMENTO DELLE VARIE CARATTERISTICHE NEGATIVE DEI PCM</i> .....	33
<b>4</b> <i>UTILIZZO DEI PCM IN EDILIZIA</i> .....	37
<b>4.1</b> <i>PARAMETRI DI SCELTA</i> .....	40
<b>4.2</b> <i>INTEGRAZIONE NELL'INVOLUCRO EDILIZIO</i> .....	41
<b>4.3</b> <i>STRATIGRAFIA DELLA MURATURA CON PCM</i> .....	42
<b>4.4</b> <i>PARAMETRI PER IL COMFORT TERMICO</i> .....	44
<b>4.5</b> <i>UTILIZZO DI MATERIALI INFIAMMABILI IN EDILIZIA</i> .....	47

4.6	STATO DELL'ARTE.....	48
4.7	UTILIZZO DEL PCM IN SISTEMI DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO.....	52
5	ANALISI DELL'UTILIZZO DI PCM IN EDILIZIA .....	55
5.1	INTRODUZIONE .....	55
5.2	PROGRAMMI UTILIZZATI.....	55
5.3	DATI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE.....	58
5.3.1	LOCALIZZAZIONE E CLIMA .....	58
5.3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA STUDIATA.....	58
5.4	CONTROLLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO .....	61
5.5	CONTROLLO DELLA TEMPERATURA INTERNA .....	63
5.6	OSSERVAZIONI .....	66
5.7	VALIDAZIONE DEL MODELLO .....	67
5.7.1	CONFRONTO DEI RISULTATI .....	69
6	VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA DI FUSIONE DEL PCM.....	71
6.1	RICERCA DELL'OTTIMA POSIZIONE .....	72
6.2	ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA INTERNA .....	74
7	CONCLUSIONI .....	81
8	BIBLIOGRAFIA.....	83
	RINGRAZIAMENTI.....	87

## **INTRODUZIONE**

Al giorno d'oggi uno dei temi principalmente discussi in tutti i settori è quello dell'inquinamento ambientale causato dall'uomo. Ne deriva la volontà di tendere ad una riduzione dei consumi con un risparmio energetico sempre maggiore.

Il settore edilizio richiede un'elevata quantità d'energia, utilizzata soprattutto per i sistemi di riscaldamento e raffrescamento. Ad esempio, dopo una lunga giornata di lavoro, in inverno qualsiasi persona vuole tornare a casa e trovare un ambiente caldo e confortevole, mentre, siamo tutti alla ricerca di un ambiente fresco durante le afose giornate di agosto.

Non sono solo i governi a puntare sulla riduzione del fabbisogno energetico di un edificio, imponendo valori limiti della trasmittanza termica ed energia consumata, ma è lo stesso utente a voler un risparmio economico senza sacrificare il benessere domestico.

Durante le fasi di progettazione si devono osservare delle normative che regolano i valori del fabbisogno energetico e della trasmittanza degli elementi per le nuove costruzioni e le ristrutturazioni, imponendo dei vincoli molto restrittivi. Esse aiutano ed orientano verso un futuro migliore caratterizzato da una riduzione degli sprechi energetici.

Da sempre la ricerca possiede un ruolo fondamentale per lo studio di nuove tecnologie e lo sviluppo di altre esistenti ancora poco efficienti. È dall'interesse di aziende attive nel settore edilizio che si fonda lo studio di nuovi materiali con caratteristiche sempre più performanti da introdurre nella stratigrafia degli elementi costruttivi.

In questa tesi si vuole affrontare il tema riguardante i materiali a cambiamento di fase, già esistenti ed utilizzati in serbatoi d'accumulo, ma non ancora diffusi con la funzione d'isolamento negli edifici.

Questi materiali anche detti PCM (Phase Change Materials) permettono di ridurre le oscillazioni di temperatura interne all'ambiente considerato attraverso il passaggio di stato da solido a liquido, equivalente all'accumulo di una certa quantità di calore latente.

In letteratura vi sono innumerevoli articoli riguardanti questi materiali utilizzati in stanze di prova sottoposte a determinate condizioni climatiche. La maggior parte degli autori svolgono studi sperimentali e descrivono il PCM come il materiale che permette con piccoli spessori di ridurre il fabbisogno, incrementando il confort termico.

Dopo la lettura di molti articoli nasce la curiosità di capire se le percentuali di risparmio dichiarate sono realmente corrette, ed è da questo interesse che nasce l'idea di sviluppare questo elaborato.

La tesi principalmente si sviluppa in due parti: la fase di ricerca e quella di modellazione con analisi dei risultati trovati. Nella prima è presente una raccolta di tutte le informazioni riguardanti i PCM, quindi le loro caratteristiche, come lavorano e possono essere utilizzati in edilizia, ossia i vantaggi e i limiti che rispettivamente possono offrire e vincolarne il loro utilizzo diffuso. Inoltre, vengono riportati i principali i prodotti che si possono acquistare dalle più famose aziende anche italiane.

La seconda fase, invece, inizia con lo studio dei programmi utilizzati come EnergyPlus, e si caratterizza dalla creazione di un modello per la ricerca di risultati energetici. Questa parte

per semplicità viene divisa in due sezioni, ossia una riguardante la ricerca del fabbisogno energetico annuale utilizzando un impianto di riscaldamento e raffrescamento ed imponendo una temperatura interna compresa tra 20 e 26°C. Nella seconda si osservano, invece, gli andamenti delle temperature interne con l'impianto spento.

Per la validazione del modello creato è stato preso come riferimento l'articolo "Evaluation of the application of Phase Change Material on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region" di Panayiotou, Kalogirou e Tassou che descrive un caso sperimentale situato a Cipro. È stato scelto perché definisce la maggior parte dei dati utilizzati, difficilmente forniti da altri autori, inoltre suddivide i risultati in quattro casi: base, ossia solo muratura, isolante, PCM con temperatura di lavoro a 29°C e combinato, cioè composto da isolante e PCM. Questa suddivisione permette un miglior confronto dei risultati trovati e di osservare quando l'utilizzo dell'isolante sia più conveniente rispetto al solo PCM. Per quest'ultimo caso e quello combinato la posizione del materiale a cambiamento di fase viene scelta tra interna, al centro o esterna al muro in relazione alla maggior percentuale di risparmio calcolata nella prima precedente.

Successivamente al confronto dei risultati trovati con quelli dell'articolo, si è voluto studiare come la variazione della temperatura di fusione del PCM comporti una variazione dei consumi e degli andamenti della temperatura.

L'elaborato tratta un argomento ancora in via sviluppo e in fase di ricerca, ma rappresenta un ottimo inizio per uno studio nell'utilizzo in componenti edili. Inoltre, permette di capire se un impiego dei PCM comporterebbe un maggior risparmio e a quali condizioni climatiche risulterebbe più adatto a seconda della temperatura di cambiamento di fase.

## 1 L'ACCUMULO DI ENERGIA

La prospettiva di diminuzione della disponibilità delle fonti fossili, di una variazione incontrollata dei prezzi e la necessità di una politica ecosostenibile per la salvaguardia del pianeta ha portato alla necessità di una diversificazione delle fonti primarie da utilizzare nella produzione energetica.

La diffusione delle fonti rinnovabili, come nel caso del fotovoltaico, ha comportato il mutamento della tipologia di generazione di energia nella rete elettrica, prima concentrata alle sole centrali termoelettriche ed ora distribuita anche alle utenze domestiche. Tutto ciò sta portando a rilevanti modifiche infrastrutturali e tecnologiche nella rete stessa, richiedendo l'introduzione di sistemi di controllo dei flussi di energia e di potenza. Pertanto, a seguito di questa trasformazione la rete deve essere in grado di garantire in ogni momento una fornitura di potenza ed energia all'utenza in relazione alla natura non programmabile della fonte rinnovabile che può essere facilmente gestita mediante l'utilizzo di un sistema d'accumulo [1].

L'accumulo d'energia, anche detto ES (Energy Storage), consiste nello stoccaggio di una qualche forma d'energia che può essere poi utilizzata in un secondo momento quando richiesta [2].

L'utilizzo di sistemi d'accumulo comporta la possibilità di:

- semplificare la gestione dell'energia collegando la fornitura con la richiesta e qualità di potenza;
- rendere i sistemi più affidabili ed economici riducendo lo spreco d'energia;
- consentire un uso più differenziato dell'energia elettrica [1] [3] [4];
- diminuire il consumo di combustibili fossili, quindi delle associate emissioni inquinanti;
- installare macchine con potenze nominali minori, poiché non dimensionate per il massimo carico.

In generale, la potenza richiesta, sia termica che elettrica, non è costante nel tempo ed in molti casi non lo è nemmeno la fornitura, basti pensare ai sistemi che sfruttano l'energia solare.

In passato, quando la domanda e l'offerta di energia avevano un andamento molto variabile nel tempo, era necessario dimensionare il sistema di conversione d'energia utilizzando il valore di picco della domanda. Ovviamente questo comportava elevate inefficienze poiché le macchine lavoravano per molte ore a potenze minori rispetto a quelle nominali. Grazie all'utilizzo di sistemi di accumulo, vi è la possibilità di ridurre la potenza installata ad un valore minore del massimo richiesto dalla domanda, con conseguenti risparmi [5].

Le applicazioni dei sistemi d'accumulo sono numerose ed interessano l'intera catena del sistema elettrico, dalla generazione all'utenza finale, passando per la trasmissione e la distribuzione.

In fase di progettazione, i parametri caratteristici di un sistema ES vengono scelti a seconda dell'applicazione e delle caratteristiche tecnico ed economiche da soddisfare.

Nella *tabella 1.1* viene riportata una suddivisione generale dei sistemi di accumulo per settore, taglia e possibili applicazioni [1].

SETTORE	TAGLIA	APPLICAZIONE
Domestico	0,5 - 10 kW	Ottimizzazione dell'auto-produzione, alimentazione anche in caso di distacco dalla rete
Commercio e piccola industria	5 - 500 kW	Integrazione dell'auto-produzione, peak-shaving, possibile commercio dell'energia
Commercio e industria	0,5 - 5 MW	Pianificazione delle tariffe, gruppi di continuità (UPS), cogenerazione o auto-produzione in loco
Aziende di distribuzione	0,5 - 5 MW	Differimento dell'ampliamento degli asset di distribuzione
Aziende elettriche di produzione	5 - 50 MW	Commercio dell'energia, commercio dei servizi ausiliari

Tabella 1.1: Sistemi d'accumulo suddivisi per settore, taglia ed applicazione [1]

I sistemi d'accumulo vengono classificati in base alla forma d'energia utilizzata per l'immagazzinamento e si distinguono in accumulo meccanico, chimico, biologico, magnetico e termico, come l'illustrato nella figura 1.1.

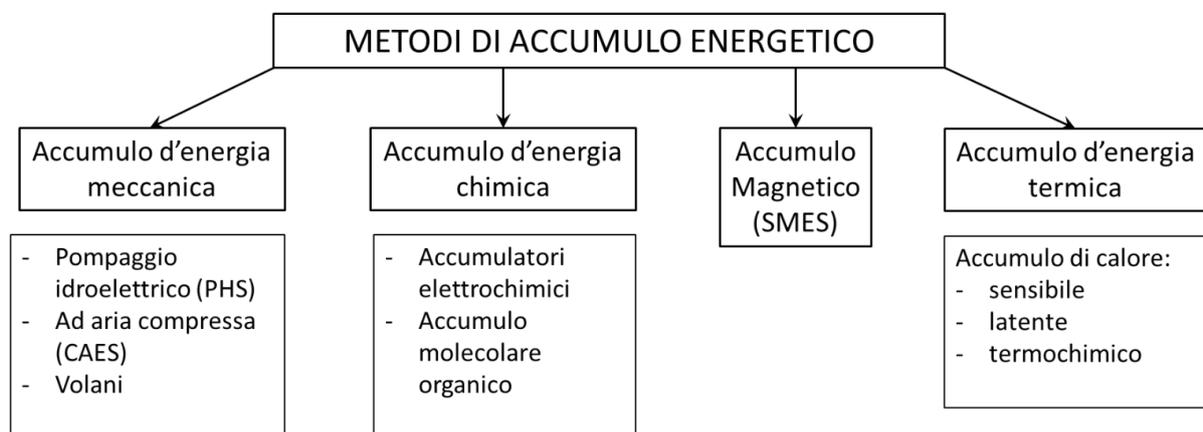


Figura 1.1: Classificazione delle diverse metodologie di accumulo dell'energia [1]

### Accumulo meccanico

I sistemi ES meccanici convertono l'energia elettrica in meccanica attraverso il passaggio in energia potenziale, di pressione o cinetica. Di particolare interesse è l'energia potenziale associata al campo gravitazionale terrestre, cioè tanto più una massa viene sollevata rispetto al terreno tanto maggiore è l'energia accumulata in essa. L'esempio più comune sono i sistemi di pompaggio idroelettrico (PHS): nel periodo di fuori picco, quando tariffe elettriche sono basse, le pompe portano l'acqua in un bacino superiore in modo tale da consentire la massima

produzione quando richiesta. Un'altra forma di accumulo d'energia meccanica deriva dalla compressione di una massa solida o di un gas: applicazioni di questo tipo sono i sistemi ad aria compressa (CAES).

L'accumulo di energia cinetica, invece, avviene mediante l'utilizzo di una massa in movimento con moto lineare o rotante, come nel caso dei volani [1].

Le prime due tecnologie descritte, PHS e CAES, possono essere impiegate su larga scala, mentre, i volani sono più adatti ad uno stoccaggio intermedio [3].

### **Accumulo chimico**

Di questa categoria fanno parte gli accumulatori elettrochimici, cioè sistemi in grado di immagazzinare energia elettrica convertendola in energia chimica. Comunemente questi sistemi vengono chiamati batterie primarie o secondarie, con la differenza che solamente quest'ultime presentano un ciclo reversibile quindi la possibilità di essere caricate e scaricate più volte.

Collegando la batteria ad una fonte elettrica le specie chimiche presenti reagiscono tra loro per formarne di nuove. Successivamente, quando viene inserito un carico elettrico le specie precedentemente generate, reagiscono e producono energia.

Le batterie possono essere sfruttate per avere: disponibilità di potenza nel periodo di fuori picco, livellamento del carico e immagazzinamento dell'energia elettrica generata da una turbina eolica o da impianti fotovoltaici [1].

L'accumulo chimico può avvenire anche mediante le stesse reazioni chimiche che portano alla produzione di diversi materiali da utilizzare per lo stoccaggio energetico. Per esempio si possono produrre gas, come l'idrogeno: uno dei vettori energetici del futuro, poiché può essere trasportato ed accumulato con diverse modalità per lunghe distanze e periodi con perdite praticamente nulle. Inoltre è ottenibile partendo da varie fonti, come combustibili fossili, acqua, biomasse e con molteplici processi dall'elettrolisi alla conversione termochimica. Tuttavia solo alcuni di questi processi hanno raggiunto una maturità commerciale e a causa di ciò la competitività di questa tipologia di accumulo rispetto alle altre è ancora da dimostrare [1].

### **Accumulo magnetico**

L'energia immagazzinata in un campo magnetico creato da un flusso di corrente che attraversa un cavo conduttore, più precisamente un induttore, viene definita accumulo magnetico.

Se l'induttore è composto da materiale superconduttore, il sistema di accumulo sarà denominato SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Questo è costituito da una bobina percorsa da una corrente stazionaria, un sistema di interfaccia tra la rete e l'accumulo e, infine, un sistema criogenico. Quest'ultimo permette di mantenere la bobina ad una temperatura di superconduttività, ossia nell'intervallo da qualche K a 134K, pari alla massima temperatura dei materiali superconduttori operanti ad alte temperature. Grazie alla proprietà dei superconduttori di avere bassa resistività, il tempo di decadimento della corrente si allunga notevolmente raggiungendo i  $10^5$  anni. L'energia immagazzinata viene poi estratta nella forma elettrica mediante opportuni convertitori elettrici [1].

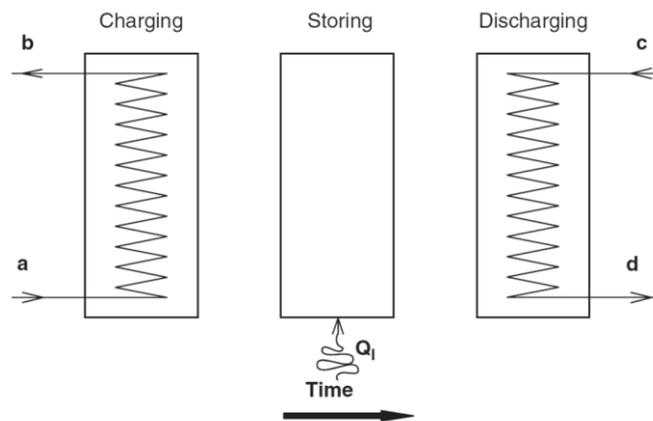
### Accumulo termico

L'accumulo d'energia termica può essere realizzato attraverso una variazione di energia interna nel materiale dovuta ad uno scambio di calore sensibile, latente o termochimico [3], come si vedrà nel capitolo successivo. Il potenziale applicativo di questa categoria è ampio ed è in grado di assistere la fase di generazione di energia termica ed elettrica permettendo di spostare, modificare e ridurre i consumi degli utenti finali considerati dall'impianto di produzione [5].

Principalmente un intero processo di accumulo termico è caratterizzato da tre fasi [6]:

1. assorbire il calore, sia questo sensibile, latente o termochimico;
2. conservare l'energia assorbita fino al momento della necessità;
3. rilasciare il calore assorbito nella prima fase.

Un semplice ciclo è illustrato in *figura 1.2*, nella quale si notano distintamente questi tre periodi.



*Figura 1.2: Le tre fasi di un processo d'accumulo [5]*

## **2 L'ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA TES**

Le applicazioni che sfruttano l'energia solare sia in ambito termico che elettrico sono molto diffuse, ma devono far fronte al problema di discontinuità e non programmabilità della fonte stessa. La soluzione a questo problema in molte applicazioni ingegneristiche è l'utilizzo di sistemi di accumulo d'energia termica, anche detti TES (Thermal Energy Storage). Il calore accumulato in eccesso nei periodi di sole può essere immagazzinato e poi utilizzato durante la notte o in altri periodi, come nel caso del calore estivo per uso invernale.

Problemi simili ad avere una fonte termica non continua sorgono anche nei sistemi di recupero di calore residuo caratterizzati da periodi di disponibilità e di utilizzo differenti fra loro. Ad esempio, vi sono processi, come la produzione di ceramiche, che utilizzano calore ad alte temperature e tramite sistemi TES possono recuperare il calore in uscita, altrimenti perso, per riscaldare. Successivamente questa fonte termica può essere sfruttata in un impianto cogenerativo per la generazione combinata di energia elettrica e termica.

Lo stoccaggio d'energia termica può essere applicato anche nella maggior parte degli edifici in cui si ha un significativo fabbisogno di calore nel periodo invernale e le tariffe dell'elettricità consentono allo stoccaggio di essere competitivo con altre forme di riscaldamento. Inoltre durante l'estate il calore può essere immagazzinato e successivamente utilizzato in sistemi per il raffrescamento degli edifici, ad esempio in una macchina ad assorbimento.

L'importanza dell'accumulo è data dal fatto che il carico termico massimo si manifesta con un ritardo temporale rispetto al momento di massima insolazione, a causa dell'inerzia della struttura [5] [7].

I sistemi TES hanno il potenziale di incrementare l'effettivo uso dei dispositivi d'energia termica e possono aiutare nell'abbinare la disponibilità della risorsa energetica con la domanda [2].

L'utilizzo di questi sistemi comporta i seguenti vantaggi [5]:

- incremento della capacità di generazione. La domanda per riscaldamento, raffrescamento o potenza, raramente è costante nel tempo, quindi durante i periodi di bassa richiesta i TES possono essere caricati permettendo un incremento della capacità quando la richiesta è massima;
- miglioramento nelle gestioni di impianti cogenerativi. Questi impianti generalmente operano seguendo la domanda termica, quindi vi sono periodi in cui si ha un eccesso di energia elettrica prodotta. Grazie ai TES l'impianto non è obbligato a seguire il carico termico e ciò costituisce un vantaggio;
- integrazione con altre funzioni. In applicazioni dove si hanno serbatoi di acqua è possibile aumentarne la flessibilità incorporando al loro interno un accumulo termico.

I sistemi TES sono caratterizzati da vari parametri, come [6] [8]:

- la densità specifica di energia, cioè quanta energia si può accumulare per unità di peso o di volume che varia in base alla tipologia di accumulo e al materiale utilizzato;
- la capacità di accumulo, quindi la massima energia immagazzinabile;

- l'efficienza del sistema;
- la conservazione nel tempo delle caratteristiche dell'accumulo;
- la temperatura alla quale si trova il materiale utilizzato per lo stoccaggio.

La richiesta di energia in molti settori, tra cui quello industriale e pubblico, varia su base giornaliera, settimanale e stagionale. Quindi la *durata dell'accumulo* è un fattore importante ed identifica il tempo entro il quale l'energia immagazzinata può essere conservata senza subire perdite energetiche. I TES possono essere suddivisi secondo questo parametro in breve, medio e lungo termine.

L'accumulo a breve termine è caratterizzato da una durata misurabile in ore e viene anche detto stoccaggio giornaliero. Il suo utilizzo è indirizzato verso quei sistemi che lavorano con picchi di potenza elevati per poche ore e permette una riduzione della taglia delle macchine stesse.

Le tipologie a medio e lungo termine vengono consigliate quando le dispersioni termiche o i carichi energetici stagionali possono essere utilizzati rispettivamente con un ritardo settimanale o mensile. L'accumulo a lungo termine, spesso riferito ad un accumulo stagionale o annuale, sfrutta la variazione climatica tra le stagioni. La sua caratteristica primaria è l'elevata capacità corrispondente ad un ordine di grandezza pari a cento volte rispetto all'accumulo giornaliero e per tale motivo esso non può essere installato all'interno di edifici. In fase di progettazione è importante considerare le perdite termiche non trascurabili a causa della notevole differenza temporale tra l'accumulo e l'utilizzo del calore.

Confrontando le tipologie descritte si nota che solo l'accumulo annuale può contribuire al 100% al fabbisogno di riscaldamento dell'edificio, mentre quello giornaliero difficilmente supera il 60% anche se può operare in modo competitivo con i convenzionali combustibili. Quest'ultimo presenta il vantaggio di avere bassi capitali d'investimento e perdite energetiche basse rispetto a quello stagionale che può risultare economico solo per servire molte abitazioni o un parco industriale. Per motivi di volume, solo quelli giornalieri possono essere prodotti in un luogo diverso da quello d'installazione [5] [6].

Le tipologie di TES si differenziano anche in base alle temperature di lavoro, corrispondenti a differenti applicazioni (*tabella 2.1*). Solitamente si trovano divisi in [4] [9]:

- HTTES (High Temperature Thermal Energy Storage). È un accumulo ad alta temperatura che comprende tutti gli impianti che operano con temperature di lavoro maggiori di 200°C. Nonostante gli usi di questa tipologia d'accumulo siano incentrati su applicazioni riguardanti il solare termico, HTTES permette anche di recuperare il calore di scarto in modo conveniente, utilizzandolo ad esempio nella fase produzione di molti materiali e nel settore metallurgico in generale;
- LTTES (Low Temperature Thermal Energy Storage), corrisponde all'accumulo a bassa temperatura. Esso è costituito da tutti quei sistemi che operano tra 10°C e 200°C. Le applicazioni più frequenti riguardano il riscaldamento e il raffrescamento di edifici, i sistemi di trattamento aria, le serre, i forni solari e i serbatoi d'acqua. Spesso questi sistemi si trovano abbinati a impianti combinati o collettori solari in

modo da poter sfruttare al meglio la fonte solare, sia di tipo giornaliero che stagionale;

- MTTES (Medium Temperature Thermal Energy Storage), corrisponde ad un accumulo intermedio tra quello di alta temperatura e quello di bassa. I processi di accumulo considerati hanno un intervallo di temperatura tra i 100°C e i 250°C. Questa tipologia di accumulo risulta molto interessante per una serie di applicazioni, tra le quali gli impianti solari a concentrazione e il solar cooling, cioè la produzione di freddo con macchine frigorifere ad assorbimento;
- CTES (Cold Thermal Energy Storage). L'accumulo termico del freddo è caratterizzato da temperature inferiori ai 20°C, ossia minori di quella ambiente. Accumulare energia termica fredda significa portare le molecole del materiale utilizzato ad un livello energetico inferiore rispetto alla condizione normale. In generale, il CTES è utilizzato per il raffrescamento e condizionamento degli ambienti: il picco di carico elettrico richiesto in un pomeriggio d'estate viene spostato in periodo di fuori picco, quindi nella notte. Inoltre, questi sistemi possono essere utilizzati nelle applicazioni d'industria per la conservazione degli alimenti.

	TEMPERATURE	APPLICAZIONI	SORGENTI
HTTES: accumulo termico ad alta temperatura	$T > 200^{\circ}\text{C}$	Generazione di potenza, riscaldamento edifici	Centrali solari, impianti cogenerativi, cascami energetici (calore di scarto da processi industriali)
MTTES: accumulo termico a media temperatura	$100^{\circ}\text{C} < T < 250^{\circ}\text{C}$	Buffering, riscaldamento degli ambienti, macchine frigorifere ad assorbimento	Solare termico a concentrazione, calore di scarto da processi industriali
LTTES: accumulo termico a bassa temperatura	$10^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$	Riscaldamento/raffrescamento edifici	Collettori solari, impianti cogenerativi
CTES: accumulo termico freddo	$T < 10^{\circ}\text{C}$	Raffrescamento edifici, conservazione degli alimenti	Collettori solari, ghiaccio invernale

Tabella 2.1: Classificazione dei sistemi TES per intervallo di temperatura di esercizio [9]

L'efficienza di un sistema TES è definita dal rapporto tra l'energia estratta durante la scarica e l'energia immagazzinata durante la carica, cioè

$$\eta = \frac{mc(T - T_0)}{mc(T_{\infty} - T_0)}$$

dove  $mc$  è la capacità termica totale del mezzo,  $T$  e  $T_0$  sono rispettivamente la massima e minima temperatura dell'accumulo durante il processo di scarica e  $T_\infty$  è la temperatura massima al termine del processo di carica [9].

Gli accumuli a bassa temperatura, visti in precedenza, sono ampiamente utilizzati per il riscaldamento di acqua calda sanitaria e presentano un'efficienza maggiore del 90% se di tipo giornaliero, ma inferiore al 70% se stagionali [5].

## **2.1 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI D'ACCUMULO TERMICO**

I sistemi di accumulo si differenziano in base alla tipologia di calore, ovvero [10]:

- accumulo di calore sensibile: si basa sull'immagazzinamento di energia termica mediante riscaldamento o raffreddamento di un mezzo di accumulo liquido o solido, come ad esempio l'acqua, il cemento e alcune pietre;
- accumulo di calore latente: è basato sul calore assorbito o rilasciato quando un materiale effettua una trasformazione di fase da solido a liquido oppure da liquido a gas;
- accumulo termochimico, derivante dalle reazioni chimiche.

### **2.1.1 ACCUMULO DI CALORE SENSIBILE**

L'accumulo dovuto ad un incremento o abbassamento della temperatura del materiale è detto calore sensibile. La sua efficacia dipende dal calore specifico del materiale e, se il suo volume è importante, dalla sua densità. Sistemi comunemente usati sono rocce, terreno o acqua. La quantità di calore immagazzinato nel materiale può essere espressa con la seguente formula:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T$$

dove  $c_p$  è il calore specifico del materiale utilizzato,  $\Delta T$  è la variazione di temperatura,  $V$  il volume e  $\rho$  la densità del materiale. Dalla formula si nota che la quantità di calore sensibile accumulato dipende fortemente dal prodotto  $\rho c_p$ .

