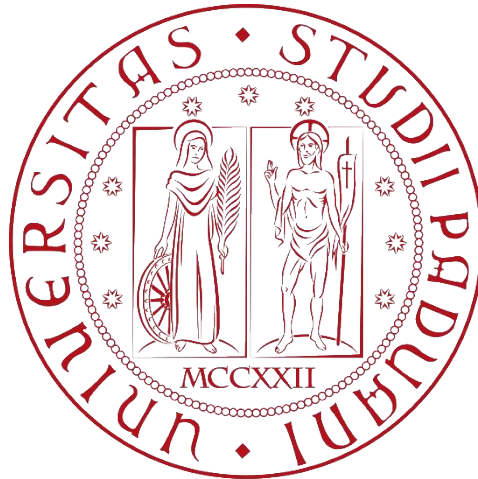


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di laurea in Ingegneria Gestionale



Tesi di laurea triennale

STUDIO SPERIMENTALE DI UN ACCUMULO DI CALORE LATENTE A PCM A BASSA TEMPERATURA AL VARIARE DELLE CONDIZIONI OPERATIVE

Relatore: Prof.ssa Righetti Giulia

Studente: Basso Lorenzo

Matricola: 1223289

Anno accademico 2021/2022

Alla mia famiglia.

Alla casualità.

Indice

1. Introduzione.....	6
2. Descrizione impianto.....	11
3. Sperimentazione.....	20
a. Fase di carica.....	20
b. Fase di scarica.....	22
c. Commento.....	23
d. Analisi dell'andamento della temperatura in funzione della posizione delle termocoppie ...	24
4. Sperimentazioni successive.....	29
a. Analisi dell'effetto della portata.....	29
b. Analisi dell'effetto della temperatura dell'acqua in ingresso durante la scarica.....	31
5. Conclusioni.....	33
6. Fonti bibliografiche.....	34

Introduzione

L'energia è una componente fondamentale dell'odierna civiltà umana, ha infatti coperto un ruolo fondamentale nella crescita e nello sviluppo della società fin dai tempi antichi.

Dalla prima Rivoluzione Industriale la domanda di energia è aumentata enormemente e sono state utilizzate varie tecnologie e materie prime per produrla, a partire dal carbone fino ad arrivare alle fonti rinnovabili che stanno prendendo piede negli ultimi anni.

Oggi, la maggior parte della produzione di energia proviene dai combustibili fossili: carbone, gas naturale e petrolio, i quali causano l'emissione di enormi quantità di anidride atmosferica nell'atmosfera e il conseguente innalzamento della temperatura media dovuto all'effetto serra.

Secondo British Petroleum la domanda di energia aumenterà di almeno il 40% fra il 2010 e il 2030.

Una soluzione per ridurre le emissioni di CO₂ sono le fonti rinnovabili: fotovoltaico, solare termico, eolico, idroelettrico, ecc.

Concentrandosi sulle fonti solari ed eoliche, uno dei principali svantaggi è quello di essere discontinue: il Sole ad esempio, in quasi tutti i Paesi del mondo, è presente per un tempo limitato durante la giornata (alternanza fra il dì e la notte) e l'intensità della variazione solare varia in base alla stagione.

Servono quindi delle tecnologie per immagazzinare l'energia quando è disponibile, per poterla poi utilizzare anche quando l'approvvigionamento non è possibile.

Di tutta la domanda di energia, dal 20% al 40% è consumata da edifici in Paesi sviluppati (Javadi et al., 2019) [1] e uno degli scopi è il riscaldamento di questi.

Per immagazzinare l'energia termica ci possono essere varie soluzioni (Chaturvedi et al., 2020) [2]. Il primo consiste nella conservazione del calore sensibile. In questo caso il calore viene fornito a un materiale (solitamente fluido), il quale risponde con un aumento della sua temperatura.

L'energia assorbita sarà uguale a:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT$$

Dove:

T_i = temperatura iniziale;

T_f = temperatura finale.

Un secondo metodo è l'immagazzinamento termo-chimico, dove il calore viene scambiato con un materiale di stoccaggio mediante reazioni termo-chimiche.

La conservazione del calore latente rappresenta l'ultima possibilità e si basa sul calore assorbito e rilasciato da una sostanza in cambiamento fase.

Queste sostanze sono dette Phase Change Materials (PCM, Materiali in cambiamento di fase) che, integrate nel processo tecnologico, vengono usate per assorbire calore latente (fase di carica) e rilasciarlo (fase di scarica) modificando la propria fase.

Il tipo di cambiamento di fase fornisce una prima classificazione dei PCM:

- Solido-Solido;
- Liquido-Gas;
- Solido-Gas;
- Solido-Liquido.

Nel caso dei PCM con cambiamento di fase solido-liquido, essi possono essere classificati in organici (acidi grassi, paraffina), inorganici (metalli, sali idrati) e compositi.

L'energia assorbita dai PCM S-L sarà uguale a:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + mL + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT$$

dove:

T_i = temperatura iniziale;

T_f = temperatura finale;

T_m = temperatura di fusione;

L = calore latente di fusione.

Come è possibile notare dall'equazione, ci sono due componenti di calore sensibile assorbito, uno precedente e uno successivo al cambiamento di fase S-L.

Un'ulteriore classificazione dei PCM può essere basata sulla temperatura di cambiamento di fase e la loro relativa applicazione:

- In bassa temperatura per la refrigerazione ($t < 20^{\circ}\text{C}$);
- In medio-bassa per climatizzazione domestica, acqua calda sanitaria, solare termico, controllo termico di componenti elettronici ($20 < t < 80^{\circ}\text{C}$);
- In media temperatura per recupero di calore industriale, concentratori solari, ORC a bassa temperatura ($80 < t < 200^{\circ}\text{C}$);
- In alta temperatura per ORC e impianti di produzione dell'energia ($t > 200^{\circ}\text{C}$).

Prima di valutare vantaggi e svantaggi, ecco presentati alcuni problemi dei materiali (Javadi et al. 2019) [1] con alcune delle possibili soluzioni:

- *Segregazione di fase*: è il cambiamento nella composizione del PCM lungo il ciclo termico. Può essere risolto mediante incapsulamento con materiali forti, flessibili, resistenti alla corrosione e termicamente stabili.
- *Conducibilità termica*: un basso valore di questa proprietà comporta un maggior tempo per i processi di carica e scarica del PCM. Per sopperire a questo problema si può aumentare l'area di scambio termico, aumentare la turbolenza del fluido che scambia calore, disperdere particelle con alta conducibilità termica nel PCM oppure si può effettuare l'incapsulamento con un guscio metallico o polimerico.
- *Stabilità del materiale*: intesa come stabilità chimica e termica, un'eventuale instabilità può portare a corrosione e prestazioni inferiori.
- *Interfaccia mobile*: l'interfaccia di separazione solido-liquido si muove durante il cambiamento di fase.
- *Sottoraffreddamento*: significa che il PCM rimane liquido al di sotto della sua temperatura di solidificazione e comporta una diminuzione delle prestazioni di raffreddamento.

Passando ai vantaggi e agli svantaggi dei PCM, un primo e importante vantaggio è che permettono di immagazzinare da 5 a 14 volte più calore rispetto ai sistemi basati sulla conservazione del calore sensibile.

Più in dettaglio nella seguente tabella vengono analizzati i principali vantaggi e svantaggi dei vari tipi di PCM S-L. (Javadi et al. 2019) [1]

PCM	Vantaggi	Svantaggi
Organici	Basso sottoraffreddamento, fusione congrua, compatibile con metalli, no segregazione di fase, chimicamente stabile.	Bassa entalpia di cambiamento di fase, alta espansione volumetrica, bassa conducibilità termica, infiammabili.
Inorganici	Bassa espansione volumetrica, alta conducibilità termica, netto punto di fusione, alto calore latente di fusione, non infiammabili.	Instabilità termica e chimica, corrosibili, fusione non congrua, alto sottoraffreddamento.
Compositi	Alta densità di accumulo termico, netto punto di fusione, cambiamento di fase congruo, no segregazione di fase.	Bassa conducibilità termica, bassa stabilità del ciclo termico, forte odore, costi elevati.

Tabella 1. Vantaggi e svantaggi dei vari tipi di PCM.

Le principali applicazioni dei PCM sono per scopi di riscaldamento e raffreddamento (Javadi et al. 2019) [1], i più importanti sono i seguenti:

- Riscaldamento di acqua e aria mediante pannello solare;
- Distillazione di acqua;
- Elettricità prodotta mediante concentratore solare;
- Raffreddamento e aria condizionata.

