

**Università degli Studi di Padova**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**Accoppiamento tra PCM e strutture realizzate  
mediante tecnologia additiva per il raffreddamento  
passivo di componenti elettronici**

**Relatore:** Luisa Rossetto

**Correlatore:** Andrea Diani

**Laureando:** Alessio Gobbo 1205739

Anno Accademico 2020/2021



*Ai miei genitori.*

## Sommario

L'oggetto di riferimento in questo lavoro è rappresentato dall'accoppiamento tra superfici porose, realizzate mediante tecniche non convenzionali (Additive Manufacturing), e Phase Change Materials (PCM). L'obiettivo principale consiste nell'analizzare il comportamento del lato riscaldato in presenza di carichi termici, assimilabili al tipico surriscaldamento delle apparecchiature elettroniche, nel momento in cui viene a mancare un sistema di raffreddamento adeguato. Di conseguenza, si intende verificare la possibilità di un futuro utilizzo di tale sistema per una rimozione passiva di calore ed al contempo osservare come le superfici estese agiscano sull'incremento dello scambio termico limitato dalla bassa conduttività dei PCM. La metodologia impiegata si basa sulla raccolta dati di prove sperimentali che simulino le condizioni presentate testando 3 PCM, 2 strutture con 3 differenti carichi termici.

Nel *Capitolo 1* viene presentata una panoramica generale riguardante le tipologie, caratteristiche, applicazioni dei PCM con una focalizzazione in merito alle strategie per l'incremento della conduttività termica.

Nel *Capitolo 2* è presente l'impianto sperimentale, gli strumenti utilizzati ed il sistema di acquisizione

Nel *Capitolo 3* i dati raccolti dalle prove vengono analizzati producendo successivamente dei confronti fra le strutture, le paraffine, le potenze termiche e l'aderenza ad un modello proposto per la stima. Inoltre, saranno proposti al termine dei principali paragrafi dei risultati qualitativi utili alla comprensione.

Nel *Capitolo 4* vengono tratte le conclusioni in merito al lavoro svolto.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 I materiali in cambiamento di fase</b>	<b>3</b>
1.1 Classificazione dei PCM	3
1.1.1 Materiali organici	3
1.1.2 Materiali inorganici	4
1.1.3 Eutettici	4
1.2 Accumulo termico	5
1.2.1 Il calore sensibile	6
1.2.2 Il calore latente	7
1.2.3 Accumulo chimico	9
1.3 Criteri di selezione	9
1.4 Strategie per l'incremento della conduttività termica	11
1.4.1 Superfici alettate	11
1.4.2 Schiume metalliche	14
1.4.3 Tubi di calore	15
1.4.4 Miglioramento con materiali micro e nano-riempitivi	16
1.4.5 Incapsulamento	18
1.4.6 Tecniche di miglioramento ibride	19
1.5 Applicazioni	20
1.5.1 Settore edilizio	20
1.5.2 Produzione di energia	22
1.5.3 HVAC	23
1.5.4 Automobili	24
1.5.5 Celle a combustibile	25
1.5.6 Elettronica	26
1.6 Stato dell'arte dell'additive manufacturing (AM)	26
1.6.1 Opportunità per l'AM	29
1.6.2 Esempio applicativo per i PCM	30
<b>2 Impianto Sperimentale</b>	<b>33</b>
2.1 Strutture metalliche	33
2.2 Geometria reticolare	35
2.3 Body-Centered-Cubic	37
2.4 PCM utilizzati	38
2.5 Realizzazione del modulo di prova	40
2.5.1 Contenitore	41
2.5.2 Riscaldatore elettrico	42

2.5.3	Modulo finale . . . . .	43
2.6	Strumenti di misura e acquisizione . . . . .	43
2.6.1	Taratura termocoppie . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Risultati</b>	<b>47</b>
3.1	Descrizione delle prove . . . . .	47
3.2	Struttura Body-Centered-Cubic 87% con cella di 10 mm . . . . .	49
3.3	Struttura reticolare 87% con cella 10 mm . . . . .	64
3.4	Struttura reticolare 87% con cella 10 mm senza paraffina . . . . .	79
3.5	Risultati delle prove . . . . .	81
3.6	Confronti tra i risultati . . . . .	83
3.7	Risultati dei confronti . . . . .	101
3.8	Confronto con il modello sviluppato da Diani e Campanale . . . . .	103
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>109</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>111</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>113</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>116</b>

# Introduzione

La transizione energetica, supportata da un piano d'azione condiviso in numerosi paesi, sta progredendo rapidamente. Il cambiamento a cui stiamo andando incontro deve però ulteriormente accelerare, altrimenti non si potrà garantire un sostanziale e apprezzabile calo delle emissioni. Per far fronte a questa accelerazione, nel parco di generazione elettrica, stanno occupando sempre più spazio le RES (Renewable Energy Sources) e, parallelamente, numerosi progetti riguardanti i sistemi di accumulo mirano ad individuare delle tecnologie che possano ottimizzare l'equilibrio tra domanda e offerta di energia. E' doveroso ricordare che la discrepanza tra domanda e offerta non è un problema presente solo nel panorama elettrico ma si manifesta soprattutto nel settore termico. I sistemi TES (Thermal Energy Storage) cercano di risolvere questo problema variando le strategie di accumulo, i materiali impiegati, le configurazioni e le taglie in gioco per far fronte agli sprechi interni del sistema ed incrementarne la flessibilità [1]. In questo particolare ambito si vanno ad inserire i cosiddetti *Phase Change Materials* che presentano delle proprietà interessanti dal momento in cui sfruttano il calore latente come forma di immagazzinamento di energia. I vantaggi teorici sono principalmente due: durante il cambiamento di fase il materiale assorbe (o cede) energia ad una temperatura pressoché costante ed, in secondo luogo, l'elevata densità di energia per unità di massa caratterizzante il cambiamento di fase, permette di impiegare ridotte quantità materiale. Questi due aspetti hanno contribuito a rendere i PCM grande argomento di studio sia per quanto riguarda in senso stretto l'accumulo termico negli impianti di riscaldamento o raffrescamento, impianti solari a concentrazione, settore edilizio e sia come sistema passivo di raffreddamento per dispositivi elettronici vista la grande inerzia termica che possono offrire. Le applicazioni non si limitano a quelle presentate precedentemente infatti, nel *paragrafo 1.5*, si approfondirà lo stato dell'arte riguardante i possibili campi di impiego.

Il lavoro di seguito vuole soffermarsi principalmente sull'analisi dei PCM come sistema di raffreddamento passivo, ovvero senza l'impiego di fonti esterne di energia, per componenti o dispositivi elettronici. E' un compito necessario fornire sistemi adeguati per lo smaltimento di calore in moduli di trasmissione/ricezione radar, sistemi di calcolo ad alte prestazioni, dispositivi di illuminazione a LED, dispositivi laser a semiconduttore, moduli elettronici di potenza, altre tecnologie spaziali ecc. e risulta ancora più importante garantirne l'affidabilità. Generalmente la maggior parte dei sistemi di raffreddamento impiega aria o liquidi che vengono movimentati utilizzando delle fonti di energia esterne. Se per qualche ragione si dovesse presentare un guasto nel circolatore del liquido o nella ventola per la circolazione dell'aria, il dispositivo da raffreddare inizierebbe ad incrementare



la sua temperatura non essendoci un sistema funzionante in grado di asportare il calore in eccesso. Si raggiungerebbe presto il guasto del componente stesso, considerando le basse temperature di esercizio permesse dai classici dispositivi elettronici [2]. Il materiale a cambiamento di fase potrebbe ovviare a questo problema garantendo, per un determinato periodo di tempo, una corretta asportazione di calore salvaguardando il componente ed incrementando l'affidabilità del sistema di raffreddamento. L'unico reale inconveniente presente nell'utilizzo dei PCM è causato dalla scarsa conduttività termica che rende difficile il trasferimento di calore.

Numerosi ricercatori si stanno addentrando nella risoluzione di questo limite sfruttando l'inserimento di componenti ad elevata conducibilità, quali superfici estese di varie geometrie o schiume metalliche, per analizzare a livello macroscopico come varia il trasferimento termico. In particolare, Cui [3] ha osservato come l'utilizzo di una schiuma in rame di 20 PPI porosità 96% riempita di materiale in cambiamento di fase porta un incremento notevole della velocità di trasferimento termico. Alle stesse conclusioni sono giunti Rathod e Banerjee sfruttando delle alette longitudinali che hanno portato ad una riduzione del 43,6% del tempo di solidificazione [4]. Un altro filone di ricerca invece viene seguito creando miscele composte da PCM e nanoparticelle metalliche o nanofibre di carbonio per "potenziare" le proprietà del PCM stesso [5]. Esistono inoltre approcci ibridi in cui si combinano strutture alettate con miscele di materiale eutettico e nanoparticelle di GNP (graphene nano plates) come si evince dagli studi di Singh et al. [6].

Quello che verrà studiato in questo lavoro prenderà spunto da lavori svolti precedentemente in merito alle superfici estese sfruttando però strutture metalliche ad elevata conducibilità termica realizzate mediante la produzione additiva per mezzo di stampanti 3D. Questa tecnologia moderna permette di generare forme molto particolari riducendo l'utilizzo di materia prima ed evitando lavorazioni successive del pezzo che prevederebbero un'asportazione di materiale. In seguito, si osserverà come le diverse geometrie delle strutture utilizzate influenzino la velocità di trasferimento termico.

# Capitolo 1

## I materiali in cambiamento di fase

### 1.1 Classificazione dei PCM

Il panorama dei materiali in cambiamento di fase è veramente vasto, perciò risulta utile raggrupparli generando una suddivisione che ne faciliti la comprensione. Generalmente si predilige considerare la loro natura chimica producendo perciò tre categorie: organico, non organico e miscele eutettiche che successivamente si spiegheranno nel dettaglio. Ma altre tipologie di raggruppamenti possono comunque essere prese in considerazione come si vede in *figura 1.1*.

In particolare, si possono classificare per la tipologia di incapsulamento, il range di temperatura a cui il materiale tipicamente cambia di fase e le transizioni di fase: solido-liquido, solido-gas, liquido-gas e solido-solido.

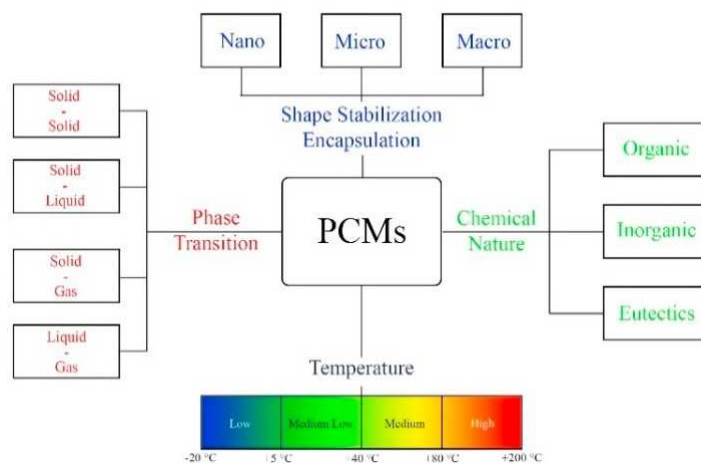


Figura 1.1: Classificazione dei materiali in cambiamento di fase [7].

#### 1.1.1 Materiali organici

All'interno di questa categoria si trovano altri tre gruppi: paraffine, acidi grassi e miscele organiche. Seppur si presentano termicamente e chimicamente stabili, non corrosivi per i metalli, riciclabili e caratterizzati da un elevato calore latente

hanno anche numerosi difetti. In particolare, sono infiammabili, hanno una minore entalpia in cambiamento di fase rispetto ad altri PCM, una bassa conduttività termica e sono poco compatibili con mezzi di contenimento di tipo polimerico.

Nel dettaglio, le *Paraffine* sono un idrocarburo con formula chimica  $C_{2n}H_{2n+2}$ , generalmente inodore, presenti sotto forma di gas alla temperatura di  $25^\circ\text{C}$ , per valori di  $n \leq 5$ , allo stato liquido con  $5 < n < 10$  mentre si trovano sotto forma di solido per  $n > 10$  [8]. Inoltre, aumentando progressivamente il numero di atomi di carbonio, la catena si allunga incrementando la temperatura di fusione ma anche il calore latente [9]. Oltre agli aspetti citati precedentemente hanno un'entalpia di cambio di fase relativamente elevata, temperatura durante la transizione di fase fluttuante, nessun sotto raffreddamento, chimicamente inerti e tensione di vapore inferiore che le rendono di riferimento nella categoria dei materiali organici. Inoltre, la possibilità di scegliere la temperatura di fusione e la garanzia di una stabilità ciclica portano le paraffine ad essere notevolmente studiate dovendo però scontrarsi con la conduttività termica che risulta decisamente bassa, attorno a  $0.2\text{-}0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

*Gli acidi grassi* vengono anche detti *non-paraffine* perché provenienti da piante e animali. Sono caratterizzati dalla formula chimica  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$  ed hanno proprietà fisiche pressoché perfette rendendoli per molti aspetti migliori alle paraffine se non fosse per il fatto che sono molto più costosi da produrre.