A basse temperature, l'acqua si presta ad essere il miglior liquido adatto a questo tipo di accumulo, poiché è economica e possiede un elevato valore del calore specifico pari a 4,2 kJ/kgK, cioè due volte maggiore rispetto a quello del terreno e della roccia. Quindi possedendo un elevato valore del prodotto  $\rho c_p$  essa è favorita nell'operare in sistemi di riscaldamento e raffrescamento degli edifici grazie alla possibilità di utilizzare differenze di temperatura non eccessivamente elevate.

Mentre nel caso di rocce e ceramiche l'elevata differenza di temperatura utilizzata serve per compensare la loro bassa capacità termica pari a 0,84 kJ/kgK [3] [5].

Normalmente, nella scelta del materiale utilizzato per l'accumulo si considerano vari aspetti tra i quali la capacità termica, l'economicità e la velocità di rilascio ed assorbimento del calore.

Nella *tabella 2.2* sono riportati i comuni materiali utilizzati per il TES sensibile e le loro proprietà [5].

MATERIALE	DENSITÀ [kg/m <sup>3</sup> ]	CALORE SPECIFICO [J/kgK]	CAPACITÀ VOLUMETRICA TERMICA [10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K]
Argilla	1458	879	1,28
Mattone	1800	837	1,51
Arenaria	2200	712	1,57
Legno	700	2390	1,67
Cemento	2000	880	1,76
Vetro	2710	837	2,27
Alluminio	2710	896	2,43
Ferro	7900	452	3,57
Acciaio	7840	465	3,68
Terra ghiaiosa	2050	1840	3,77
Magnetite	5177	752	3,89
Acqua	988	4182	4,17

*Tabella 2.2: Proprietà termiche a 20°C di alcuni materiali utilizzati per l'accumulo sensibile [5]*

I materiali utilizzati per l'accumulo possono essere solidi o liquidi. Tra i primi troviamo in particolare il cemento e la ceramica calcinabile per il loro basso prezzo, la buona conducibilità termica e un moderato calore specifico. Invece la scelta dei liquidi per il trasporto del calore, ricade su acqua, olio, sodio e sali fusi. Quest'ultimi sono ampiamente usati nei sistemi a torre solare, essendo liquidi a pressione ambiente possono essere usati a temperature operative compatibili con le alte temperature della turbina. Inoltre sono già usati in industrie chimiche e metallurgiche come fluido trasporto calore [2] [4].

Il vantaggio dell'utilizzo degli accumuli di calore sensibile è quello di essere economico e senza nessun rischio derivante dall'uso di materiali tossici, ma richiede grandi volumi a causa della bassa densità energetica dei materiali utilizzati rispetto alle altre due tipologie di accumulo, come si può notare dalla *figura 2.2* riportata in seguito [11].

I sistemi TES che sfruttano il calore sensibile possono essere suddivisi in varie sottocategorie a seconda del mezzo utilizzato. Di seguito vengono riportate alcune di queste e le loro caratteristiche.

### **TES con serbatoi d'acqua**

I sistemi TES più comuni sono quelli utilizzano l'acqua in serbatoi per il riscaldamento, condizionamento dell'aria e altre applicazioni.

Generalmente l'impiego di questo accumulo comporta il rispetto di alcuni requisiti importanti per una buona efficienza del sistema. Innanzitutto esso deve essere stratificato, cioè all'interno devono essere presenti volumi separati di acqua a seconda della temperatura e in qualsiasi periodo la miscelazione deve essere minima. L'effettiva capacità di accumulo deve essere scelta in modo da minimizzare la quantità di volume morto dell'acqua nel serbatoio, cioè quella parte che non viene ricircolata e riscaldata, quindi ritenuta persa per lo scopo. Infine, le dispersioni del serbatoio verso l'esterno devono essere minimizzate da un opportuno strato di isolamento termico [5].

Durante la fase di progettazione di un serbatoio ci sono delle linee guida da seguire per rispettare i requisiti descritti, quali [5]:

- considerazioni geometriche:
  - un serbatoio stretto e alto è preferibile poiché aiuta la stratificazione;
  - l'ingresso e l'uscita di acqua devono essere installati in modo da fornire continuità al flusso, evitando la miscelazione;
  - minimizzare il volume morto d'acqua, mediante la connessione dell'ingresso e dell'uscita rispettivamente sopra e sotto;
- considerazioni operative:
  - la differenza di temperatura tra la parte superiore e inferiore dell'acqua nel serbatoio deve essere di almeno di 5-10°C ottenuta mediante il controllo e mantenimento delle due temperature a valori stabiliti;
  - la velocità d'ingresso ed uscita deve essere bassa in modo tale da favorire la stratificazione;
- altre considerazioni:
  - le caratteristiche dell'isolamento e dell'impermeabilizzazione del serbatoio devono rispettare certe specifiche per evitare perdite di calore e d'acqua.

### **TES con calcestruzzo**

Il calcestruzzo viene scelto per il basso costo, la disponibilità in tutto il mondo e la facilità di lavorazione.

Questo materiale per essere un buon accumulatore termico deve avere un elevato calore specifico, buone proprietà meccaniche, un coefficiente di espansione vicino a quello dell'acciaio ed un'elevata resistenza meccanica al caricamento termico di ciclo.

Una volta che il calcestruzzo ha immagazzinato il calore, le trasformazioni e reazioni presenti in esso ne influenzano le altre proprietà fisiche. Inoltre, quando raggiunge una temperatura di 100°C, l'acqua presente in esso viene espulsa fino ad un massimo di 130kg per m<sup>3</sup> di calcestruzzo. Successivamente l'acqua rimanente (50-60 kg per m<sup>3</sup>) che è fisicamente legata nei piccoli pori o trattenuta con assorbimento chimico, viene espulsa se la temperatura passa da 120 a 600°C. L'acqua persa riduce il peso del calcestruzzo da 2-4%.

Il calore specifico del calcestruzzo diminuisce con l'aumento della temperatura da 20 a 120°C, lo stesso andamento si manifesta anche per la conducibilità termica, ma in un intervallo maggiore da 20 a 280°C. Le proprietà meccaniche sono leggermente influenzate dalla perdita di acqua, la forza a compressione diminuisce del 20% a 400°C comparata a quella a temperatura ambiente.

Il sistema TES con calcestruzzo può essere formato da piastre prefabbricate oppure riversato direttamente in sito all'interno di grandi blocchi. Quest'ultima applicazione risulta di facile costruzione ed economica [5].

### **TES con roccia e acqua/roccia**

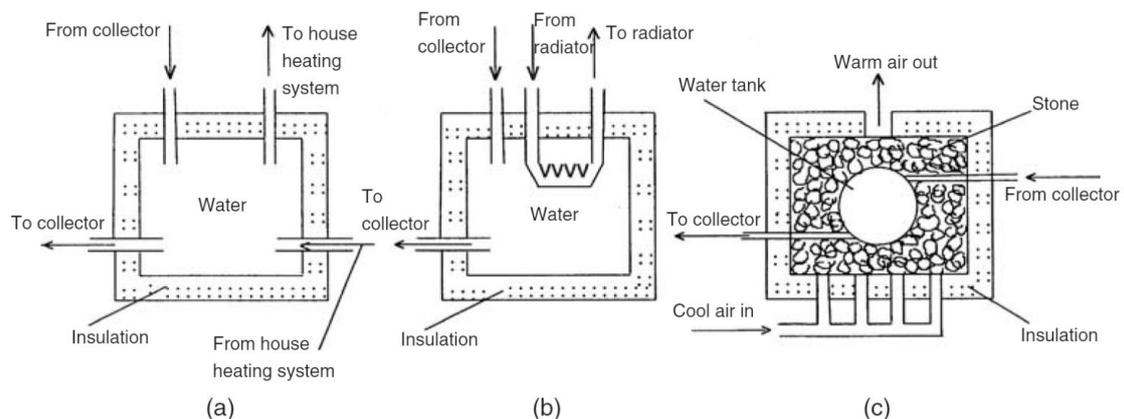
La roccia è un materiale economico, ma la sua capacità termica volumetrica è minore rispetto quella dell'acqua. Il vantaggio della roccia rispetto quest'ultima è quello di poter essere facilmente usata per lo stoccaggio con temperature maggiori di 100°C [5].

Eldighidy (1991) condusse estese teorie ed esperimenti su serbatoi d'accumulo solare con TES e dimostrò come l'acqua, la roccia e i PCM sono i materiali più adatti a tale scopo. Per quanto riguarda i primi due, furono esaminate tre differenti configurazioni per lo stoccaggio, di seguito descritte in *figura 2.1*.

Il primo sistema è il più comune ed è costituito da un contenitore pieno d'acqua a diretto contatto sia con il collettore solare che con il sistema di riscaldamento domestico (*figura 2.1a*). L'acqua fredda nella parte inferiore del serbatoio è fatta circolare al collettore per il riscaldamento solare e quindi riportata nella parte superiore del serbatoio. Questa a sua volta viene fatta circolare direttamente attraverso i radiatori del battiscopa o pannelli radianti di riscaldamento dentro le stanze.

La *figura 2.1b* mostra un altro sistema costituito da un tubo alettato a spirale di rame immerso nel serbatoio d'acqua riscaldata dal sole.

Un interessante metodo di accumulo che utilizza sia acqua che rocce come supporto è noto come il metodo di Harry Thomason (*figura 2.1c*). In questo sistema l'acqua riscaldata dal collettore solare entra nel serbatoio d'acqua nella parte superiore, affonda mentre si raffredda, e infine lascia il serbatoio nella parte inferiore per ritornare nel collettore. Il serbatoio d'acqua è circondato da roccia fluviale attraverso la quale viene fatta circolare l'aria da trasportare per il riscaldamento domestico. L'intero complesso di rocce e d'acqua è contenuto all'interno di parete isolate. Il vantaggio di questo sistema è l'elevata capacità termica dell'acqua e l'ampia area del serbatoio di roccia che porta al trasferimento efficiente di calore nell'aria [5].



*Figura 2.1: Sistemi d'accumulo solare (a) serbatoio direttamente collegato al collettore e sistema di riscaldamento domestico, (b) TES sensibile con scambio di calore tra collettore e serbatoio, (c) metodo Herry Thomason [5]*

### 2.1.2 ACCUMULO DI CALORE LATENTE

L'accumulo di calore latente avviene mediante il cambiamento di fase del materiale, ossia con una trasformazione da solido a liquido o da liquido a gas o viceversa. Solitamente i materiali utilizzati in questa categoria vengono anche detti PCM (Phase Change Material).

La capacità media di questi sistemi è data da:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT$$

$$Q = m [C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)]$$

dove  $m$  è la massa dell'accumulo in kg,  $C_{sp}$  è il calore specifico medio tra  $T_i$  (temperatura iniziale) e  $T_m$  (temperatura di fusione) in J/kg K,  $dT$  la variazione di temperatura,  $a_m$  la frazione fusa e  $\Delta h_m$  il calore di fusione per unità di massa J/kg, infine,  $C_{lp}$  il calore specifico medio tra  $T_m$  e  $T_f$  (temperatura finale) in J/kgK [3].

Il vantaggio di un TES latente è la sua elevata densità di energia immagazzinabile, molto maggiore rispetto a quella di un accumulo sensibile, come si può osservare dalla *figura 2.2*. Inoltre, grazie a ciò i PCM permettono di lavorare con differenze di temperatura molto piccole comportandone un uso più diffuso.

Se si considera un accumulo latente a temperatura costante, le trasformazioni più adatte sono liquido-solido e solido-solido, poiché quella solido-gas presenta lo svantaggio di necessitare di grandi volumi per il passaggio di stato [2] [5].

I materiali a cambiamento di fase utilizzati in questa tipologia di TES verranno spiegati in modo più approfondito nel capitolo successivo di questa tesi.

### 2.1.3 ACCUMULO TERMOCHIMICO

Un'altra categoria di accumulo termico è caratterizzata dall'uso di reazioni chimiche endotermiche e viene per questo detta accumulo termochimico. Essa è basata su reazioni che comportano la rottura e la formazione di legami chimici, permettendo un elevato accumulo d'energia per unità di massa del materiale. È importante e necessario che le reazioni siano reversibili così da permettere più cicli consecutivi [2] [5].

I sistemi termochimici fanno affidamento sull'energia assorbita e liberata nel processo di rottura e formazione dei legami molecolari in una reazione chimica completamente reversibile. In questo caso, il calore immagazzinato dipende dalla quantità di materiale, dal calore endotermico della reazione e dal grado di conversione. In questo caso, il calore accumulato è pari a:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta h_r$$

dove  $a_r$  è la frazione reagente,  $m$  la massa dell'accumulo e  $\Delta h_r$  l'energia endotermica di reazione [3].

Il principale vantaggio di questo stoccaggio consiste nel possedere un'elevata densità di energia dovuta alle reazioni coinvolte che può essere superiore a quello che si incontra di solito per altri processi di accumulo termico. Presentando però un elevato costo, l'accumulo termochimico si trova ancora nelle prime fasi di sviluppo [4] ed è per questo motivo che non verrà approfondito in modo dettagliato.

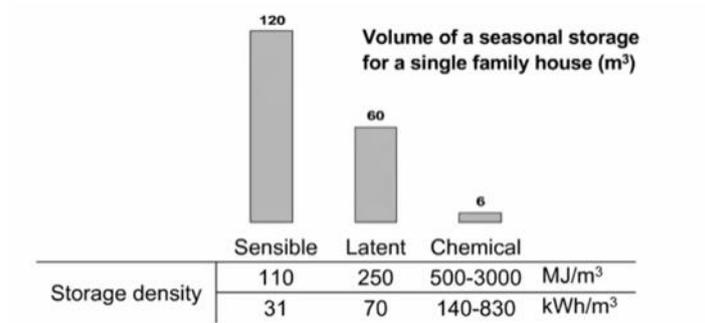


Figura 2.2: Valori di densità di accumulo di calore sensibile, latente e termochimico [8]

## 2.2 ACCUMULO ATTIVO E PASSIVO

Nel settore edilizio, l'accumulo termico è suddiviso in due differenti categorie: sistema attivo e passivo.

I sistemi passivi sono tecnologie applicate all'edilizia con l'obiettivo di regolare gli scambi termici tra esterno ed interno dell'edificio utilizzando la radiazione solare come fonte energetica e sfruttando i componenti edilizi, sia d'involucro che interni, per la captazione e l'accumulo. Questi sistemi includono l'uso di facciate ventilate, massa termica, effetto ombreggiamento, elementi di copertura vetrati e tecniche di riscaldamento e raffrescamento notturno.

A differenza dei sistemi passivi, quelli attivi agiscono con sistemi di controllo per il mantenimento del comfort interno mediante l'uso di sistemi meccanici di riscaldamento e raffrescamento. Normalmente sono integrati negli edifici per fornire un raffreddamento gratuito o spostare il carico termico dalle condizioni di picco a quelle di fuori picco, come ad esempio il riscaldamento domestico dell'acqua [11] [12].

### TECNOLOGIA PASSIVA

L'uso di tecnologie TES passive ha l'obiettivo di provvedere al comfort termico con il minimo uso di HVAC, cioè sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

Un accumulo di tipo passivo può sfruttare sia il calore sensibile che quello latente. Scegliendo la prima tipologia viene utilizzata l'elevata massa termica dei materiali usati in edilizia che permettono di accumulare importanti quantità d'energia, come rocce, calcestruzzo e mattoni [12] [13]. Se si vuole sfruttare, invece, un accumulo di calore latente, si dovranno impiegare materiali a cambiamento di fase che potranno essere introdotti nel muro in differenti modi, come si vedrà nei capitoli successivi.

Di norma questi sistemi vengono suddivisi in tre categorie principali [13]:

- a guadagno diretto: la radiazione solare attraversa lo spazio asservito prima di essere immagazzinata nella massa di accumulo;
- a guadagno indiretto: l'energia termica della radiazione solare viene immagazzinata in un sistema di accumulo e poi trasferita allo spazio asservito;
- a guadagno separato o isolato: la radiazione solare viene raccolta in un accumulo separato rispetto l'area dell'edificio, per poi essere distribuita allo spazio abitativo.

I sistemi a *guadagno diretto* (figura 2.3) rappresentano la categoria più semplice. La radiazione entra nella stanza direttamente attraverso le superfici vetrate, e una volta immagazzinata negli elementi costruttivi che delimitano l'ambiente, viene rilasciata durante il periodo notturno. Quindi la massa d'accumulo è composta dal pavimento e dalle pareti della stanza. L'uso di questi sistemi, a meno di dispositivi di controllo, presenta l'inconveniente di un possibile surriscaldamento degli ambienti nella mezza stagione o in quella estiva, di eccessive dispersioni termiche attraverso le superfici finestrate durante la notte e di una radiazione diretta sugli individui presenti generando un discomfort localizzato a causa dell'abbagliamento. Pertanto è opportuno che le superfici vetrate siano costituite da almeno un doppio vetro camera per ridurre le dispersioni e siano dotate di dispositivi per il controllo della radiazione entrante, come l'uso di tende interne o di schermature esterne [13].

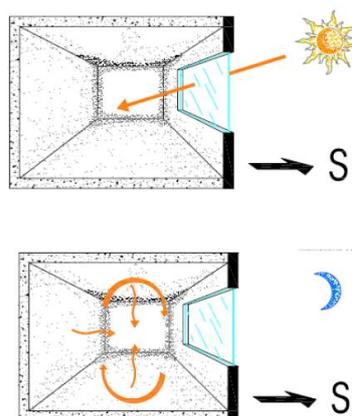


Figura 2.3: Sistema a guadagno diretto [12]

I sistemi a *guadagno isolato* sono caratterizzati nell'aver il collettore per l'accumulo di energia solare termicamente isolato dallo spazio interno dell'edificio.

Essi si differenziano in due principali tipologie: serra e termosifone. Nella prima, quella denominata serra (*figura 2.4*), la radiazione viene raccolta in un edificio diverso da quello da servire, e solo in un successivo momento il calore viene trasferito alle zone dove richiesto. Questo spazio vetrato che funge da collettore può essere un portico, una serra per la coltivazione di piante o un atrio vetrato [13]. Inoltre, se non provvisto di un accumulo, esso deve essere collegato mediante un circuito termico a quello dell'edificio per la distribuzione del calore. Anche in questo sistema, come per quello a guadagno diretto, è necessaria l'installazione di schermature per evitare i periodi di surriscaldamento estivo e di un isolamento mobile delle stesse superfici vetrate per le eccessive dispersioni termiche invernali [12].

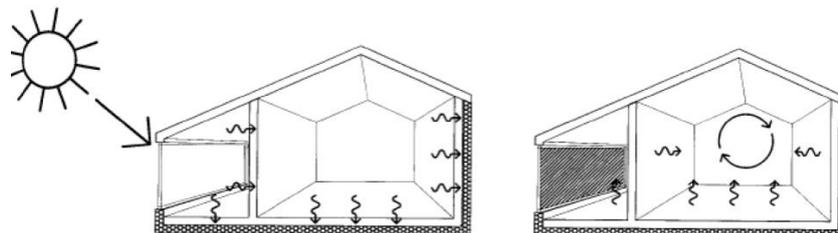


Figura 2.4: Sistema a serra [12]

Anche l'edificio passivo a termosifone (*figura 2.5*) è caratterizzato, come il precedente, da uno spazio che funge da collettore separato dall'edificio con la differenza che in esso è presente un fluido, aria o acqua. Sfruttando il principio del termosifone il fluido si porta prima verso il basso e una volta riscaldato dal sole risale verso lo spazio da servire o la massa di accumulo per circolazione naturale [12].

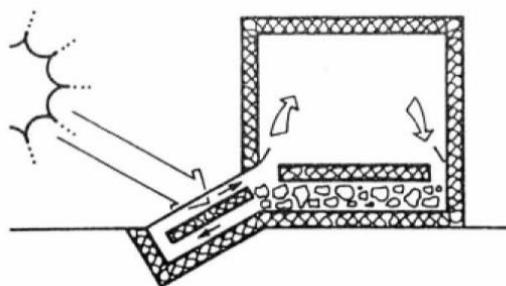


Figura 2.5: Sistema a termosifone [12]

I sistemi a *guadagno indiretto* sfruttano l'involucro della casa come accumulatore. La massa termica è riscaldata direttamente o indirettamente dal sole e trasferisce con un certo ritardo l'energia in precedenza immagazzinata nell'ambiente servito.

In questa categoria vi sono 4 tipologie di edifici [12]:

1. edificio con muro Trombe in muratura (*figura 2.6*). È costituito da un muro orientato verso sud e da una vetrata posta ad una distanza di 8-10 cm dal muro esterno. La radiazione

solare incidente sulla vetrata, viene cattura nella camera d'aria e provoca un innalzamento della temperatura del muro. Il calore viene ceduto all'ambiente servito mediante conduzione dalla parete riscaldata o aprendo le aperture e facendo circolare l'aria calda presente tra il vetro e parete;

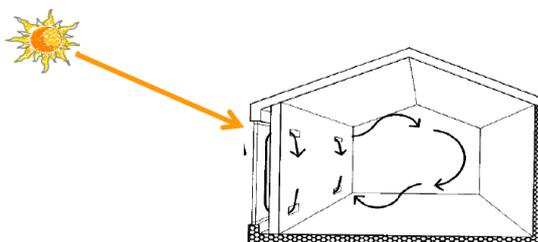


Figura 2.6: Sistema a guadagno indiretto con muro Trombe in muratura [12]

2. edificio con muro Trombe ad acqua. Si tratta di un sistema ad acqua costituito da una parete trasparente realizzata con due lastre poste ad una distanza di 10mm e separate da un'intercapedine d'acqua;

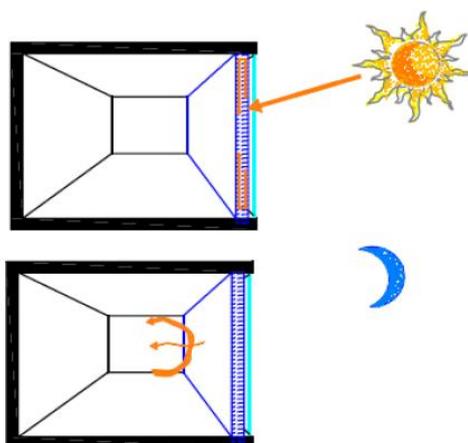
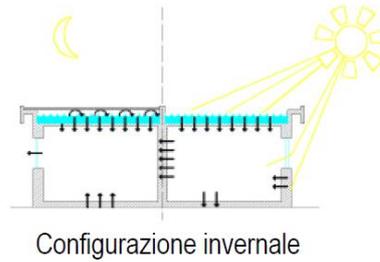
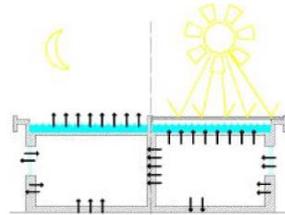


Figura 2.7: Sistema a guadagno indiretto con muro Trombe ad acqua [12]

3. edificio con roof pond (figura 2.8). È costituito da una massa termica d'acqua posta sulla copertura dell'edificio e sorretta da un solaio con elevata conducibilità termica. In inverno durante il giorno la massa d'acqua accumula calore e durante la notte essa viene coperta per evitare dispersioni verso l'esterno e l'energia viene trasferita negli ambienti sottostanti attraverso il solaio. D'estate invece, è il contrario: durante il giorno la vasca viene coperta e assorbe il calore proveniente dagli ambienti interni, e durante la notte è scoperta rilasciando il calore accumulato;



Configurazione invernale



Configurazione estiva

Figura 2.8: Sistema a guadagno indiretto con roof pond [12]

4. edificio con sistema a cambiamento di fase. Viene sfruttata la capacità dei materiali a cambiamento di fase di assorbire e rilasciare calore nell'intorno della loro temperatura di fusione.

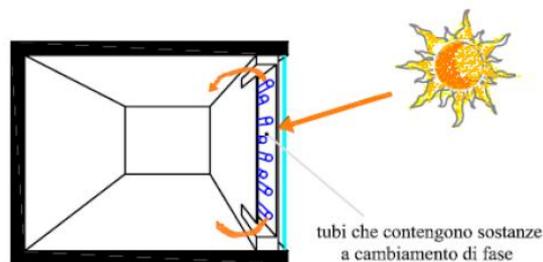


Figura 2.9: Sistema a guadagno indiretto con sistema a cambiamento di fase [12]

## TECNOLOGIA ATTIVA

I sistemi d'accumulo termico attivi vengono utilizzati in edifici a risparmio energetico che sfruttando fonti alternative, come l'energia solare, diventano autosufficienti.

Questi sistemi forniscono una soluzione per le nuove o retrofit applicazioni, come per l'implementazione di energie rinnovabili nel HVAC per riscaldamento e condizionamento o applicazioni per lo spostamento dei picchi d'energia richiesti.

La loro integrazione negli edifici può essere fatta attraverso l'uso della struttura (muri e pareti), delle facciate esterne, dei soffitti sospesi, dei sistemi di ventilazione, del solare termico o di serbatoi d'acqua [11], come si riporta in figura 2.10.

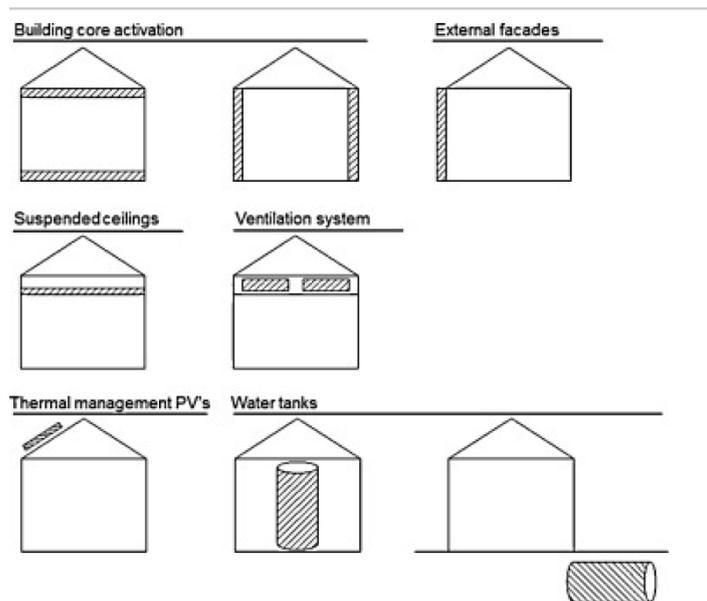


Figura 2.10: Esempi di integrazioni di tecnologie attive in edifici [11]

Ad oggi molto diffuso è il solare termico che permette, con l'uso di sistemi di controlli e d'accumulo, il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria ad uso domestico, mentre il fotovoltaico è largamente utilizzato per la produzione di energia elettrica che può essere utilizzata per il raffrescamento e riscaldamento degli ambienti interni mediante un condizionatore/pompa di calore.

### 3 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

#### 3.1 INTRODUZIONE

I materiali a cambiamento di fase, detti anche PCM (Phase Change Materials), sono composti accumulatori che sfruttano il fenomeno fisico della transizione di fase per assorbire i flussi energetici entranti, conservando un'elevata quantità di energia termica a temperatura costante, restituendo in seguito il calore assorbito durante un abbassamento di temperatura esterna.

L'esempio più comune di PCM è l'acqua che, avendo una temperatura di congelamento a 0°C, risulta inapplicabile nella maggior parte delle applicazioni di immagazzinamento del calore.

Di norma i PCM, a temperatura ambiente, sono allo stato solido e con l'aumentare della temperatura sopra una certa soglia fondono accumulando calore che sarà rilasciato durante il cambiamento di fase liquido-solido [15].

Il PCM è una sostanza che presenta un elevato calore latente di fusione: scegliendo un'opportuna temperatura di fusione è infatti possibile ridisegnare la curva nel grafico "energia interna-temperatura media" (figura 3.1) in modo tale da ottenere un incremento di energia immagazzinabile ad una data temperatura.

L'utilizzo di questi materiali comporta alcuni vantaggi, come ad esempio il fatto che se il PCM si trova nella propria fase liquida ad una temperatura maggiore della temperatura di fusione, la quantità di energia interna accumulata è maggiore della sola frazione sensibile, in quanto si deve considerare anche il calore di fusione [16].