Infine, come presentato da Jain et al. [3], ci sono vari metodi per migliorare le prestazioni di un sistema a PCM:

- Aumentare l'area di scambio termico, mediante alette e ulteriori tubi;
- Migliorare la conducibilità termica, mediante l'utilizzo di nanoparticelle, materiali porosi e a matrice metallica oppure tramite incapsulamento;

- Migliorare l'uniformità del processo usando diversi PCM (sistema a cascata). In particolare, questo sistema permette di aumentare la quantità di calore stoccato sfruttando PCM con temperature di fusione diverse.

Descrizione impianto

Obiettivo

Le prove sperimentali servono a misurare e valutare le proprietà del PCM CrodaTherm™ 9.5, che, avendo una temperatura di fusione di 9,7°C, può essere utilizzato in applicazioni che hanno bisogno di un immagazzinamento energetico a bassa temperatura, come ad esempio veicoli pesanti con cella frigorifera.

In particolare, l'obiettivo è valutare e misurare i tempi e l'energia termica di carica e scarica.

Operativamente quindi il PCM solidificherà in seguito all'introduzione di una portata di acqua fredda, dopo aver misurato tempi e differenze di temperatura tra acqua in ingresso e in uscita (da cui possiamo calcolare il calore assorbito dall'acqua) il PCM verrà liquefatto grazie a una nuova portata d'acqua, ora più calda e verranno effettuate le stesse misurazioni.

Componenti dell'impianto

La parte più importante dell'impianto è il PCM. Come detto in precedenza viene utilizzato il CrodaTherm™ 9.5.

Più precisamente, ci sono 188,76 kg di materiale a cambiamento di fase, che in fase liquida risultano con un'altezza di 122 cm.

Qui di seguito sono riportate le caratteristiche principali del materiale, fornite dall'azienda CrodaTherm.

Thermal Properties by three-layer calorimetry (3LC)

Property	Typical Value	Units
Peak melting temperature	9 (48.2)	°C (°F)
Total stored heat, 1°C to 16°C (melting) ¹	220	kJ/kg
Peak crystallisation temperature	9 (48.2)	°C (°F)
Total stored heat, 16°C to 1°C (crystallisation) ¹	216	kJ/kg

¹Heat stored comprises latent heat and sensible heat

3LC is a technique used to assess heat storage properties under conditions that are often closer to those encountered in use. See appendix for more information on the calorimetry techniques used by Croda.

Thermal properties by differential scanning calorimetry (DSC)

Property	Typical Value	Units
Peak melting temperature	9.7 (49.5)	°C (°F)
Latent heat, melting	186	kJ/kg
Peak crystallisation temperature	5.0 (41)	°C (°F)
Latent heat, crystallisation	-186	kJ/kg

DSC scanning rate: 1°C/ minute

DSC is an analytical technique used for the thermal characterisation of phase change materials. Croda applies the peak melting temperature obtained by DSC in the suffix of the CrodaTherm product name. See appendix for more information on the calorimetry techniques used by Croda.

Tabelle 2. e 3. Proprietà termiche del PCM in analisi.

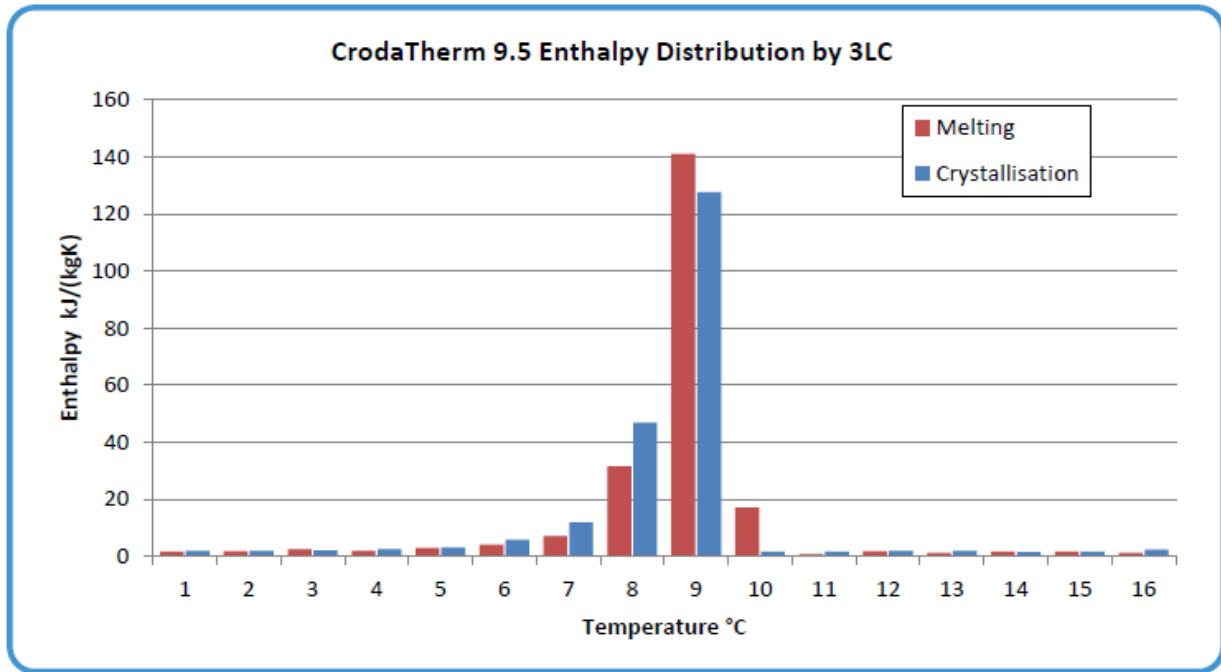


Grafico 1. Distribuzione dell'entalpia del PCM in analisi.

Other Properties

Property	Typical Value	Units
Bio-based content	100	%
Density at 2°C (solid)	963	kg/m ³
Density at 20°C (liquid)	858	kg/m ³
Flash point	195	°C
Specific heat capacity (solid)	2.2	kJ/(kg·°C)
Specific heat capacity (liquid)	2.1	kJ/(kg·°C)
Volume expansion -10°C – 25°C ²	TBC	%
Thermal conductivity (solid)	0.24	W/(m·°C)
Thermal conductivity (liquid)	0.15	W/(m·°C)
Thermal cycles without change in properties ³	TBC	Cycles

² Expansion due to normal decrease in density with increasing temperature, including solid to liquid phase change, between the stated temperature limits.

³Cycles completed at the issue date of this document. Testing is ended at 10,000 cycles.

Tabella 4. Ulteriori proprietà fisiche del PCM in analisi.

Il PCM è contenuto in un container di altezza 136,5 cm e di base 71 cm x 65 cm al cui interno è contenuto il PCM in esame e il sistema di scambiatori di calore.

Il container è isolato termicamente da uno strato di materiale isolante spesso 5,5 cm per ridurre lo

scambio termico con l'esterno.



Figura 1. Il container dell'impianto sperimentale.

Il sistema per lo scambio termico è costituito da 16 scambiatori in alluminio posti in verticale e realizzati con la tecnologia roll-bond, la cui portata di acqua in ingresso e uscita è garantita da due collettori, i quali sono collegati alle tubazioni esterne di entrata e uscita.

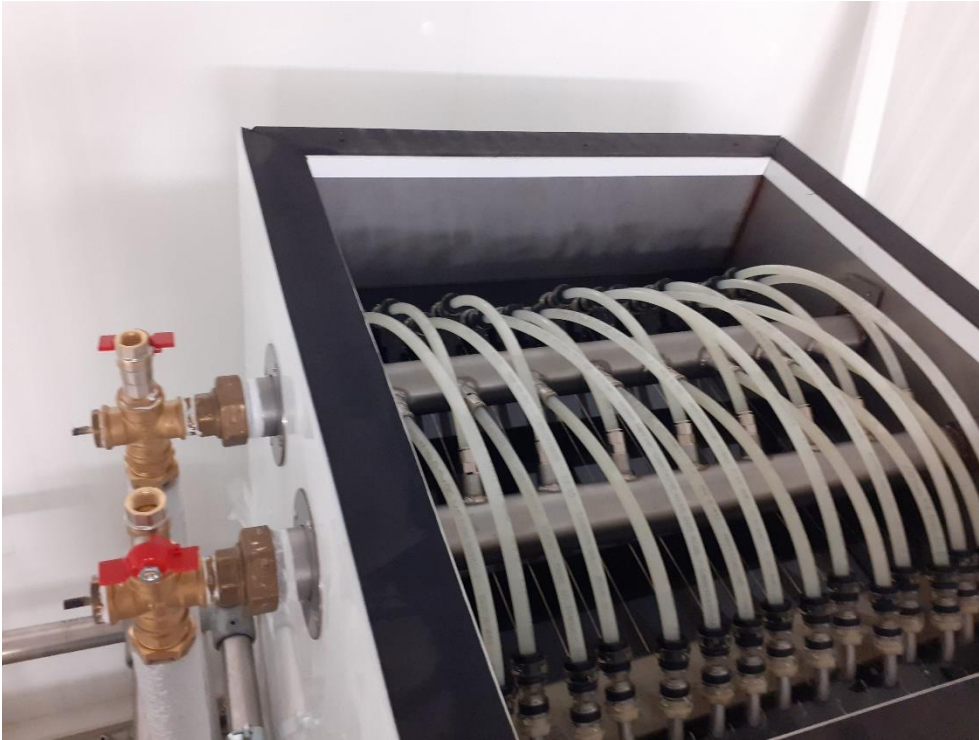


Figura 2. I tubi di ingresso/uscita e i collettori che garantiscono la portata di acqua all'interno dei roll-bond.