### 1.1.2 Materiali inorganici

Principalmente identificati da sali idrati e metalli di vario genere, i SS-PCM (solid-solid-PCM) sono in grado di immagazzinare/rilasciare energia termica nella fase solida attraverso una combinazione di tecniche di immagazzinamento dell'energia come trasformazioni magnetiche, trasformazioni della struttura cristallografica, trasformazioni tra struttura amorfa e struttura cristallina. Queste particolari forme di immagazzinamento rendono questi materiali migliori in termini di calore latente e di conducibilità termica rispetto ai materiali organici. Purtroppo il loro svantaggio è la loro natura corrosiva, il sotto raffreddamento, la segregazione, la separazione di fase e la potenziale instabilità termica. Per queste ragioni risultano più adatti per l'accumulo di energia di processi industriali ad alta temperatura grazie anche alla loro non infiammabilità.

### 1.1.3 Eutettici

In generale i materiali eutettici non sono altro che una combinazione dei sopracitati per dare origine a composti formati appunto da materiali in cambiamento di fase di tipo organico-inorganico, organico-organico ed inorganico-inorganico. Generalmente le miscele che trovano un maggiore ventaglio di applicazioni sono i composti a base di sali che vengono studiati per l'accumulo latente nei sistemi per la produzione di energia elettrica mediante l'energia solare a concentrazione (CSTP). Le combinazioni possibili sono veramente numerose fissata una temperatura di fusione, se poi ci si addentra in un ampio range di temperature le possibilità diventano migliaia tanto che risulta veramente difficile selezionare la miscela eutettica migliore. Infatti, la maggior parte dei sali sono idroscopici e assorbono l'acqua anche in laboratori relativamente asciutti facendo emergere delle forti discrepanze nelle misurazioni [10]. Inoltre, lo scorrimento dei sali può causare un

danneggiamento della strumentazione più delicata che limita fortemente il numero di prove eseguibili. Di conseguenza risulta di fondamentale importanza trovare dei modelli empirici che permettano di stimare a priori determinate proprietà per selezionare più velocemente la miscela ideale senza dover eseguire numerose misurazioni. Le proprietà come densità e temperatura di fusione sono calcolabili con relazioni fornite in letteratura che garantiscono una buona precisione mentre conduttività e calore latente restano tuttora più difficili da stimare.

E' possibile riassumere gli aspetti peculiari di queste tre categorie nello schema sottostante.

Organici	Inorganici	Eutettici
Sono polimeri con lunghe catene composte da molecole di carbonio e idrogeno	Elevato calore di fusione	Punto di fusione preciso
No sottoraffreddamento	Alta conduttività termica	Alta capacità termica volumetrica
Disponibili in ampi intervalli di temperatura	Bassa variazione di volume	Costo elevato
Fisicamente e chimicamente stabili	Facilmente disponibile	Ridotte informazioni riguardo le altre proprietà
Elevato calore di fusione	Non infiammabile	
Infiammabili	Sottoraffreddamento	
Bassa conduttività termica	Portano alla corrosione	
Bassa densità energetica	Fusione non omogenea	
Fusione in modo omogeneo	Alta densità energetica	

Figura 1.2: Riepilogo delle principali proprietà dei PCM [1].

## 1.2 Accumulo termico

Le reti composte da linee elettriche e gasdotti risultano dei sistemi molto complessi che per anni sono cresciuti diventando sempre più ramificati al fine di raggiungere ogni angolo del globo. Le architetture però stanno risultando non idonee, in particolare quella elettrica, soprattutto se si considera l'arrivo dei sistemi di generazione RES (Renewable Energy Sources) che, a causa delle forti oscillazioni istantanee nella produzione di energia elettrica, generano degli scompensi notevoli nella qualità del servizio stesso. Il sistema d'accumulo perciò non vuole solamente riallineare lo scompenso che si genera tra domanda e offerta ma anche promuovere una regolazione stessa della rete, nonché permettere di ridurre la potenza complessiva degli impianti di produzione aumentando al contempo la manovrabilità del sistema complessivo. Allo stesso modo agisce un qualsiasi sistema di stoccaggio: un bacino artificiale (alimentato da un torrente) a monte di una centrale idroelettrica, la batteria in un impianto fotovoltaico oppure il serbatoio nelle centrali solari a concentrazione e via dicendo.

Per quanto riguarda lo stoccaggio di energia termica si trovano applicazioni sia negli impianti di generazione elettrica (vedi CSTP) per aumentarne la producibilità, nei processi industriali altamente energivori per il recupero del calore in eccesso e il suo riutilizzo o negli impianti solari per il riscaldamento dell'ACS ecc.. In tutti questi esempi o si riduce la potenza di picco dell'impianto o si incrementa l'efficienza e la flessibilità del sistema. Previsioni ancora più lontane potrebbero riassumersi nello stoccaggio di energia termica in enormi bacini che accumulano in estate per cederla in inverno abbattendo letteralmente il consumo di gas e di energia elettrica per il condizionamento degli ambienti. In parte è quello che già avviene per le pompe di calore geotermiche mediante l'utilizzo del terreno come sorgente a temperatura costante data la sua elevata inerzia termica. Non solo da questo esempio ma da altri che vedremo si può intuire come una sor-

gente a temperatura costante risulti qualitativamente migliore ed estremamente più versatile.

E' questa la ragione principale per cui si predilige studiare ed utilizzare questi materiali: la capacità di assorbire o cedere calore mediante un cambiamento di fase, perciò a temperatura costante, sia esso solido-liquido, liquido-gas, solido-gas oppure solido-solido. Prima di capire nel dettaglio la ragione per cui il calore latente diventa un'ottima metodologia per accumulare energia termica risulta utile alla comprensione analizzare il calore sensibile, fonte di accumulo più diffusa e semplice con ulteriori cenni per quanto riguarda l'accumulo chimico.

Successivamente verrà illustrato uno schema che sintetizza le varie strategie per lo stoccaggio di energia termica, una tra le forme di accumulo presenti come quello elettrochimico, elettrico, meccanico e biologico. All'interno di questi grandi gruppi esistono molti processi differenti che permettono di generare altrettanti diagrammi ad albero come quello che verrà qui proposto. E' doveroso precisare che molto spesso si può passare da una forma di energia all'altra mediante opportune conversioni, di conseguenza un sistema di stoccaggio elettrico può comunque generare del calore ma non per questo viene trattato come un serbatoio termico.



Figura 1.3: Tipologie di accumulo di energia termica [8].

### 1.2.1 Il calore sensibile

L'accumulo di calore sensibile (SHS) è il metodo di più comune e semplice in quanto il materiale non subisce transizioni di fasi ma semplicemente incrementa la sua temperatura. Di conseguenza la quantità di calore assorbito aumenta li-

nearmente mano a mano che la temperatura del materiale/sistema incrementa la sua temperatura.

La relazione che descrive questo trasferimento viene qui fornita:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

Dove:

- $Q$  corrisponde al calore sensibile con unità di misura [J];
- $m$  quantità di massa del materiale espressa in [kg];
- $c_p$  rappresenta il calore specifico indicato con [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ];
- $\Delta T$  la differenza di temperatura ( $T_f - T_i$ ) indicata in [K], con  $T_f$  e  $T_i$  rispettivamente la temperatura finale ed iniziale.

Di conseguenza a parità di massa e di materiale utilizzato (medesimo  $c_p$ ) per incrementare la quantità di calore assorbito bisogna innalzare la temperatura  $T_f$  producendo un andamento lineare come si evince in *figura 1.4*.

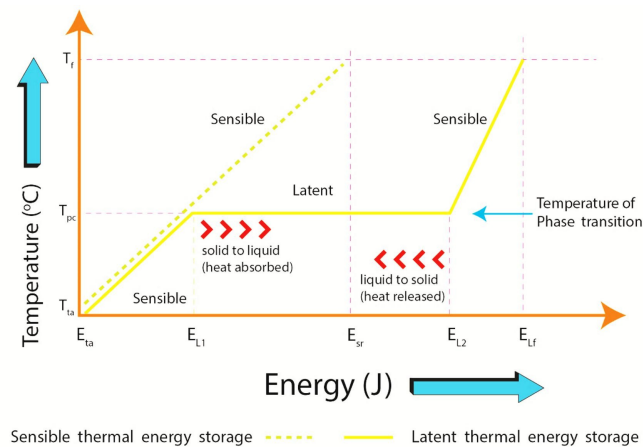


Figura 1.4: Andamento della temperatura durante l'assorbimento di calore [8].

### 1.2.2 Il calore latente

L'accumulo di calore latente (LHS) è il trasferimento di calore come risultato di un cambiamento di fase che si verifica in uno specifico intervallo ristretto di temperatura del materiale in questione. Esistono due sistemi di accumulo del calore latente che differiscono in termini di trasferimento: diretto e indiretto. Si parla di sistema diretto quando il trasferimento di calore avviene attraverso il contatto tra il fluido termovettore (HTF) e il materiale LHS e di un sistema indiretto quando c'è un solido che genera una separazione tra HTF e materiale LHS.

I cambiamenti di fase consistono in processi che portano a una trasformazione nello stato di aggregazione: evaporazione e condensazione, fusione e solidificazione o altri cambiamenti microscopici come cristallizzazione o modificazioni nella struttura interna del materiale. In questi processi la densità di energia per unità di massa supera di gran lunga la densità raggiungibile mediante l'utilizzo di calore sensibile, infatti, quest'ultimo obbliga a lavorare con grandi differenze di temperatura o in altri casi con enormi volumi di materia.

Considerando la transizione maggiormente sfruttata nei PCM, ovvero *solido-liquido (SL-PCM)*, si trova che la loro disposizione molecolare interna da una struttura cristallina ordinata passa ad una disordinata (amorfa) quando la temperatura supera una soglia critica (cioè la temperatura di transizione di fase). Un aumento dell'energia vibrazionale rompe i legami molecolari tra le singole molecole, facendo sì che la disposizione cristallina diventi uno stato liquido orientato in modo casuale. Al contrario, quando le temperature scendono al di sotto della temperatura di transizione di fase, inizia un processo di nucleazione in cui le molecole si riorganizzano in un reticolo cristallino. La forma e il numero di cristalli che si formano durante la cristallizzazione dipendono da molti fattori, come la velocità di raffreddamento, il tipo di molecole e la presenza di impurità che possono fungere da agenti nucleanti. L'inconveniente principale resta nella variazione di volume che generalmente si aggira attorno al 10%, ad alcuni fenomeni di isteresi e alla possibilità di non poter effettuare un elevato numero di transizioni pena il degradamento di alcune proprietà. In ogni caso la pressione non varia in modo significativo e la temperatura resta pressoché costante durante la transizione come si vede nella *figura 1.4* precedente. Quando la fusione è completata, un ulteriore trasferimento di calore fa sì che il calore sensibile venga nuovamente immagazzinato.

I materiali a cambiamento di fase *solido-solido (SS-PCM)* assorbono e rilasciano calore mediante transizioni di fase reversibili tra una fase cristallina o semicristallina (solida) e un'altra fase amorfa, semicristallina o cristallina (solida). Diversamente dai PCM solido-liquido, i PCM solido-solido mantengono le loro proprietà di massa solida entro determinati intervalli di temperatura e sono quindi indicati anche come PCM "a stato solido". Gli SS-PCM in genere subiscono anche una minore segregazione di fase e una variazione di volume inferiore quando i loro segmenti molli vengono immobilizzati. Questa caratteristica estende la loro durata prevenendo il degrado al ciclo termico, che è importante per le applicazioni che richiedono prestazioni a lungo termine (ad esempio edifici).

Esistono altre forme di stoccaggio in fase solido-solido come accennato nel paragrafo *1.1.2* e di cui non si entrerà nel dettaglio.

Per quanto riguarda le quantità vere e proprie di scambio termico sono facilmente calcolabili mediante la seguente relazione:

$$Q = \Delta H = m \cdot \Delta h \quad (1.2)$$

Dove:

- $\Delta h$  corrisponde alla differenza di entalpia tra ( $h_f - h_i$ ) [ $\text{J kg}^{-1}$ ];
- $m$  quantità di massa del materiale espressa in [kg];

Da notare che il  $\Delta h$  presenta generalmente valori molto elevati (proprio di ciascun PCM) rispetto al  $c_p \cdot \Delta T$  che permette perciò di utilizzare ridotte quantità di massa, chiaramente con una temperatura di fusione confrontabile con le temperature del  $\Delta T$  presente nell'equazione *1.1*. Infatti, osservando la *figura 1.4*, fissata la quantità  $E_{L2}$  di calore, la temperatura a cui bisognerebbe portare il materiale mediante scambio di calore sensibile risulterebbe notevolmente elevata con conseguenti dissipazioni termiche inevitabili.