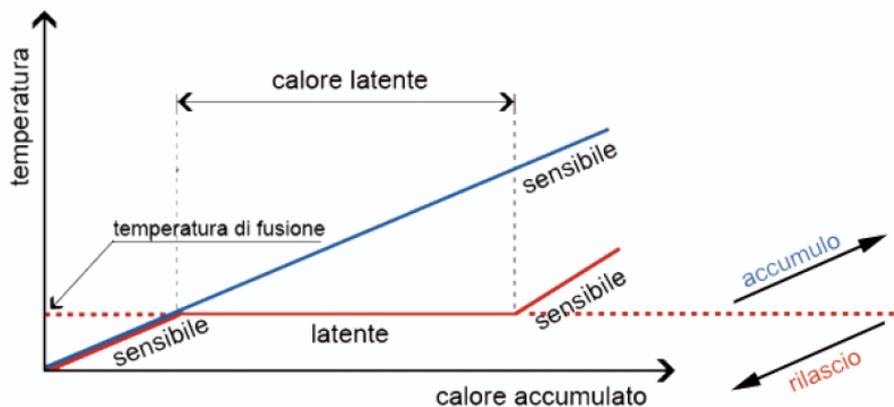


Figura 3.1: Differenza dei profili di accumulo termico sensibile e latente rispetto alla temperatura [26]

Inoltre, a parità di energia interna immagazzinata, il PCM ha una temperatura inferiore e una densità di energia maggiore rispetto ad un accumulo che non contiene PCM, conseguentemente avrà minori perdite derivate dalla differenza di temperatura con l'esterno e occuperà un minor volume [16].

Si noti la *figura 3.2* dove, a parità di energia termica accumulata, viene confrontato il volume necessario d'acqua e quello del TH29, ossia un PCM.

Minore è la differenza di temperatura nella quale opera l'accumulo, maggiore è il vantaggio di usare il PCM poiché richiedente un volume minore [8].

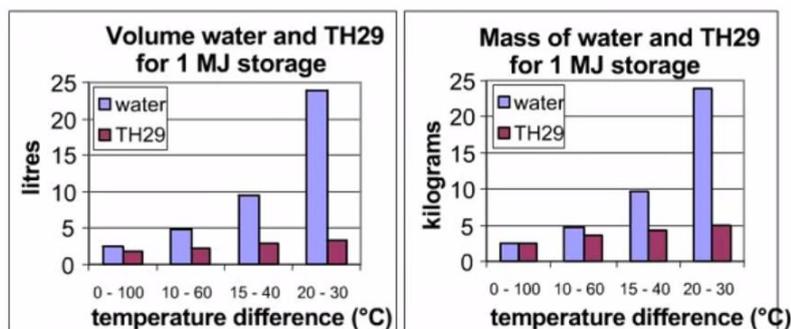


Figura 3.2: Confronto del volume e massa necessario per l'accumulo di 1MJ di energia termica tra acqua e un materiale a cambiamento di fase [8]

Considerando una differenza di temperatura di 15 K, la densità d'energia specifica del PCM è superiore rispetto a quelle degli altri materiali. Di seguito sono riportati alcuni valori [17] (*figura 3.3*):

- acqua 55 kJ/kg;
- pietra 13 kJ/kg;
- legname 27 kJ/kg;
- plastica 16 kJ/kg;
- PCM paraffina-cera 230 kJ/kg.

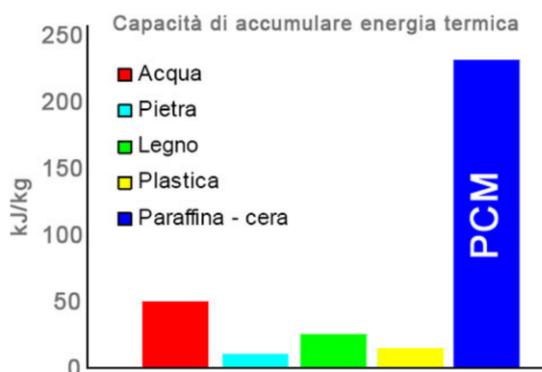


Figura 3.3: Calore latente di fusione [kJ/kg] con una differenza di temperatura di 15 K [27]

Un materiale a cambiamento di fase, per essere utilizzato in modo ottimale in sistemi d'accumulo di calore, deve possedere determinate caratteristiche [5] [18]:

- **termodinamiche**
  - un punto di fusione nell'intorno delle temperature di lavoro utilizzate;
  - elevato calore di fusione per avere scambi d'energia il più possibile isotermi;
  - elevata densità specifica d'energia, in modo tale da minimizzare il volume occupato;

- un elevato calore specifico, così è possibile sfruttare anche la parte di calore sensibile;
  - elevata conducibilità termica che comporta la necessità di minori  $\Delta T$  per caricare e scaricare l'accumulo;
  - fusione congruente: il materiale dovrebbe sempre fondere completamente, così che le fasi di liquido e solido siano omogenee. Ciò evita differenti densità tra solido e liquido che portano al fenomeno della segregazione, quindi ad un cambiamento della composizione chimica del materiale;
  - piccolo volume di cambiamento di fase durante la transizione, per la possibilità di utilizzare semplici contenitori;
- **cinetiche:**
    - basso o nullo sottoraffreddamento durante il congelamento. Questa proprietà può essere raggiunta con l'incremento della velocità di nucleazione e di crescita dei cristalli;
- **chimiche:**
    - stabilità chimica per evitare perdita di prestazioni;
    - nessuna decomposizione, per aumentarne la vita operativa;
    - comportamento non corrosivo;
    - non tossico, non infiammabile e non esplosivo;
- **tecniche:**
    - semplicità;
    - applicabilità;
    - efficacia;
    - compattezza;
    - compatibilità con i materiali utilizzati per il suo contenimento;
    - validità;
    - affidabilità;
- **economici:**
    - disponibilità in commercio;
    - basso costo;
    - facilità di reperimento.

### 3.2 TIPOLOGIE DI PCM

I materiali a cambiamento di fase sviluppati sono molteplici ed hanno una temperatura di transizione di fase compresa tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e oltre  $150^{\circ}\text{C}$ , come rappresentato in *figura 3.4*. Inoltre, sono in grado di immagazzinare calore per unità di volume fino a 14 volte in più dei comuni materiali come acqua, muratura o roccia [15].

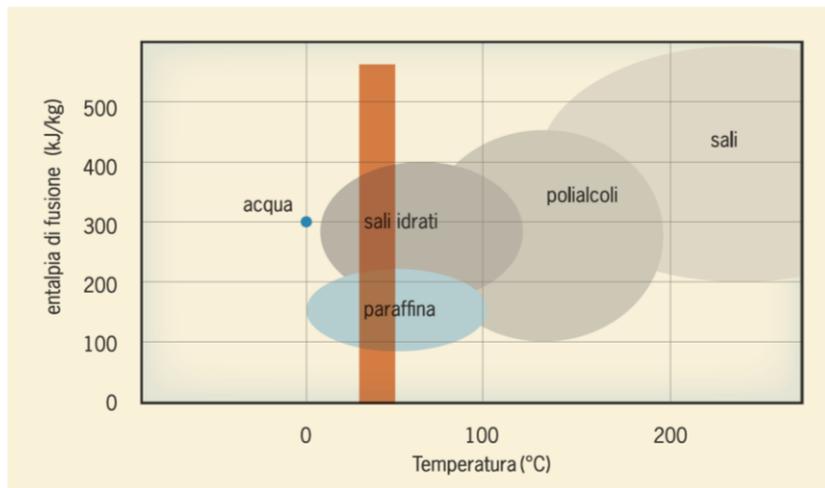


Figura 3.4: Capacità di accumulo dei PCM e temperatura di esercizio [15]

Dalla figura precedente si nota la presenza di varie categorie di PCM che lavorano a determinati intervalli di temperatura ed energia immagazzinata.

I PCM si suddividono principalmente in tre gruppi: organici, inorganici ed eutettici, a loro volta suddivisi in sottocategorie come si osserva in *figura 3.5*.

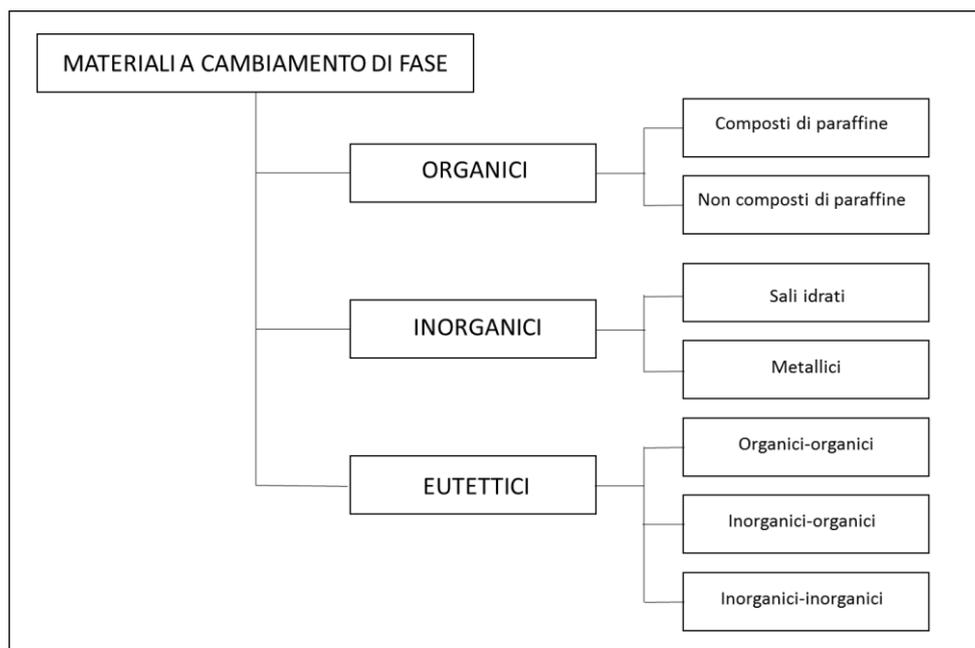


Figura 3.5: Classificazione dei materiali a cambiamento di fase

### **3.2.1 PCM ORGANICI**

Nei PCM organici si trovano le paraffine e le non-paraffine.

#### **LE PARAFFINE**

Le paraffine sono composti organici derivanti dal processo di raffinazione del petrolio e quindi costituiscono un sottoprodotto del processo produttivo dei carburanti e lubrificanti che, a temperatura ambiente, ha una consistenza cerosa [18]. Esiste una grande quantità di paraffine disponibili, le cui temperature di transizione coprono un range di temperature tra  $-8^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$  [15].

Sono costituite da una miscela di catene di n-alcani del tipo  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$  e, al crescere della lunghezza delle catene, aumentano la temperatura di fusione del materiale e quindi la quantità di calore latente assorbito, dunque rilasciato.

Esse possiedono un valore di densità di stoccaggio compreso tra 130 e 210 kJ/kg [19].

Le paraffine sono caratterizzate dai seguenti vantaggi:

- hanno una buona capacità di accumulo termico;
- sono capaci di solidificare senza ulteriore sottoraffreddamento [15];
- non si ha il fenomeno della segregazione di fase durante la fusione;
- lavorano in un ampio range di temperatura e il punto di fusione varia considerevolmente con il numero di atomi di carbonio nella catena;
- sono sicure ed affidabili;
- non sono corrosive;
- sono chimicamente inerti e stabili a temperature inferiori a  $500^{\circ}\text{C}$  anche dopo numerosi cicli;
- presentano bassa tensione di vapore;
- presentano minimi cambiamenti di volume durante la fusione, circa del 10%;
- hanno elevato calore di fusione 35-40 kcal/kg [5];
- hanno fusione uniforme e buone proprietà di nucleazione [20].

I loro svantaggi sono:

- un ciclo di condensazione-fusione lungo;
- incompatibilità con contenitori di plastica;
- moderata infiammabilità [20];
- bassa conducibilità termica, circa  $0,2 \text{ W/mK}$  [19];
- costo variabile, poiché segue l'andamento del prezzo del petrolio;
- alcuni composti di paraffine sono dannosi per la salute provocando ferite cutanee, agli occhi e alle mucose [15].

#### **LE NON-PARAFFINE**

La maggior parte dei PCM non-paraffine sono costituiti dagli acidi, nocivi e costosi, e dagli oli vegetali [15].

Questo tipo di PCM è caratterizzato da un elevato calore di fusione, una bassa conducibilità termica, infiammabilità e instabilità ad alte temperature [20].

Gli acidi grassi hanno un valore di calore latente di fusione nell'intervallo 170 e 210 kJ/kg in base al tipo di acido, per esempio laurico, palmitico e stearico [19].

Gli oli vegetali sono composti organici derivanti da fonti naturali, come ad esempio l'olio di palma, di colza, di soia e di cocco, o provenienti da grassi animali. Il range di temperature di lavoro è compreso tra -40°C e 150°C.

Questa categoria presenta vari vantaggi, tra cui il fatto che sono biodegradabili e non tossici, se correttamente contenuti non si ossidano e non diventano rancidi. Inoltre, durante il cambiamento di fase manifestano una variazione di volume minima, sono stabili, possono durare nel tempo, hanno un elevato calore latente, resistono al fuoco e sono più economici rispetto ai PCM derivati dal petrolio [15].

### **3.2.2 PCM INORGANICI**

La seconda famiglia di materiali a cambiamento di fase è quella dei PCM inorganici composta dai sali idrati e dai metalli.

#### **I SALI IDRATI**

I sali idrati sono composti chimici che possono essere considerati come delle leghe di sale inorganico ed acqua che formano una struttura solida cristallina con corrispondente formula generale  $AB \cdot nH_2O$ .

Il loro cambiamento di fase risulta in una idratazione e deidratazione del sale che porta alla formazione del sale idrato ed acqua [19].

Questi composti hanno un punto di fusione compreso tra i 15°C e 80°C [15].

Sono gli unici materiali inorganici usati con discreto successo come PCM. Essi hanno:

- un costo inferiore rispetto alla paraffina [18];
- un elevato calore latente per unità di volume;
- un'elevata conducibilità termica (circa il doppio della paraffina);
- non sono molto corrosivi;
- sono compatibili con la plastica;
- leggermente tossici [20].

Di contro, però, possiedono degli svantaggi:

- hanno fusione incoerente, quindi il problema della segregazione: durante la cristallizzazione non viene rilasciata acqua a sufficienza per avere una completa dissoluzione della fase solida ed essendo la densità dei sali maggiore, essi si depositano sul fondo e di conseguenza si ha una perdita nella reversibilità del ciclo di cambiamento di fase [18];
- alla temperatura di fusione si ha una bassa velocità di nucleazione che li rende soggetti al sottoraffreddamento;
- durante la fusione la variazione di volume può essere maggiore del 10%, risulta quindi necessario l'utilizzo di particolari contenitori;
- si deteriorano se esposti all'aria [15].

## **I METALLI**

Le proprietà dei metalli consistono in un'elevata conducibilità termica, un elevato calore di fusione per unità di volume e una bassa tensione di vapore, ma come svantaggi possiedono l'elevato peso e un basso calore specifico [20].

### **3.2.3 PCM EUTETTICI**

I PCM eutettici non sono utilizzati a causa del loro elevato costo, ma hanno la caratteristica di fondere e solidificarsi senza che sia presente il fenomeno della segregazione [20].

## **3.3 APPROFONDIMENTO DELLE VARIE CARATTERISTICHE NEGATIVE DEI PCM**

Nel precedente paragrafo sono state descritte le caratteristiche di ogni PCM e si sono notati vari svantaggi che li caratterizzano. In generale si possono avere i seguenti svantaggi.

**Il sottoraffreddamento:** è definito come lo stato in cui un liquido inizia la fase di solidificazione al di sotto della normale temperatura di congelamento, sperimentando un ritardo nell'inizio del processo. Solo quando il processo ha inizio, la temperatura aumenta fino al valore del punto critico e rimane costante fino alla completa solidificazione del PCM.

Dopo un prolungato uso, molti dei sali idrati tendono, durante la fase di rilascio del calore immagazzinato, al sottoraffreddamento prima del congelamento. Questo causa una perdita nell'efficienza del materiale, quindi una riduzione dell'energia termica assorbita [21].

Il sottoraffreddamento è uno degli svantaggi che molto spesso non viene opportunamente considerato dai tecnici, ma che condiziona fortemente le caratteristiche di funzionamento dell'accumulo.

La ragione di un elevato grado di sottoraffreddamento è dovuta dalla bassa velocità di nucleazione di cristalli o dal basso grado di crescita di questi nuclei. Perciò il vantaggio nell'uso di questi materiali per l'accumulo termico è ridotto.

Studi hanno dimostrato che c'è una connessione tra la tendenza al sottoraffreddamento e la viscosità del materiale liquido al punto di fusione. Materiali con elevata viscosità nello stato liquido hanno bassi coefficienti di diffusione per gli atomi che li compongono, e ciò comporta la loro impossibilità nel riarrangiarsi nella forma solida [5].

Il fenomeno del sottoraffreddamento può essere ridotto grazie a degli agenti addizionali di nucleazione. Tuttavia, le performance termiche del PCM ne sono influenzate essendovi un abbassamento del calore latente di fusione a causa di questi additivi [21].

**La segregazione di fase:** è quel fenomeno chimico-fisico per il quale durante la fase di solidificazione di una soluzione liquida AB, con A avente una temperatura di fusione maggiore, la soluzione solida che si forma avrà una struttura diversa rispetto alla soluzione liquida, poiché i due componenti solidificano a temperature diverse [22].

La segregazione di fase influenza negativamente la stabilità del ciclo termico del PCM. Essa avviene quando all'interno del materiale la composizione è formata da diverse fasi durante il ciclo di lavoro.

Questo fenomeno è più comune nei PCM con multicomponenti cioè costituiti da componenti con differente densità e può essere ridotto utilizzando addensanti [21].

### **La bassa conducibilità termica**

I materiali a cambiamento di fase tendono ad avere una bassa conducibilità termica, la quale comporta una bassa velocità di trasferimento del calore entrante ed uscente per l'accumulo. L'utilizzo di additivi aumenta la conducibilità del materiale, tuttavia comporta anche un indebolimento della convezione naturale del materiale e una riduzione del calore latente di fusione.

In applicazioni residenziali, una bassa conducibilità può portare a vari problemi, per esempio i tempi per il totale cambiamento di fase diventano molto lunghi ed i benefici vengono meno. Per incrementare la conduzione, una possibile soluzione è quella di aumentare la superficie di scambio calore attraverso l'uso di alette [21].

**L'infiammabilità:** I PCM, come si vedrà nei prossimi capitoli, possono essere utilizzati anche nella stratigrafia di elementi costruttivi e da ciò deriva l'importanza del loro grado di infiammabilità.

Lo svilupparsi di incendi all'interno di edifici è dovuto principalmente ai materiali utilizzati.

Di largo uso è il cartongesso in gesso che è adatto e relativamente sicuro. Tuttavia, se si utilizza una parete in gesso con attorno il 24% di paraffina non si raggiungono i limiti stabiliti per la sicurezza. Durante un incendio, la paraffina subisce il passaggio dallo stato liquido a gassoso e tende a rompere l'incapsulamento, quindi ad uscire e favorire lo sviluppo delle fiamme.

I ricercatori hanno osservato che utilizzando degli agenti ritardanti per il fuoco, è possibile ridurre questo effetto negativo e permettere l'integrazione del PCM negli edifici in modo sicuro [21].

**Il costo:** Nella *tabella 3.1* sono stati riportati i costi medi dei vari materiali a cambiamento di fase. Questi dati sono stati ottenuti dalla rivista "US Department for Energy's".

Si nota che il prezzo di mercato per i sali idrati è circa 25 volte maggiore rispetto alla materia prima, questo perché per aumentarne l'efficacia e l'efficienza, vengono aggiunti degli additivi [21].

<b>MATERIALE</b>	<b>TIPOLOGIA DI PCM</b>	<b>COSTO [US \$/Kg]</b>
Paraffina	Organico	1,88-2,00
Grado tecnico icosano	Organico	7,04
Grado icosano puro	Organico	53,9
Acido stearico	Acido grasso	1,43-1,56
Acido palmitico	Acido grasso	1,61-1,72
Acido oleico	Acido grasso	1,67-1,76
Glicerina grezza	Acido grasso	0,22-0,29
M-27	Disponibile in commercio acido grasso	14,26
M-51	Disponibile in commercio acido grasso	11,13
M-91	Disponibile in commercio acido grasso	10,12
Cloruro di calcio	Inorganico-sali idrati	0,20
Latest 29T	Disponibile in commercio sali idrati	4,95

*Tabella 3.1: Tabella dei prezzi di vari PCM (rivista "US Department for Energy's")*

Durante l'ultimo decennio, l'attenzione si è focalizzata su nuove classi di materiali caratterizzati da una bassa volatilità e sostanze anidro organiche, cioè prive di acqua indipendentemente dallo stato fisico, come polietilene glicole, acidi grassi e i loro derivati, e paraffine. Essi non sono ancora visti come candidati ad alto potenziale poiché più costosi rispetto ai sali idrati. Inoltre, possiedono una bassa capacità di accumulo per unità di volume e sono soggetti a pregiudizi, essendo derivati dal petrolio.

Recenti studi hanno dimostrato come in alcuni di questi materiali i difetti descritti siano limitati e comportino il vantaggio di includere la stabilità fisica e chimica, un buon comportamento termico e regolabile nelle zone di transizione.

Le paraffine appaiono particolarmente adatte per applicazioni relative alla conservazione dell'energia in edifici e energia solare [5].



## **4 UTILIZZO DEI PCM IN EDILIZIA**

Al giorno d'oggi, il settore dell'edilizia utilizza per il fabbisogno degli edifici un terzo della totale energia finale e metà del consumo elettrico globale, inoltre è responsabile per un terzo delle totali emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Uno dei contributi maggiori del cambiamento climatico è dovuto proprio all'anidride carbonica che è responsabile dell'effetto serra.

Questi valori sono destinati ad aumentare a causa della stima dell'aumento della popolazione mondiale comportando una maggiore pressione del sistema energetico sui cambiamenti climatici [2].

La riduzione dei consumi energetici degli edifici implica l'opportunità di limitare le conseguenze negative sull'ambiente. Questo è possibile mediante l'utilizzo di sistemi d'accumulo che rappresentano il "cuore" del riscaldamento e raffrescamento poiché uniformano le estreme temperature causate dal ciclo giornaliero solare disponibile, permettendo il mantenimento di temperature interne accettabili durante il giorno e la notte [5].

L'energia solare ha un enorme potenziale per soddisfare la domanda energetica degli edifici in inverno, tuttavia è una fonte di energia dipendente dal tempo con un carattere intermittente e variabile con il picco di radiazione solare che si verifica vicino a mezzogiorno. Questi problemi possono essere risolti immagazzinando l'energia termica: l'energia solare può essere raccolta e conservata durante il giorno per poi essere rilasciata all'aria interna quando la temperatura della stanza scende durante la notte. Oltre al caldo è possibile immagazzinare il freddo dall'aria ambiente per convezione naturale (o forzata) durante la notte in estate e poi utilizzarlo nelle ore più calde della giornata.

Questi meccanismi di accumulo di energia termica permettono di ridurre gli sbalzi di temperatura dell'aria interna e migliorare il livello di comfort termico, quindi il benessere delle persone [23].

L'energia termica può essere conservata sotto forma di calore sensibile o latente. La differenza principale tra le due tipologie deriva dalla necessità di utilizzare una massa di materiale pesante per la prima. L'accumulo di calore latente è preferito rispetto l'altro per la sua elevata densità energetica in un piccolo intervallo di temperature e per la natura isoterma del processo d'immagazzinamento durante il quale il materiale utilizzato subisce un cambiamento di stato [23].

Tutti i materiali possiedono la capacità di accumulare calore, capacità che aumenta con l'aumentare della densità e del calore specifico.

Fra i materiali usati in edilizia non vi è una così netta variazione del valore del calore specifico, ma di rilevante importanza è la densità, questo perché strutture pesanti comportano minori oscillazioni di temperatura rispetto a quelle leggere.

Uno dei materiali comunemente usati in edilizia è il calcestruzzo per la sua inerzia termica e le buone proprietà strutturali. Altri materiali utilizzati sono il mattone pieno, la pietra, la terra pressata [24].

I PCM utilizzati nel settore dell'edilizia forniscono all'edificio una massa termica artificiale basata non sulla capacità di accumulo inerziale, caratteristica dei comuni materiali utilizzati nel settore, ma sul calore latente.

Per poterli sfruttare al meglio nelle costruzioni, essi devono possedere una temperatura di fusione intorno ai 25°C, un basso costo, un elevato calore di transizione e disponibilità nel mercato, non devono essere tossici e corrosivi [15].

Ricordandosi la classificazione dei PCM fatta in precedenza, per applicazioni nel settore edilizio l'unico gruppo utilizzato è quello dei soli organici, con una temperatura di fusione tra 20 e 32°C. I materiali inorganici non sono adatti a svolgere questa funzione a causa della loro irreversibilità nei processi di solidificazione e liquefazione, dovuta dal fenomeno di segregazione, inoltre, presentano fenomeni di corrosione [25]. Quelli eutettici sono poco applicati a causa del loro elevato costo [15].

Oggi l'interesse è focalizzato in sistemi passivi dove l'involucro esterno non è più caratterizzato da una prestazione termica predeterminata corrispondente alla stratigrafia scelta, ma diventa un elemento in grado di interagire con continuità con l'ambiente e permettere un maggior confort e bassi consumi.

Grazie all'utilizzo di un nucleo interno di materiale PCM, è possibile affiancare all'isolamento fornito dall'involucro esterno, un'inerzia artificiale.

Durante il giorno i sali o le paraffine utilizzati all'interno della muratura passano dalla fase solida a quella liquida con un processo endotermico, ovvero immagazzinano il calore in eccesso evitando il surriscaldamento dell'ambiente. Durante la notte, al calare delle temperature essi si solidificano nuovamente rilasciando il calore accumulato in precedenza [15].

Fondamentalmente durante l'anno vengono identificati due periodi: estate e inverno.

Nel periodo estivo, questi materiali vengono utilizzati per smorzare l'onda di calore entrante durante il giorno ed è importante che la stessa quantità immagazzinata venga ceduta durante la notte, in modo tale da permettere un buon funzionamento nel giorno successivo. Il carico frigorifero viene spostato dalle ore diurne, caratterizzate dalle elevate temperature, al periodo notturno comportandone una diminuzione del valore giornaliero.

Per la rigenerazione del PCM sono presenti varie possibilità: ventilazione notturna manuale, con l'apertura da parte dell'utente delle finestre, o automatica, oppure con un sistema di raffreddamento degli strati di PCM mediante sistemi ad acqua.

Viceversa, durante l'inverno il calore accumulato durante le ore più calde viene rilasciato durante la notte [15].

I vantaggi che si ottengono dall'utilizzo di questi materiali in edilizia sono:

- elevata inerzia termica. I PCM, in virtù della loro capacità di cambiare di fase, sono in grado di aumentare notevolmente l'inerzia termica dei componenti edili in cui sono integrati;
- peso ridotto. A differenza dei materiali lapidei, i PCM sono dotati di caratteristiche di termoregolazione indipendenti dalla propria massa. I sistemi di involucro edilizio contenenti questi materiali garantiscono uno smorzamento ed uno sfasamento

temporale nella trasmissione del calore nonostante siano dotati di una ridotta massa frontale;

- riciclabilità della materia prima. L'utilizzo di paraffina o di sali idrati come materia prima fa sì che i PCM siano dotati di un buon livello di riciclabilità;
- possibilità di scegliere la temperatura di fusione al fine di garantire il benessere termico degli ambienti interni a seconda della zona climatica o ambiente specifico in cui verrà utilizzato [26];
- a parità di peso e in un intervallo prossimo alla temperatura di fusione hanno una capacità di accumulo molto elevata, circa 80-100 volte quella dei rispettivi sistemi tradizionali;
- modificano il comportamento dell'edificio in funzione delle condizioni esterne [27];
- i PCM non dipendono dallo spessore, come nel caso dei materiali tradizionali;
- permettono una riduzione dei picchi di temperatura con conseguente risparmio energetico, ad esempio in climi caldi (centro-sud Italia) si può raggiungere un risparmio sui consumi energetici pari al 20% [28].