La tecnologia roll-bond è basata su due fogli di alluminio legati ad alta pressione lasciando un preciso circuito inchiostro fra i due strati. Poi, mediante aria compressa, viene creato un piccolo canale, al posto del pattern di inchiostro, nel quale scorrerà il fluido di scambio termico.



Figura 3. Configurazione del canale del roll-bond in serie.

In particolare, i fogli roll-bond sono distanziati tra loro di 31 mm e in loro canale interno ha diametro 3 mm.

Per i nostri obiettivi utilizzeremo due tipi di roll-bond con due configurazioni diverse: in parallelo e in serie.

Nel primo caso, la portata di fluido termico entra ed esce dallo stesso roll-bond da e per i collettori. Nel secondo caso invece, la portata in uscita del primo roll-bond è fornita dal collettore, mentre la portata in ingresso dei successivi roll-bond è data da quella in uscita dal precedente roll-bond. Ciò significa che solo l'uscita dall'ultimo roll-bond sarà collegata al collettore.

All'esterno del container, come già citato prima, sono presenti le tubazioni che forniscono acqua al nostro sistema di scambio termico.

Infine, sono presenti degli strumenti di misura: il misuratore di portata, 39 termocoppie interne e le termocoppie esterne.

Il misuratore di portata è posto nel tubo in ingresso al nostro container ed è del tipo magnetico.

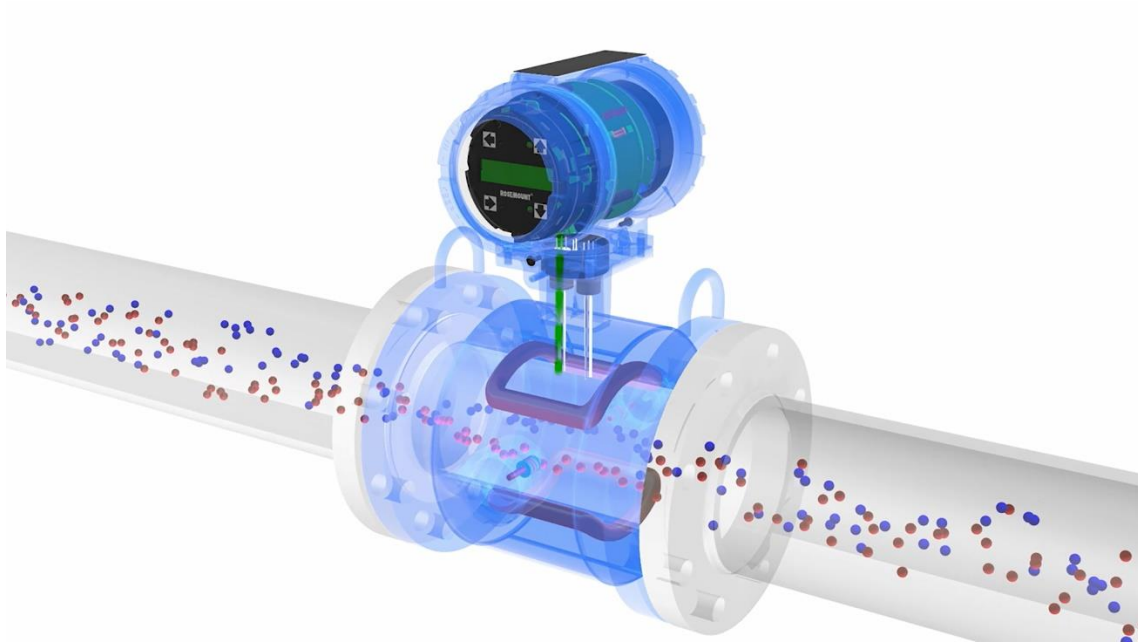


Figura 4. Schema del misuratore di portata magnetico. Immagine presa da emerson.com

Come si può vedere nella figura 4, lo strumento genera un campo magnetico in direzione perpendicolare al fluido di passaggio, se il fluido è conduttore allora agli elettrodi (in contatto con il fluido) risulta una differenza di potenziale, la quale è proporzionale alla velocità del fluido. Quindi, nota la sezione del condotto e la densità del fluido, è possibile ricavare la portata massica con la relazione:

$$\dot{m} = S \cdot \rho \cdot w$$

Dove:

S è la sezione del condotto;

ρ è la densità del fluido

w è la velocità del fluido.



Figura 5. Il misuratore di portata presente nell'impianto.

Le termocoppie permettono di misurare la temperatura del PCM con molta precisione sfruttando l'effetto Seebeck: in un circuito chiuso formato da due conduttori di natura differente e saldati alle estremità in modo da creare un anello, sottoposto a un gradiente di temperatura (le due estremità di giunzione sono esposte a temperature differenti), si instaura una differenza di potenziale proporzionale alle differenze di temperatura.

Quindi, per misurare la temperatura del PCM, un'estremità (stagnata per assicurare il contatto fra i due cavi) è in posta in contatto con lo stesso. L'altra invece è situata nella macchina Ice Point Reference Kaye K-170 (con stabilità di ± 0.005 °C e precisione di ± 0.005 °C) che mantiene la temperatura costante a 0°C (riferimento a zero), in questo modo dopo aver misurato la differenza di potenziale possiamo calcolare la differenza di temperatura e quindi la temperatura del materiale (se il riferimento è zero la differenza di temperatura sarà uguale alla temperatura stessa).

Le termocoppie utilizzate in laboratorio sono costituite da cavi in rame e costantana del tipo T e forniscono le misurazioni di temperatura con un'incertezza di ± 0.1 K.

Un elemento importante da considerare è la distribuzione delle termocoppie all'interno del materiale.

È necessario, infatti, che esse siano posizionate in modo da poter misurare la temperatura in più punti omogeneamente distribuiti secondo uno schema che ci possa dare maggiori informazioni riguardo alla variazione di temperatura nel PCM.

Le termocoppie sono quindi posizionate su undici aste poste verticalmente all'interno del container secondo il seguente schema:

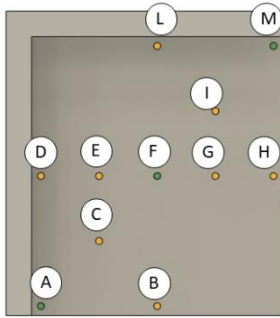


Figura 6. Distribuzione delle aste.

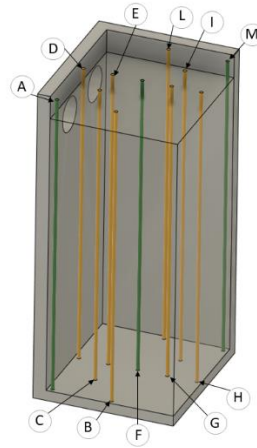


Figura 7. Distribuzione delle aste, vista dall'alto.

Orizzontalmente invece, le termocoppie si distribuiscono in cinque piani:

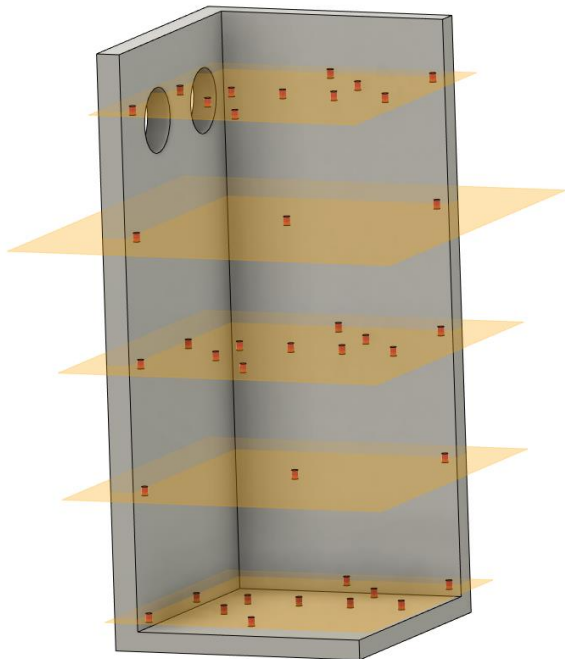


Figura 8. Distribuzione orizzontale delle termocoppie.

Partendo dal basso, il primo, il terzo e il quinto piano presentano undici termocoppie, mentre il secondo e il quarto presentano tre termocoppie.