### 1.2.3 Accumulo chimico

L'accumulo di energia termochimica (TCES) è caratterizzato da un'elevata densità di energia, un'elevata efficienza exergetica e un'elevata temperatura di esercizio [11]. L'accumulo di energia termochimica è ottenuto tramite una reazione chimica reversibile. Nei legami chimici delle molecole coinvolte nel ciclo di carica/scarica viene trattenuta l'energia chimica potenziale. Questo tipo di accumulo di energia ha la più alta densità di energia di qualsiasi TES, ma l'efficienza di reazione diminuisce con il tempo. I materiali per l'accumulo di energia termochimica dovrebbero mostrare un'elevata entalpia di reazione, una rapida cinetica di reazione, un'elevata conduttività termica, una buona stabilità ciclica. Il materiale termochimico, che viene utilizzato per immagazzinare energia termochimica, è un processo fisicamente reversibile con due sostanze, o una reazione chimica reversibile come segue:



E' chiaro che svolgendo la reazione da sinistra a destra, ovvero durante il processo di carica, si necessita una quantità di calore in ingresso caratterizzando la reazione come endotermica mentre durante la scarica essa risulta esotermica.

Questa metodologia risulta molto utile qualora si intenda lavorare ad alte temperature dove un tradizionale sistema SHS necessiterebbe di grandi volumi ed un considerevole isolamento per contenere le perdite, al pari di un LHS il cui vantaggio risulta la possibilità di usare meno materiale e utilizzare temperature più costanti. Infatti, in un sistema di accumulo TCES risulta sufficiente separare i componenti A e B per poi riunirli per far avvenire la reazione nel verso opposto con minori perdite.

Per riepilogare alcune caratteristiche che distinguono i sistemi ad accumulo SHS, LHS e TCES viene fornito lo schema 1.5.

## 1.3 Criteri di selezione

Come si vedrà successivamente le applicazioni che prevedono un accumulo termico LHS mediante l'utilizzo di PCM sono numerose e per motivi progettuali bisogna essere in grado di selezionare la soluzione adeguata valutando quelli che dovrebbero essere i parametri fondamentali che rendono efficiente il sistema. Questi parametri corrispondono proprio alle proprietà fisico-chimiche intrinseche del materiale:

- Temperatura di cambio di fase: il criterio più importante è la temperatura di cambio di fase appropriata. Per selezionare un PCM appropriato, è necessario farlo in modo tale che la sua fase debba cambiare nei range di temperatura ritenuti utili.
- Calore latente: il calore latente è la quantità di calore che viene scambiata tra il PCM e l'ambiente durante il processo di cambio di fase. Certo, più energia viene immagazzinata all'interno del PCM aumentando il calore latente e quindi più energia viene scaricata nel PCM.



Caratteristica	SHS	LHS	TCES
<b>Principio</b>	L'energia termica viene immagazzinata come calore sensibile nel materiale di stoccaggio aumentando la sua energia interna (cioè, il cambiamento di temperatura del supporto di memorizzazione).  La capacità di immagazzinamento dell'energia dipende dal calore specifico del materiale di immagazzinamento e dal suo aumento di temperatura consentito.	L'energia termica viene immagazzinata dal cambiamento di fase del materiale a temperatura costante o quasi costante come calore di fusione.  La capacità di immagazzinamento dell'energia dipende dal calore latente.	TCES si basa sull'energia assorbita (endotermica) e rilasciata (esotermica) rispettivamente per rompere e riformare i legami molecolari in una reazione chimica completamente reversibile.  La capacità di immagazzinamento dell'energia dipende dall'entalpia di reazione e dal numero di moli di reagente coinvolto.
<b>Energia</b>	$E = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$	$E = m \cdot (H_f - H_i)$	$E = n \cdot \Delta H_r$
<b>Altri fattori che influenzano le caratteristiche di immagazzinamento / rilascio di energia</b>	Conduktività termica del materiale di stoccaggio  Diffusività  Pressione di vapore (in caso di mezzi di stoccaggio liquidi)	Conduktività termica del PCM  Super raffreddamento e segregazione di fase	Conduktività termica dei materiali di reazione  Pressione di alimentazione del gas reagente  Attività del catalizzatore
<b>Materiali</b>	<i>Mezzi solidi:</i> letti di ciottoli, cemento, mattoni, sabbia, acciaio fuso, ghisa, ecc. <i>Mezzi liquidi:</i> acqua, sali fusi, oli minerali, oli a base di petrolio, ecc.	<i>Organico:</i> paraffina, non paraffina. <i>Inorganico:</i> sali idrati, metalli. <i>Eutettici:</i> inorganico-organico, inorganico-inorganico e organico-organico.	Sintesi / dissociazione dell'ammoniaca, reforming del metano, idruri metallici, ossidi metallici, carbonati, idrossidi, ecc.
<b>Densità volumetrica dell'accumulo (<math>E_v</math>)</b>	Piccolo (~50 kWh / m <sup>3</sup> )	Media (~100 kWh / m <sup>3</sup> )	Alta (~500 kWh / m <sup>3</sup> )
<b>Densità gravimetrica dell'accumulo di energia (<math>E_g</math>)</b>	Piccolo (0,02-0,03 kWh / kg)	Media (0,05-0,1 kWh / kg)	Alta (0,5-1 kWh / kg)
<b>Temperatura di conservazione</b>	Temperatura della fase di carica	Temperatura della fase di carica	Temperatura ambiente
<b>Periodo di conservazione</b>	Limitato a causa della significativa perdita di calore nell'ambiente circostante	Limitato a causa della significativa perdita di calore nell'ambiente circostante	Teoricamente illimitato
<b>Trasporto di energia</b>	Distanza molto ridotta	Distanza molto ridotta	Distanza relativamente lunga (più di 100 km)
<b>Complessità</b>	Semplice	medio	Complesso
<b>Maturità della tecnologia</b>	Scala industriale	Scala pilota	Scala da laboratorio e pilota

Figura 1.5: distinzioni principali per le varie metodologie di accumulo termico [11].

- Conduktività termica: nella maggior parte delle applicazioni, è consigliabile utilizzare un PCM con elevata conduktività termica perché all'aumentare della conduktività termica, aumenta la velocità di accumulo o di rilascio di energia.
- Coefficiente di espansione del volume: i PCM subiscono un cambiamento di fase tra solido e liquido. Poiché la densità delle fasi solide e liquide è diversa, il volume del PCM allo stato fuso è diverso dal volume del PCM in quello non fuso. All'aumentare del coefficiente di espansione del volume, la variazione del volume aumenta, portando a problemi nella progettazione di dispositivi di archiviazione basati su PCM. Pertanto, il PCM con coefficiente di espansione del volume inferiore è più desiderabile.
- Costi: i costi del PCM dovrebbero essere i più bassi possibile per ridurre al minimo l'investimento e il ritorno sull'investimento stesso.

- Sottoraffreddamento: se il valore del sottoraffreddamento è zero ( $\Delta T_{sub} = 0$ ) e la temperatura è inferiore al punto di solidificazione, il PCM diventa solido. Se il valore di sottoraffreddamento non è nullo, il processo di solidificazione non si verifica alla temperatura di solidificazione. In altre parole, si verifica un fenomeno che assomiglia all'isteresi e fa perdere dell'energia accumulata.

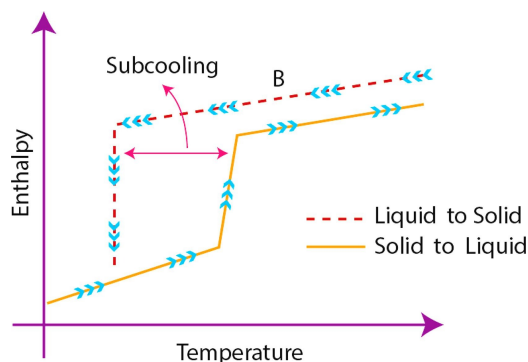


Figura 1.6: [8].

- Stabilità: in molti PCM, le proprietà subiscono un cambiamento all'aumentare dei cicli di transizione di fase portando, ad esempio, ad una diminuzione del calore latente del PCM. Pertanto, il PCM dovrebbe avere la massima stabilità.

## 1.4 Strategie per l'incremento della conduttività termica

E' stato specificato inizialmente come la conduttività termica dei PCM resti indubbiamente il limite predominante riducendo drasticamente la velocità di carica/scarica ed ostacolando perciò le possibili applicazioni del materiale.

Numerose tecniche sono state testate al fine di migliorare questa proprietà spingendosi da un lato verso l'incremento della superficie coinvolta nel trasferimento di calore mediante alette e schiume metalliche, mentre dall'altro il lavoro principale è stato effettuato sul PCM stesso mediante l'inserimento di micro/nano additivi altamente conduttivi o in alternativa utilizzando tecniche particolari di incapsulamento. In seguito allo schema che mostra le principali tecniche per il miglioramento della conduttività termica verrà analizzata nel dettaglio ciascuna di esse.

### 1.4.1 Superfici alettate

Numerosi studi sono stati condotti al riguardo concentrandosi principalmente sulla configurazione geometrica (alette circolari, longitudinali, ecc.) dimensioni (altezza, spessore) numero e spaziatura delle alette e tipologia di materiale. Questo perché risultano essere un sistema semplice, economico e facilmente fabbricabile. Per agevolare il processo di scambio termico è stata posta da parte di Eftekhari et al.[12] ed altri studiosi una notevole attenzione al processo di convezione analizzando la disposizione delle alette. Velraj et al.[13] hanno riportato studi numerici

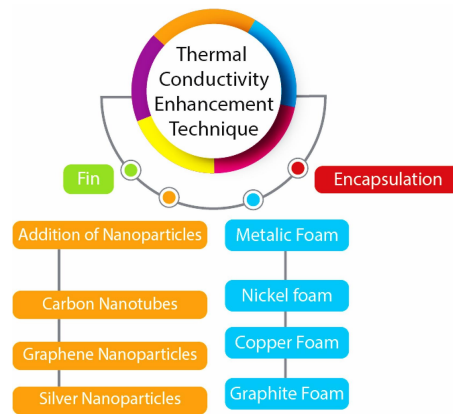


Figura 1.7: Tecniche per migliorare la conduttività termica dei PCM [8].

e sperimentali per un dispositivo di accumulo termico costituito da un tubo circolare verticale alettato internamente e riempito con paraffina RT60. Il gruppo è stato posizionato all'interno di un altro tubo circolare contenente acqua come fluido termovettore. I risultati dello studio hanno mostrato che la configurazione a V offre i massimi benefici per l'accumulo di energia delle alette. Inoltre, i risultati hanno mostrato che il tempo di solidificazione completa con questa configurazione di alette è approssimativamente ridotto a  $[1 / (\text{numero di alette})]$  rispetto a quello senza. Stritih [14] ha condotto uno studio sperimentale per esaminare le caratteristiche termofluidiche di un accumulo in PCM con e senza alette rettangolari durante le fasi di fusione e solidificazione. La paraffina con un punto di fusione di  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  è stata selezionata come PCM perché adatta per applicazioni di accumulo di energia negli edifici. Si è riscontrato che l'efficacia dell'aletta durante la solidificazione potrebbe aumentare fino a 3 volte mentre l'aumento è inferiore a 1 durante la fusione. La ragione di ciò è che nella fase di solidificazione domina la conduzione, che viene migliorata efficacemente in presenza di alette. D'altra parte, le alette riducono la convezione naturale che è dominante durante la fusione.

Sciacovelli et al.[15] ha condotto simulazioni numeriche per ottimizzare la funzionalità termica di alette a forma di Y con biforcazioni sotto forma di alette a forma di albero, a forma di fiocco di neve e di forma anulare. I risultati hanno mostrato che l'efficienza dello scarico di energia può essere aumentata fino al 24% quando vengono applicate alette ottimali con doppia biforcazione. L'analisi dei risultati di ottimizzazione ha rivelato che esiste una relazione tra la durata del tempo di funzionamento e la forma ottimale delle alette. Si è scoperto che le alette a forma di Y con angoli ampi tra i rami sono preferite per tempi di funzionamento brevi mentre le alette a forma di Y con angoli più piccoli sono preferite per tempi di funzionamento lunghi.

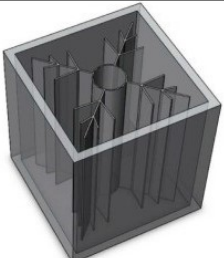
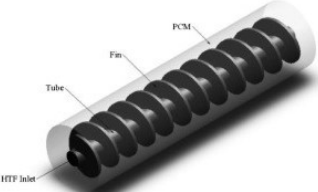

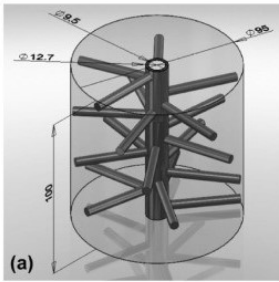
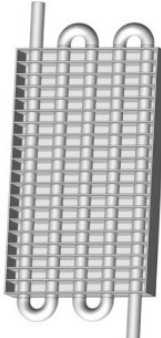
Shape of fin	Process	Nature of work	Schematic
Branched longitudinal fin	Solidification	Numerical	
Spiral fin	Melting	Numerical	
Annular fin	Melting	Numerical	
Pin fin	Melting	Numerical	
Plate fin	Melting and solidification	Numerical and experimental	

Figura 1.8: Diverse configurazioni di alette immerse in PCM [5].