Purtroppo, però, possiedono delle caratteristiche negative quali:

- è richiesta una maggiore complessità nella fase di progettazione e realizzazione;
- necessità di un packaging in grado di contenere questi materiali per un lungo periodo;
- necessità di particolari condizioni termiche che permettano al materiale di cambiare fase e quindi difficoltà nella scelta della temperatura di fusione più adatta [27];
- il loro costo ancora elevato rispetto ai materiali comunemente utilizzati;
- possibile surriscaldamento nel periodo estivo quando la temperatura notturna non scende sotto quella del materiale, impedendone la solidificazione;
- elevata infiammabilità della paraffina che può essere utilizzata solo in quantità ridotta;
- la conservazione nel tempo delle proprietà del PCM riguardanti il cambiamento di fase non è stata ancora certificata [26].

I limiti appena descritti possono essere contenuti, ad esempio mediante l'adozione di sistemi attivi o passivi per il raffrescamento notturno o di scambiatori di calore per il recupero termico risolvendo il problema del surriscaldamento estivo. Inoltre, la scelta di sali idrati è favorita dalla loro bassa infiammabilità rispetto le paraffine con la possibilità di utilizzare una quantità maggiore di materiale a cambiamento di fase nella stratigrafia degli elementi edilizi [26].

## 4.1 PARAMETRI DI SCELTA

La progettazione di un accumulo di calore latente comporta la necessità di considerare tre fattori [21]:

1. scelta del materiale a cambiamento di fase più adatto alle temperatura di lavoro;
2. un contenitore che racchiuda il PCM;
3. una superficie di scambio termico per il trasferimento del calore dall'ambiente al PCM e viceversa.

La prima proprietà da considerare per la scelta del PCM adatto è la sua temperatura di fusione. Questa temperatura non deve essere troppo bassa, altrimenti non si raggiungerebbero le condizioni di comfort durante la notte, e nemmeno troppo alta poiché non riuscirebbe ad accumulare sufficiente energia durante il giorno, non permettendo il passaggio di stato. In fase di progetto è opportuno quindi considerare le caratteristiche della zona climatica nella quale si opera e il periodo dell'anno nel quale si vuole sfruttare il PCM.

Una temperatura di circa 26°C è utile per evitare il surriscaldamento interno in primavera comportando una situazione di comfort, ma con una sollecitazione esterna inferiore il valore ottimale scenderebbe a 23°C per il benessere delle persone [29].

Di seguito viene riportata una tabella con le caratteristiche desiderabili che deve possedere un materiale a cambiamento di fase per il suo utilizzo [21].

PROPRIETÀ FISICHE	PROPRIETÀ CHIMICHE	PROPRIETÀ TERMICHE	FATTORI ECONOMICI
Bassa variazione di densità durante il cambiamento di fase	Non infiammabile, non esplosivo e non velenoso	Le fasi solida e liquida devono avere elevata conducibilità termica	Deve essere immediatamente disponibile in elevata quantità
Elevata densità	Chimicamente stabile	Elevato calore specifico	Basso costo
Durante la solidificazione poco o niente sottoraffreddamento	Compatibile con i materiali di contenimento	Le temperature di cambiamento di fase devono essere adatte all'applicazione	Commercialmente fattibile
Bassa pressione di vapore	Non chimicamente decomponibile	Elevato calore latente per unità di massa	

*Tabella 4.1: Caratteristiche fisiche, chimiche, termiche ed economiche opportune per un PCM [21]*

La funzione del contenitore per i PCM è di notevole importanza poiché deve svolgere la funzione di barriera con l'ambiente esterno e protezione dalle interazioni dannose, offrire un'adeguata superficie di scambio, garantire stabilità strutturale ed essere facilmente maneggiabile. Inoltre, a seconda dell'applicazione offrire resistenza alla corrosione, stabilità termica, resistenza meccanica e flessibilità.

Le tipologie di contenimento del materiale a cambiamento di fase si suddividono principalmente in tre gruppi a seconda del metodo utilizzato per il suo immagazzinamento [21]:

- *tecnica del macro-incapsulamento*: la più diffusa, si tratta di incapsulare una precisa quantità di materiale all'interno di una distinta unità. L'utilizzo di questa comporta la facilità di utilizzare l'aria come mezzo per lo scambio termico, permettendo un migliore utilizzo nel settore residenziale;
- *tecnica del micro-incapsulamento*: si tratta del contenimento di particelle microscopiche di PCM in contenitori sferici composti da un film polimerico ad elevato peso molecolare. Questo metodo è caratterizzato da una bassa velocità di trasferimento a causa della matrice incapsulante che ha una bassa conduttività termica, inoltre questa tecnica risulta essere più costosa rispetto alle altre;
- *serbatoio di accumulo*: possiede delle similarità con i serbatoi di scambio termico esistenti. Il problema di questo metodo è la necessità di un'elevata area di scambio termico a causa della bassa conduttività termica del PCM rispetto ai precedenti metodi di incapsulamento visti.

## **4.2 INTEGRAZIONE NELL'INVOLUCRO EDILIZIO**

Negli ultimi decenni la ricerca ha presentato numerosi studi riguardanti il possibile utilizzo di PCM nella stratigrafia edilizia, come pareti, soffitti o pavimentazioni. Tuttavia sono presenti ancora notevoli difficoltà per l'utilizzo pratico ed efficace di questa nuova tecnologia per lo stoccaggio di calore latente [23].

Una volta determinato il materiale a cambiamento di fase più corretto per lo scopo in base alle temperature di lavoro e alle sue caratteristiche, si deve proseguire con la scelta della tipologia d'integrazione nell'involucro edilizio. Questa può seguire tre vie principali [28]:

- *incorporazione del PCM nei sistemi costruttivi*: è un metodo semplice e consiste nella miscelazione del materiale PCM in polvere o liquido con i materiali edili, come gesso o cemento. Bisogna prestare attenzione che i due materiali devono essere compatibili;
- *immersione del PCM fuso dentro ad un materiale da costruzione poroso*: ad esempio blocchi di cemento o gesso, mediante un assorbimento capillare. L'utilizzo di questo metodo comporta dopo un lungo periodo delle perdite, ma il vantaggio sta nel poter convertire pannelli di rivestimento ordinari in pannelli di rivestimento con PCM;
- *incapsulamento dei PCM*: si tratta di utilizzare una capsula che garantisce flessibilità, resistenza alla corrosione, stabilità nel tempo e protegge il PCM da dannose interazioni con l'ambiente, fornendo sufficiente superficie per il trasferimento del calore. Le forme di incapsulamento usate sono quelle macro e micro, già trattate nel paragrafo precedente. Grazie a questo metodo è possibile superare i problemi di infiammabilità, ma esso non aiuta l'incremento di conducibilità che rimane a bassi valori e c'è la tendenza alla solidificazione lungo i bordi.

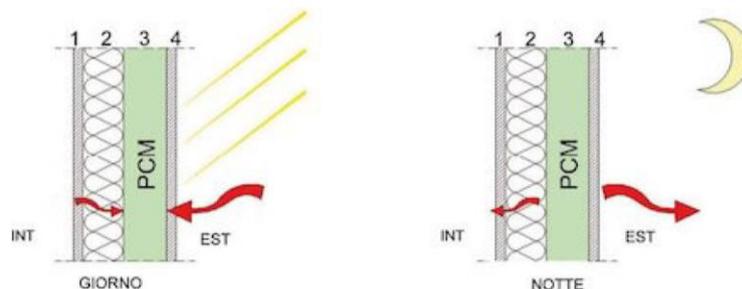
### 4.3 STRATIGRAFIA DELLA MURATURA CON PCM

La stratigrafia della muratura con l'inserimento di materiale a cambiamento di fase ha un ruolo fondamentale per il rendimento del sistema. Il PCM può essere posizionato all'interno, al centro o all'esterno rispetto all'ambiente considerato. I possibili modelli di parete sono i seguenti [27]:

#### MODELLO 1

In riferimento alla *figura 4.1*, questa stratigrafia consiste principalmente nel porre lo strato d'isolante sul lato interno e il PCM sul lato esterno.

L'uso del modello 1 permette al PCM di assorbire il flusso termico dovuto alla radiazione e dalla differenza di temperatura dell'aria durante il giorno, mentre di notte di rilasciare l'energia accumulata verso l'esterno quando la temperatura scende al di sotto di quella di fusione del materiale.



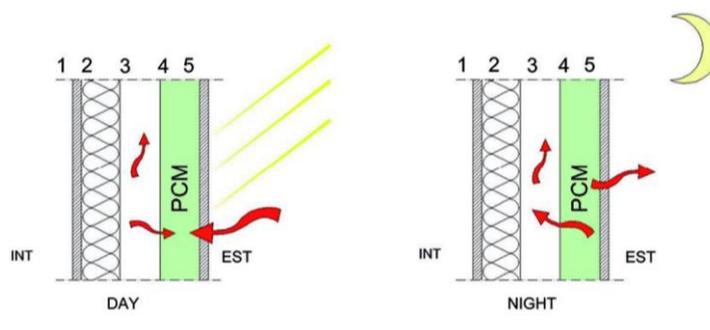
*Figura 4.1: Modello 1 composto da:*

*1 intonaco interno – 2 isolante termico – 3 strato di PCM – 4 intonaco esterno [27]*

#### MODELLO 2

Questo secondo modello di stratigrafia del muro è simile al precedente con la differenza di un ulteriore strato costituito da un'intercapedine d'aria ventilata che permette di trasportare il calore verso l'alto e non in direzione dell'ambiente interno, come riportato in *figura 4.2*.

Durante il giorno lo strato di PCM assorbe il flusso termico entrante, mentre di notte rilascia il calore che fluisce in parte verso l'esterno della parete e in parte verso l'intercapedine d'aria.



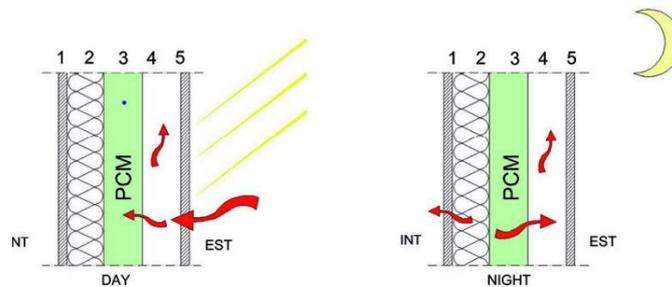
*Figura 4.2: Modello 2 composto da:*

*1 intonaco interno – 2 isolante termico – 3 intercapedine ventilata – 4 strato di PCM – 5 intonaco esterno [27]*

### MODELLO 3

Il materiale a cambiamento di fase può essere anche installato tra l'isolante interno e l'intercapedine d'aria, come in *figura 4.3*.

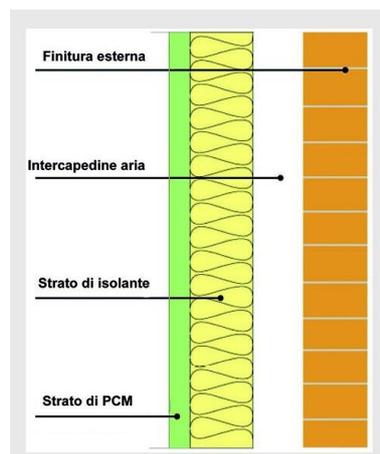
La differenza con i precedenti modelli consiste nella direzione di rilascio di calore, infatti, durante la notte quando le temperature scendono una parte importante di calore fluisce verso l'intercapedine per essere rimossa con ventilazione naturale.



*Figura 4.3: Modello 3 composto da:  
1 intonaco interno – 2 isolante termico – 3 strato di PCM –  
4 intercapedine ventilata – 5 intonaco esterno [27]*

Grazie all'introduzione del materiale PCM nella muratura è possibile aumentare l'inerzia termica della struttura [27]:

- il PCM posizionato nell'intonaco interno (*figura 4.4*) accumula calore quando la temperatura dell'aria della stanza è maggiore di quella di fusione del materiale scelto, mentre rilascerà calore, solidificando, quando la temperatura scende al di sotto di quella di fusione;



*Figura 4.4: PCM nell'intonaco interno [27]*

- il PCM posto all'interno del muro e vicino allo strato esterno (*figura 4.5*) assorbe il calore durante il giorno evitando di riscaldare l'ambiente interno, invece di notte lo rilascia in entrambe le direzioni, quindi verso l'interno e l'esterno;

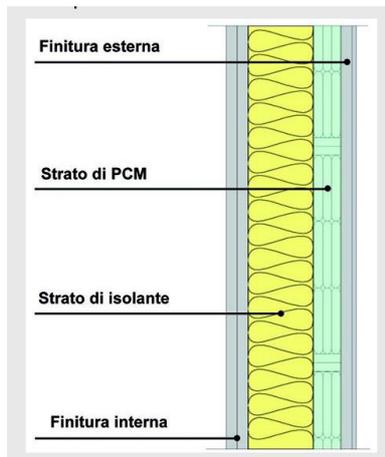


Figura 4.5: PCM interno verso l'esterno [27]

- il PCM posizionato tra l'intercapedine d'aria e l'intonaco esterno, come si osserva in figura 4.6, permette di accumulare una grande quantità di calore durante il giorno, mentre di notte lo strato rilascia calore fino alla solidificazione. La ventilazione nell'intercapedine contribuisce ad evacuare parte del calore.

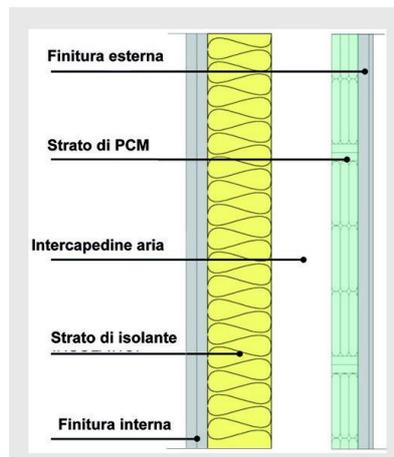


Figura 4.6: PCM interno verso l'esterno vicino all'intercapedine d'aria [27]

#### 4.4 PARAMETRI PER IL COMFORT TERMICO

Il benessere è una condizione di soddisfazione nella quale uno o più individui si trovano e dalla quale non vi è desiderio di allontanarsi.

Risulta chiaro che il benessere non è una quantità misurabile analiticamente, ma statisticamente poiché dipende da molte variabili alcune strettamente soggettive e di natura psicologica.

Le variabili sono:

- il benessere termico e igrometrico;
- il benessere olfattivo, legato alla qualità dell'aria;

- il benessere visivo, relativo all'illuminazione;
- il benessere psicologico.

Il comfort termico corrisponde alla sensazione di gradevolezza in cui l'individuo non ha un eccesso di stress. Esso dipende da:

- parametri fisici: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria, pressione atmosferica e umidità relativa;
- parametri esterni: attività svolta che influenza il metabolismo, abbigliamento;
- fattori organici: età, sesso, caratteristiche fisiche individuali;
- fattori psicologici e culturali.

### **UMIDITÀ RELATIVA**

Corrisponde al rapporto tra la quantità di acqua contenuta in un kg d'aria secca ad una certa temperatura e la massima quantità d'acqua contenuta, alla stessa temperatura, dallo stesso kg d'aria.

Questo parametro ha un effetto sulla sensazione di comfort. Alle temperature di benessere non c'è la necessità di raffrescamento evaporativo, mentre, viene utilizzato come importante mezzo per la dissipazione del calore quando si hanno alte temperature. L'aria satura, cioè con 100% di UR, impedisce qualsiasi metodo di raffrescamento di tipo evaporativo. Quando l'UR è minore del 20%, comporta danni al corpo poiché le membrane mucose si seccano ed aumentano le possibilità di infezioni.

La sensazione di freddo viene incrementata quando a basse temperature l'aria risulta molto secca, in quanto l'umidità a contatto con la pelle evapora.

Per temperature dell'aria maggiori di 32°C con una percentuale di umidità relativa maggiore del 70%, la sensazione di caldo viene accentuata in quanto il sudore prodotto dal corpo non può evaporare.

### **ATTIVITÀ SVOLTA E RESISTENZA TERMICA DEL VESTIARIO**

Il termine metabolismo descrive i processi biologici di un individuo che produce costantemente calore in quantità variabile. Il tasso di metabolismo è l'energia liberata per unità di tempo dalla trasformazione degli alimenti. La quantità richiesta dal corpo dipende dal livello di attività e si esprime con l'unità di misura detta met pari a 58W/m<sup>2</sup>.

Ad ogni attività svolta corrisponde un valore, ad esempio lo stare a riposo equivale a 1 met, un'attività di tipo sedentario 1,2 met, e così via fino ad arrivare a 14 met per uno sforzo fisico eccezionale.

Il vestiario di una persona influisce in modo considerevole sulle perdite di calore per evaporazione, sugli scambi di calore per conduzione e irraggiamento. Esso ha la funzione di isolamento termico sugli individui che mediante esso possono controllare le proprie dispersioni termiche.

Questo parametro viene espresso in clo pari a 0,155m<sup>2</sup>K/m. Esso è compreso nell'intervallo di valori da 0 a 4, dove con 0 clo si indica un corpo nudo, con 0,5 clo un abito estivo, 1 clo un abito invernale e così via.

## VELOCITÀ DELL'ARIA

Il movimento dell'aria favorisce la dissipazione del calore producendo effetti termici senza che vi sia una variazione della temperatura dell'aria, attraverso i seguenti modi:

- aumento della dissipazione del calore per convezione fino a che la temperatura dell'aria è inferiore a quella della pelle;
- accelerazione dell'evaporazione e quindi produzione di raffrescamento fisiologico. Con UR minore del 30% questo effetto è importante in quanto si ha già un'intensa evaporazione anche con aria ferma. Se UR è maggiore del 80% l'evaporazione è comunque limitata e il movimento dell'aria non ha grandi effetti rinfrescanti. L'evaporazione può essere accelerata quando l'UR è nell'intorno dei 40-50%.

È bene che la velocità dell'aria in ambienti dove viene svolta un'attività di tipo sedentario, ad esempio uffici, sia minore di 0,15-0,20 m/s. In questo modo il parametro dell'aria risulta poco influente per la determinazione del comfort termico.

## TEMPERATURA OPERATIVA

I parametri termici che influenzano il comfort sono la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante.

La temperatura dell'aria è intesa come temperatura di bulbo secco ed è il fattore più importante nella determinazione del benessere termico.

La temperatura media radiante  $T_{MR}$  corrisponde alla temperatura della cavità nera che assicura lo stesso scambio termico per radiazione dell'ambiente considerato:

$$t_{MR} = \frac{\sum_i F_i t_{Si} A_i}{\sum_i A_i}$$

dove  $F_i$  è il fattore di vista che può essere semplificato nella formula quando il corpo che emette si trova al centro dell'ambiente,  $t_{Si}$  è la temperatura della superficie e  $A_i$  l'area della superficie che emette calore.

Questa temperatura influisce sugli scambi per irraggiamento e corrisponde alla media pesata delle temperature delle superfici che delimitano l'ambiente incluso l'effetto dell'irraggiamento solare incidente.

È il fattore che influenza maggiormente la sensazione di calore perché la radiazione che cade sulla cute ne attiva gli stessi organi sensori, assieme alla temperatura dell'aria.

La variazione di 1°C della temperatura dell'aria può essere compensata da una variazione contraria da 0,5 – 0,8°C nella  $T_{MR}$ . Per una condizione confortevole la  $T_{MR}$  deve essere di 2°C maggiore rispetto la temperatura dell'aria. Se è minore di 2°C, è comunque tollerabile, ma solo se la radiazione emessa dal corpo è quasi la stessa in tutte le direzioni.

Solitamente la temperatura considerata è una combinazione tra la temperatura media radiante e quella dell'aria, poiché si ha 50% radiazione e 50% convezione. Questa temperatura viene chiamata *temperatura operativa* e corrisponde alla media aritmetica tra le due temperature [30].

In generale nella fase di progettazione è importante considerare il livello di comfort interno all'ambiente per predisporre un opportuno impianto e per mantenere i parametri, come temperatura operativa, umidità e velocità dell'aria, a valori congrui. In *tabella 4.2* vengono riportati i valori ottimali a seconda della stagione considerata.

	<b>ESTATE</b>	<b>INVERNO</b>
Temperatura	24-26°C	18-20°C
Umidità relativa	50-60%	40-50%
Velocità dell'aria	0,1-0,2 m/s	0,05-0,5 m/s

*Tabella 4.2: Valori consigliati per la temperatura, UR e velocità dell'aria a seconda della stagione [30]*

#### **4.5 UTILIZZO DI MATERIALI INFIAMMABILI IN EDILIZIA**

Nel capitolo 3, nel quale sono state esposte tutte le caratteristiche dei PCM, è stato sottolineato il fatto che questi materiali sono infiammabili. È quindi opportuno prestare attenzione alle linee guida e alle norme vigenti per poterli utilizzare nella stratigrafia dei componenti edilizi.

La norma europea UNI EN 13501-1 regola la classificazione dei materiali e degli elementi da costruzione in base alla loro reazione al fuoco.

Il comportamento al fuoco di una qualsiasi struttura è l'insieme delle trasformazioni fisiche che essa subisce poiché sottoposta all'azione del fuoco. La maggior parte dei materiali da costruzione non possiede buone proprietà di reazione, ma offre una resistenza ad esso. La differenza di questi due concetti consiste nel comportamento che un materiale possiede nei confronti del fuoco, ossia un materiale resistente ha la capacità di conservare stabilità, tenuta e isolamento termico per un determinato periodo, mentre per reazione s'intende il comportamento di un materiale che contribuisce alimentando il fuoco al quale è sottoposto [31].

La sicurezza antincendio dei prodotti da costruzione viene divisa in classi dalla normativa europea fornendo una piattaforma comune per il confronto delle proprietà di resistenza al fuoco dei materiali, nel modo riportato in *tabella 4.3*. Le principali proprietà che determinano la classificazione sono la non-combustibilità, l'accendibilità, la diffusione delle fiamme, il potere calorifico e la produzione di fumo e di gocce ardenti [31].

CLASSIFICAZIONE AL FUOCO		
cat.	caratteristica	materiale
<b>A</b>	Non combustibile	Calcestruzzo, muratura, suoli (sabbia, ghiaia, ..), cemento, malta, terraglia, ceramica per l'edilizia, vetro, vetro multicellulare, massicci elementi di gesso, ghisa, acciaio, alluminio
<b>A1</b>	Non combustibile, senza sostanze organiche, senza sostanze combustibili	Elementi in fibra minerale, lana di vetro
<b>A2</b>	Non combustibile con sostanze infiammabili organiche, oppure sostanze infiammabili possono essere contenute	Pannelli di gesso su cartone (con superficie chiusa), calcestruzzo con polistirolo, lana di roccia
<b>B</b>	Combustibile	
<b>B1</b>	Difficilmente infiammabile	Materiale di legno trattato con una protezione antincendio, materie plastiche di schiuma rigida, l'incendio si deve spegnere da solo dopo che si toglie la sorgente delle fiamme
<b>B2</b>	Normalmente infiammabile	Elementi e materiali in legno con una spessore maggiore 2mm
<b>B3</b>	Facilmente infiammabile	Elementi e materiale di legno con unno spessore minore 2mm, paglia, cartone, carta non possono essere usati

*Tabella 4.3: Assegnazione della classificazione al fuoco dei materiali edili (senza pavimentazione) secondo la UNI EN 13501-1:2005*

L'utilizzo di PCM costituiti da paraffina in edilizia è limitato a causa della loro facile infiammabilità poiché appartenenti ai gruppi B1 e B2. Essa permette una quantità di massimo il 20%, escludendo il loro utilizzo per gli edifici pubblici [26].

#### **4.6 STATO DELL'ARTE**

Negli ultimi anni, aziende che producono materiali per l'edilizia hanno iniziato a proporre di nuovi ed innovativi con elevate prestazioni energetiche. In collaborazione con centri di ricerca hanno sviluppato sistemi per l'integrazione di questi materiali permettendone la possibilità d'ingresso nel mercato europeo.

La possibilità di utilizzare materiali a cambiamento di fase in edilizia deve sottostare a determinati requisiti, come accennato in paragrafi precedenti, quali: temperatura di fusione simile a quella per il comfort termico, entalpia, inerzia termica, stabilità nel tempo, temperatura di congelamento, aspetti ecologici, prezzo tossicità e reperibilità [26]. Ogni azienda dopo aver opportunamente verificato le caratteristiche del PCM, lo rende disponibile per una sua diffusione.

L'elemento base per impiegare la cera paraffina nella miscela costituente i materiali da costruzione, senza compromettere le sue proprietà, è quello di inserirla in microcapsule di diametro 2-20  $\mu\text{m}$  di polimetilmetacrilato. Queste capsule sono state brevettate dall'azienda BASF e sono disponibili come polvere secca da miscelare con altre sostanze o materiali, quindi inserite in pannelli di cartongesso o in legno, isolanti termici, intonaci o sistemi di facciata vetrati o in plexiglas.

La ditta tedesca Rubitherm, per ovviare al problema della quantità limite utilizzabile della paraffina, pari al 20% per normativa, utilizza come elemento base i sali idrati che sono meno infiammabili. La possibilità di introdurre una quantità maggiore di materiale porta ad un aumento dell'inerzia termica pur rimanendo nei limiti d'infiammabilità consentiti [26].

Le seguenti schede forniscono una visione sui materiali ed elementi caratterizzati da PCM presenti in commercio. Questa raccolta contiene prodotti disponibili nel mercato europeo per l'involucro edilizio realizzato con tecnologie assemblate a secco [26].

Generalmente le aziende produttrici forniscono schede poco chiare ed incomplete, queste riportate sono state trovate in letteratura e verificate per quanto possibile, in modo tale da poterle utilizzare per un confronto delle prestazioni e dimensioni e per fornire un'idea indicativa le caratteristiche, i parametri di valutazione o le unità considerate.

#### micronal

**Descrizione:** microcapsule e soluzione acquosa contenente PCM.

**Possibili utilizzi:** materia prima per la composizione di materiali da costruzione (intonaci, gessi, pannelli di rivestimento, ecc.).

**Composizione:** microcapsule di diametro 2-20  $\mu\text{m}$  in polimetilmetacrilato contenenti cera di paraffina.

Temperatura di fusione 23°C o 26°C in base al tipo.

**Comportamento termico:** funge da termoregolatore ammortizzando i picchi di temperatura. Quando l'ambiente raggiunge una temperatura superiore al punto di fusione del PCM, la cera contenuta all'interno delle capsule cambia di fase acquisendo il calore esterno senza che la sua temperatura aumenti. Analogamente all'abbassamento della temperatura la cera si risolidifica cedendo calore all'ambiente circostante.

**Capacità termica specifica:** 110 kJ/kg della polvere (in base alla ISO 11357-3), ca. 46 kJ/kg sciogliendo il principio attivo nell'acqua con una percentuale del 42%.

**Versioni sul mercato:** è disponibile come dispersione acquosa e come polvere secca

- DS 5000 X

fluida, temperatura di fusione del nucleo 26°C

- DS 5007 X

fluida, temperatura di fusione del nucleo 23°C

- DS 5001 X

polvere, temperatura di fusione del nucleo 26°C

- DS 5008 X

polvere, temperatura di fusione del nucleo 23°C

**Caratteristiche particolari:** i PCM sono micro-incapsulati al fine di aumentare la loro capacità di cambiamento di fase

**Ditta produttrice:**

BASF AG

tel. 0049 621 600

fax. 0049 621 6042525

www.basf.com, info@basf.com

www.micronal.de

**Distribuzione in Italia:**

BASF-Italia

www.basf-italia.it

numero verde 0080022766257



Scheda 1: Micronal dell'azienda italiana BASF [26]

## DELTA-PCMs

**Descrizione:** PCM sotto forma di pannelli o contenuti all'interno di buste in alluminio, sfere in plastica o membrane bugnate.