La figura 9 ci presenta la nomenclatura completa delle termocoppie, utile poi per identificarle nel database.

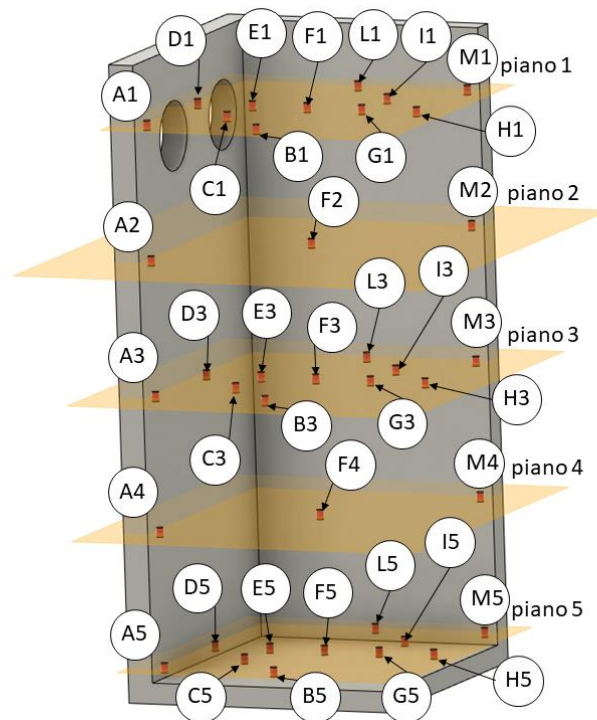


Figura 9. Nomi delle termocoppie.

All'esterno, utilizziamo due termocoppie per misurare la variazione della temperatura tra l'acqua in ingresso e quella in uscita, senza utilizzare quindi il riferimento a zero. Questo permette di ridurre l'incertezza dello strumento. Questo tipo di configurazione delle termocoppie è denominato termopila.

Tutti i nostri strumenti producono dati in formato analogico, i quali vengono raccolti da un acquirente Key Sight 34970A e tramite un multiplexer vengono convertiti in formato digitale in modo da poter essere letti dal computer.

Sperimentazione

Le prove sperimentali avevano, come già detto in precedenza, l'obiettivo di valutare le proprietà del PCM in esame per una sua eventuale applicazione per lo stoccaggio del freddo.

La singola prova si compone di due parti: fase di carica e fase di scarica.

Nella prima il PCM viene raffreddato con una portata di acqua, viene quindi asportato calore dallo stesso.

Nella fase di scarica invece viene fatta scorrere una portata di acqua più calda, la quale quindi cede calore al PCM.

Sono state effettuate varie prove, variando alcune condizioni del sistema. Analizziamo ora i risultati della prima prova.

Fase di carica

La prima parte della sperimentazione consisteva nella carica del PCM, il quale aveva inizialmente una temperatura media di $25,62^{\circ}\text{C}$.

L'obiettivo era asportare calore mediante una portata d'acqua di 40 L/min con una temperatura di ingresso di $6,5^{\circ}\text{C}$.

Nel Grafico 2 sottostante vengono presentati gli andamenti della temperatura di due termocoppie, una posizionata in alto e una posizionata in basso.

In particolare, possiamo notare come lo scambio termico si possa dividere in due parti: scambio di calore sensibile e scambio di calore latente.

Nella prima parte infatti la temperatura cala abbastanza velocemente, aiutata anche da una differenza di temperatura (Dt) elevata.

Dopo poco più di un'ora la temperatura si è stabilizzata intorno ai 9°C , punto di solidificazione, ed è rimasta approssimativamente costante fino alla fine della carica, ciò significa che in questa fase è stato scambiato calore latente di solidificazione.

Questa seconda parte della carica è durata fino a circa 7 h dall'inizio della prova, ciò è dovuto al fatto che il calore latente di solidificazione necessario è maggiore rispetto a quello sensibile precedentemente assorbito (vedi Grafico 3), oltre che al basso Dt tra l'acqua e il PCM, il quale influenza la potenza termica scambiata come è possibile visualizzare nel Grafico 4.

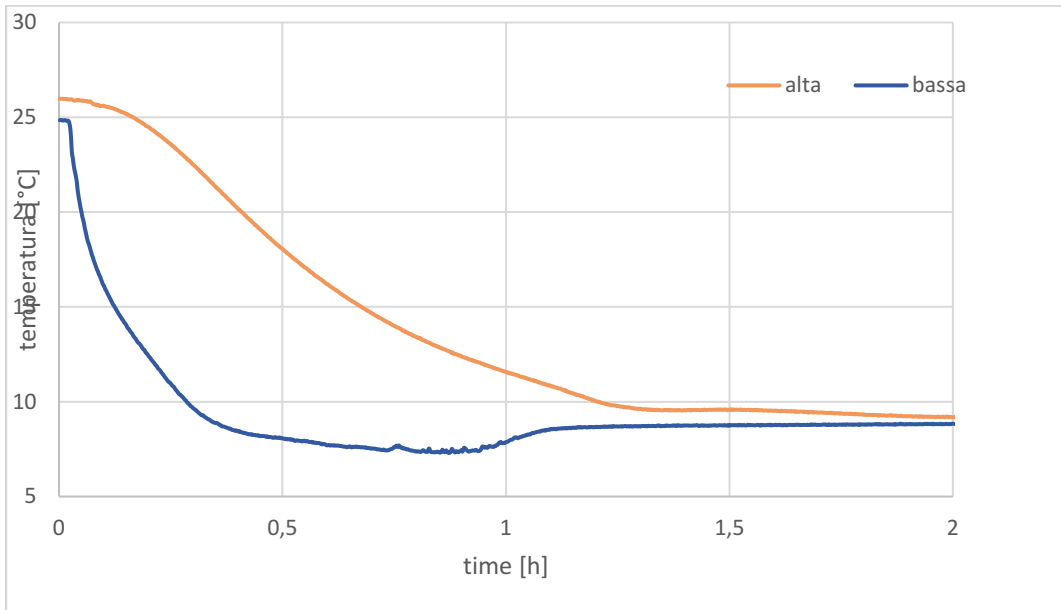


Grafico 2. Andamento della temperatura di due termocoppie nelle prime due ore della prova.

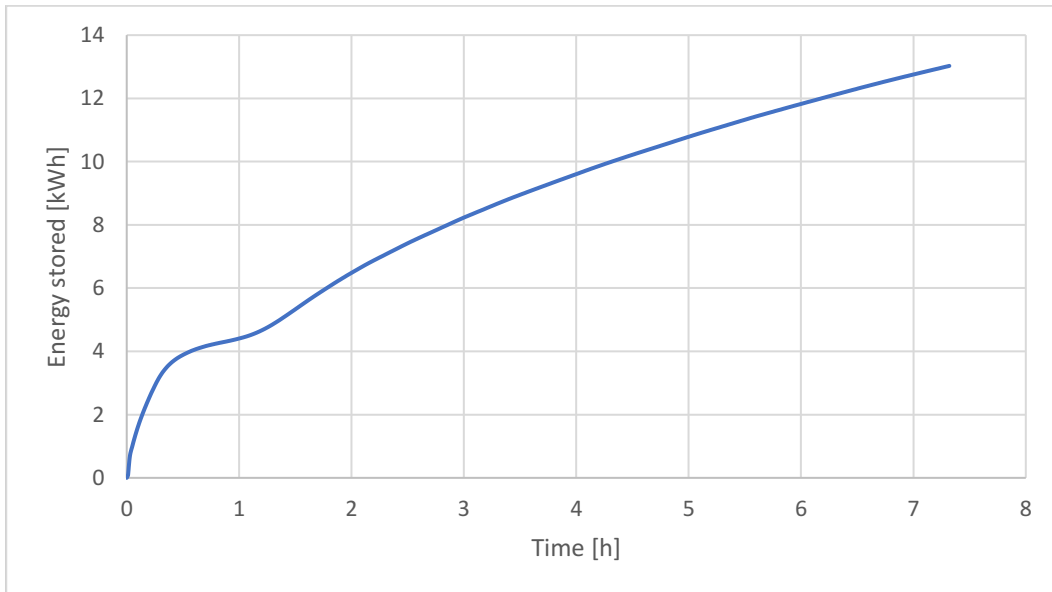


Grafico 3. Andamento dell'energia immagazzinata nel corso del tempo.