### 1.4.2 Schiume metalliche

Le schiume metalliche a celle aperte sono strutture porose con piccole aperture chiamate pori o vuoti, comunemente fabbricate iniettando gas schiumogeno (solitamente aria) nel metallo fuso per formare bolle che producono la struttura a pori tipica delle schiume. I pori a loro volta sono collegati da dei "fibre" che a loro volta si interconnettono ai nodi. A causa del metodo di produzione non è possibile ottenere celle di geometria regolare e soprattutto di dimensioni standard, di conseguenza è necessario semplificarne la forma utilizzando una geometria di cella circolare e delle dimensioni medie semplificando così la schiuma. I materiali principalmente utilizzati sono rame, alluminio, leghe di alluminio.

Principali parametri per classificare le schiume e descriverne la morfologia sono la porosità ( $\epsilon$ ) e la densità dei pori ( $\omega$ ). La porosità rappresenta la percentuale del volume dei pori rispetto al volume totale occupato dalle fibre in schiuma e dallo spazio dei pori: sostanzialmente lo spazio vuoto generato rispetto allo spazio totale occupato dalla struttura. La densità dei pori è il numero di pori per pollice lineare (PPI), tanto più piccolo è questo valore e tanto più piccole risultano essere le "celle elementari" all'interno del materiale. Anche in questo caso, come per le superfici estese, si ritiene che l'elevata conducibilità ed il grande rapporto superficie/volume possano portare un notevole incremento del trasferimento di calore.

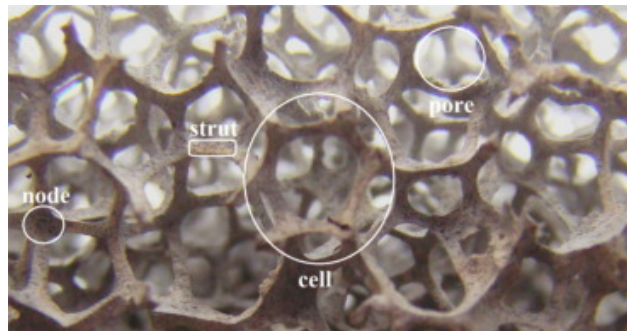


Figura 1.9: Vista dettagliata all'interno di una schiuma metallica [5].

Una schiuma metallica con bassa porosità non risulta favorevole per lo stoccaggio di energia perché gran parte del volume risulta occupato dai nodi/legamenti che vanno a ridurre lo spazio potenzialmente occupabile dal PCM. È fonte di studio l'individuazione dei valori ottimali di porosità per garantire un adeguato miglioramento delle proprietà termiche senza compromettere troppo la quantità di PCM utilizzabile.

Lafdi et al.[16] hanno condotto delle prove per osservare l'effetto della porosità e della dimensione dei pori sul processo di fusione di una paraffina. Lo studio ha utilizzato vari campioni di schiuma con un intervallo di porosità  $88\% < \epsilon < 96\%$  e dimensione dei pori di  $5 < \omega < 40$  arrivando alla conclusione che schiume con porosità elevata e dimensioni grandi permettono l'instaurarsi di moti convettivi che accelerano il processo. Al contempo, schiume con porosità inferiore incrementano notevolmente la conduttività permettendo così un abbassamento della temperatura del lato riscaldato. Questa conclusione permette di capire che esiste

un valore ottimale che permette di far coesistere buoni valori di conduzione e convezione nel processo di scambio termico.

Li et al.[17] utilizzando schiume metalliche con  $\epsilon > 90\%$  hanno notato come l'uniformità nella distribuzione del calore sia aumentata e come essa possa essere incrementata diminuendo la densità dei pori per aumentare la convezione naturale o diminuendo la porosità per migliorare la conduttività termica effettiva.

Altri ricercatori hanno dimostrato come generalmente i processi convettivi vengano ostacolati dalle schiume metalliche che però fanno generalmente migliorare la conduttività, parametro veramente limitante in un PCM, portando a notevoli decrementi nel tempo di carica e scarica.

### 1.4.3 Tubi di calore

I tubi di calore (Heat Pipe) rappresentano una tipologia di scambiatore di calore che coinvolge un fluido che alternativamente subisce processi di condensazione ed evaporazione. Sono in grado di trasferire grandi quantità di calore per distanze molto lunghe rendendoli dei mezzi superconduttivi che sfruttano il calore latente di vaporizzazione garantendo una grande densità di energia trasportata in modo pressoché isotermico. Tipicamente la sua struttura è composta da una zona evaporatore, una zona condensatore che vengono separate da una zona adiabatica.

A causa del loro potenziale nel ridurre la resistenza termica relativamente elevata rappresentata dai PCM, le tecnologie HP hanno attirato una crescente attenzione da parte dei ricercatori in campi rilevanti per le applicazioni TES latenti come l'accumulo termico solare, scambiatori di calore, raffreddamento di edifici e componenti elettronici. La figura 1.10 riassume diverse configurazioni di HP accoppiati ai PCM.

Shabgard et al. [18] hanno studiato numericamente la risposta transitoria di un'unità TES a calore latente assistita da tubi di calore integrata con un impianto solare di tipo Stirling. L'unità contiene una serie di tubi di calore (HP) incorporati in un PCM il cui volume è stato fissato e sono stati considerati quattro valori di spaziatura dei tubi di calore. È stato riscontrato che gli HP con la spaziatura più piccola determinano una minore fluttuazione della potenza termica fornita al motore, maggiori cadute di temperatura nell'unità e la massima quantità di fusione e solidificazione del PCM.

Turnpenny et al. [19] hanno costruito un sistema di raffreddamento integrato con l'unità HP-PCM in un edificio adibito ad uffici per prevenire il surriscaldamento nelle tipiche condizioni estive del Regno Unito. Il design aspira l'aria dalla stanza utilizzando ventole a bassa potenza esposte alle estremità degli HP. L'aria calda interna si raffredda scaricando calore al PCM e lo scioglie durante il giorno mentre l'aria fredda esterna si riscalda assorbendo il calore dal PCM e solidificandolo durante la notte. L'aggiunta di HP al design migliora le prestazioni dell'unità di stoccaggio aumentando i tassi di scambio termico tra l'aria e il PCM. I risultati indicano che il sistema offre vantaggi sostanziali in termini di costi e di energia rispetto al condizionamento d'aria convenzionale e ad altre tecnologie come le travi fredde.

Enhancement method	Process	Nature of the work	Schematic
Heat pipe integrated with metal foam/foil	Melting and solidification	Experimental	
Heat pipe integrated with annular fin	Solidification	Numerical	
Heat pipe and nano-enhanced PCM	Melting	Numerical	
Heat pipe integrated with annular fin	Numerical	Melting	
Heat pipe integrated with longitudinal fin	Numerical	Melting	

Figura 1.10: Vista dettagliata all'interno di una schiuma metallica [5].

#### 1.4.4 Miglioramento con materiali micro e nano-riempitivi

Un'altra strada viene presa lavorando non tanto, come si è visto, sulla macro struttura che contiene o in cui è immerso il PCM, bensì su riempitivi che vanno a disperdersi all'interno del PCM stesso. Qui di seguito saranno presentati i principali additivi e nanoparticelle utilizzati.

- Nanoparticelle di metallo:** il miglioramento della funzionalità dei PCM come supporti di memorizzazione attraverso l'aggiunta di nanoparticelle è stato segnalato per la prima volta da Khodadadi e Hosseinizadeh [20]. È stato sviluppato un modello numerico basato sul metodo dell'entalpia per studiare gli effetti delle nanoparticelle di rame disperse sul comportamento di solidificazione dell'acqua come PCM all'interno di una cavità quadrata a riscaldamento differenziale.

Ho e Gao [5] hanno preparato emulsioni di nanoparticelle di allumina ( $Al_2O_3$ ) in paraffina (n-ottadecano) utilizzando la tecnica del tensioattivo non ionico. Le proprietà termofisiche efficaci tra cui densità, conduttività termica e viscosità dinamica delle dispersioni sono state studiate sperimentalmente. È stato riscontrato un miglioramento relativo della conduttività termica e della viscosità dinamica dovuto alla dispersione delle nanoparticelle rispetto alla paraffina pura. Tuttavia, l'aumento della viscosità dinamica è risultato essere molto maggiore della conduttività termica. Pertanto, l'efficienza della convezione naturale nella regione fusa potrebbe essere notevolmente ridotta.

Wu et al. [21] hanno condotto test sperimentali per studiare le caratteristiche di fusione/solidificazione del composito rame/paraffina come PCM nano-potenziato. I risultati hanno mostrato che la conduttività termica del composito potrebbe essere migliorata del 14% nella fase solida e del 18% nella fase liquida aggiungendo nanoparticelle di rame del 2% in peso. Inoltre, l'aggiunta di nanoparticelle di rame dell'1% in peso potrebbe ridurre i tempi di fusione e solidificazione di circa il 33% e il 32% rispettivamente. Lo studio ha concluso che l'aggiunta di una piccola quantità di nanoparticelle è una strategia adatta per ottenere un'elevata conduttività dei PCM.

Lin e Al-Kayiem [22] hanno disperso nanoparticelle di rame da 20 nm in paraffina per produrre nanocompositi Cu – PCM sfruttabili per applicazioni TES solari. Proprietà di accumulo termico, quali, la conducibilità termica, il degrado termico e la stabilità chimica sono state caratterizzate sperimentalmente. I risultati hanno mostrato che la dispersione delle nanoparticelle non solo aumenta la conduttività termica, ma migliora anche la stabilità termica e riduce l'effetto di super raffreddamento della paraffina durante la fase di scarica.

- *Nanofibre di carbonio*: Secondo Fukai et al.[23] le fibre di carbonio possiedono conduttività termica paragonabile a quella dell'alluminio e del rame, insieme ad un elevato potenziale di resistenza alla corrosione e agli attacchi chimici. Pertanto, le fibre di carbonio potrebbero essere alternative più efficienti per migliorare la conduttività termica nella maggior parte dei PCM.

Lo studio di Elgafy e Lafdi [24] è stato il primo sull'utilizzo di nanofibre di carbonio per migliorare la conduttività termica di un PCM. Lo studio ha utilizzato un PCM nanocomposito preparato aggiungendo nanofibre di carbonio del diametro medio di 100 nm e di lunghezza media di 20  $\mu$ m nella paraffina mediante tecnica di miscelazione e fusione a taglio. Lo studio ha scoperto che la conduttività termica del nanocomposito aumenta quasi linearmente con l'aumentare della frazione di massa della nanofibra, portando a tassi di solidificazione elevati. Il rapporto affermava che anche con una frazione in massa dell'1% di fibra di carbonio il tempo di solidificazione potrebbe essere ridotto di circa il 23% e ha anche rivelato che un tasso di solidificazione più elevato potrebbe essere ottenuto con fibre trattate in superficie rispetto a quelle con fibre di superficie non trattata.



- *Nanotubi di carbonio*: Il nanotubo di carbonio (CNT) è un altro nanomateriale che ha un'elevata conduttività termica ( $1950 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) con un enorme potenziale per applicazioni di accumulo termico ed energetico. Sulla base della loro nanostruttura cilindrica, i CNT sono principalmente classificati come nanotubi a parete singola (SWCNT) e nanotubi a parete multipla (MWCNT) come si può facilmente vedere nella figura 1.11.

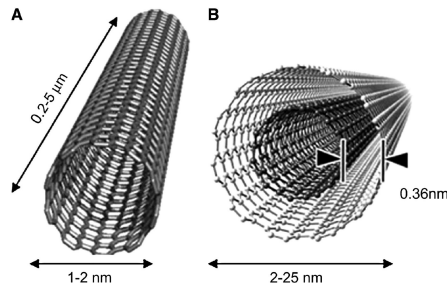


Figura 1.11: CNT di tipo a parete singola (A) e multipla (B) [5].

Zeng et al. [25] hanno utilizzato MWCNT per preparare compositi PCM a stabilità di forma tramite polimerizzazione in situ. MWCNT con un diametro esterno di 10–30 nm e una lunghezza di 5–15  $\mu\text{m}$  sono stati dispersi in 1-tetradecanolo (TD) come PCM con frazioni di massa dello 0,5–5%. Lo studio ha rivelato che l'introduzione del MWCNT non influisce molto sul calore di fusione, ma abbassa la temperatura di fusione di circa  $2^\circ\text{C}$ , e aumenta la conducibilità termica fino al 30% rispetto ai campioni puri. Il rapporto ha anche rivelato che esiste un miglioramento lineare della conduttività termica con l'aumento della frazione di massa del MWCNT. A medesime conclusioni sono giunti altri ricercatori che hanno utilizzato altri PCM, diametri diversi di nanotubi e diverse frazioni in massa.