**Possibili utilizzi:** materia prima per la composizione di materiali da costruzione.

**Composizione:** sali idrati.

**Temperatura di fusione:** tra i 22°C e i 28°C.

**Comportamento termico:** funge da termoregolatore ammortizzando i picchi di temperatura e mantenendo la temperatura interna di un edificio stabile a 25°C anche nei periodi più caldi dell'anno.

**Capacità termica specifica:** 5700 kJ nel pannello 20 mm di spessore.

**Versioni sul mercato:** buste in alluminio, pannelli, sfere e membrane bugnate.

**Caratteristiche particolari:** un pannello di 2 cm ha la stessa capacità termica di 24 cm di cemento, 36 cm di muratura in mattoni, 38 cm di legno massello, 226 cm di un sistema di facciata in costruzione leggera.

**Ditta produttrice:**

Dörken GmbH

Wetterstrasse 58

58313 Herdecke

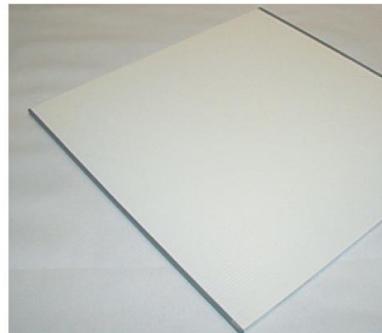
Germania

tel. 0049 2330 630

fax 0049 2330 63355

www.doerken.de,

bvf@doerken.de



Scheda 2: DELTA-PCMs dell'azienda tedesca Dorcken GmbH [26]

## SmartBoardTM

**Descrizione:** pannello in cartongesso contenente PCM.

**Possibili utilizzi:** rivestimento interno di pareti esterne.

**PCM contenuti:** microcapsule micronal® in polimetilmetacrilato, di diametro 2-20 µm, contenenti cera di paraffina.

**Temperatura di fusione del PCM:** 23°C o 26°C in base al pannello.

**Composizione:** pannello in cartongesso contenente microcapsule micronal®. Un pannello di 1 mq spesso 15 mm contiene 3kg di microcapsule.

**Capacità termica latente nell'intervallo di attivazione:** circa 330 kJ/m<sup>2</sup>.

**Capacità termica specifica:** ca. 1,20 kJ/kgK.

**Conduttività termica:** 0,18 W (mk)

**Dimensione del pannello:** 1250 x 2000 mm.

**Spessore:** 15 mm.

**Peso:** 11,5 kg/m<sup>2</sup>.

**Resistenza alla compressione:** 1,5 Nmm<sup>2</sup> (in base alla norma DIN 18180).

**Resistenza al fuoco:** B1 (difficilmente infiammabile).

**Versioni sul mercato:**

- SmartBoardTM 23:

temperatura di fusione del PCM 23°C

- SmartBoardTM 26:

temperatura di fusione del PCM 26°C

**Caratteristiche particolari:** grazie al contenuto di PCM un pannello SmartBoard

con uno spessore di 1,5 cm ha la stessa capacità di accumulo di calore di una parete in cemento di 9 cm o di un muro in laterizio di 12 cm.

**Ditta produttrice:**

BASF AG

tel. 0049 621 600

fax. 0049 621 6042525

www.basf.com , info@basf.com

**Distribuzione in Italia:**

BASF-Italia

www.basf-italia.it

numero verde 0080022766257



Scheda 3: SmartBoardTM dell'azienda italiana BASF [26]

## delta-cool

**Descrizione:** buste in alluminio contenenti PCM.

**Possibili utilizzi:** può essere integrato in sistemi di coperture leggere.

**PCM contenuti:** sali idrati.

**Temperatura di fusione del PCM:** 22-29°C varia in base al modello.

**Composizione:** sali idrati in buste di alluminio.

**Capacità termica specifica:** 2,7 kJ/kgK da solido, 2,2 kJ/kgK da liquido.

**Dimensione della busta:** 300 x 600 mm.

**Spessore:** dipende dalla fase in cui si trova il materiale.

**Peso:** dipende dalla fase in cui si trova il materiale.

**Densità:** 1,6 kg/l da solido, 1,5 kg/l da liquido. Resistenza al fuoco: B1 (difficilmente infiammabile).

**Versioni sul mercato:**

- delta-cool 24 temperatura di fusione 24°C

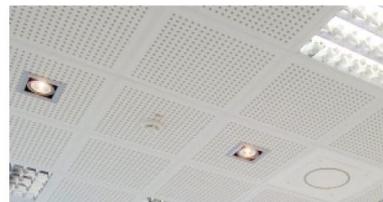
- delta-cool 29 temperatura di fusione 29°C

**Caratteristiche particolari:** Un litro di delta-cool 24 è in grado di assorbire la stessa quantità di energia di 10 litri di acqua. Questo materiale atossico, totalmente riciclabile e difficilmente infiammabile è garantito per più di 10000 cicli di cambiamento di fase, pari a circa 25 anni.

**Ditta produttrice:**

Dörken GmbH

Wetterstrasse 58  
58313 Herdecke  
Germania  
tel. 0049 2330 630  
fax 0049 2330 63355  
www.doerken.de  
bvf@doerken.de



Scheda 4: Delta-cool dell'azienda tedesca Dörken GmbH [26]

## maxit clima

**Descrizione:** intonaco per interni a base di gesso ad applicazione meccanica.

**Possibili utilizzi:** intonaco di fondo o finitura liscia che funge da stabilizzatore termico da applicare su soffitti e pareti. Idoneo per cucine e bagni secondo la DIN 18550.

**PCM contenuti:** microcapsule micronal® in polimetilmetacrilato, di diametro 2-20 µm, contenenti cera di paraffina.

**Temperatura di fusione del PCM:** tra i 22°C e i 26°C.

**Composizione:** PCM (20%), gesso, inerti minerali e additivi per facilitarne la lavorazione.

**Capacità termica latente nell'intervallo di attivazione:** 18 kJ/kg (temperatura compresa tra i 22°C e i 26°C).

**Resistenza alla compressione:** >1,5 Nmm<sup>2</sup>.

**Spessore dell'applicazione:** circa 15 mm.

**Fabbisogno d'acqua:** 64%.

**Resistenza al fuoco:** classe B2 (normalmente infiammabile), utilizzando una vernice isolante può raggiungere la classe B1 (difficilmente infiammabile).

**Supporti:** muratura di qualsiasi tipo, portaintonaco e lastre in cartongesso, particolarmente indicato per supporti leggeri con ridotta capacità di accumulo termico come pareti in cartongesso, mattoni forati e calcestruzzo cellulare.

**Fornitura:** sacchi di carta da 30kg su pedane

da 35 sacchi = 1,050t.

**Versioni sul mercato:** maxit clima 26 – temperatura di fusione 26°C.

**Caratteristiche particolari:** Grazie al contenuto di PCM l'intonaco maxit clima è in grado di assorbire, durante la fase di fusione, circa 4,5 volte in più del calore di un normale intonaco. Uno spessore di 1,5 cm trattato con maxit clima ha la stessa massa termica di una parete di 8,1 cm in Cls., di 13,4 cm di cartongesso e di 28,8 cm di laterizio alleggerito.

**Ditta produttrice:**

maxit italia s.r.l.

viale F. Kennedy 21

24066 Pedrengo (BG)

Italia

tel. 035 662524

fax 035 655821

www.maxit-italia.it

adriano.fumagalli@maxit-italia.it



Scheda 5: Maxit clima dell'azienda italiana maxit italia s.r.l. [26]

## GLASSXcrystal

**Descrizione:** sistema di facciata pluristrato in vetro contenete pannelli PCM.

**Possibili utilizzi:** facciate vetrate traslucenti.

**PCM contenuti:** pannello PCM in sali idrati spesso 24 mm prodotto dalla Dörken.

**Temperatura di fusione del PCM:** tra i 26°C e i 28°C.

**Composizione:** vetro di sicurezza esterno 6 mm, camera d'aria con pannelli frangisole e gas nobile 20 mm, vetro di sicurezza basso emissivo 6 mm, intercapedine con gas nobile 10 mm, vetro di sicurezza basso emissivo 6 mm, intercapedine con pannelli a cambiamento di fase 24 mm, vetro di sicurezza che può essere serigrafato con materiale ceramico in base alle particolari esigenze

**Capacità termica specifica:** 1185 Wh/m<sup>2</sup>.

**Conducibilità termica:** 0,48 W/m<sup>2</sup>K.

**Dimensioni:** spessore 78 mm, altezza max. 2800 mm, larghezza max. 1500 mm, superficie max. 4,2 m<sup>2</sup>.

**Spessore:** 78 mm

**Peso:** 90 Kg/m<sup>2</sup>

**Versioni sul mercato:** è possibile avere un elemento di facciata con qualsiasi dimensione purché contenute all'interno di quelle massime.

**Caratteristiche particolari:** Questo sistema di facciata vetrata, contenente al suo interno un isolante trasparente e un sistema frangisole selettivo, può essere montato al posto di un

normale infisso mantenendo uno spessore estremamente ridotto. I raggi solari estivi con un'inclinazione maggiore di 40° vengono totalmente rifratti dall'elemento frangisole, mentre quelli invernali con un'inclinazione minore di 35° penetrano all'interno del sistema di facciata colpendo direttamente i pannelli PCM.

**Ditta produttrice:**

GlassX AG

Technoparkstrasse 1

8005 Zürich

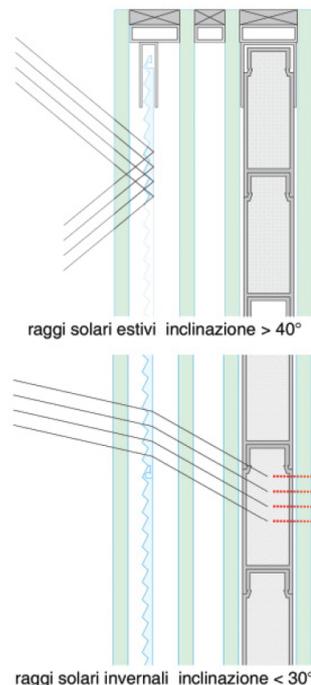
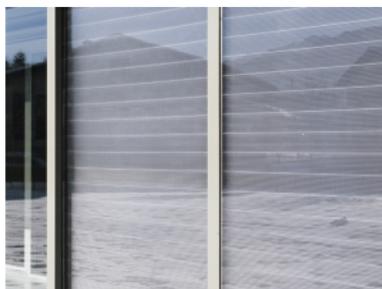
Svizzera

tel. 0041 44 4451740

fax 0041 44 4451749

www.glassx.ch

info@glassx.ch



Scheda 6: GLASSXcrystal dell'azienda svizzera GlassX AG [26]

## 4.7 UTILIZZO DEL PCM IN SISTEMI DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

L'utilizzo di materiali a cambiamento di fase nel settore dell'edilizia non include solamente la loro introduzione nella stratigrafia di pareti, pavimenti e tetto, ma la possibilità di utilizzarli anche in sistemi di raffrescamento o riscaldamento, come dimostrato dai seguenti concetti [5]:

- un PCM con fusione 5-15°C potrebbe essere usato per il raffrescamento.

Durante la notte con un refrigeratore, il materiale diventa solido, cioè viene sfruttato il periodo della giornata in cui la domanda elettrica e i prezzi sono minori. Successivamente, nell'arco della giornata tornerà allo stato liquido assorbendo il calore degli ambienti interni, come si nota in *figura 4.7*;

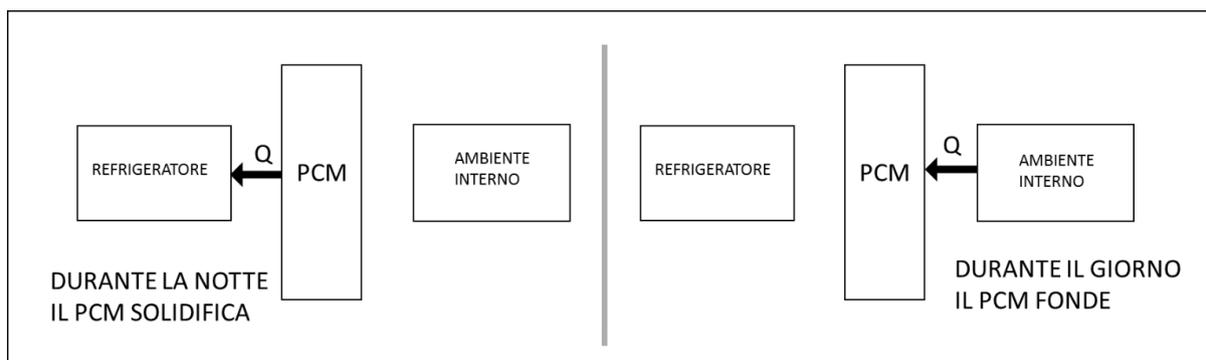


Figura 4.7: PCM utilizzato per il raffrescamento di ambienti combinato con un frigorifero

- un edificio potrebbe essere riscaldato e raffreddato con l'uso di pompe di calore invertibili mediante la connessione di un circuito d'acqua ad un PCM caratterizzato da un punto di fusione compreso tra 20 e 35°C, ad esempio il  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  con fusione a 27°C, come in figura 4.8;

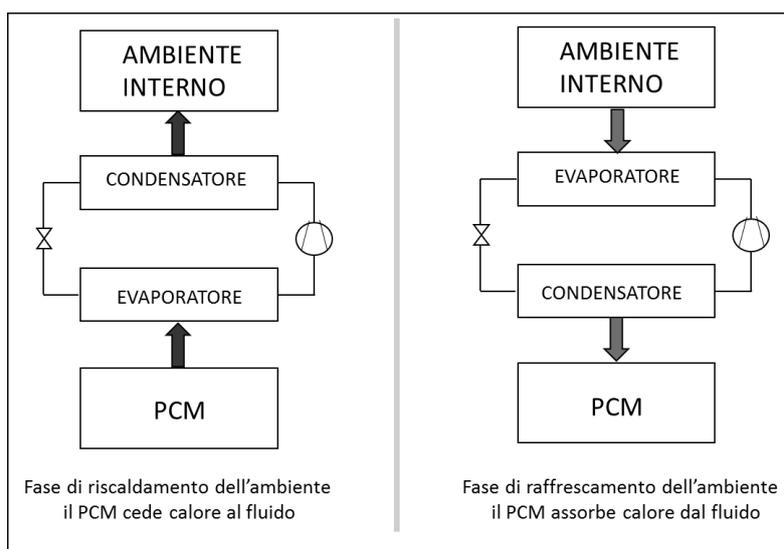


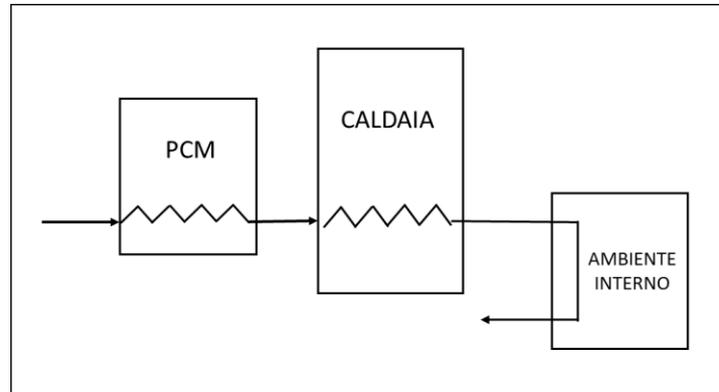
Figura 4.8: Utilizzo di PCM combinato ad una pompa di calore invertibile

- un riscaldamento solare ad aria calda potrebbe usare un PCM con m.p (temperatura di fusione) a 25-30°C, esempio usare il  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  per provvede al riscaldamento notturno e come preriscaldatore per il riscaldamento giornaliero;

- un riscaldamento solare ad aria calda potrebbe usare un PCM con fusione a 40-60°C, per esempio  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  eutettico (m.p 58°C), per riscaldamento diurno e notturno;

- un riscaldamento di acqua calda la quale potrebbe essere preriscaldata in un serbatoio di PCM incapsulato con temperatura di fusione 55-70°C, per esempio  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  eutettico. L'attenzione deve essere posta alla liquefazione del PCM poiché una volta raggiunto lo stato solido non permetterebbe il

riscaldamento del fluido. Questo processo può essere compiuto ad esempio nei periodi di basso costo dell'energia elettrica. Uno schema semplificato è rappresentato in *figura 4.9*;



*Figura 4.9: Utilizzo del PCM per il preriscaldamento del fluido utilizzato nel riscaldamento degli ambienti*

- un sistema di battiscopa solare dove per il riscaldamento d'acqua si potrebbe impiegare un PCM con fusione 60-95°C, per esempio  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (m.p. = 89 °C).

## **5 ANALISI DELL'UTILIZZO DI PCM IN EDILIZIA**

### **5.1 INTRODUZIONE**

Il risparmio energetico nel settore dell'edilizia, ossia la riduzione del fabbisogno termico e frigorifero a parità di comfort, è di notevole importanza per un ingegnere durante la progettazione.

Nel corso degli anni la stessa legislatura ha obbligato a ridurre il valore della trasmittanza dei vari componenti esterni di una struttura, comportando in parte lo sviluppo di nuovi materiali. Il progettista deve saper scegliere la tipologia di materiale e le caratteristiche ottimali in relazione ad alcuni fattori, come il clima esterno, la reperibilità e il costo nel mercato.

Le fasi principali da seguire nella costruzione di nuovi edifici o nelle ristrutturazioni sono:

- l'individuazione della località dell'edificio e quindi la tipologia del clima;
- le caratteristiche principali degli edifici esistenti nella zona riguardo ai materiali utilizzati;
- la scelta della stratigrafia dei vari componenti dell'edificio;
- il calcolo dei consumi e il confronto di varie ipotesi se presenti.

In questa tesi si è voluto seguire l'articolo "Evaluation of the application of Phase Change Material on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region" di Panayiotou, Kalogirou e Tassou per la valutazione dell'applicazione di materiali a cambiamento di fase a Cipro [32]. Quest'articolo è stato tratto dalla tesi di Panayiotou "Thermal Performance of dwellings in Cyprus and approaches for energy conservation".

### **5.2 PROGRAMMI UTILIZZATI**

Per lo sviluppo di questa tesi sono stati accoppiati principalmente due software:

- EnergyPlus 8.8.0 per la simulazione energetica dinamica del caso studio;
- SketchUp per la modellazione 3D dell'edificio utilizzata dal precedente.

#### **ENERGYPLUS**

L'importanza della ricerca delle prestazioni ottimali di comfort interno, attraverso lo studio dell'involucro edilizio e dell'impianto termotecnico, implica l'esecuzione di calcoli in regime dinamico molto complessi.

EnergyPlus è uno dei programmi più affermati e gratuiti per la simulazione energetica in regime dinamico di edifici, dove le condizioni al contorno sono considerate continuamente variabili. Solitamente le simulazioni energetiche vengono eseguite su 8760 ore, ma il programma permette l'inserimento di un periodo di tempo diverso da quello preimpostato. Inoltre, è possibile ripartire il periodo in una serie di intervalli (time step) per ciascuno dei quali viene eseguita la simulazione.

Il programma è in grado di effettuare simulazioni energetiche di un edificio, calcolando i carichi di riscaldamento e di raffrescamento per mantenere all'interno degli ambienti una situazione di comfort in riferimento ai parametri inseriti, permettendo il confronto di più soluzioni per la valutazione dei consumi e benefici.

È possibile integrare EnergyPlus con altri programmi di modellazione, per rendere più semplice ed intuitivo il suo utilizzo, uno di questi è SketchUp, attraverso il quale è possibile realizzare il modello tridimensionale dell'edificio da inserire come dato iniziale.

Una nota importante riguarda il modo mediante il quale vengono forniti i risultati, infatti il programma elabora i dati immessi in modo acritico, cioè se i dati inseriti sono insensati, esso produrrà risultati insensati. Per questo motivo ingegneri ed architetti hanno un ruolo indispensabile nella progettazione e nell'utilizzo dei programmi.

EP-Launch (figura 5.1) è una componente opzionale dell'installazione di EnergyPlus per Windows che permette in modo intuitivo di selezionare i file ed eseguire le simulazioni. Grazie ad esso è possibile eseguire EnergyPlus in modo semplice, in quanto consente di aprire un editor di testo per i file di input e di output, un foglio di calcolo per i file contenenti i risultati della simulazione, un browser web e di avviare un visualizzatore per il file di disegno selezionato (utilizzando il software Autocad).

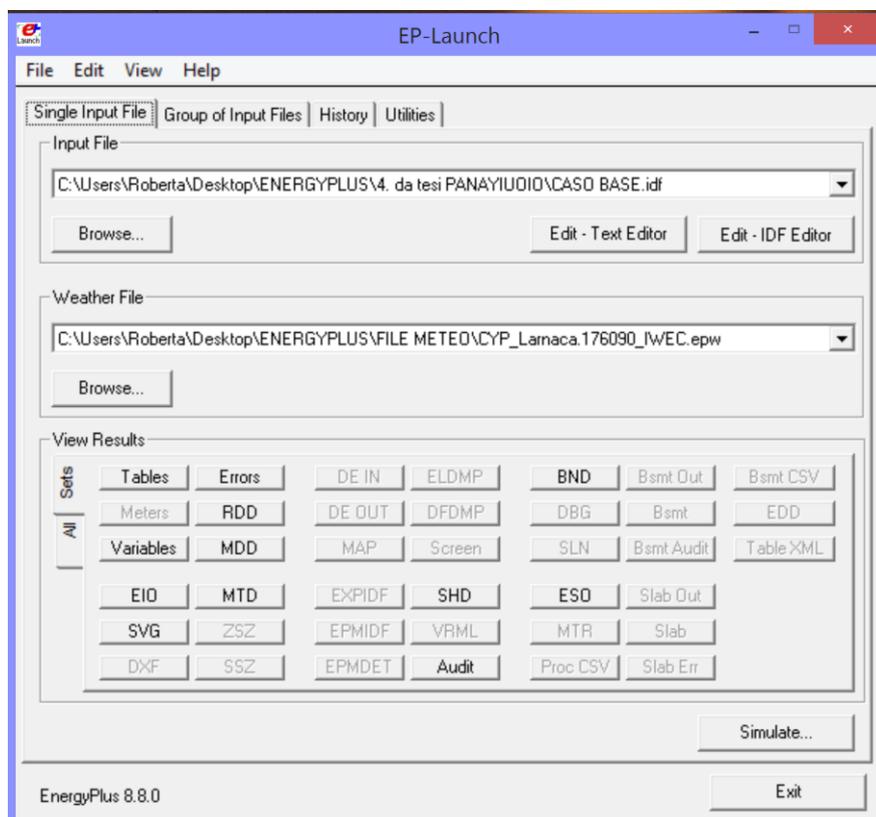
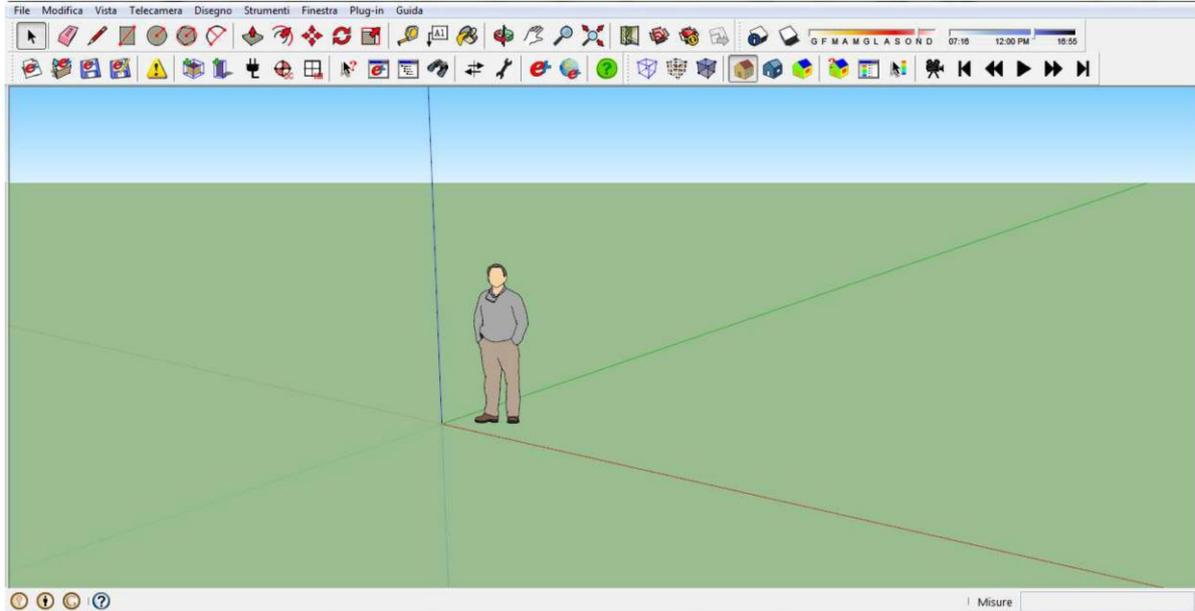


Figura 5.1: Interfaccia grafica di EP-Launch

## SKETCHUP

SketchUp è un software di modellazione 3D di semplice utilizzo grazie alla sua interfaccia intuitiva (figura 5.2).



*Figura 5.2: Interfaccia grafica di SketchUp*

Ha i suoi punti di forza nella creazione di forme bidimensionali e tridimensionali, fornendo al disegnatore uno strumento intuitivo e veloce, in grado di assisterlo dal punto di vista grafico e di consentirgli un'esplorazione dinamica e creativa degli oggetti, dei materiali e dell'impatto della luce solare.

### 5.3 DATI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE

In questa tesi si è studiata analiticamente l'applicazione di PCM macroincapsulati posti nell'involucro di una stanza di prova a Cipro. Il principale programma utilizzato è EnergyPlus mediante il quale si sono valutate varie soluzioni dal punto di vista del risparmio energetico e andamento delle temperature interna.

Due differenti simulazioni sono state eseguite: la prima riguardante il fabbisogno richiesto dalla stanza mantenendo un controllo sulla temperatura interna, mentre nella seconda viene osservato l'andamento della temperatura senza alcun impianto di riscaldamento o raffrescamento.

La simulazione è eseguita per un intero anno tipico (8760h) dal 1° gennaio al 31° dicembre.

#### 5.3.1 LOCALIZZAZIONE E CLIMA

La stanza di prova viene posizionata a Cipro, più precisamente a Larnaca.

Il file meteo inserito come input nel programma viene fornito dal sito [www.energyplus.net](http://www.energyplus.net), nel quale è possibile trovare file denominati TMY (Typical Meteorological year) di molte località, altrimenti difficilmente reperibili gratuitamente.

#### 5.3.2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA STUDIATA

In relazione all'articolo individuato come caso studio, si è creato il modello della stanza con SketchUp, con le seguenti dimensioni e orientazione (figura 5.3).

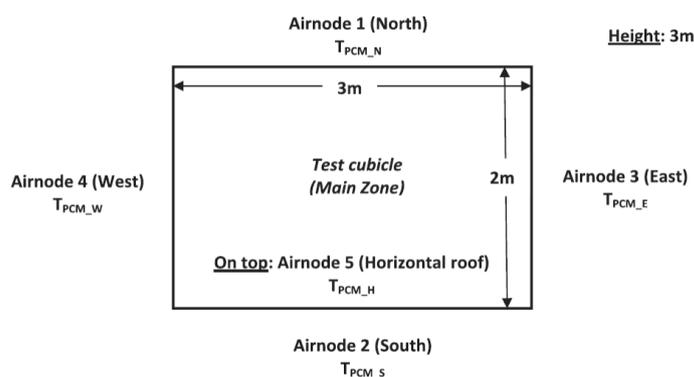


Figura 5.3: Dimensione ed orientazione della stanza di prova

Successivamente, seguendo le indicazioni fornite dalla tesi di Panayiotou si sono introdotti nel programma tutti i materiali e le loro caratteristiche, come spessore dello strato, densità, calore specifico e conducibilità.

La struttura della stanza in esame è formata da una pavimentazione adiabatica verso il terreno, mentre, le pareti e il tetto piano variano a seconda del caso studiato.