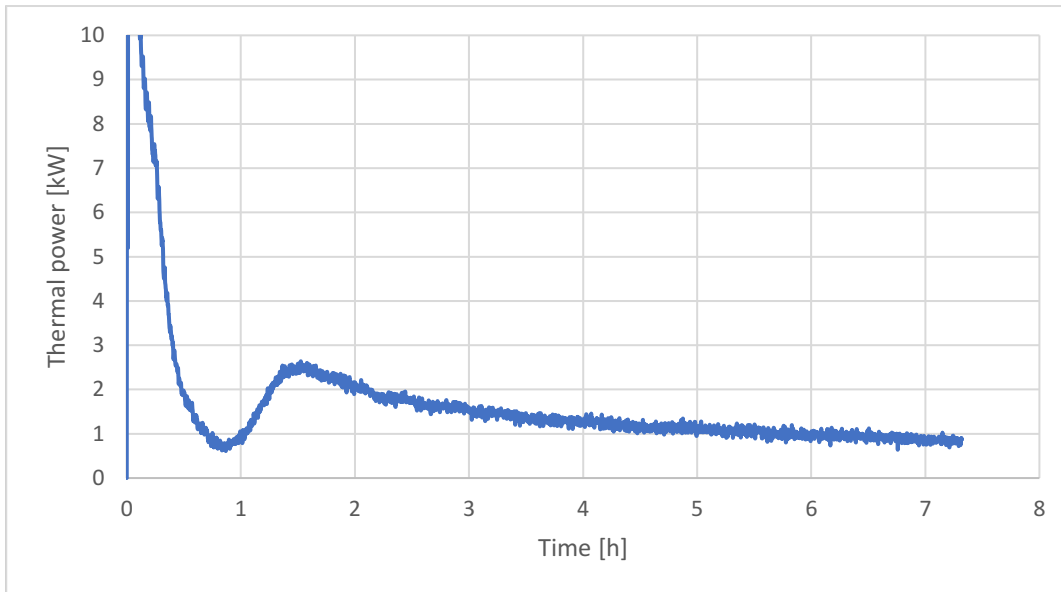


Grafico 4. Andamento della potenza termica scambiata nel corso del tempo.

Dal grafico 3 è possibile notare che nella fase di carica il PCM ha ceduto circa 13 kWh. Visto che il Dt era molto basso, la potenza termica scambiata era bassa; perciò, è stato deciso di passare alla seconda fase.

Fase di scarica

Dopo circa 7h è iniziata la fase di scarica.

Viene ora apportata al sistema una portata di acqua, sempre di 40 L/min, alla temperatura di 14°C.

Come è possibile notare dal Grafico 5 la maggior parte dello scambio termico è avvenuta nelle prime 3h di scarica, dopo le quali il Dt è sensibilmente diminuito e ciò ha comportato un rallentamento dello scambio, proprio perché la maggior parte del materiale si era avvicinato alla temperatura dell'acqua.

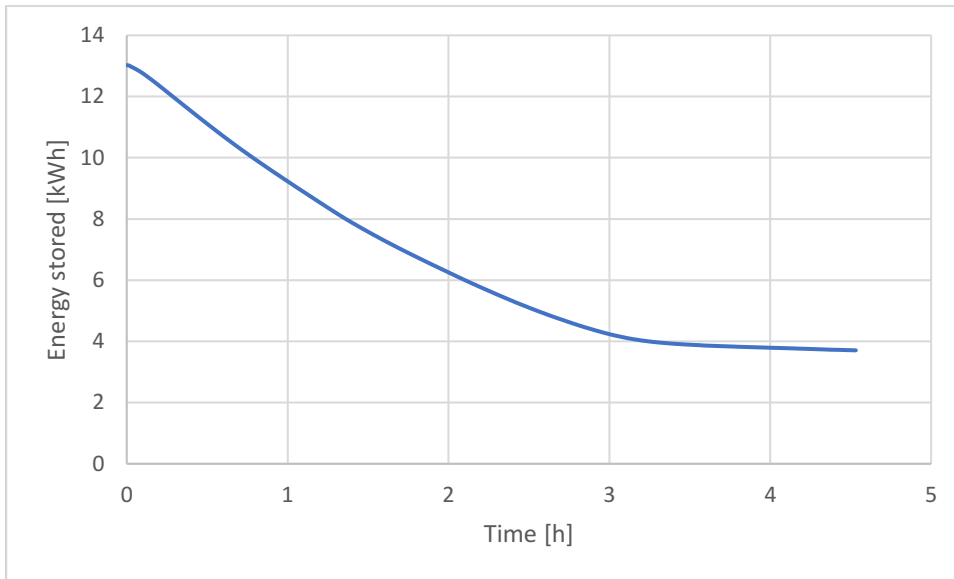


Grafico 5. Andamento dell'energia immagazzinata durante la fase di scarica.

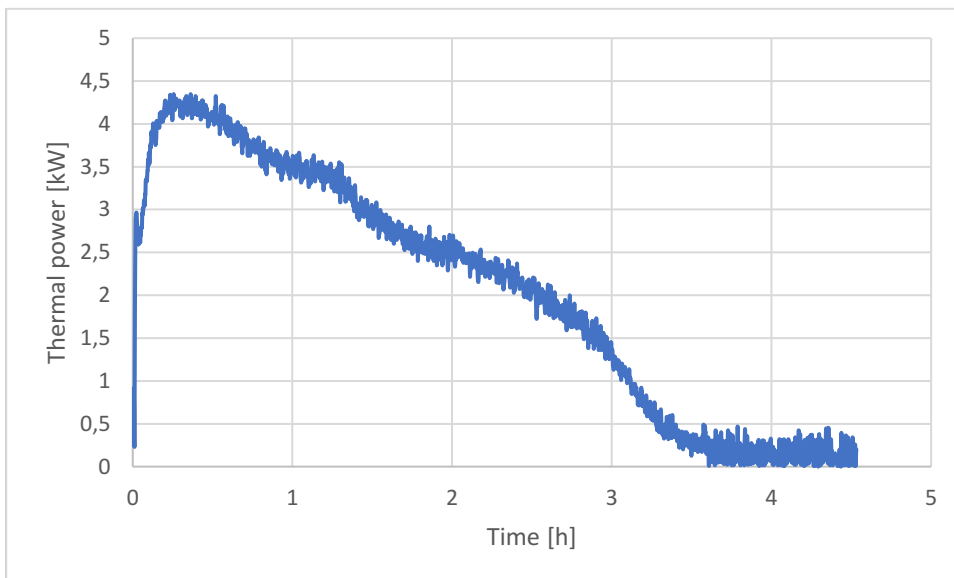


Grafico 6. Andamento della potenza termica durante la fase di scarica.

Commento

In totale, la prova è durata quasi 12 h. Nel Grafico 7 possiamo osservare l'andamento dell'energia immagazzinata.

I risultati sperimentali evidenziano come il sistema scambia energia termica troppo lentamente per avere importanti applicazioni. Verranno quindi analizzate in seguito alcune prove in cui vengono cambiate delle condizioni del sistema, quali la portata e il Δt .

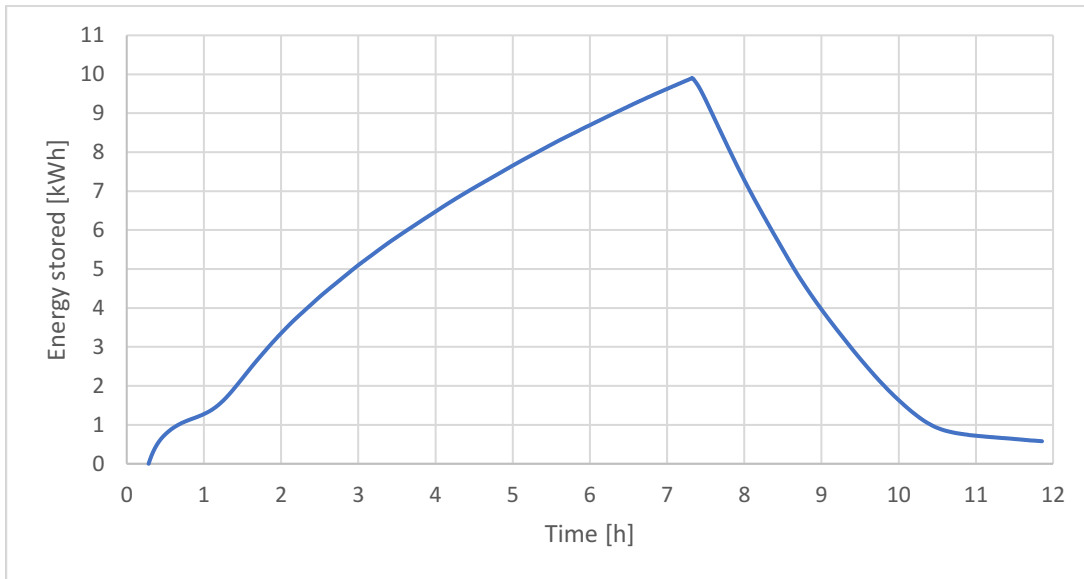


Grafico 7. Andamento dell'energia immagazzinata.

Analisi dell'andamento della temperatura in funzione della posizione delle termocoppie

Per poter comprendere meglio il comportamento del materiale durante la prova analizzo come varia la temperatura in base alla posizione delle termocoppie.