#### 1.4.5 Incapsulamento

È un processo in cui una particella viene circondata da materiale o incorporata in una matrice, formando una capsula. La capsula può essere di forma sferica, tubolare, ovale o irregolare. Per accogliere le variazioni di volume al momento della trasformazione di fase, a volte viene introdotta una sacca d'aria. Il guscio deve essere in grado di resistere alle sollecitazioni prodotte a causa dei cambiamenti volumetrici al momento del processo di cambiamento di fase. Il nucleo potrebbe essere solido o disciolto in un fluido vettore, nel qual caso il materiale è noto come MPCS (Microencapsulated Phase Change Material Slurry) [26]. Le tecniche di incapsulamento possono essere suddivise in micro e macro incapsulamento con annessi vantaggi e svantaggi. Il macroincapsulamento migliora la compatibilità del materiale con l'ambiente circostante attraverso la costruzione di una barriera e incrementa la gestione del PCM durante la produzione. Le prestazioni del micro e nano incapsulamento apportano capacità aggiuntive: miglioramento del trasferimento di calore all'ambiente circostante attraverso il suo ampio rapporto superficie/volume e la stabilità del ciclo poiché la separazione di fase è limitata a distanze microscopiche.

Il *Microincapsulamento* viene appositamente progettato per estendere il rapporto tra superficie e volume rendendo questa tecnica adatta per materiali da

costruzione e per l'accumulo passivo di energia termica. Tuttavia, questa non è la loro unica applicazione in quanto sono perfettamente adatti per applicazioni di raffreddamento e riscaldamento in edifici, tessuti, fluidi per il trasferimento di calore, schiume termoisolanti e fanghi MPCM. E' possibile vedere nella figura 1.12 alcune morfologie di microcapsule contenenti materiali solidi/liquidi instabili o sensibili attraverso un involucro solido.

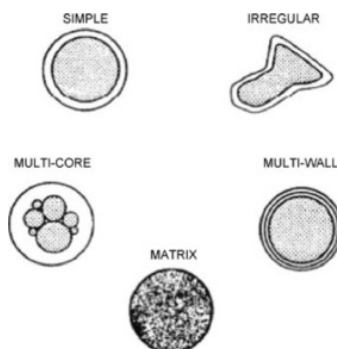


Figura 1.12: Morfologia di diversi tipi di microcapsule [1].

Chiaramente il guscio deve a sua volta possedere determinate proprietà di inerzia fisica, tenuta, alta conduttività termica, non presentare fenomeni di osmosi e chiaramente un'elevata resistenza a sollecitazioni meccaniche e sforzi termici. Una parentesi interessante potrebbe essere spesa per spiegare come generare queste capsule ma verrà limitata citando solamente i metodi sfruttati: metodo fisico-meccanico (essiccazione a spruzzo, estrusione centrifuga, ugello vibrante, evaporazione del solvente), metodo chimico (polimerizzazione in sospensione, polimerizzazione in mini emulsione) o metodo fisico-chimico (coacervazione, gelificazione ionica) PCM organici con applicazioni fisico-chimiche.

Si parla di *Macroincapsulamento* quando le dimensioni del guscio superano 1 mm, per andare a formare geometrie di quest'ultimo tipicamente a cubi, sacchetti, cilindri, tubi ecc. rendendolo una grande opportunità per gli involucri degli edifici.

Risulta molto difficile ed esteso il processo che prevederebbe la completa analisi delle tipologie, forme e dimensioni a cui il macroincapsulamento possa arrivare, di conseguenza sarà presentato uno schema riepilogativo che riassume la strategia dell'incapsulamento come tecnica per l'incremento della conducibilità termica ma soprattutto della stabilità nel tempo del PCM.

#### 1.4.6 Tecniche di miglioramento ibride

All'inizio di questo paragrafo è stata introdotta una distinzione che andava a delineare i due principali approcci per l'incremento della conducibilità termica, uno rivolto ad aggiungere strutture fisse come alette, schiume o altri generi di superfici per estendere l'area di scambio e il secondo invece mirato nell'additivare delle sostanze per modificare a livello microscopico il trasferimento di calore del PCM. Nessun limite però viene posto nel momento in cui si decida di ibridizzare le soluzioni combinando tutte le sottovarianti appartenenti a questi due macro gruppi. Giusto per citare alcuni esempi si veda l'utilizzo di normali alette accoppiate a dei tubi di calore o a miscele contenenti nanoparticelle piuttosto che schiume metalliche. Per non parlare di schiume metalliche accoppiate a tubi di calore o sempre

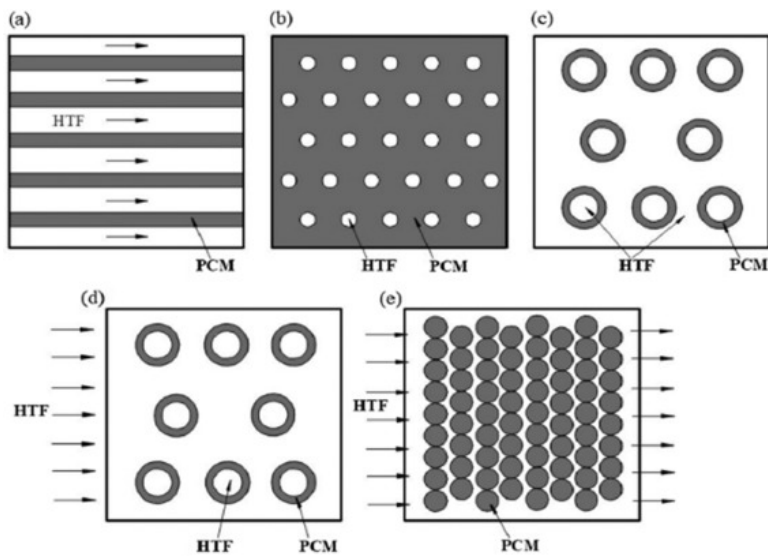


Figura 1.13: a) piastra piana; (b) Shell e tubo: flusso interno; (c) fascio tubiero - flusso parallelo; d) fascio tubiero - flusso incrociato; (e) Letto imballato [27].

schiume metalliche al cui interno è stato inserito un PCM additivato di nano particelle. Insomma le varianti possibili a questo punto si intuisce che possono essere innumerevoli e lo studio procede nell'individuare le soluzioni economicamente più vantaggiose ed efficienti.

## 1.5 Applicazioni

### 1.5.1 Settore edilizio

Gli studi si stanno muovendo in molteplici direzioni, in particolare in ambito *Edilizio*. V. Ram et al [28] studiano calcestruzzo di cemento al cui interno si può inserire un materiale a cambiamento di fase incorporato in nanomateriali (PCN-PCM). La prova sul campo è stata effettuata, sviluppando due cubicoli di dimensioni  $1,12 \text{ m} \times 1,12 \text{ m} \times 1,12 \text{ m}$  presso l'Università GLA di Mathura (India). L'Università si trova in India alle coordinate geografiche  $27,6056^\circ \text{ N}$  e  $77,5930^\circ \text{ E}$ . L'India è un paese tropicale con abbondante disponibilità di radiazione solare durante tutto l'anno. Poiché il clima rimane per lo più caldo e secco, è possibile ottenere il massimo utilizzo della carica e scarica del PCM. Nei paesi tropicali come l'India, il fabbisogno energetico per il raffreddamento e il riscaldamento degli ambienti negli edifici commerciali e residenziali è molto intenso e in continuo aumento. Pertanto, esiste un'enorme opportunità per sviluppare soluzioni efficienti dal punto di vista energetico per ridurre il fabbisogno energetico per il raffreddamento e il riscaldamento degli ambienti.

Un cubicolo è costituito solo da cemento mentre l'altro ha PCM macroincapsulato integrato in pareti e tetti. Entrambe le cabine sono dotate di finestre e porte per una corretta ventilazione dell'aria interna, soprattutto durante lo scarico del PCM. Entrambi i cubicoli sono stati quindi testati in condizioni ambientali tropicali esterne per valutare il comportamento / risposta termica interna in termini di riduzione della temperatura di picco, ampiezza termica e sfasamento temporale.

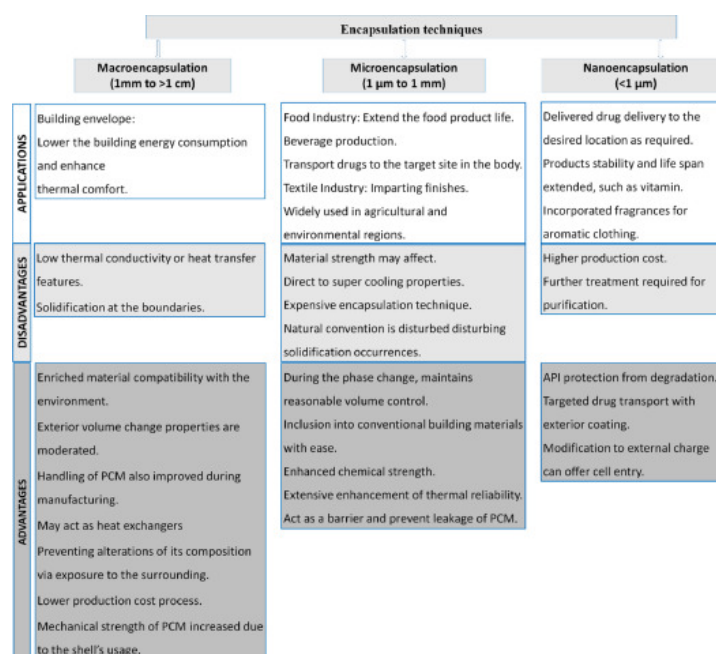


Figura 1.14: Applicazioni legate a ciascuna tecnica di incapsulamento [1].

È stato valutato anche il flusso termico attraverso le pareti dei cubicoli e il carico di raffreddamento. Il materiale a cambiamento di fase utilizzato è stato PCM commerciale denominata SavE OM37 PCM (acquistato da Pluss Advanced Technologies Pvt. Ltd.) a base chimica inorganica con un intervallo di temperatura di fusione di 36 – 40 °C. Il materiale utilizzato per realizzare le macro-capsule di PCM è la lega di alluminio 8011 di 0,5 mm di spessore, 16,7 mm di diametro e 900 mm di lunghezza. Un totale di 35 tubi di alluminio (25 tubi da 900 mm e 10 tubi da 370 mm) con 17,5 kg di PCM di paraffina sono stati incorporati nel cubicolo sperimentale. Il comportamento termico interno di entrambi i cubicoli è stato registrato per 24 ore il 12 luglio 2018 ed è analizzato in termini di temperatura interna, ampiezza termica e sfasamento temporale della parete sud, parete ovest, parete nord, parete est, tetto e ambiente interno.

I risultati hanno portato all'osservazione di una riduzione del 40,67% –59,79% dell'ampiezza termica, 60–120 min di ritardo per il raggiungimento del picco ed 7,19% –9,18% di riduzione della temperatura di picco delle pareti. Di conseguenza è possibile stimare un risparmio in termini economici sulla spesa della bolletta elettrica per il raffrescamento dell'ambiente.

Le variazioni tra gli edifici che utilizzano i tradizionali sistemi HVAC e gli edifici ad attivazione termica con PCM incorporato nella sua struttura sono state mostrate in figura 1.15. La figura mostra come le strutture edilizie attivate termicamente (TABS) dotate di tecnologia PCM siano in grado di ridurre le variazioni di temperatura interne e quindi di mantenere il comfort termico all'interno dell'involucro edilizio [29].

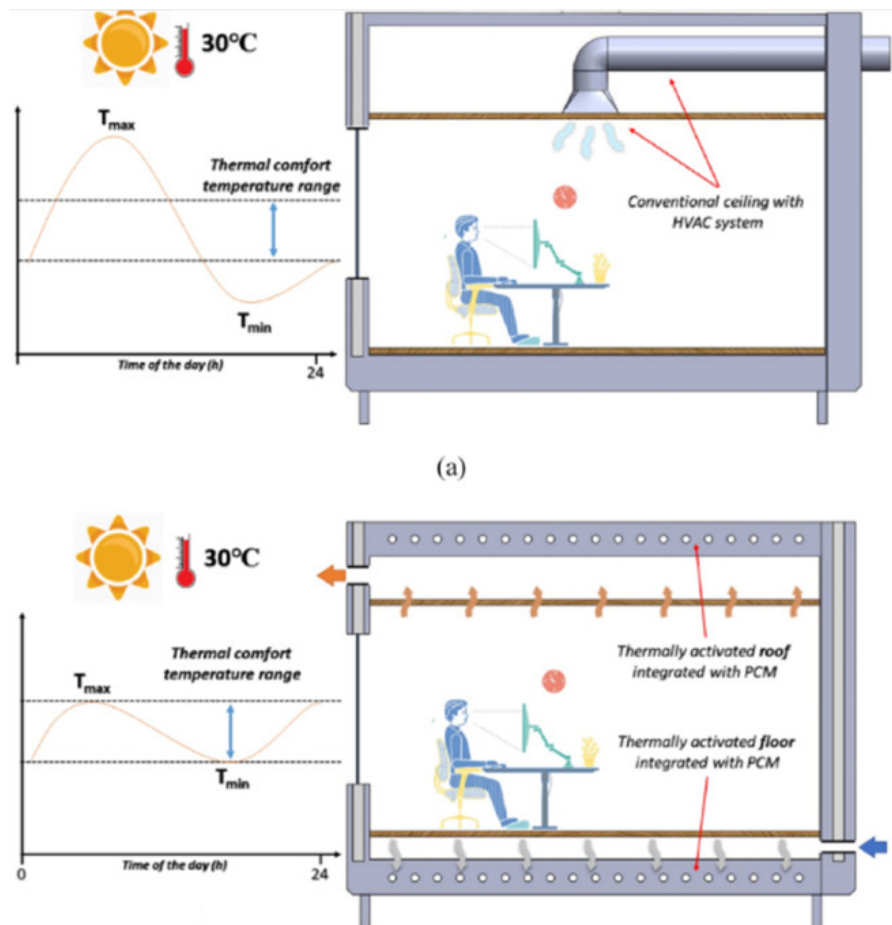


Figura 1.15: Schema che mostra la differenza tra (a) un ufficio con raffreddamento HVAC convenzionale e (b) un ufficio integrato con TABS e PCM [1].