La sequenza degli strati appartenenti al tetto è descritta in *figura 5.4* e per esso vi sono quattro possibili soluzioni: senza isolante e PCM, solo con isolante, solo con PCM e la combinazione di quest'ultimi.

Di seguito si riporta anche la *tabella 5.1* riguardante le caratteristiche dei materiali scelti.

STRATIGRAFIA TETTO  
con isolante e pcm



*Figura 5.4: Stratigrafia del tetto piano*

MATERIALI UTILIZZATI PER IL TETTO PIANO				
materiale	spessore [m]	conducibilità [W/mK]	densità kg/m3	calore specifico J/kgK
strato isolante di bitume	0,004	1,4	2000	2210
massetto	0,05	1,4	2000	800
polistirene espanso	0,05	0,03	20	1250
cemento rinforzato	0,15	1,1	1600	850
PCM BioPCmat M91 29°C	0,014	0,2	860	1620
intonaco di cemento Portland	0,025	1,39	2200	910

*Tabella 5.1: Caratteristiche dei materiali utilizzati nella stratigrafia del tetto*

Anche per le pareti sono presenti quattro casi: solo muratura, solo con isolante, solo con PCM e combinazione tra PCM e isolante. Se si utilizza solo il PCM si devono considerare 3 diversi posizionamenti di questo, ossia internamente, esternamente o al centro della muratura.

Il caso combinato viene eseguito scegliendo il posizionamento del PCM che fornisce il risparmio energetico maggiore.

Di seguito si riportano i disegni illustrativi delle dei casi studiati e le tabelle delle caratteristiche dei materiali.

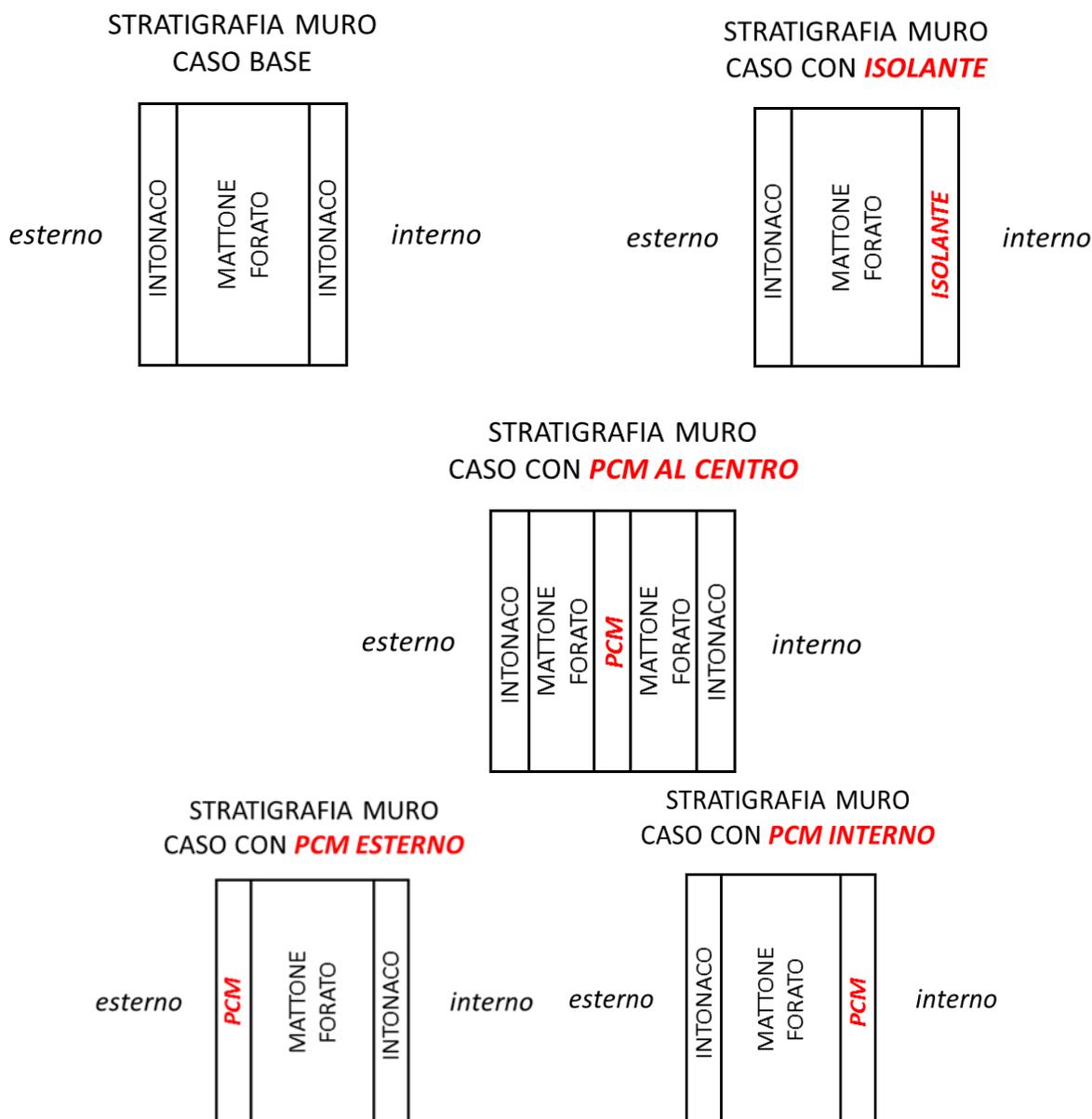


Figura 5.5: Disegni illustrativi i casi in esame

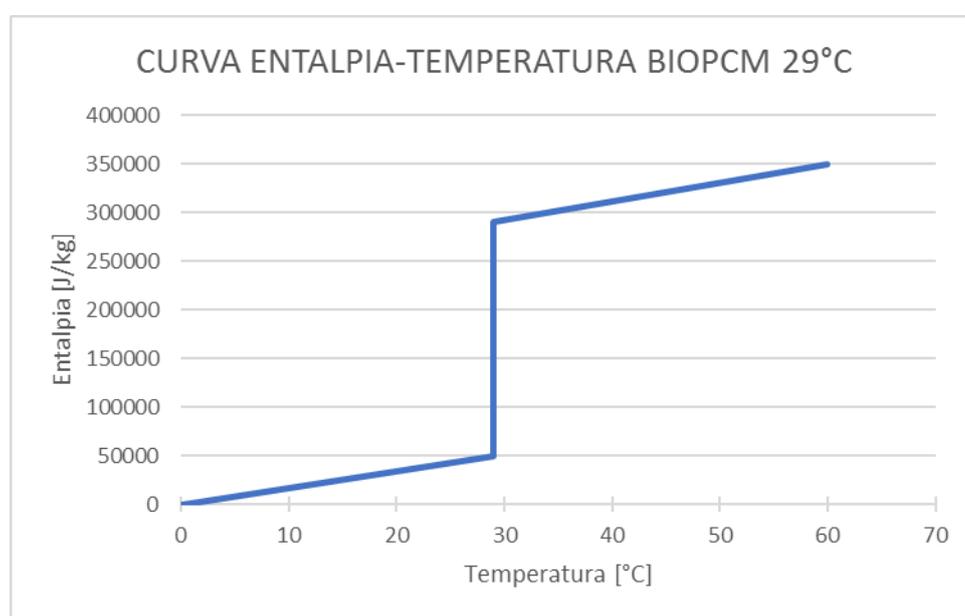
MATERIALI UTILIZZATI PER IL MURO				
materiale	spessore [m]	conducibilità [W/mK]	densità kg/m3	calore specifico J/kgK
intonaco di cemento Portland	0,025	1,39	2200	910
mattone forato	0,2	0,4	1200	840
strato isolante termico	0,025	0,051	190	1000
PCM BioPCmat M91 29°C	0,014	0,2	860	1620
intonaco di cemento Portland	0,025	1,39	2200	910

Tabella 5.2: Caratteristiche dei materiali utilizzati nei componenti verticali

Il materiale a cambiamento di fase scelto per lo studio è il BioPCmat, denominato M91. Esso ha quattro differenti temperature di fusione 23, 25, 27 e 29°C. In accordo con lo studio eseguito, considerando il clima di Cipro e le temperature raggiunte, si è scelta una temperatura di cambiamento di fase di 29°C.

Il programma Energy Plus fornisce una sezione per l'inserimento del materiale a cambiamento di fase, nella quale oltre a far riferimento alle caratteristiche sopra descritte in *tabella 5.2*, vengono inseriti i valori della curva di entalpia del materiale.

Sia la tesi che l'articolo presi di riferimento non forniscono questa curva, ma sottolineano il fatto che il cambiamento di fase avvenga a temperatura costante, così si è scelta la curva rappresentata in *figura 5.6*.



*Figura 5.6: Curva entalpia-temperatura del materiale a cambiamento scelto*

#### **5.4 CONTROLLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO**

In questa prima simulazione si vuole studiare il consumo annuale di energia per metro quadro (kWh/m<sup>2</sup> anno) mantenendo all'interno dell'ambiente una temperatura di comfort e valutare la posizione ottimale del PCM in relazione ai consumi.

Quindi vengono settate due temperature per il riscaldamento e il raffrescamento, rispettivamente di 20 e 26°C.

I risultati dei consumi e delle percentuali di risparmio rispetto al caso base sono riportati nella *tabella 5.3*.

RICHIESTA DI ENERGIA DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO IN [kWh/m <sup>2</sup> yr]				
	Q_heat	Q_cool	Q_tot	RISPARMIO
CASO BASE	90,51	106,91	197,42	
CASO CON ISOLANTE risparmio	50,34	49,74	100,08	
	40,17	57,17	97,34	49,31 %
CASO CON PCM INTERNO risparmio	81,71	93,35	175,06	
	8,8	13,56	22,36	11,33 %
CASO CON PCM AL CENTRO risparmio	81,63	92,15	173,78	
	8,88	14,76	23,64	11,97 %
CASO CON PCM ESTERNO risparmio	80,5	98,73	179,23	
	10,01	8,18	18,19	9,21 %

Tabella 5.3: Fabbisogno richiesto per il mantenimento delle temperature interne

Osservando solo i tre casi con il PCM, risulta che il posizionamento al centro del mattone rappresenta la soluzione con il maggior risparmio. Ne deriva che l'ulteriore caso studiato è la combinazione tra l'isolante e il PCM al centro, come si nota dalla figura 5.7

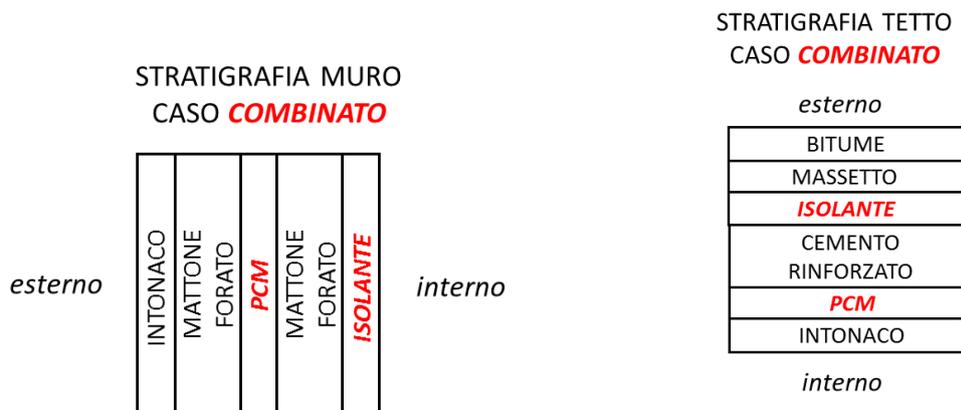


Figura 5.7: Stratigrafia del muro e del tetto nel caso combinato

La richiesta di energia per quest'ultimo caso è riportata nella seguente tabella assieme alla percentuale di risparmio rispetto al caso base.

	Q_heat	Q_cool	Q_tot	RISPARMIO
CASO COMBINATO	47,79	45,89	93,68	
risparmio	42,72	61,02	103,74	52,55 %

Tabella 5.4: Fabbisogno energetico del caso combinato

## 5.5 CONTROLLO DELLA TEMPERATURA INTERNA

La seconda simulazione, denominata controllo del livello di temperatura, mostra gli andamenti della temperatura interna nelle diverse soluzioni studiate.

Lo studio viene eseguito spegnendo l'impianto di riscaldamento e raffreddamento, in modo tale da poter osservare un andamento indisturbato e dipendente solo dalla stratigrafia del muro e del tetto.

I risultati vengono presentati per la giornata più fredda e quella più calda nell'anno, rispettivamente 4 febbraio e 28 luglio. Queste due giornate sono al di fuori dell'intervallo di lavoro del PCM, perciò viene riportato un ulteriore grafico di tre giornate di giugno dove le temperature raggiunte permettono allo strato di PCM di lavorare in modo attivo.

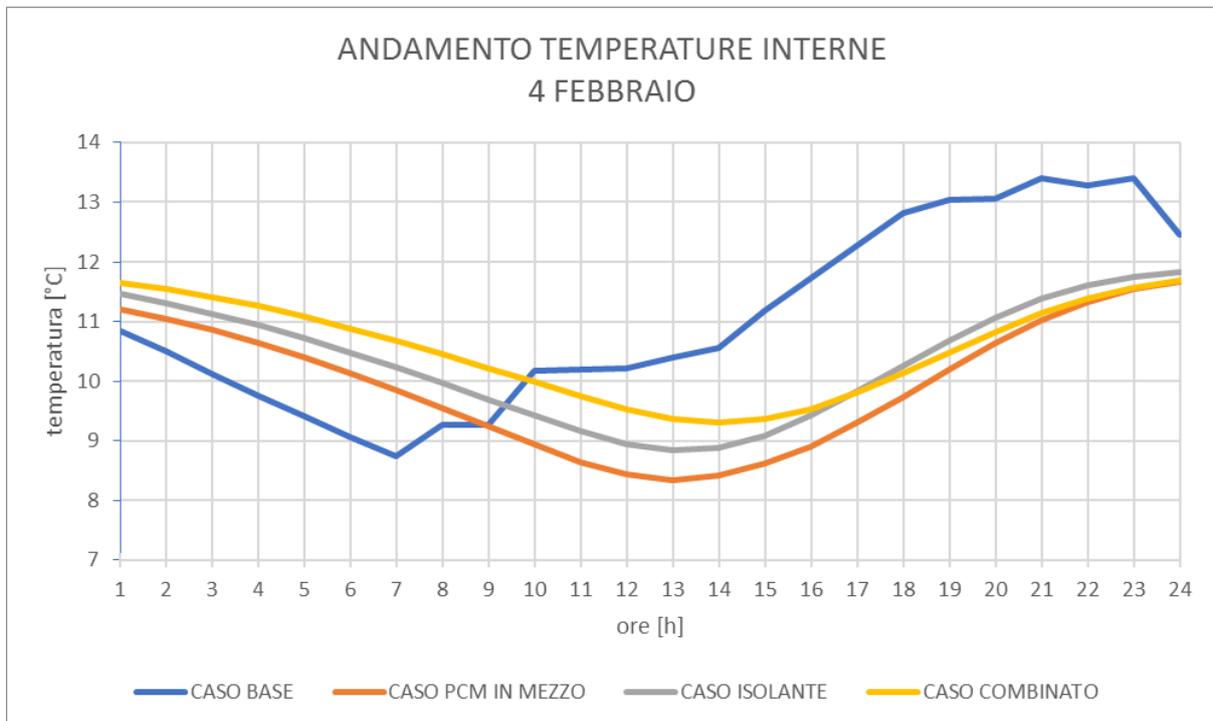


Figura 5.8: Andamento della temperatura dell'aria interna esaminata per il 4 febbraio

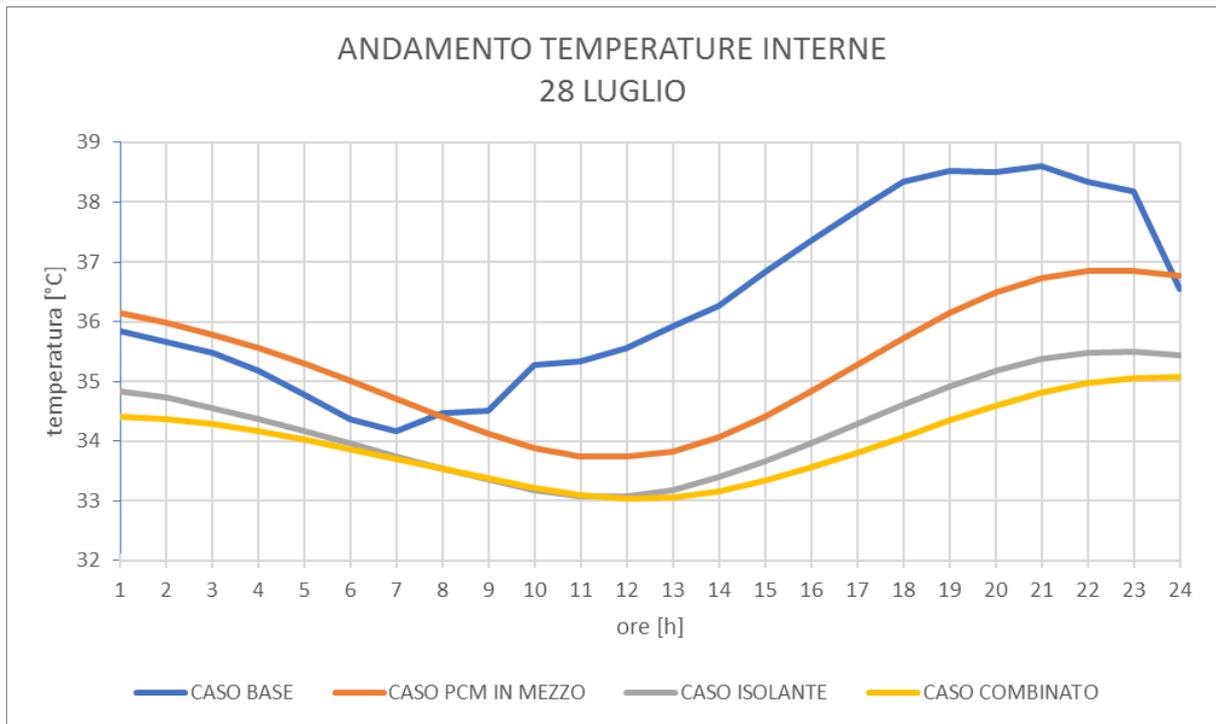


Figura 5.9: Andamento della temperatura dell'aria interna esaminata per il 28 luglio

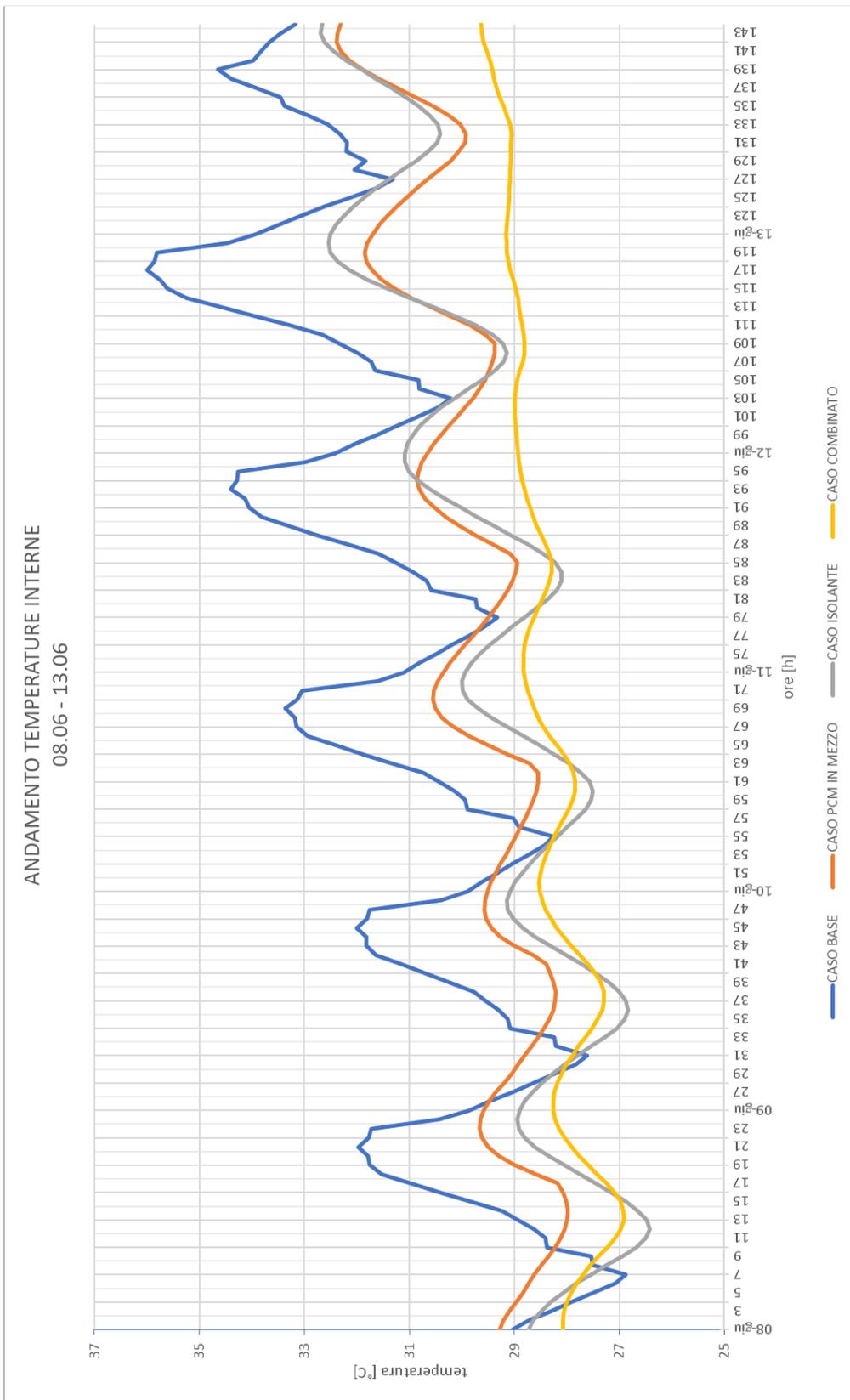


Figura 5.10: Andamento della temperatura dell'aria interna esaminata per 3 giornate di giugno

## 5.6 OSSERVAZIONI

La prima simulazione riguarda il consumo energetico per mantenere la temperatura interna tra i 20 e 26°C, mediante appositi sistemi di riscaldamento e raffrescamento. Essa fornisce risultati molto interessanti riguardo i risparmi che si ottengono scegliendo le varie configurazioni rispetto al caso base.

Come si può notare dalla *tabella 5.3*, il caso con il solo isolante porta ad un risparmio elevato, arrivando quasi a dimezzare i consumi. Mentre in tutti e tre i casi con PCM si arriva al 10% risultando essi nettamente meno efficaci dell'isolante. Questo deriva dalle proprietà termiche del materiale quando ha un comportamento passivo, ossia non assorbe o rilascia calore latente. Ad esempio, un aumento del valore della conduttività comporta sicuramente un incremento dei consumi e probabilmente un risparmio negativo.

I valori percentuali dei 3 casi sono simili perché:

- nel caso con PCM esterno, esso rileva la temperatura superficiale esterna dovuta dalla combinazione tra temperatura dell'aria e radiazione. In estate le temperature raggiunte sono elevate e il materiale non è in grado di eseguire la risolidificazione poiché l'ambiente esterno non scende sotto i 29°C. Mentre in inverno le temperature non permettono la liquefazione del materiale che si mantiene allo stato solido;
- nel caso con PCM interno, ponendo una temperatura interna di comfort tra 20 e 26°C, esso rileva temperature vicine al suo punto di lavoro, ma sempre minori dei 29°C. Rispetto al caso esterno il risparmio aumenta;
- il caso con PCM al centro, offre un maggior risparmio poiché il materiale si trova in una condizione intermedia tra le due sopra descritte.

Infine, il risparmio del caso combinato deriva principalmente dall'isolante utilizzato e il PCM rappresenta uno strato aggiuntivo che porta ad una diminuzione della trasmittanza della parete.

Nella seconda parte relativa al controllo della temperatura dell'aria interna, si sono individuate interessanti curve riguardanti l'andamento dei casi in esame. Dai grafici sopra riportati si nota come l'utilizzo di uno strato isolante o PCM comporti un andamento delle temperature più simile ad una sinusoidale e con i picchi di temperature spostati in avanti.

Sia per il giorno più freddo che per il più caldo, il caso più favorevole è quello combinato che permette di aumentare le temperature minime in inverno e di spostare verso il basso la curva nel caso estivo.

In entrambi i periodi, estivo ed invernale, l'isolante rimane nettamente migliore rispetto l'uso del PCM, poiché quest'ultimo si comporta come uno strato passivo essendo al di fuori del suo intervallo di lavoro.

Interessante è il grafico di più giornate riportato in *figura 5.10* per il mese di giugno, dove si può osservare un andamento del PCM diverso dai precedenti: il materiale a cambiamento di fase è di fatto uno strato attivo e riesce a mantenere una temperatura molto costante nell'intorno dei 29°C, risultando più competitivo dell'isolante. Ad esempio, nella giornata del 12 giugno risulta migliore del solo isolante poiché riesce ad abbassare il picco di temperature.

Inoltre, la curva su cui è bene prestare attenzione è quella del caso combinato, essa rimane la favorita poiché possiede un andamento quasi costante e mantiene la temperatura interna stabile in un intervallo di temperature minore di 30°C.

Da questi grafici si può concludere che l'utilizzo del PCM non può escludere quello dell'isolante: in inverno e in estate, ossia quando il materiale non lavora, solo l'utilizzo dell'isolante può ridurre il flusso di calore rispettivamente uscente ed entrante, mentre, in autunno e in primavera il PCM a determinate temperature è ottimo per mantenere una curva costante. L'utilizzo combinato dei due materiali permette di ridurre i consumi sull'intero anno.

## 5.7 VALIDAZIONE DEL MODELLO

Il lavoro svolto in questa tesi è stato realizzato a partire dall'articolo "Evaluation of the application of Phase Change Material on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region" di Panayiotou, Kalogirou e Tassou, tratto dalla tesi di Panayiotou "Thermal Performance of dwellings in Cyprus and approaches for energy conservation".

La scelta dell'articolo di riferimento, per lo studio eseguito, è stata fatta per la semplicità e completezza dei dati e risultati rispetto ad altri lavori disponibili in letteratura, in modo tale da permettere una validazione del modello creato e quindi le successive analisi.

I risultati riguardanti i consumi energetici richiesti e le percentuali di risparmio per i casi esaminati da Panayiotou sono riportati nelle seguenti tabelle tratte dall'articolo.

<b>POSIZIONE PCM INTERNO</b>	Energia totale richiesta [kWh/m <sup>2</sup> anno]	324
	Energia totale risparmiata [kWh/m <sup>2</sup> anno]	40,8
	Percentuale di risparmio [%kWh/m <sup>2</sup> anno]	21,8%
<b>POSIZIONE PCM AL CENTRO</b>	Energia totale richiesta [kWh/m <sup>2</sup> anno]	324,8
	Energia totale risparmiata [kWh/m <sup>2</sup> anno]	89,7
	Percentuale di risparmio [%kWh/m <sup>2</sup> anno]	21,6%
<b>POSIZIONE PCM ESTERNO</b>	Energia totale richiesta [kWh/m <sup>2</sup> anno]	296
	Energia totale risparmiata [kWh/m <sup>2</sup> anno]	118,5
	Percentuale di risparmio [%kWh/m <sup>2</sup> anno]	28,6%

*Tabella 5.5: Risultati della simulazione del controllo d'energia per i 3 casi con PCM*

<b>CASO COMBINATO</b>	Energia totale richiesta [kWh/m <sup>2</sup> anno]	140,2
	Energia totale risparmiata [kWh/m <sup>2</sup> anno]	274,3
	Percentuale di risparmio [%kWh/m <sup>2</sup> anno]	66,2%
<b>CASO ISOLAMENTO</b>	Energia totale richiesta [kWh/m <sup>2</sup> anno]	161,9
	Energia totale risparmiata [kWh/m <sup>2</sup> anno]	252,6
	Percentuale di risparmio [%kWh/m <sup>2</sup> anno]	61%

Tabella 5.6: Risultati della simulazione del controllo d'energia

Di seguito vengono riportati per completezza i grafici degli andamenti delle temperature nel giorno più freddo e più caldo presenti nell'articolo.