Ricordo con la Figura 9 come sono posizionate le termocoppie: sono disposte verticalmente su 11 aste e orizzontalmente su 5 piani.

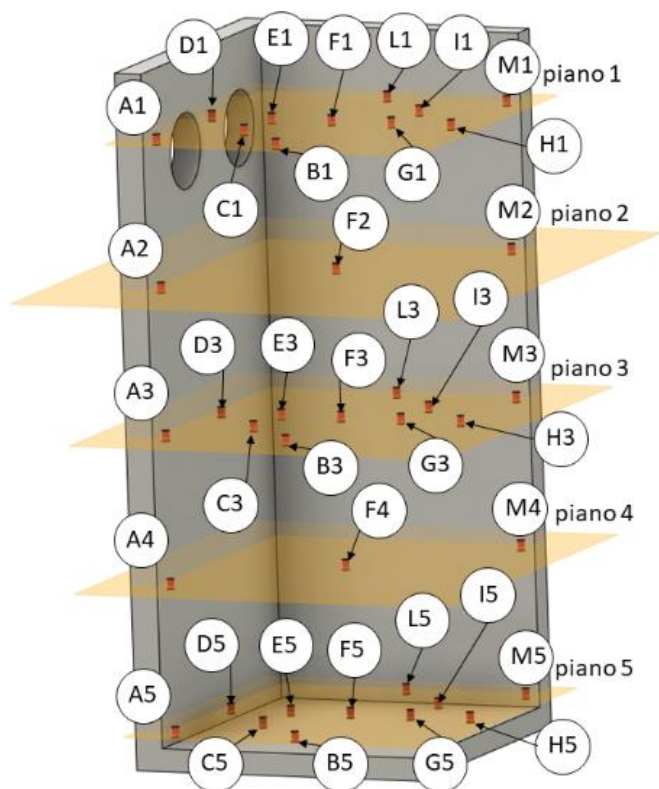


Figura 9. Nomi delle termocoppie.

Dal Grafico 8 notiamo come non vi sia una differenza nell'evoluzione della temperatura se consideriamo le termocoppie di uno stesso piano, stratificazione invece presente fra piani diversi sia nella fase di carica che di scarica (Grafici 9 e 10).

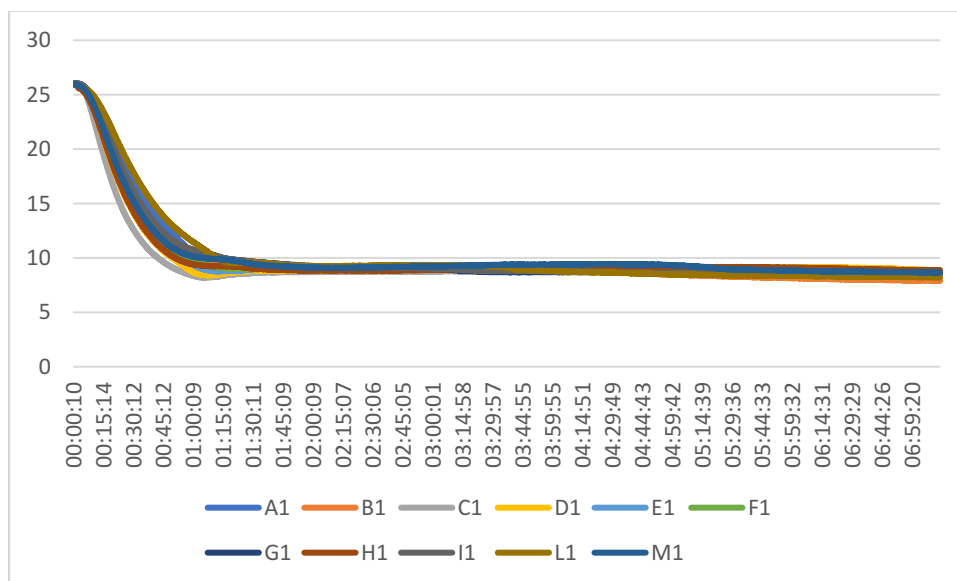


Grafico 8. Andamento della temperatura delle termocoppie del piano 1 nella fase di carica.

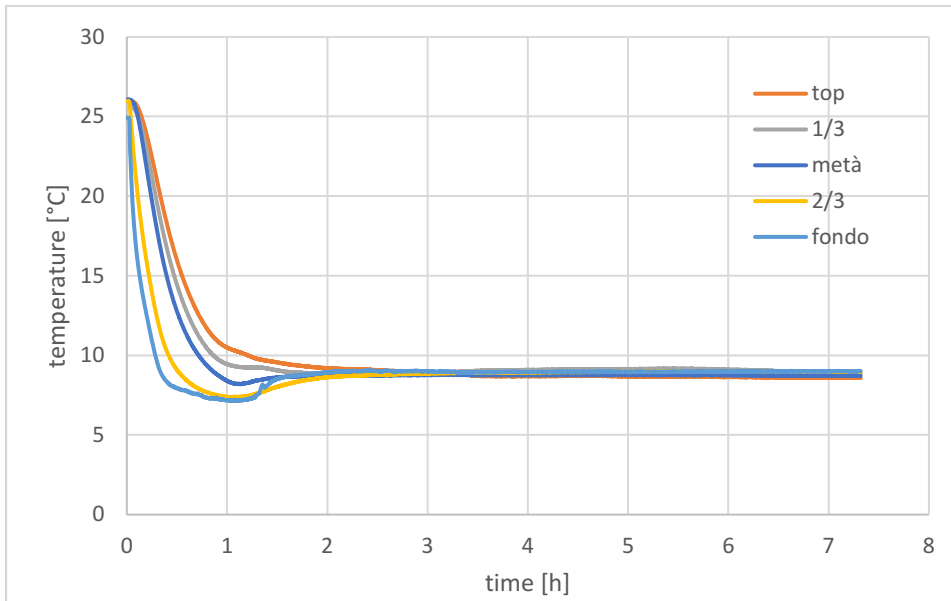


Grafico 9. Andamento della temperatura di termocoppie prese in ciascun piano nella fase di carica.

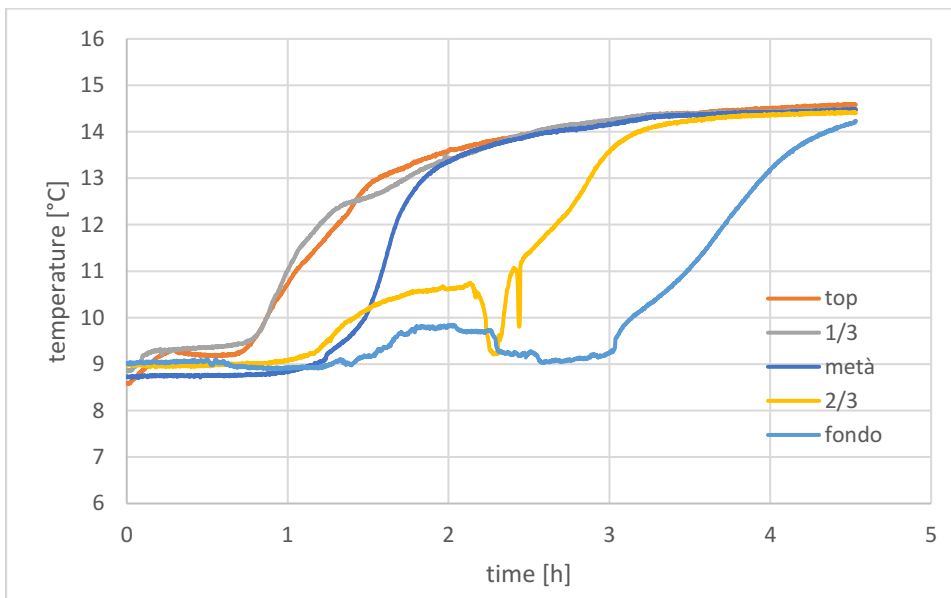


Grafico 10. Andamento della temperatura di termocoppie prese in ciascun piano nella fase di scarica.

Analizziamo prima la fase di carica. Come notiamo dal Grafico 9 le termocoppie posizionate più in basso raffreddano più velocemente e sono soggette a sottoraffreddamento.

La causa del raffreddamento più veloce potrebbe risiedere nella formazione di moti convettivi nel liquido nel corso della prima ora della prova.

La conformazione del roll-bond fa sì che il PCM in alto sia a contatto con l'acqua appena entrata e quindi poco più fredda di quella che è posta a contatto con il PCM in basso, quindi inizialmente il PCM in alto è leggermente più freddo di quello in basso e questo causa i moti convettivi.

Gli stessi moti però vengono limitati dalla conformazione del PCM a seguito del sottoraffreddamento.