### 1.5.2 Produzione di energia

Circa il 47% delle centrali solari a concentrazione esistenti utilizza lo stoccaggio del sale fuso per produrre elettricità. Detto questo, la questione chiave relativa al sistema a sali fusi è la necessità di grandi volumi di stoccaggio, scambiatori di calore costosi e la necessità di installazioni pesanti.

Li et al. [27] hanno studiato i progressi dei PCM integrati a sale fuso e hanno scoperto che la tecnologia può fornire risultati promettenti per gli impianti solari concentrati che operano a temperature medio-alte comprese tra 200 e 1000 °C. La conclusione dell'esperienza ha illustrato una configurazione che comprendeva l'area superiore del 25% del sistema con un sale fuso con PCM ad alta temperatura di H525. La sezione centrale del sistema di accumulo termico è stata riempita di cemento al 50% e il fondo è stato riempito con sale fuso a bassa temperatura di H325. Questa disposizione come mostrato figura 1.16 in ha offerto le migliori prestazioni cicliche tra tutti i test eseguiti.

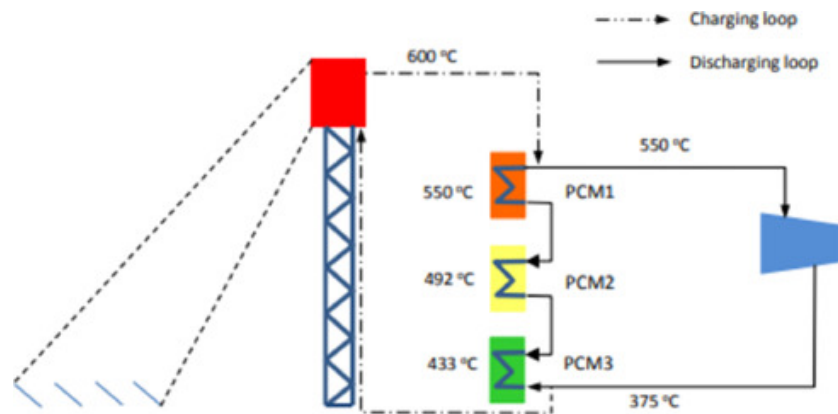


Figura 1.16: Centrale elettrica a torre solare con dispositivo TES a cascata a base di sali fusi [1].

### 1.5.3 HVAC

Gli edifici per uffici di grandi dimensioni esistenti possono richiedere riscaldamento e raffreddamento simultanei. Le zone interne di un edificio tendono a surriscaldarsi a causa del calore di scarto generato da fattori interni (persone, illuminazione e attrezzature), mentre le zone perimetrali richiedono il riscaldamento a causa della dispersione termica attraverso finestre, muri e infiltrazioni. L'approccio convenzionale per affrontare questa situazione è quello di utilizzare sistemi a quattro tubi. Un sistema a quattro tubi comprende due tubi di alimentazione e due tubi di ritorno per l'acqua. Di conseguenza, alcune zone possono ricevere acqua fredda mentre altre zone ricevono acqua calda, il che significa che il riscaldamento e il raffreddamento possono essere forniti contemporaneamente.

L'integrazione del dry cooler ha consentito di evitare l'utilizzo del raffreddamento meccanico ogniqualvolta la temperatura dell'aria ambiente fosse favorevole. Tuttavia, durante la stagione estiva, i carichi di raffreddamento degli edifici sono stati soddisfatti utilizzando il raffreddamento meccanico.

Per estendere ulteriormente lo sfruttamento del free cooling, un modello di scambiatore di calore basato su PCM è stato sviluppato con Modelica e accoppiato con il nuovo sistema HVAC.

Un progetto concettuale del gruppo scambiatore di calore basato su PCM è illustrato in Figura 1.17. È costituito da un contenitore del PCM, una ventola per migliorare il trasferimento di calore ed una serranda mobile. Il principio di funzionamento include due modalità: processo di carica e processo di scarica. Il processo di carica avviene durante la notte. La serranda è aperta e la ventola soffia aria ambiente verso il contenitore del PCM per solidificare il PCM e, quindi, immagazzinare l'energia di raffreddamento. Il processo di scarica avviene durante il giorno. La serranda è chiusa, isolando lo scambiatore di calore dall'esterno. L'acqua di ritorno che scorre attraverso lo scambiatore di calore si trova a una temperatura superiore al punto di fusione del PCM. Pertanto, il PCM assorbe il calore e il materiale si scioglie [30].

Tra le quattro configurazioni di impianto termico, la prestazione energetica più elevata è stata raggiunta dalla configurazione che include la pompa di calore reversibile aria-acqua accoppiata allo scambiatore di calore a base PCM. Il con-

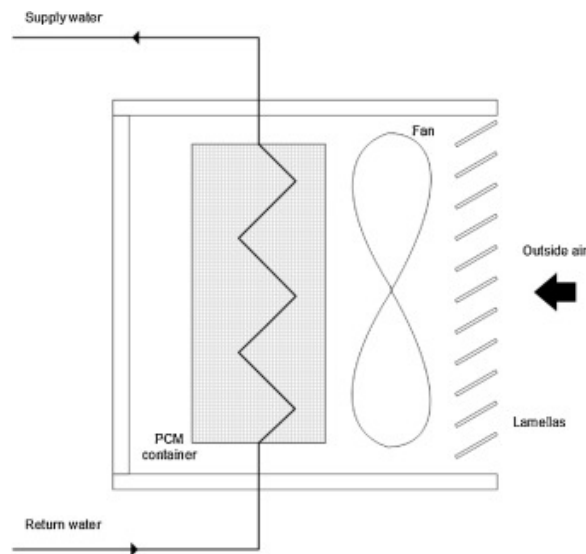


Figura 1.17: Scambiatore di calore [30].

sumo annuo di energia primaria è stato di  $6,3 \text{ kWh/m}^2$ , con un risparmio del 67% rispetto alla configurazione di base.

#### 1.5.4 Automobili

I veicoli elettrici e gli HEV (Hybrid Electric Vehicles) soddisfano ancora oggi alcune limitazioni relative all'autonomia, prezzo, tempo di ricarica, possibilità di ricarica locale, batteria a vita, aspetti di comfort legati alla cabina. La maggior parte dei problemi sono legati al sistema di batterie, che è il componente più cruciale e costoso dei BEV (Battery Electric Vehicles). Di conseguenza, un aspetto cruciale per la penetrazione del mercato è il miglioramento delle prestazioni energetiche e della durata delle batterie. Per aiutare la penetrazione del mercato, sono necessari un sistema di batterie su larga scala e una velocità di corrente elevata sopportabile per migliorare la potenza e/o l'energia incorporata negli EV/HEV. Tuttavia, a livelli di corrente elevata, queste batterie producono molto calore durante il funzionamento, come accelerazione rapida, cicli di scarica prolungata o carica rapida. Pertanto, un sistema di gestione termica della batteria (BTMS) deve essere implementato per mantenere la temperatura di funzionamento delle batterie tra questi limiti.

Due BTMS tradizionali sono stati ampiamente studiati per applicazioni automobilistiche :

- Raffreddamento ad aria forzata;
- Fluido di raffreddamento diretto/indiretto.

Il sistema di alimentazione dell'automobile Nissan Leaf, ad esempio, che si basa solo sul raffreddamento ad aria, stava perdendo la capacità della batteria a un ritmo più veloce di quanto pubblicizzato. Il sistema della batteria utilizza essenzialmente una singola ventola per distribuire il calore in modo uniforme all'interno del sistema. In condizioni gravi, (circa  $50\text{-}60^\circ\text{C}$  in Arizona), a causa

della mancanza di un sistema di gestione termica ottimizzato, il calore prodotto stava esaurendo la capacità della batteria dei veicoli elettrici e l'autonomia andava quasi dimezzandosi.

I PCM introducono un livello meno complesso del design della batteria. Infatti, le celle del sistema di batterie sono circondate da questo materiale e utilizzano l'accumulo di calore latente per regolare la temperatura. I materiali a cambiamento di fase sono sistemi in grado di catturare e rilasciare il calore generato durante la fusione e la solidificazione.

Lin et al. [31] hanno riportato un TMS (Thermal Management System) passivo per moduli batteria  $LiFePO_4$  realizzati con PCM. Per risolvere la bassa conduttività termica del PCM, come mostrato in figura 2.18, il sistema della batteria è circondato da grafite espansa e fogli di grafite che possiedono una conducibilità termica 24 volte superiore a quella della paraffina. I risultati dei test hanno mostrato che la temperatura del sistema della batteria utilizzando PCM è stata ridotta del notevolmente a  $I = 40$  A e  $I = 80$  A, rispettivamente. Per completare lo studio, è stato eseguito un test di inattività in cui non sono state applicate funzioni di carica o scarica al sistema della batteria. È stato riferito che la temperatura del modulo batteria con PCM è scesa molto più lentamente rispetto al modulo senza PCM. Ciò riflette un buon risultato per la temperatura minima raggiunta dalla batteria di veicoli EV o HEV a basse temperature perché il sistema della batteria viene mantenuto più a lungo a una temperatura ottimale.

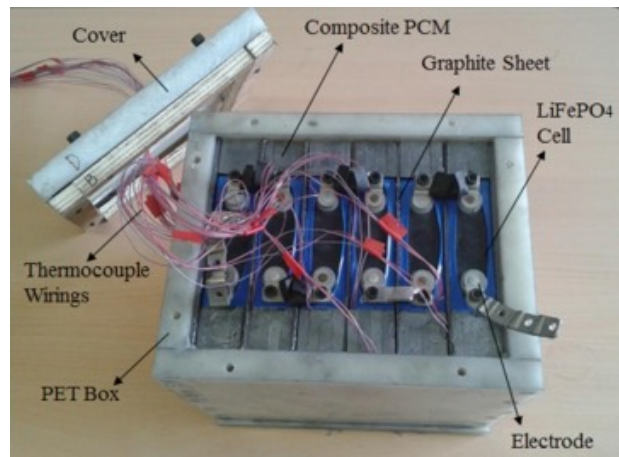


Figura 1.18: Prototipo di sistema di batterie con TMS passivo [31].

### 1.5.5 Celle a combustibile

In questo lavoro [32], il modello del reattore a idruro di metallo accoppiato con materiale a cambiamento di fase (PCM) come gestione del calore, viene modificato per descrivere meglio i comportamenti di trasferimento di calore e di massa dei processi di assorbimento/desorbimento continuo di idrogeno. Attraverso la validazione sperimentale, il modello modificato si è dimostrato più accurato del modello tradizionale. Quindi, sulla base del modello proposto, le prestazioni del reattore a idruro di metallo sono ulteriormente ottimizzate dall'analisi parametrica, dalle proprietà e dalla modifica della configurazione. I risultati mostrano che il reattore a idruro metallico raggiunge un'efficienza di stoccaggio dell'idrogeno del



47% alla temperatura di cambiamento di fase di 42 °C, che è superiore a 35 e 49 °C. Aggiungendo grafite espansa al PCM, l'efficienza di stoccaggio dell'idrogeno può aumentare fino a circa il 72%, che è superiore all'efficienza precedentemente riportata del 69%. Ciò è dovuto al maggiore trasferimento di calore tra l'idruro di metallo e il PCM.

### 1.5.6 Elettronica

Il PCM viene posizionato attorno alla sezione adiabatica del condotto termico (Heat Pipe) in cui il calore viene assorbito e rilasciato a seconda della potenza assorbita all'evaporatore e della velocità dei ventilatori al condensatore. Gli esperimenti vengono eseguiti per ottenere le distribuzioni di temperatura dell'evaporatore, del condensatore e del PCM durante i processi di carica, scarica e carica/scarica simultanei. Nel presente studio, l'acqua, il tricosano e il tricosano potenziato con nano additivi vengono utilizzati come materiali per l'accumulo di energia. I PCM nano avanzati vengono preparati miscelando diverse percentuali di volume (0,5%, 1% e 2%) di  $Al_2O_3$  nanoparticelle con Tricosano. La conducibilità termica del PCM nano potenziato viene misurata e risulta essere migliorata fino a un massimo del 32% rispetto al tricosano puro. Vengono inoltre studiati gli effetti dei volumi di riempimento del PCM, delle velocità della ventola e della potenza di riscaldamento sulle prestazioni del modulo di raffreddamento. Da questo studio è emerso che la temperatura dell'evaporatore del tubo di calore con PCM potenziato nano è diminuita di circa il 25,75%, il che può far risparmiare il 53% della potenza della ventola rispetto a un tubo di calore tradizionale. È stato anche scoperto che il PCM nano avanzato può immagazzinare quasi il 30% dell'energia fornita all'evaporatore, riducendo il consumo di energia della ventola [33].