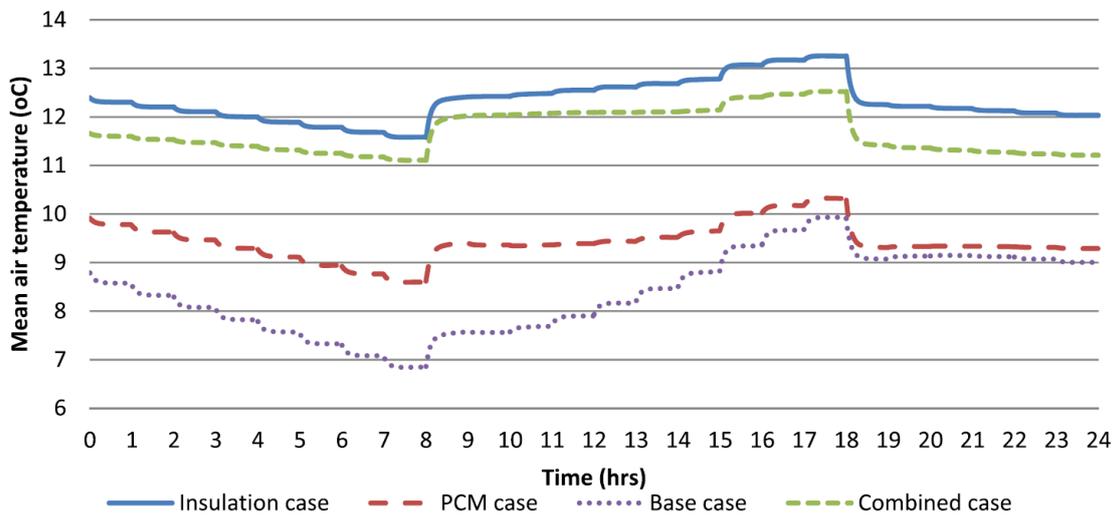


Figura 5.11: Andamento temperatura dell'aria interna il 3 febbraio

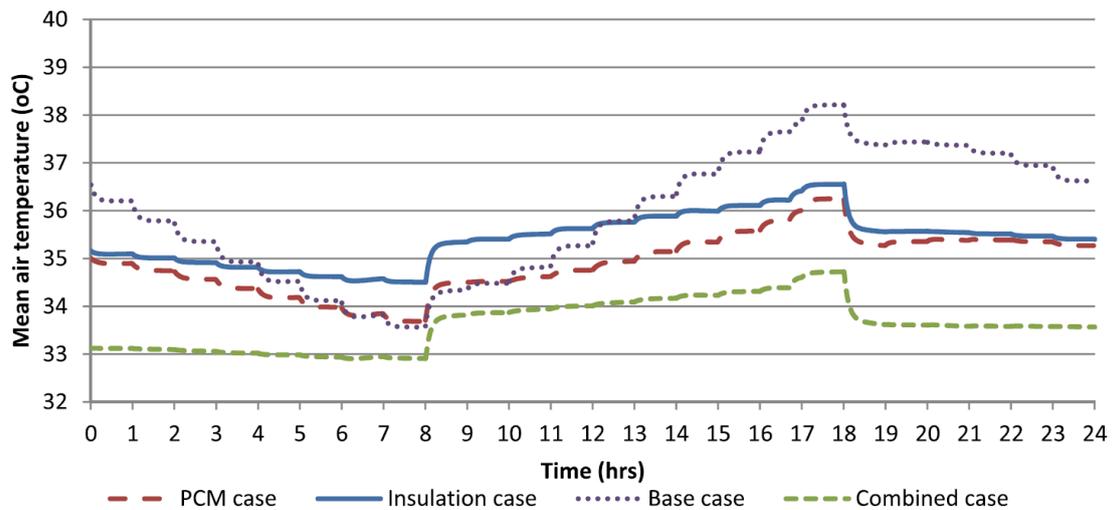


Figura 5.12: Andamento temperatura dell'aria interna il 26 luglio

I risultati del controllo energetico mostrano come l'ottima posizione del PCM è quando si trova sul lato esterno della parete, quindi applicato tra l'intonaco e il mattone. Questo fatto viene spiegato dagli autori come una conseguenza all'esposizione delle condizioni esterne del PCM, quindi alla differenza di temperatura e alla radiazione. Nella *tabella 5.5* si nota che la percentuale di risparmio raggiunte per il caso ottimale è pari a 28,6% rispetto al caso base. Il caso combinato riportato nella *tabella 5.6* comporta un risparmio maggiore rispetto a tutti gli altri casi, poiché vi è l'azione congiunta dell'isolante e del PCM esterno. Esso porta ad un risparmio del 67,6%, ossia 6% maggiore rispetto al caso con solo isolante.

Nella parte riguardante il controllo della temperatura, con riferimento ai diagrammi delle temperature, il caso con PCM esterno presenta prestazioni superiori in estate rispetto l'inverno, durante il quale non lavora a causa delle basse temperature.

Nel periodo invernale il caso migliore è quello con il solo isolante, seguito dal caso combinato, contrariamente all'estate dove l'ottimo si ha con il caso combinato consentendo una riduzione della temperatura interna di 3-5°C rispetto al caso base.

### **5.7.1 CONFRONTO DEI RISULTATI**

La fase di ricerca e di inserimento dei dati in EnergyPlus è di notevole importanza poiché ne determina i risultati. Nel programma sono stati considerati per ogni materiale i valori dello spessore, della conducibilità, della densità, del calore specifico e i punti caratteristici della curva entalpia-temperatura, come riportato in precedenza nelle *tabelle 5.1 e 5.2*. È importante ricordare che solamente i primi due valori sono stati forniti dall'articolo, mentre le altre proprietà scelte dalla letteratura.

Ponendo a confronto i risultati calcolati con quelli dell'articolo da subito si osservano alcune differenze, dovute principalmente all'insieme della diversità dei dati utilizzati dagli autori come:

- assunzione dei dati riguardanti le proprietà dei materiali;
- utilizzo di un programma diverso da EnergyPlus e delle equazioni di calcoli inserite;
- diversità del file meteo considerato, non essendoci un possibile confronto di un andamento delle temperature esterne è impossibile avere la certezza di curve uguali o simili.

La diversità del file meteo è uno dei fattori più caratterizzanti nei risultati trovati, poiché il materiale a cambiamento di fase tenderà a reagire in modo diverso a seconda dell'oscillazioni giornaliere delle temperature. Il file fornito da EnergyPlus prende come riferimento l'anno 2002, sicuramente non recente ma affidabile ed accurato, essendo un file difficilmente reperibile gratuitamente.

Il confronto dei risultati per la validazione del modello è stato fatto suddividendo il lavoro nelle due parti principali: controllo del fabbisogno energetico e controllo della temperatura.

Nella parte con impianto di riscaldamento e raffrescamento i risultati da osservare sono le percentuali di risparmio. Il caso con solo isolante è simile poiché si discosta del solo 10%,

mentre per i casi con il materiale a cambiamento di fase si hanno differenze nelle percentuali del 10 e del 20%. Queste percentuali, a prima vista potrebbero risultare elevate, ma in realtà sono corrette ed in linea con quelle dell'articolo, ovvero una differenza del 10% non è nulla se si pensa a quante variabili si hanno nella costruzione di un modello.

La seconda parte con impianto spento fornisce i diagrammi delle temperature interne osservati e commentati in precedenza. Gli andamenti da me trovati oscillano in un intervallo di temperature simili con l'articolo.

L'osservazione di sole due giornate comporta un'elevata approssimazione di un andamento tipico annuale, ma è possibile studiare il fatto che introducendo strati nella stratigrafia del muro o ponendo caratteristiche migliori, le temperature hanno la tendenza ad essere più costanti rispetto al caso base il quale tende a seguire maggiormente le temperature esterne.

Il confronto dei risultati ha evidenziato come gli andamenti da me calcolati siano congrui con quelli della tesi di Panayiotou, permettendo quindi la validazione del modello creato in EnergyPlus e la possibilità di uno studio ulteriore variando la temperatura di cambiamento di fase del PCM.

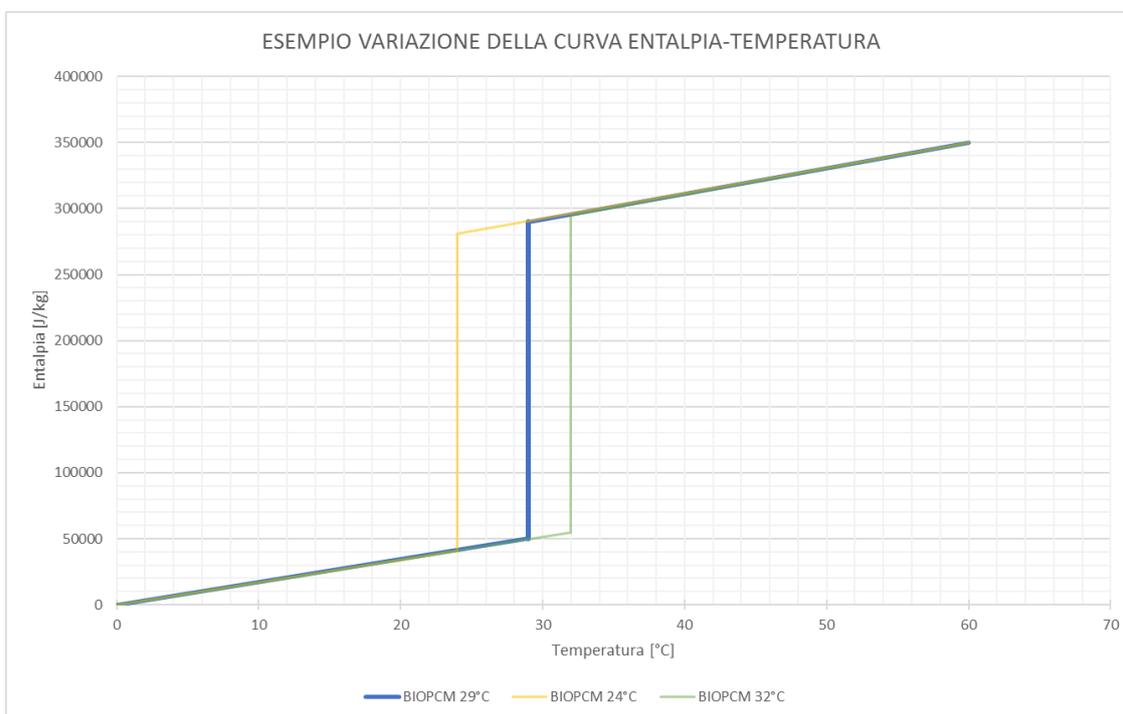
## 6 VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA DI FUSIONE DEL PCM

Una volta effettuata la validazione del modello, si è voluto osservare come la variazione della temperatura di fusione del PCM ne possa cambiare il comportamento.

Prima di iniziare a variare solamente la temperatura di fusione si è considerata la curva entalpia-temperatura del materiale preso di riferimento, ossia a 29°C.

Questa curva caratteristica varia al variare del PCM, ma deve mantenere costanti le pendenze qualora si scegliesse una diversa temperatura di lavoro. Essa è formata da tre parti tra cui un tratto verticale relativo al cambiamento dello stato fisico del materiale e quindi all'assorbimento o rilascio del calore latente, valore che deve rimanere costante poiché proprio di ogni PCM. Quando la temperatura di fusione varia il tratto verticale si sposta e di conseguenza il suo punto d'inizio risulta più basso, se si sposta a sinistra, o più alto, se la fusione è a temperature maggiori. Ad esempio, come mostrato in *figura 6.1* nella quale si riporta la caratteristica dei PCM con fusione a 24, 29 e 32°C, si osserva come la lunghezza del tratto verticale rimanga costante, ma vari il punto d'inizio dello stesso.

Quindi nell'inserimento della caratteristica in EnergyPlus, si sono variati solo i due valori appartenenti al cambiamento di fase, ma non i due estremi dell'intera curva.



*Figura 6.1: Esempio della variazione dei valori della curva per PCM con temperatura di fusione 24, 29 e 32°C.*

## **6.1 RICERCA DELL'OTTIMA POSIZIONE**

Il PCM quando utilizzato in edilizia ha una temperatura di lavoro tra i 20 e 32°C, come descritto in letteratura. Questo intervallo è stato preso come riferimento per la variazione della temperatura di fusione e la ricerca dell'ottima posizione nella stratigrafia della parete è stata fatta calcolando le percentuali di risparmio per tutti e tre i casi, ossia con PCM esterno, al centro e interno.

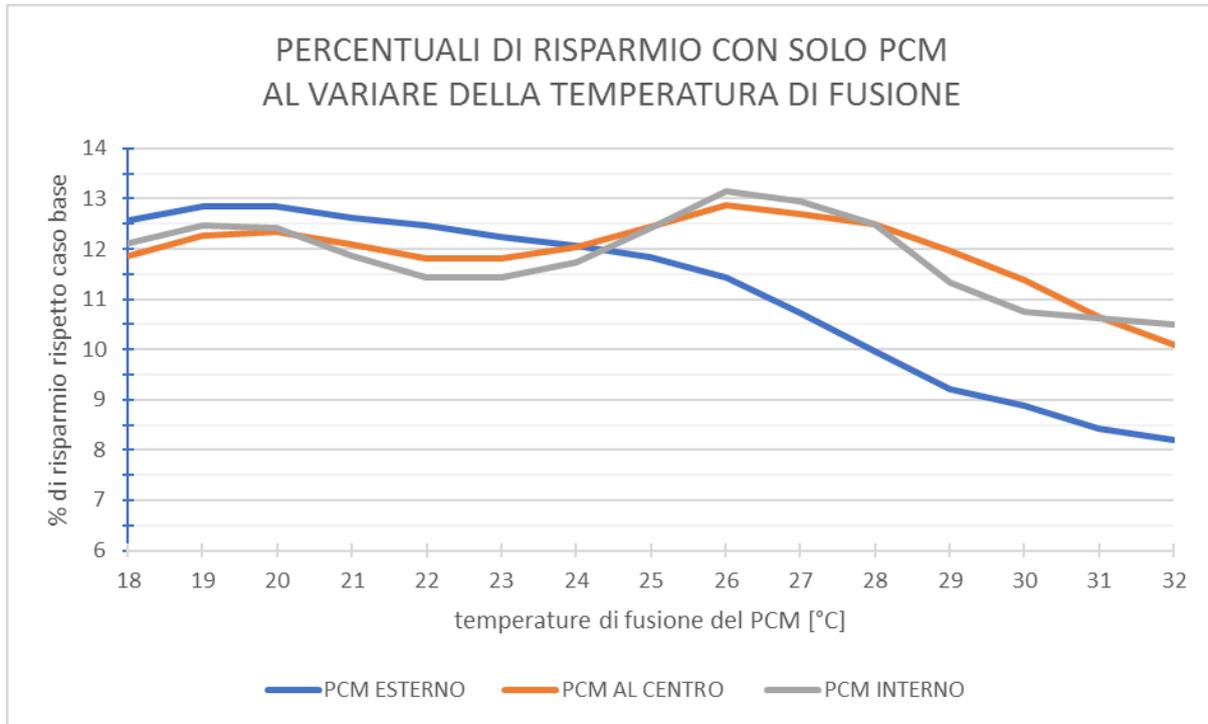
Di seguito viene riportata la *tabella 6.1* con i valori delle richieste energetiche che permettono di mantenere le temperature interne comprese tra 20 e 26°C e le percentuali di risparmio rispetto al caso base, al variare della temperatura di cambiamento di fase. Inoltre, è stato evidenziato per ogni temperatura il posizionamento del PCM che offre maggior risparmio.

Nella fase di analisi dei risultati si è notato come a 20°C la percentuale di risparmio fosse ancora in crescita, così si è voluto ampliare il range di lavoro da 18 a 32°C e osservare il comportamento a 20°C.

TEMP. DI FUSIONE DEL PCM		Q_tot [kWh/m <sup>2</sup> anno]	risparmio	
°C	CASO BASE	197,42		
	CON ISOLANTE	100,08	49,31	%
32	PCM ESTERNO	181,21	8,21	%
	PCM AL CENTRO	177,47	10,11	%
	<b>PCM INTERNO</b>	<b>176,72</b>	<b>10,49</b>	%
31	PCM ESTERNO	180,81	8,41	%
	<b>PCM AL CENTRO</b>	<b>176,41</b>	<b>10,64</b>	%
	PCM INTERNO	176,44	10,63	%
30	PCM ESTERNO	179,91	8,87	%
	<b>PCM AL CENTRO</b>	<b>174,95</b>	<b>11,38</b>	%
	PCM INTERNO	176,18	10,76	%
29	PCM ESTERNO	179,23	9,21	%
	<b>PCM AL CENTRO</b>	<b>173,78</b>	<b>11,97</b>	%
	PCM INTERNO	175,06	11,33	%
28	PCM ESTERNO	177,73	9,97	%
	<b>PCM AL CENTRO</b>	<b>172,76</b>	<b>12,49</b>	%
	<b>PCM INTERNO</b>	<b>172,77</b>	<b>12,49</b>	%
27	PCM ESTERNO	176,25	10,72	%
	PCM AL CENTRO	172,38	12,68	%
	<b>PCM INTERNO</b>	<b>171,84</b>	<b>12,96</b>	%
26	PCM ESTERNO	174,87	11,42	%
	PCM AL CENTRO	172,02	12,87	%
	<b>PCM INTERNO</b>	<b>171,48</b>	<b>13,14</b>	%
25	PCM ESTERNO	174,03	11,85	%
	<b>PCM AL CENTRO</b>	<b>172,83</b>	<b>12,46</b>	%
	PCM INTERNO	172,92	12,41	%
24	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>173,61</b>	<b>12,06</b>	%
	PCM AL CENTRO	173,65	12,04	%
	PCM INTERNO	174,23	11,75	%
23	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>173,27</b>	<b>12,23</b>	%
	PCM AL CENTRO	174,1	11,81	%
	PCM INTERNO	174,83	11,44	%
22	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>172,82</b>	<b>12,46</b>	%
	PCM AL CENTRO	174,11	11,81	%
	PCM INTERNO	174,83	11,44	%
21	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>172,5</b>	<b>12,62</b>	%
	PCM AL CENTRO	173,54	12,10	%
	PCM INTERNO	173,98	11,87	%
20	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>172,04</b>	<b>12,86</b>	%
	PCM AL CENTRO	173,05	12,34	%
	PCM INTERNO	172,92	12,41	%
19	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>172,04</b>	<b>12,86</b>	%
	PCM AL CENTRO	173,2	12,27	%
	PCM INTERNO	172,8	12,47	%
18	<b>PCM ESTERNO</b>	<b>172,61</b>	<b>12,57</b>	%
	PCM AL CENTRO	174,02	11,85	%
	PCM INTERNO	173,49	12,12	%

Tabella 6.1: Fabbisogno energetico e percentuali di risparmio al variare della temperatura di lavoro del PCM

Nella *tabella 6.2* viene riportato il grafico con gli andamenti percentuali dei tre casi studiati descritti nella tabella precedente.



*Figura 6.2: Andamento delle percentuali di risparmio al variare della temperatura di lavoro del PCM e del suo posizionamento*

Dalla *figura 6.2* si nota come i casi con posizionamento al centro e all'interno siano quelli più performanti permettendo di avere due massimi uno relativo intorno a 19 e 20°C ed uno assoluto intorno a 26°C. Mentre il PCM lato esterno lavora bene solamente a basse temperature 19-20°C, spostando quindi il suo utilizzo ottimale nei periodi di inizio primavera e autunno. Ciò si giustifica dal fatto che in estate con temperature esterne di 35°C, la superficie della parete esterna può raggiungere anche i 50°C, ossia temperature molto maggiori rispetto a quelle di lavoro, poiché fortemente condizionata dalla radiazione solare.

Gli altri due casi presentano due massimi di risparmio principalmente dovuti all'influenza della temperatura interna mantenuta tra i due valori ottimali mediante un sistema di riscaldamento e raffrescamento.

## **6.2 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA INTERNA**

In questa seconda parte si sono voluti studiare gli andamenti delle temperature nei quattro casi studio: base, isolante, PCM nella posizione ottimale e combinato.

I grafici di seguito riportati sono riguardanti i casi più interessanti ossia con temperature di cambiamento di fase di:

- 20°C con posizionamento ottimale lato esterno;
- 26°C con PCM lato interno;
- 29°C non è un punto di massimo risparmio ma si è voluto studiare poiché riportato nell'articolo preso di riferimento;
- 32°C scelto per osservare il comportamento del PCM con temperature maggiori di quelle viste.

I grafici annuali evidenziano andamenti di temperatura differenti a seconda della temperatura di lavoro del PCM scelta. Principalmente vi sono due andamenti interessanti della curva per il caso combinato: uno costante ed uno coincidente al caso con solo isolamento.

### STRATO DI PCM LAVORA IN MODO ATTIVO

L'obiettivo principale di una materiale a cambiamento di fase è quello di mantenere la temperatura di un ambiente costante quando viene raggiunta la sua temperatura di lavoro e quindi assorbire il calore latente che altrimenti surriscalderebbe la stanza.

Come si vedrà dalle figure riportate in seguito, si può notare come l'andamento tendente ad un valore costante appartenga al caso combinato, e ciò dimostra l'efficacia di utilizzare entrambi i materiali: PCM ed isolante.

È importante sottolineare il fatto che il caso da osservare inizialmente è quello combinato per poi confrontarlo con i due casi, solo isolante e solo PCM, e comprendere al meglio il comportamento di quest'ultimo.

- PCM 20

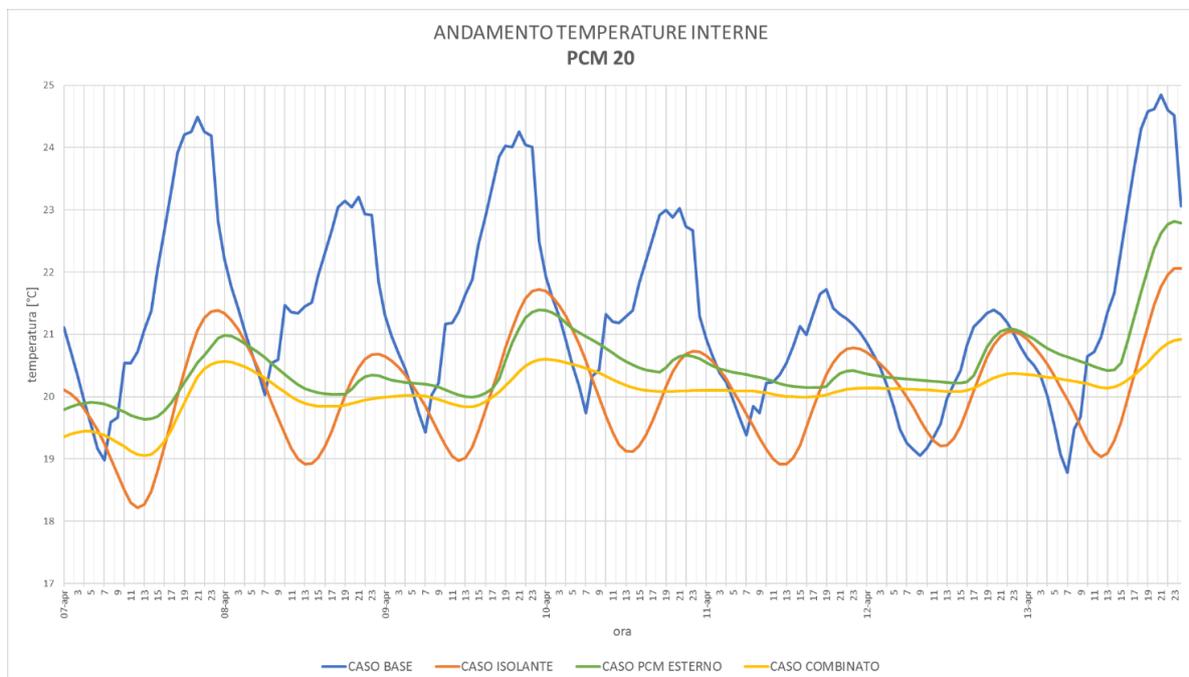


Figura 6.3: Andamento temperature interne con PCM 20 nel periodo dal 7 al 13 aprile

Utilizzare un PCM con temperatura di fusione di 20°C comporta un andamento poco lineare, sono presenti solo alcuni giorni durante la seconda e terza settimana nel mese di aprile nei

quali il caso combinato fornisce un andamento circa costante, a differenza dei casi successivi ad altre temperature.

Si può comunque notare in *figura 6.3*, che riporta l'andamento della seconda settimana di aprile, come nell'intorno dei 20°C il caso combinato segua molto il caso con solo PCM per poi attenuarsi dall'utilizzo dell'isolante.

- PCM 26

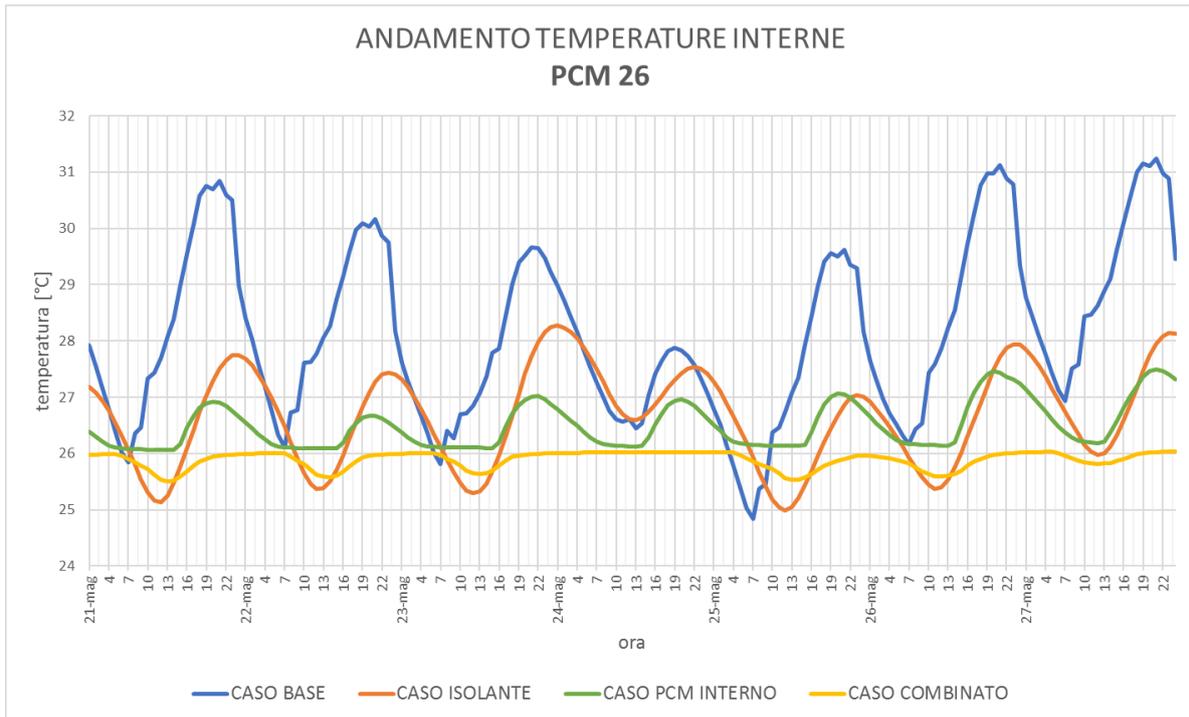


Figura 6.4: Andamento temperature interne con PCM 26 nel periodo dal 21 al 27 maggio

Ponendo le temperature di lavoro del materiale a 26°C, esso è caratterizzato da una curva costante per il caso combinato che permette di bloccare la temperatura interna proprio a quella di fusione scelta e un abbassamento di massimo mezzo grado relativo alle temperature minime raggiunge con il solo isolante. Inoltre, è possibile osservare come il solo PCM mantenga la temperatura all'interno della stanza tra i 26 e 27°C quando lavora, a differenza dei 30°C raggiunti utilizzando solo la muratura semplice.