Troviamo infatti la situazione rappresentata dalla Figura 10: il cambiamento di fase è già iniziato nei pressi dei roll-bond, ma nel punto in cui è presente la termocoppia troviamo una sempre più fine fase liquida, che quindi fa fatica a muoversi.

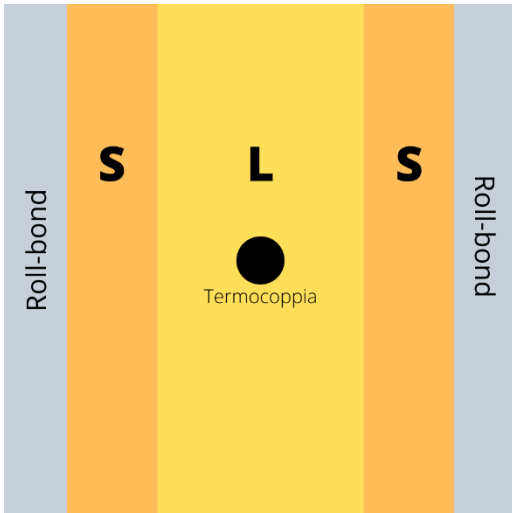


Figura 10. Illustrazione del cambiamento di fase durante la carica.

Nella fase di scarica invece, notiamo come le termocoppie in alto aumentino di temperatura più velocemente rispetto a quelle in basso, ciò avviene perché il PCM in alto è a contatto con l'acqua in ingresso a 14°C, temperatura leggermente superiore a quella dell'acqua in contatto con il PCM in basso, proprio perché ha già ceduto un po' di calore.

Proprio per questa ragione non sono presenti moti convettivi dettati dal gradiente di temperatura, perché il PCM "caldo" si trova già in alto.

Un'altra possibile ragione è che il PCM in basso ha iniziato prima il cambiamento di fase durante la carica e quindi ha rilasciato una maggiore quantità di calore latente, che quindi dovrà riassorbire nella fase di scarica prima di aumentare la propria temperatura.

Nei due piani più in basso, inoltre, troviamo delle anomalie durante la fase di scarica. Per spiegarle utilizziamo la Figura 11 che ci presenta una situazione opposta a quella della fase di carica.

Ora il PCM dei piani alti in prossimità dei roll-bond diventa liquido e in mezzo rimane uno strato di solido, il quale cadendo potrebbe aver causato quelle repentine variazioni entrando in contatto con le termocoppie in basso.

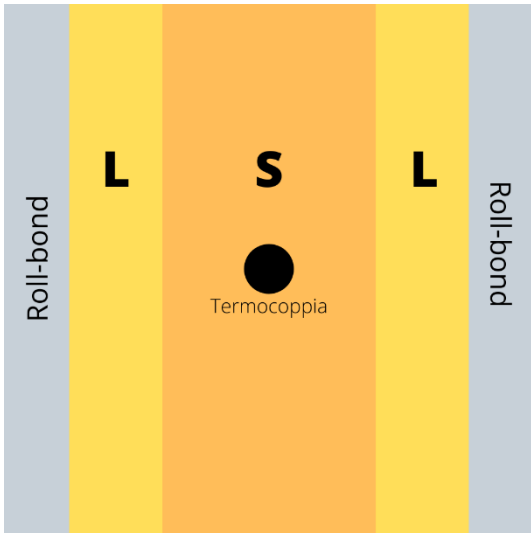


Figura 11. Illustrazione del cambiamento di fase durante la scarica.

Sperimentazioni successive

Per comprendere meglio il fenomeno sono state effettuate delle ulteriori sperimentazioni, in particolare per valutare l'effetto della variazione di alcune condizioni del sistema.

Verranno analizzate la variazione della portata d'acqua in carica e il Dt dell'acqua durante la scarica, quindi utilizzando acqua a temperature diverse.

Analisi dell'effetto della portata

Per analizzare l'effetto della portata durante la fase di carica sono state effettuate delle ulteriori prove con una portata d'acqua di 10 L/min e 20 L/min. La temperatura dell'acqua rimane di 6,5°C. La temperatura della stanza è stata abbassata a 9°C per limitare gli effetti della dispersione termica.

Vediamo subito dal Grafico 11 come una minor portata comporti un maggior tempo di carica, relazione confermata dal Grafico 12, dove vediamo il grafico a dispersione del tempo di carica per passare da 20°C a 9°C in funzione della portata con la relativa equazione di regressione polinomiale di grado 2.

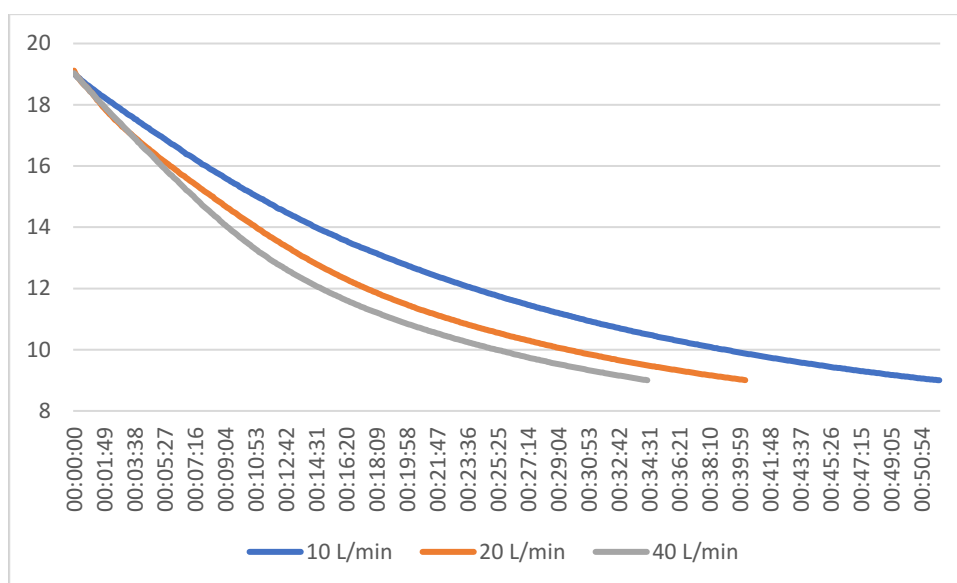


Grafico 11. Andamento della temperatura media del PCM in funzione della portata d'acqua in carica.

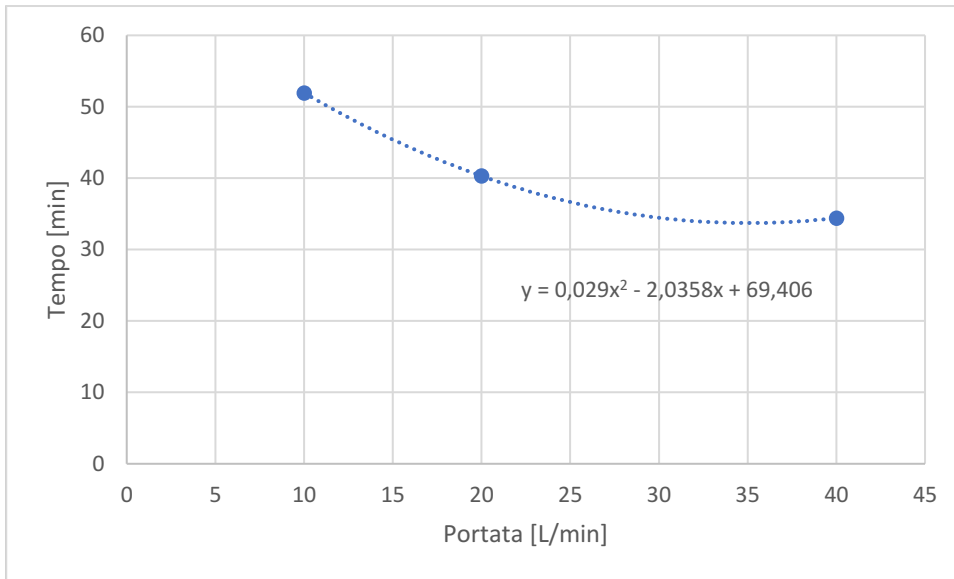


Grafico 12. Scatterplot del tempo di carica da 19°C a 9°C in funzione della portata.

Il Grafico 13 ci presenta l'andamento dell'energia immagazzinata durante la fase di carica: a parità di tempo trascorso dall'inizio della prova, maggiore è la portata e maggiore è l'energia immagazzinata e possiamo notarlo anche mediante la Tabella 5, che presenta i valori di energia immagazzinata dopo un tempo di 4 h.