## 1.6 Stato dell'arte dell'additive manufacturing (AM)

La stampa 3D, più formalmente nota come produzione additiva (AM), ha il potenziale per rivoluzionare il settore delle costruzioni, con vantaggi prevedibili tra cui una maggiore efficienza strutturale, riduzione del consumo di materiale e degli sprechi, razionalizzazione e accelerazione del processo di progettazione-costruzione, personalizzazione migliorata, maggiore libertà architettonica e maggiore precisione e sicurezza in loco. A differenza dei metodi di produzione tradizionali per i prodotti da costruzione, la stampa 3D in metallo offre pronte opportunità per creare sezioni non prismatiche, irrigidimenti interni, aperture, elementi funzionalmente classificati, microstrutture variabili e proprietà meccaniche attraverso riscaldamento e raffreddamento controllati e precompressione indotta termicamente. La produzione additiva offre molte opportunità per il settore delle costruzioni, ma ci saranno anche nuove sfide e richieste, come la necessità di ingegneri più esperti nel digitale, un maggiore utilizzo di analisi computazionali avanzate e un nuovo modo di pensare per la progettazione e la verifica delle strutture, con maggiore enfasi sull'ispezione e sui test di carico. Si prevede che l'AM integrerà, piuttosto che sostituire, i processi di produzione convenzionali, con un chiaro potenziale per soluzioni ibride, rinforzi strutturali e riparazioni [34].

È generalmente riconosciuto che il settore edile è in ritardo rispetto all'industria aerospaziale e automobilistica in termini di diffusione della tecnologia, innovazione e livelli di produttività. Molti progetti di costruzione utilizzano ancora metodi e pratiche lavorative prevalentemente tradizionali, come i disegni bidimensionali, il controllo manuale del posizionamento del calcestruzzo, l'uso di casseforme e strutture temporanee, il posizionamento manuale di rinforzi e livellamenti e una forza lavoro transitoria, che porta a una perdita di conoscenza al completamento del progetto e un maggior rischio di incidenti. Un importante progresso nella costruzione è stato il passaggio al CAD 3D e alla modellazione delle informazioni sugli edifici (BIM), così come la produzione fuori sede, sebbene ciò sostanzialmente allontani le tecniche tradizionali dal cantiere. Chiaramente c'è spazio per abbracciare ulteriormente l'innovazione nella costruzione e ci sono opportunità da esplorare per l'adozione di tecniche di stampa 3D.

Le tecniche di produzione convenzionali sono o sottrattive, dove la quantità di materiale all'interno di un oggetto è ridotta, come la lavorazione di un blocco metallico, o sono formative, dove la quantità di materiale utilizzata è conservata, come la sagomatura (ad esempio laminazione a caldo o formatura a freddo) o colare utilizzando uno stampo. La produzione additiva aumenta la massa dei componenti durante il processo di produzione, in genere costruendo un oggetto strato per strato dai dati del modello 3D attraverso un processo automatizzato. Il concetto di produzione additiva può essere fatto risalire alla foto scultura negli anni '60 dell'Ottocento, dove le sculture tridimensionali venivano prodotte da una serie di foto bidimensionali. Un notevole sforzo di ricerca negli anni '60 e '70 ha portato allo sviluppo della fotopolimerizzazione per polimeri, fusione a letto di polvere per ceramica, metalli e polimeri e laminazione di fogli per ceramica, metalli, carta, polimeri e legno. La stereolitografia, un tipo di fotopolimerizzazione, in cui un polimero liquido sensibile ai raggi ultravioletti viene polimerizzato utilizzando un laser, è stata la prima tecnica di produzione additiva commercializzata alla fine degli anni '80.

La produzione additiva in metallo è attualmente utilizzata nelle industrie biomedicali e aerospaziali per produrre parti di uso finale di alto valore, che sono altamente personalizzate o prodotte in piccole quantità. Si stima che il mercato totale dell'AM abbia un valore di oltre 4 miliardi nel 2014, con il mercato delle parti per uso finale pari a 1,7 miliardi, e si prevede che crescerà fino a oltre 21 miliardi entro il 2020. Al di là dei tradizionali settori ad alto valore, la produzione additiva sta iniziando a essere esplorata nel settore delle costruzioni per costruire ponti, case e uffici in cemento, case di plastica e nodi e ponti di connessione in metallo.

### **Industria aerospaziale**

La produzione additiva in metallo è attualmente utilizzata nell'industria aerospaziale grazie ai suoi vantaggi rispetto alle tecniche di produzione convenzionali. Una metrica popolare nell'industria aerospaziale è il rapporto buy-to-fly, che è il rapporto tra la massa del materiale acquistato e la massa del componente finito finale. I rapporti buy-to-fly compresi tra 10 e 20 sono comuni, sebbene possano essere anche più alti. Le tecniche sottrattive tradizionali sono molto dispendiose, mentre le tecniche AM sprecano meno materiale e consentono forme strutturali più ottimizzate con il risultato di un componente finale più leggero. È stato sti-

mato che AM potrebbe risparmiare 4,3 milioni di euro per un aereo e 770 euro per un'auto da sottrarre nei costi di produzione e consumo di carburante ridotto per tutta la durata del veicolo. Le parti prodotte in modo additivo vengono generalmente utilizzate per componenti non critici per la sicurezza e su aerei militari piuttosto che commerciali, a causa della variabilità del processo di produzione. I nuovi modelli dell'Eurofighter Typhoon utilizzano componenti prodotti in modo additivo nella loro unità di condizionamento dell'aria, così come l'Airbus A380 per le staffe all'interno della cabina passeggeri [34]. GE Aviation ha sviluppato un ugello per carburante AM in metallo (vedi figura 1.19), che ha ridotto l'oggetto finale da 18 pezzi a un singolo pezzo, ha ridotto inoltre la massa di un quarto e ha portato a un aumento di cinque volte della durata del pezzo. GE Aviation ha ricevuto ordini per oltre 8.000 motori, ciascuno contenente diciannove ugelli di carburante fabbricati in modo additivo. Prevedono di produrre 100.000 parti strutturali AM entro il 2020, con tassi di produzione di 40.000 componenti all'anno utilizzando più di 400 macchine AM.



Figura 1.19: Ugello carburante GE Aviation prodotto in modo additivo [34].

Nel 2013, SpaceX ha costruito e testato una camera del motore in superlega di nichel prodotta in modo additivo. Hanno notato che la nuova tecnica di produzione ha ridotto il tempo dal concetto al prototipo di un ordine di grandezza, fino a circa tre mesi. La camera del motore è stata accesa più di 80 volte. L'anno successivo SpaceX lanciò un razzo con componenti prodotti in modo additivo nei motori, i componenti potevano funzionare ad alta pressione e vibrazioni e a basse temperature criogeniche. La costruzione ha richiesto due giorni anziché molti mesi per la fusione e si è riscontrato che le valvole costruite hanno una forza, duttilità e resistenza alla frattura superiori rispetto ai componenti fusi convenzionalmente.

### Industria automobilistica

La realizzazione di strutture mediante AM è stata sperimentata nella produzione di inserti per lo stampaggio nell'industria automobilistica. Sebbene gli inserti richiedessero un'ulteriore lavorazione dopo la costruzione, la produzione si è rivelata più economica rispetto ai metodi convenzionali a causa dei tempi di costruzione più rapidi e gli inserti hanno raggiunto livelli di prestazioni comparabili nei test. La produzione additiva è stata anche esplorata in un contesto sportivo con componenti idraulici in lega di titanio costruiti e testati in conformità con gli standard

interni di Red Bull Racing. I componenti hanno soddisfatto tutti i requisiti dei test e si è scoperto che la produzione additiva consente un peso inferiore e forme più ottimizzate, portando a un flusso del fluido più efficiente [34].

### Industria energetica

La produzione additiva è stata utilizzata anche nel settore energetico per la riparazione delle turbine a gas. L'usura della punta del bruciatore richiede una manutenzione regolare, che comporta il taglio della vecchia punta e la saldatura di una sostituzione prefabbricata. La produzione additiva ha consentito riparazioni notevolmente più rapide, fino al 90% più veloci, poiché è sufficiente rimuovere il materiale danneggiato prima di aggiungere nuovo materiale. Le vecchie versioni dei bruciatori possono anche essere aggiornate con gli ultimi miglioramenti, con conseguenti ulteriori risparmi sui costi. Nella costruzione, si può prevedere che le tecniche di produzione additiva potrebbero essere utilizzate per riparare elementi strutturali danneggiati o corrosi o addirittura essere utilizzate per "aggiornare" una struttura in loco in risposta alle crescenti richieste di carico.

#### 1.6.1 Opportunità per l'AM

Un'opportunità chiave che la produzione additiva offre rispetto ai processi di produzione tradizionali è la flessibilità geometrica sia su macro che su microscala, consentendo strutture e materiali ingegnerizzati altamente ottimizzati. I progettisti non si limitano più a lavorare con geometrie semplici, con forme non rientranti e spessori di parete costanti. La produzione additiva sblocca una varietà di nuove sezioni e forme strutturali, come sezioni trasversali ed elementi con spessori di parete variabili attorno al perimetro o lungo la lunghezza, o sezioni cave con caratteristiche di rinforzo interne e chiavi di taglio, per migliorare l'azione del composito con il riempimento materiale, che non era tecnologicamente o economicamente fattibile con metodi convenzionali (vedi figura ??).

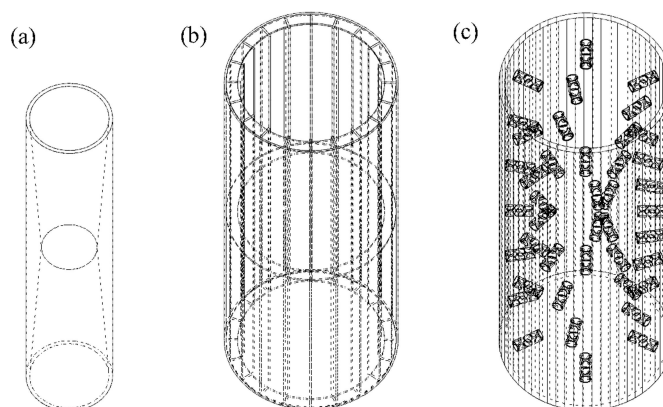


Figura 1.20: Esempio di componenti con spessori variabili [34].

La capacità di collocare il materiale nelle posizioni strutturalmente ottimali è una caratteristica importante dell'AM, con vantaggi ad ampio raggio, non ultima una riduzione del consumo di materiale e degli sprechi, e quindi in definitiva dei costi. Questo concetto trova applicazione in una trave continua, con profondità

complessiva variabile, che può essere sostituita con una trave metallica realizzata con stampa 3D a profondità costante, con spessore variabile della flangia. Il materiale viene posizionato dove è necessario per soddisfare le richieste del diagramma del momento flettente, e le sezioni più robuste e quindi geometricamente più duttili coincidono con i punti che richiedono maggiori capacità di rotazione. Viene mantenuta la compatibilità con le filosofie di progettazione esistenti, avendo dimensioni esterne coerenti.

Su microscala, le proprietà del materiale possono essere modificate per produrre materiali ingegnerizzati con comportamento meccanico controllato. La porosità degli impianti biomedici viene deliberatamente aumentata nelle posizioni chiave per ridurre la rigidità del materiale e migliorare la compatibilità con l'osso umano adiacente. All'interno della costruzione questo potrebbe essere utilizzato per distribuire forze e momenti nel modo più favorevole riducendo la rigidità per attirare meno forza in alcune aree, o utilizzato per produrre elementi di assorbimento di energia sacrificale per strutture in aree sismiche.

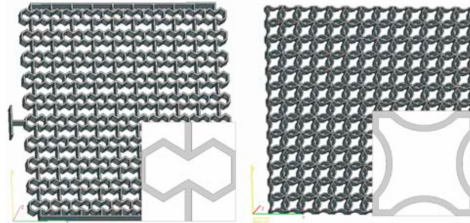


Figura 1.21: Struttura a nido d'ape con porosità variabile [34].

### 1.6.2 Esempio applicativo per i PCM

Come è stato trattato nel paragrafo relativo alle tecniche per l'incremento delle prestazioni dei PCM, l'utilizzo delle superfici estese risulta sicuramente una tecnica interessante e infatti nel *capitolo 3* quando si affronterà la composizione dell'impianto sperimentale, salteranno all'occhio queste superfici estese create mediante AM. Esistono perciò delle estensioni della stampa 3D che non comprendono perciò solo applicazione nel settore aerospaziale, costruttivo, automobilistico. In particolare, verrà presentato un esempio di schiuma metallica realizzata mediante tecnologia additiva.