Nella *figura 6.4* viene riportato l'andamento dell'ultima settimana di maggio, ma andamenti uguali si osservano dal 15 di maggio alla prima settimana di giugno e nella prima settimana di settembre, grazie alla diminuzione delle temperature dopo la stagione estiva.

- PCM 29

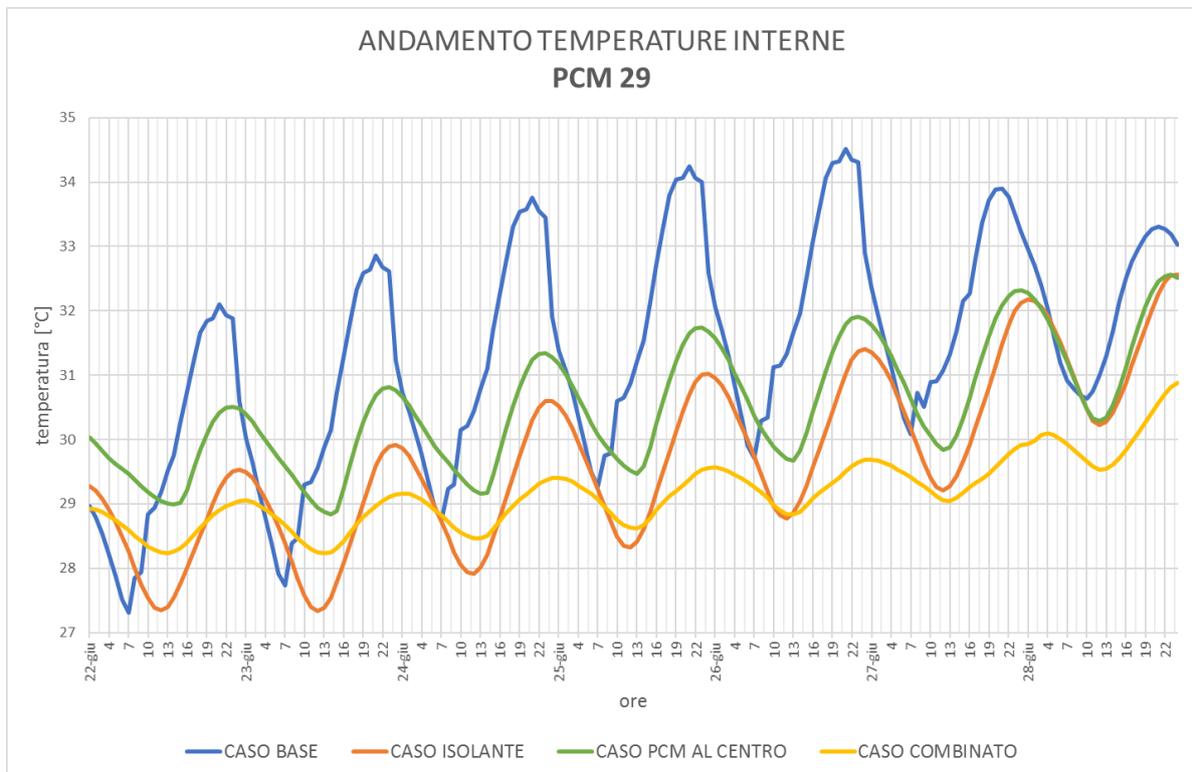


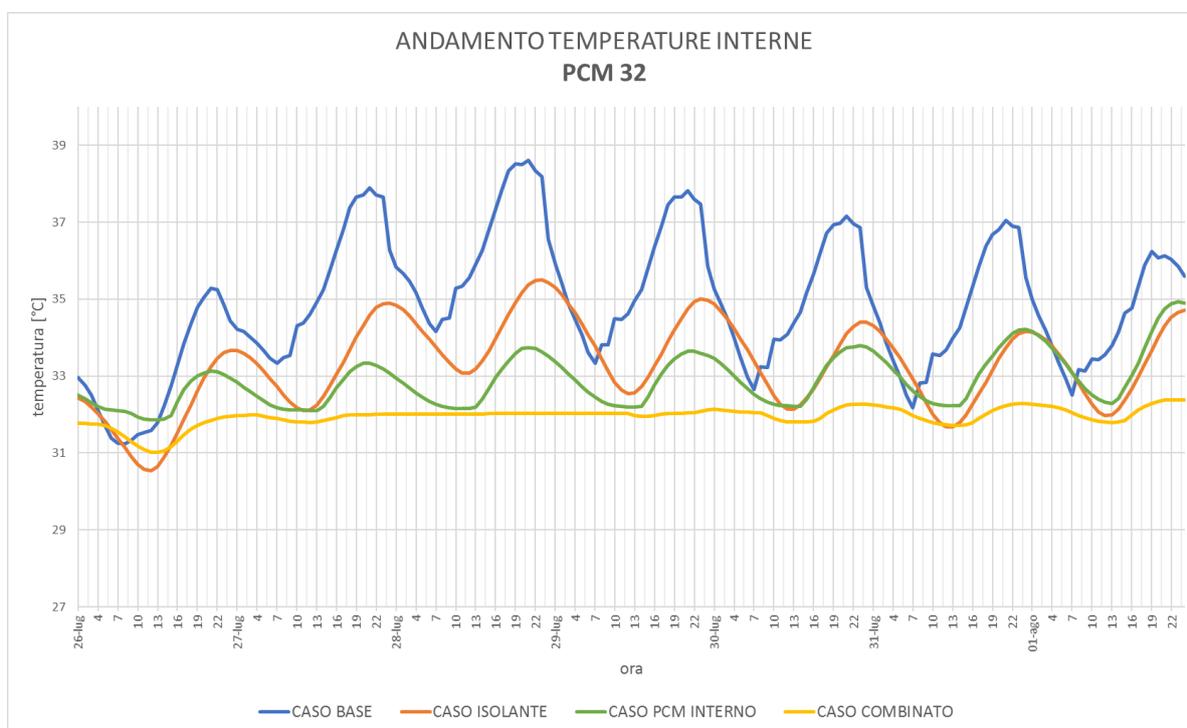
Figura 6.5: Andamento temperature interne con PCM 29 nel periodo dal 22 al 28 giugno

La scelta di una temperatura di lavoro del materiale a cambiamento di fase di 29°C è quella meno ottimale rispetto le altre scelte per lo studio, come ci si poteva aspettare osservando il grafico delle percentuali di risparmio in figura 6.2.

Esaminando l'andamento annuale delle temperature si nota che nessun giorno presenta una tendenza lineare.

In figura 6.5 è stata riportata per completezza l'ultima settimana di giugno quando le temperature interne per il caso combinato hanno un valore nell'intorno dei 29°C e si nota come questa stratigrafia permetta comunque di ridurre le temperature interne a differenza degli altri tre casi.

- PCM 32



*Figura 6.6: Andamento temperature interne con PCM 32 nel periodo dal 26 luglio al 01 agosto*

In quest'ultimo caso, la combinazione isolante e PCM fornisce un andamento costante per un periodo maggiore rispetto i casi visti, formato dall'ultima settimana di luglio, dalla prima, terza e quarta settimana di agosto e dalle prime due di settembre. In *figura 6.6* è stata riportata come esempio l'ultima settimana di luglio poiché lo stesso andamento si presenta negli altri periodi elencati.

La linearità della curva che identifica il caso combinato è dovuta al clima di Cipro che ha estati molto calde permettendo ad un PCM con un'elevata temperatura di lavoro di assorbire il calore per un tempo maggiore.

### **STRATO DI PCM LAVORA IN MODO PASSIVO**

Nei periodi in cui le temperature non permettono l'utilizzo attivo dello strato di PCM, si nota come il caso combinato coincida quasi perfettamente con l'andamento dell'isolante. Vi è una piccola differenza dovuta soprattutto al fatto che introducendo uno strato ulteriore, in questo caso PCM, esso agisce sulla trasmittanza con un determinato valore di conducibilità.

Nelle figure successive è stato riportato il PCM con temperatura di fusione di 26°C, scelta poiché appartiene al caso ottimale e si osserva solo un contributo passivo da parte di questo materiale, non essendo presenti le condizioni utili per un suo impiego.

Le due settimane rappresentate sono state scelte per studiare il comportamento dei quattro casi quando le temperature di lavoro sono minori (*figura 6.7*) e maggiori (*figura 6.8*) del punto di lavoro del PCM.

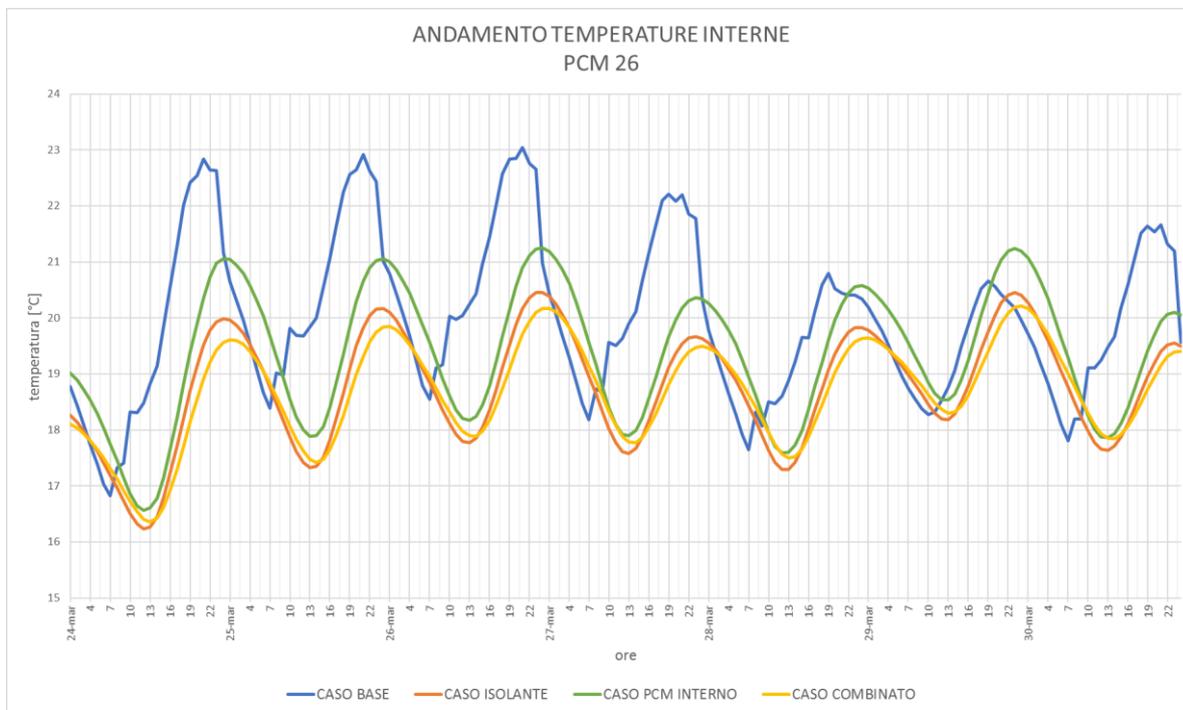


Figura 6.7: Andamento delle temperature interne con PCM 26 nell'ultima settimana di marzo

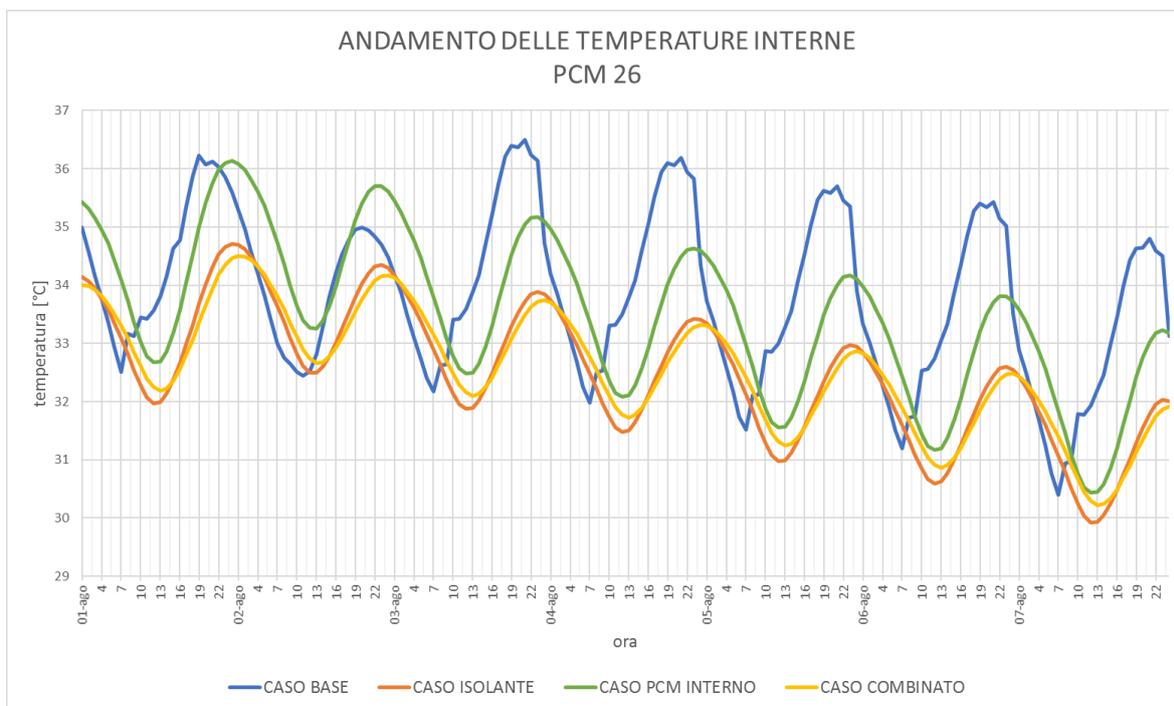


Figura 6.8: Andamento delle temperature interne con PCM 26 nella prima settimana di agosto

In entrambi i casi visti il PCM oltre a ridurre i consumi energetici per il raffrescamento e riscaldamento, visti nel paragrafo 6.1, permette di incrementare il comfort termico qualora la temperatura di fusione fosse scelta in modo adeguato.

Osservando i grafici riportati si nota come ad esempio l'utilizzo combinato dell'isolante e del PCM con cambiamento di fase a 26°C, in primavera e autunno consenta per un determinato tempo di mantenere una temperatura interna a 26°C, cioè pari alla temperatura di benessere estiva. In inverno quando il materiale partecipa in modo passivo come ulteriore strato, esso permette un minor consumo nel riscaldamento per portare l'ambiente interno alla temperatura coerente con il comfort delle persone, ossia 20°C.

## 7 CONCLUSIONI

Questa tesi ha voluto introdurre una nuova tipologia di accumulo nel settore edilizio mediante i materiali a cambiamento di fase, anche detti PCM. Grazie a questi nuovi isolanti è possibile, non solo sfruttare il calore sensibile, ma anche quello latente attraverso il passaggio di stato. Essi rappresentano una nuova frontiera per la costruzione di involucri edilizi sempre più efficienti che permettono di ridurre il fabbisogno termico e favorire il comfort negli ambienti.

L'articolo di Panayiotou, scelto come riferimento, ha permesso la validazione del modello creato in EnergyPlus.

I dati forniti dagli autori hanno permesso la validazione dell'articolo, altrimenti impossibile. Infatti, variare anche di poco alcuni valori, come conducibilità o calore specifico, comporta una variazione delle percentuali di risparmio elevata, portando alla possibilità di valori anche negativi, quindi ad una spesa maggiore rispetto al caso base.

Questo materiale a cambiamento di fase accumula un'elevata quantità di calore latente solo ad una specifica temperatura scelta all'interno del suo intervallo di lavoro. Quando le condizioni climatiche esterne non consentono di raggiungere l'intorno del punto di fusione del PCM, questo si comporta come uno scarso materiale isolante. Da ciò deriva l'importanza del materiale di possedere buone proprietà di conducibilità, densità e calore specifico che caratterizzano il suo comportamento nella maggior parte dell'anno.

L'utilizzo combinato del PCM e dell'isolante è il caso favorito rispetto gli altri tre poiché permette di ridurre le oscillazioni di temperatura interna e i consumi: il PCM agisce quando le temperature lo consentono aiutando il lavoro svolto in modo continuativo dall'isolante.

La validazione è uno dei punti principali per la creazione del modello poiché permette di affermare che il lavoro svolto è corretto con la possibilità di uno studio ulteriore dato dalla variazione dei parametri scelti.

Solitamente si ha la tendenza a cambiare i valori di un solo parametro alla volta in maniera tale da rendere più facile l'interpretazione dei risultati trovati.

Il parametro scelto per un'ulteriore analisi, data la sua importanza, è stata la temperatura di fusione del materiale che si è scelta da 18 a 32°C.

In questo intervallo è stata osservata quale posizione del PCM, posto all'interno, al centro o all'esterno della muratura, fornisca un risparmio maggiore e le varie percentuali rispetto al caso base. Si è notato come variando questa temperatura non solo varia la posizione ottimale e le percentuali di risparmio, ma anche i periodi di lavoro.

In *figura 6.2* per ogni caso con PCM sono state riportate le curve delle percentuali di risparmio al variare della temperatura di fusione. Si sono osservati due massimi: a 20 e 26°C, rispettivamente con un risparmio di 12,86% e 13,14%.

Con la temperatura di 26°C la posizione ottimale del PCM è lato interno, questo perché il comportamento è maggiormente influenzato dalla temperatura interna impostata per l'impianto di raffrescamento. Mentre l'altro massimo si ottiene ponendo il materiale con una temperatura di 20°C sul lato esterno.

Dai grafici delle temperature riportate nel paragrafo 6.2 si nota la diversità dei periodi nei quali agisce il PCM. Si osserva come i casi con temperature di fusione di 26 e 32°C sono favoriti

poiché permettono per periodi più lunghi di stabilizzare la temperatura interna a quella di lavoro del PCM.

Da questa analisi emerge l'importanza della scelta della temperatura di lavoro e del collocamento dello strato di PCM. Solamente una corretta scelta effettuata mediante uno studio approfondito può migliorare l'efficienza dell'involucro edilizio e il comfort interno.

In un modello vi sono numerosissimi parametri che possono essere modificati, ad esempio lo spessore del PCM inserito nel muro a parità di temperatura di fusione. Sicuramente ci si aspetta un incremento notevole delle prestazioni al suo aumento, ma sarebbe interessante osservare come variano i periodi caratterizzati da temperature interne costanti.

È importante sottolineare, però la ragione per la quale questi materiali vengono studiati con un possibile sviluppo in edilizia. La ricerca è indirizzata verso lo sviluppo di materiali sempre più performanti che permettono di assorbire un'elevata quantità di calore in piccoli spessori.

Tutto il modello è basato sull'utilizzo del file meteo di Cipro e questo risulta un interessante parametro da sostituire con uno tipico del nord Italia.

Si deve ricordare, come accennato nel capitolo 5, che la stratigrafia scelta da Panayiotou è quella tipica di Cipro ed è stata individuata dopo ricerche approfondite su quel territorio. Questo fatto ha portato alla conclusione che anche variando il file meteo, si sarebbe eseguita un'analisi approssimativa del comportamento degli edifici a causa della struttura molto diversa.

I risultati però possono essere considerati per il sud Italia che ha un clima simile a Cipro quindi vi è la possibilità di utilizzare i risultati trovati e rapportarli al nostro Paese.

L'Italia è caratterizzata da molte regioni climatiche è quindi impossibile l'utilizzo di un unico modello valido su tutto il territorio. Così facendo i valori trovati per Cipro possono essere presi in modo indicativo per un possibile risparmio energetico e un miglioramento del benessere delle persone negli ambienti interni della zona mediterranea.

Si è potuto constatare che in genere utilizzare una temperatura di fusione corrispondente ad una delle due temperature di comfort a seconda del periodo scelto per l'utilizzo del PCM permette di ridurre i consumi energetici portando un risparmio economico.

Un'attenzione particolare deve essere presente qualora il PCM venisse installato all'esterno, poiché maggiormente soggetto alle intemperie esterne e quindi sottoposto a metodologie di installazione differenti con conseguenti costi aggiuntivi.

La tecnologia con materiale a cambiamento di fase utilizzata come isolante è molto costosa e, anche se ciò non è calcolato nella tesi, caratterizzata da tempi di ammortamento del capitale investito troppo elevati tali da non favorirne la diffusione.

Questo fatto però non deve arrestare la ricerca da parte delle aziende nell'incremento delle proprietà del materiale poiché come ogni tecnologia in via di sviluppo, all'inizio sfavorita dai costi, con il passare degli anni permette una sua maggiore diffusione nella quotidianità.

Lo scopo della ricerca in ambito edilizio è quello di scoprire nuove tecnologie e di incrementare il comfort degli ambienti interni.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] P. M. P. e. O. Bramanti, Le tecnologie delle fonti rinnovabili di energia, GRUPPO24ORE, 2012.
- [2] M. M. I. M. A. L. P. D. B. Z. L. F. C. Antoni Gil, «State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1- Concepts, materials and modellization,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n. 1, pp. 31-55, 2010.
- [3] V. T. C. C. D. Atul Sharma, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n. 2, pp. 318-345, 2009.
- [4] F. P. G. C. J. B. D. Fernandes, «Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”,» *Energy*, vol. 39, n. 1, pp. 246-257, 2012.
- [5] I. D. e. M. A. Rosen, Thermal energy storage: system and application, WILEY, 2011.
- [6] «<http://fire-italia.org/sistemi-di-accumulo/>,» [Online].
- [7] S. M. Hasnain, «Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques,» *Energy Convers. Mgmt*, vol. 39, n. 11, pp. 1127-1138, 1998.
- [8] «[https://www.youtube.com/watch?v=\\_2go6alS5rQ](https://www.youtube.com/watch?v=_2go6alS5rQ),» [Online].
- [9] «[http://tesi.cab.unipd.it/43273/1/Rubin\\_Alessandro\\_L'ACCUMULO\\_DELL'ENERGIA\\_TERMICA\\_STATO\\_DELL'ARTE\\_E\\_STUDIO\\_DI\\_SISTEMI\\_E\\_SOLUZIONI\\_PER\\_LA\\_.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/43273/1/Rubin_Alessandro_L'ACCUMULO_DELL'ENERGIA_TERMICA_STATO_DELL'ARTE_E_STUDIO_DI_SISTEMI_E_SOLUZIONI_PER_LA_.pdf),» [Online].
- [10] «<http://www.ingegneri.info/varie/accumulo-di-energia-termica-la-nuova-frontiera-dei-materiali-innovativi/>,» [Online].
- [11] L. F. Alvaro de Gracia, «Phase change materials and thermal energy storage for buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 103, pp. 414-419, 2015.
- [12] «[http://www.architettura.unina2.it/docenti/areaprivata/3/documenti/22\\_03\\_2010%20solare%20passivo%20e%20attivo.pdf](http://www.architettura.unina2.it/docenti/areaprivata/3/documenti/22_03_2010%20solare%20passivo%20e%20attivo.pdf),» [Online].

- [13] «<http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/Materiali-2/dispense/sistpass.pdf>,» [Online].
- [14] G. O. N. A. Domenico Mazzeo, «A Method for Thermal Dimensioning and for Energy Behavior Evaluation of a Building Envelope PCM Layer by Using the Characteristic Days,» *Energies*, vol. 10, n. 5, pp. 1-19, 2017.
- [15] L. Ferrari, «<http://www.lucaferrari.info/wp-content/uploads/2017/02/l-materiali-a-cambiamento-di-fase-RCI9nov16.pdf>,» [Online].
- [16] M. S. G. C. Giovanni Riva, «[http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2013/rds-par2013-117.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/edifici-pa/2013/rds-par2013-117.pdf),».
- [17] «<https://www.youtube.com/watch?v=MPfno0Y1Bpg>,» [Online].
- [18] E. Donciglio, «<https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/altri/materiali-cambiamento-fase-involucro-737/>,» [Online].
- [19] «[http://tesi.cab.unipd.it/50305/1/Tesi\\_Francesco\\_Grigolato.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/50305/1/Tesi_Francesco_Grigolato.pdf),» [Online].
- [20] F.D'Annibale, G.Z., C.M., F.S., «[http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/climatizzazione-rinnovabili/2013/rds-par2013-156.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/climatizzazione-rinnovabili/2013/rds-par2013-156.pdf),» [Online].
- [21] M. K. S. E. I. G. Ashley Bland, «PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development,» *buildings*, vol. 7, n. 3, pp. 1-18, 2017.
- [22] «[https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Segregazione\\_\(chimica\)&oldid=85142497](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Segregazione_(chimica)&oldid=85142497),» [Online].
- [23] G. Z. K. L. Q. Z. H. D. Jinping Zhang, «Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook,» *Building and Environment*, vol. 42, n. 6, pp. 2197-2209, 2007.
- [24] «<https://architettura.unige.it/did/I2/architettura/quarto0506/progettbioclimatica/matdid/25.pdf>,» [Online].
- [25] I. Scaramella, «<http://www.ingegneri.info/news/edilizia/materiali-a-cambiamento-di-fase-in-edilizia-principi-e-applicazioni/>,» [Online].
- [26] «[http://www.fedoa.unina.it/3137/1/rossi\\_monica\\_tecnologia.pdf](http://www.fedoa.unina.it/3137/1/rossi_monica_tecnologia.pdf),» [Online].

- [27] B. Bartoli, «<http://www.architetto.info/news/progettazione/guida-ai-pcm-i-materiali-a-cambiamento-di-fase/>,» [Online].
- [28] A. U. Casalena, «<http://www.mygreenbuildings.org/2014/12/14/materiali-a-cambiamento-di-fase-e-involucro-edilizio.html>,» [Online].
- [29] D. N. Ulrike Koster, «[www.casaportale.com/public/uploads/DuPont\\_Energain.pdf](http://www.casaportale.com/public/uploads/DuPont_Energain.pdf),» [Online].
- [30] «[https://www.eurotherm.info/it/guida\\_al\\_comfort/comfort\\_termico\\_igrometrico](https://www.eurotherm.info/it/guida_al_comfort/comfort_termico_igrometrico),» [Online].
- [31] «<http://www.ingegneri.info/news/sicurezza/comportamento-fuoco-materiali-costruzione-guida-pvc/>,» [Online].
- [32] S. A. K. S. A. T. G. P. Panayiotou, «Evaluation of the application of Phase Change Materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region,» *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 24-32, 2016.



## ***RINGRAZIAMENTI***

Vorrei ringraziare innanzitutto la professoressa Anna Stoppato, mia relatrice, per avermi proposto un argomento così interessante ed innovativo e per avermi aiutato nella creazione di questa tesi fornendomi sempre nuovi spunti e consigli in tutto il periodo di stesura.

Un grazie speciale va ai miei genitori che mi hanno dato la possibilità di intraprendere questo percorso, non solo di studio, ma di vita, per sostenermi ogni giorno con i loro incoraggiamenti e per la fiducia che ripongono in me.

Al mio fratellino Luca ho dedicato questa tesi, un po' per scommessa, ma per tanto amore.

Un Grazie a Giuliano per avermi confortato nei momenti bui e per esserci sempre, ma soprattutto per le risate e le meritate giornate di relax.

Il percorso di studi non è fatto solo di libri, esami e voti, ma anche dall'opportunità di conoscere nuove persone e stringere amicizie che durano nel tempo. Vi sono tanti nomi che potrei scrivere ma mi limiterò solo a tre ragazze, molto diverse tra loro ma accomunate dalla semplicità e voglia di sorridere: Veronica, Valentina e Gloria. Grazie ragazze!

Infine ringrazio tutte le persone che in qualche modo mi sono state vicine e con le quale ho condiviso una parte della mia vita.