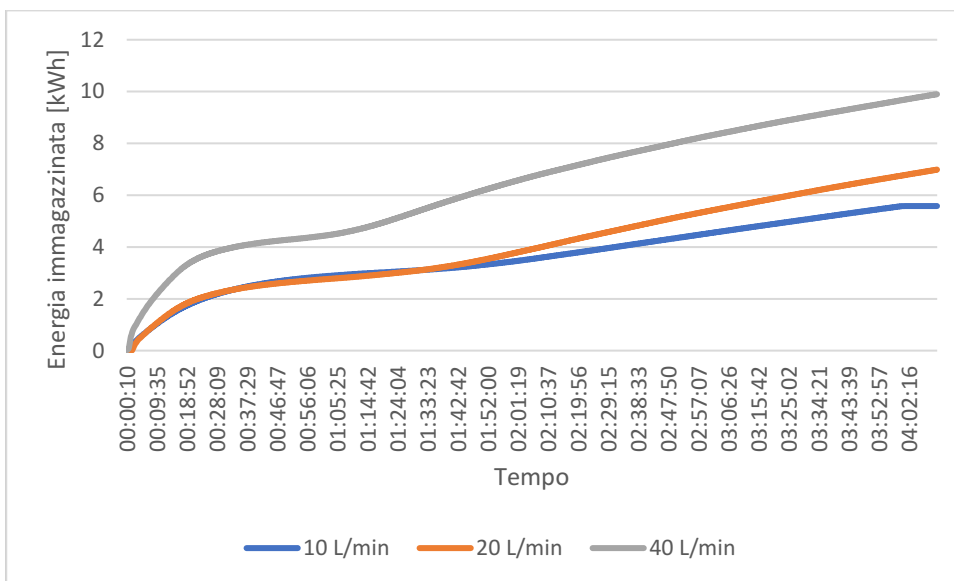


Grafico 13. Andamento dell'energia immagazzinata in funzione della portata in carica.

Portata [L/min]	10	20	40
Energia Imm. [kWh]	5,58	6,76	9,67

Tabella 5. Valori di energia immagazzinata dopo 4 h in base alla portata.

Analisi dell'effetto della temperatura dell'acqua in ingresso durante la scarica

Successivamente è stato valutato l'effetto del Δt fra acqua e PCM all'inizio della scarica. Per farlo è stato caricato il PCM nelle medesime condizioni:

- Temperatura della stanza a 9°C;
- Temperatura dell'acqua in ingresso di 6,5°C;
- Tempo di carica di 4h;
- Portata di carica di 40 L/min.

L'unica condizione diversa è la temperatura iniziale del PCM.

In seguito, la scarica è avvenuta con diverse temperature dell'acqua: 14°C, 19°C e 24°C, con conseguenti Δt di 5°C, 10°C e 15°C rispettivamente.

Ci aspettiamo che una maggior temperatura dell'acqua in ingresso comporti un più rapido aumento della temperatura media del PCM.

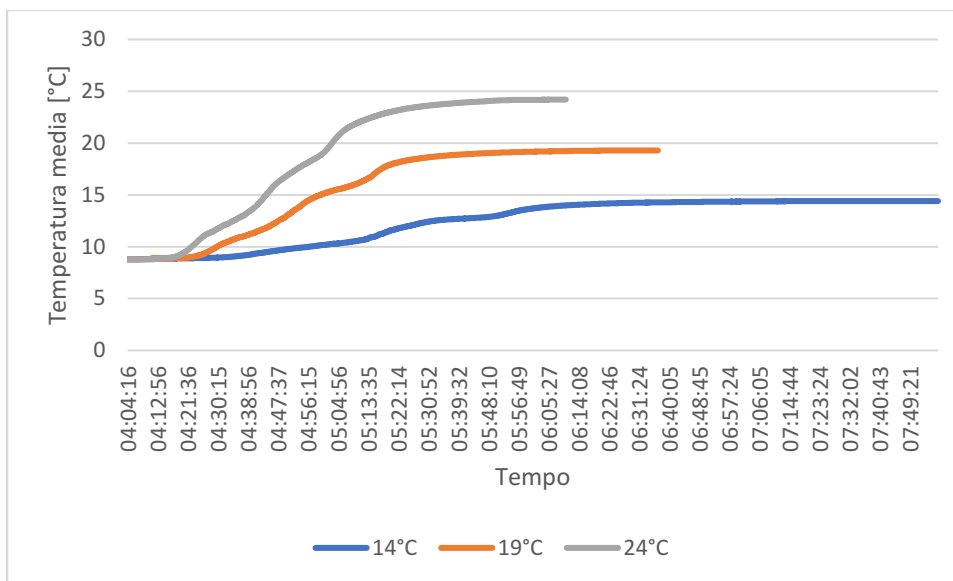


Grafico 14. Andamento della temperatura media del PCM in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso durante la scarica.

Il Grafico 14 ci conferma proprio questo e per un maggior impatto analizziamo i tempi di scarica del PCM da 9°C a 12°C mediante la Tabella 6.

t acqua [°C]	Tempo [min]
14	52,3
19	22,68
24	13,98

Tabella 6. Tempo necessario per passare da 9°C a 12°C in base alla temperatura dell'acqua in ingresso nella fase di scarica.

Visualizziamo infine la Tabella 6 mediante il grafico a dispersione sottostante.

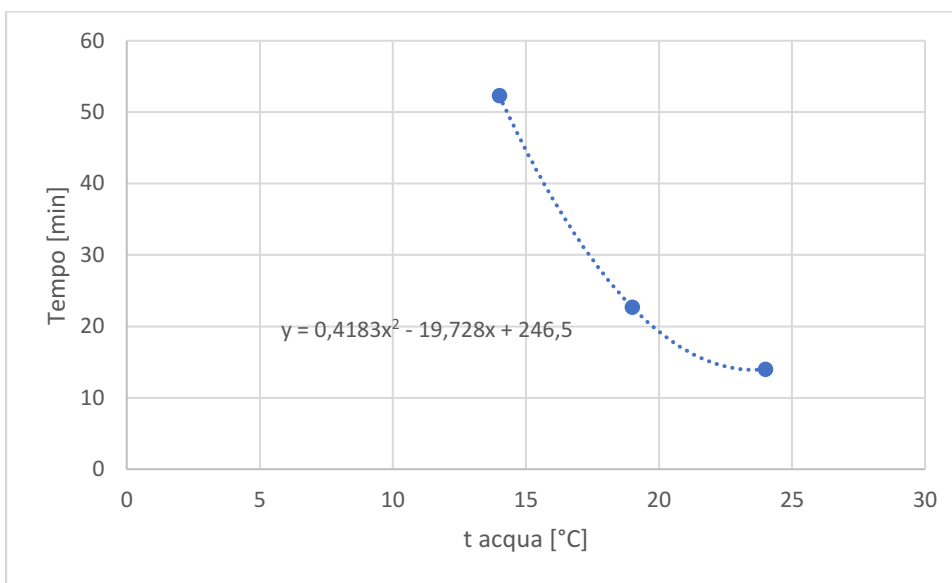


Grafico 15. Scatterplot del tempo di scarica da 9°C a 12°C in base alla temperatura dell'acqua in ingresso durante la scarica.

Conclusioni

Risultati

- La carica del PCM, partendo da circa 25°C, necessita di 7 h di tempo con una portata di 40 L/min e l'acqua alla temperatura di 6,5°C, per applicazioni commerciali potrebbe essere necessario diminuire questo tempo;
- Il cambiamento di fase non è omogeneo in tutto il PCM;
- I tempi di carica dipendono dalla portata (secondo la relazione: $y = 0,029x^2 - 2,0358x + 69,406$) e dalla temperatura dell'acqua in ingresso (secondo la relazione: $y = 0,4183x^2 - 19,728x + 246,5$), quindi dal Dt fra acqua e PCM all'inizio della scarica.

Sviluppi futuri

- Per un maggior dettaglio sulla massima energia immagazzinabile si potrebbe operare una carica completa;
- Per migliorare i tempi dello scambio termico si potrebbe aumentare il numero di roll-bond ed eventualmente rivalutare la conformazione del canale interno;
- Si potrebbe valutare la carica del PCM con acqua ad una temperatura più bassa, sempre se economicamente e/o tecnicamente possibile, conforme con l'applicazione commerciale desiderata;
- Nel valutare una diversa portata bisogna considerare che la curva trovata nel Grafico 12 mediante regressione polinomiale di grado 2 presenta un punto di minimo per una portata di 35,1 L/min, per poi iniziare a risalire. Questo significa che le portate ottimali sono comprese fra i 30 e i 40 L/min.

Fonti bibliografiche

[1] F.S. Javadi, H.S.C. Metselaar, P. Ganesan, 2019, «Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review» p. 330.

[2] R. Chaturvedi, A. Islam, K. Sharma, 2020, «A review on the applications of PCM in thermal storage of solar energy» pp. 293-294.

[3] S. Jain, K Ravi Kumar, D. Rakshit, 2021, «Heat transfer augmentation in single and multiple (cascade) phase change materials based thermal energy storage: Research process, challenges, and recommendations» pp. 5-16.