Lo studio di Bi et al. [35] si concentra sulla sintesi e caratterizzazione di schiume fragili a celle aperte con caratteristiche morfologiche controllate. Le tassellazioni Laguerre vengono utilizzate per creare topologie di schiuma casuale che vengono quindi prodotte in modo additivo mediante stereolitografia (SLA). Il materiale di base qui utilizzato è un fotopolimero ad alta temperatura con basso allungamento a rottura. La polimerizzazione eccessiva viene utilizzata per migliorare la fragilità del solido. Gli esperimenti in sito vengono eseguiti su campioni stampati in 3D con osso di cane per misurare la risposta allo sforzo-deformazione del materiale e la resistenza alla frattura associata. La microstruttura dei campioni di schiuma viene analizzata utilizzando la microtomografia computerizzata per quantificare le deviazioni morfologiche indotte dalla produzione. Lo scopo è sintetizzare microstrutture di schiuma a celle aperte che condividono le proprietà delle schiume

commerciali ma senza, o solo minime, imperfezioni indotte dalla produzione sotto forma di anisotropia, facce chiuse e/o montanti rotti che sono sempre presenti nella schiumatura convenzionale.

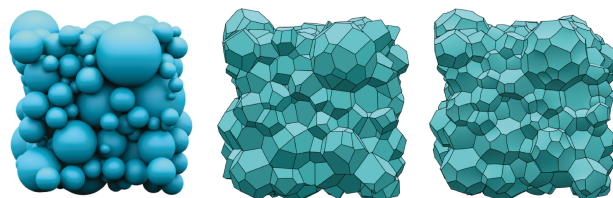


Figura 1.22: Topologie di generazione di schiume: (a) impaccamento di sfere, (b) tassellazione di Laguerre, (c) struttura di schiuma casuale [35].

I modelli cubici di topologie a celle aperte monodisperse vengono generati utilizzando il framework precedente. La figura 1.23 mostra la struttura scheletrica di una tale schiuma di sapone con 1000 cellule, che è il precursore della schiuma a celle aperte. Le coordinate e le connettività di tutti i nodi e gli spigoli vengono importate in nTopology, un software di progettazione incentrato sui materiali reticolari, e successivamente a tutti gli spigoli viene assegnata una sezione trasversale circolare uniforme. Diverse densità relative della schiuma possono essere ottenute controllando il valore dell'area della sezione trasversale.

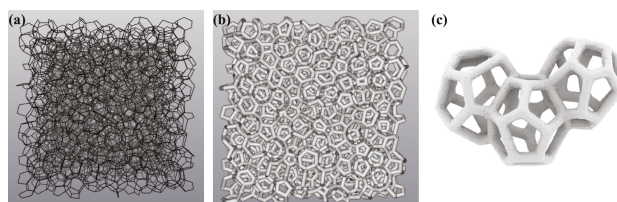


Figura 1.23: Topologie di generazione di schiume: (a) impaccamento di sfere, (b) tassellazione di Laguerre, (c) struttura di schiuma casuale [35].

Il modello 3D di schiuma risultante viene sintetizzato in una stampante basata sulla stereolitografia (Form2 di Formlabs) con uno spessore di 50  $\mu\text{m}$  utilizzando una resina fotoinduribile ad alta temperatura. SLA utilizza un raggio laser ultravioletto (UV) sulla resina per avviare una reazione a catena in cui i monomeri attivi ai raggi UV si convertono in catene polimeriche. Dopo la polimerizzazione, un motivo all'interno dello strato di resina viene solidificato per trattenere gli strati successivi. Il materiale di base è stato scelto per il suo allungamento nominale a rottura che è di circa il 2%. Il protocollo di post-elaborazione prevede il lavaggio in alcool isopropilico per 15 minuti per rimuovere la resina liquida dalle schiume stampate in 3D, seguito da polimerizzazione UV per 120 minuti a 60  $^{\circ}\text{C}$ . Risulta chiaro in una fase successiva alla realizzazione controllare il grado di precisione assolto dalla stampante 3D selezionata. Per misurare le distorsioni indotte dalla produzione, si confrontano ulteriormente gli orientamenti dei legamenti di schiuma. Si ricorda che la schiuma simulata nel Surface Evolver è vincolata dalle leggi di Plateau e quindi quattro bordi si incontrano all'angolo tetraedrico 109,47  $^{\circ}$ . Gli angoli corrispondenti tra le coppie di legamenti per il design e la schiuma sintetizzata mostrano una distorsione minima ( $<2^{\circ}$ ) tra i due oggetti 3D, essendo entrambi molto vicini alla topologia della schiuma idealizzata.

Questo perciò mostra nella stampa 3D un notevole alleato per la realizzazione fedele di geometrie molto complesse con un basso grado di distorsione tra la geometria prodotta e quella ottenuta, anche nel caso dell'utilizzo da noi fatto accoppiando queste strutture ai materiali PCM.

## Capitolo 2

# Impianto Sperimentale

### 2.1 Strutture metalliche

Nel *paragrafo 1.6* è stato messo in evidenza come la stampa 3D possa essere sfruttata per la realizzazione di strutture utili per lo scambio termico. Infatti, in questo lavoro sono state realizzate delle strutture di dimensioni 100 x 100 x 40 mm con diverse geometrie di cella e porosità: rapporto tra volume di vuoto e volume complessivo (vuoto + struttura porosa). Su entrambi i lati delle strutture sono stati effettuati 6 fori per inserire un totale di 12 termocoppie (figura 2.1). Chiaramente il lato su cui verrà applicato il carico termico prenderà il nome di lato riscaldato mentre dalla parte opposta si troverà il lato cosiddetto adiabatico. Al centro, in corrispondenza del setto poroso, verrà introdotto il PCM su cui poi verranno spesi maggiori dettagli.

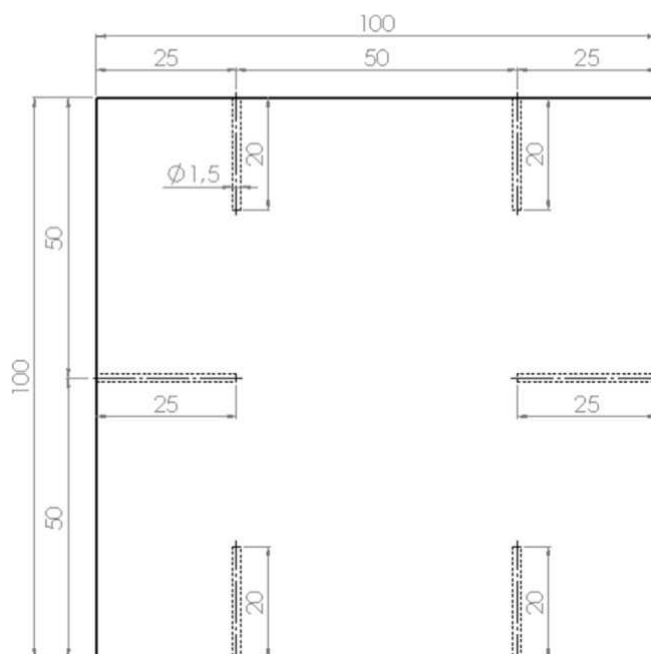


Figura 2.1: Vista in pianta delle posizioni dei fori di un singolo lato [36].

Le strutture saranno composte da una lega in alluminio visto che non risulta possibile attraverso la tecnologia additiva sfruttare materiali puri. Infatti, es-



sendoci del Silicio nella lega utilizza *AlSi10Mg* la conduttività termica risulta ridotta a  $175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Nella seguente tabella verranno proposte le proprietà della lega utilizzata.

Materiali	AlSi10Mg
Densità [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	2670
Conduttività [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]	175
Calore specifico [ $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]	920

Tabella 2.1: Proprietà della lega utilizzata per le estrusioni.

Le geometrie precedentemente realizzate mediante il software di modellazione 3D SolidWorks sono le seguenti:

- Struttura Body-Centered-Cubic (BCC) avente dimensione della cella base pari a 10 mm e densità relativa del 13%.
- Struttura Body-Centered-Cubic (BCC) avente dimensione della cella base pari a 5 mm e densità relativa del 13%.

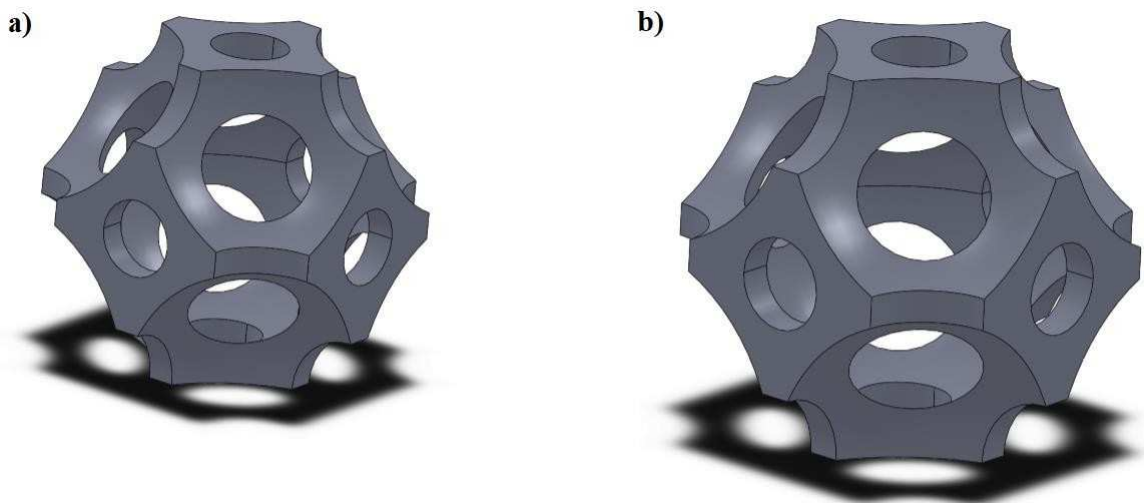


Figura 2.2: Celli elementari BCC di a) 5 mm e b) 10 mm.

- Struttura reticolare avente celle cubiche di lato 5 mm e densità relativa del 13%.
- Struttura reticolare avente celle cubiche di lato 10 mm e densità relativa del 13%.
- Struttura reticolare avente celle cubiche di lato 5 mm e densità relativa del 6%.
- Struttura reticolare avente celle cubiche di lato 10 mm e densità relativa del 6%.

Chiaramente per le strutture reticolari la dimensione su cui si va a lavorare per far variare la densità relativa risulta essere lo spessore dei lati che compongono la cella cubica. Sostanzialmente risulta difficile vederlo ad occhio ma si crea una medesima struttura semplicemente rendendola più "esile".

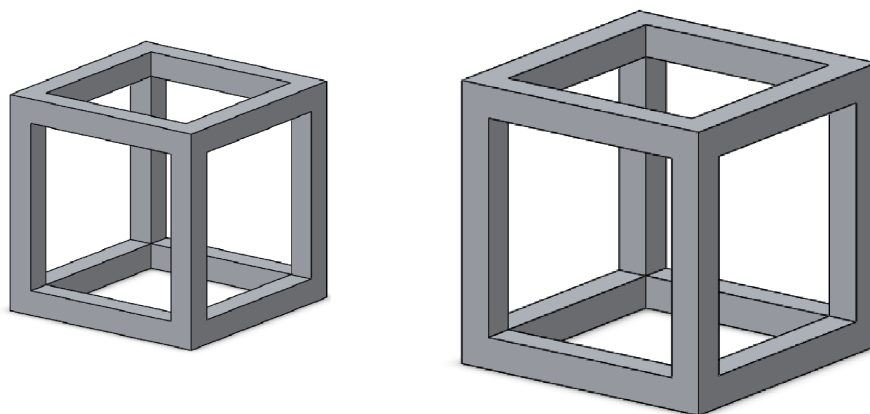


Figura 2.3: Celli elementari reticolari di a) 5 mm e b) 10 mm.

## 2.2 Geometria reticolare

Le superfici a cella reticolare hanno preso come riferimento la geometria studiata da Hu e Gong [37]. Le fibre che generano le celle cubiche hanno una sezione quadrata che varia a seconda che la densità relativa sia del 13 o del 6%. Per cui si possono definire sostanzialmente due parametri: lunghezza del lato del cubo della cella elementare ( $l$ ) e spessore della fibra ovvero il lato della sezione quadrata di essa ( $s$ ).

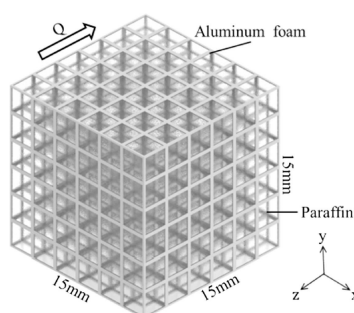


Figura 2.4: Geometria studiata da Hu e Gong [37].

Le dimensioni di cella da 5 e 10 mm sono state rese tali per avere un confronto con le strutture BCC che poi saranno analizzate nel dettaglio. La differenza è che avendo la possibilità di variare non solo il parametro  $l$  ma anche molto facilmente  $s$ , si è pensato di realizzare strutture con densità relativa diversa per osservare non solo come la geometria influenza lo scambio termico ma anche la densità. In particolare il parametro  $s$  nel caso di struttura con porosità ( $\epsilon$ ) del 87% (ovvero densità relativa del 13%) risulta uguale a 1.13 mm mentre per porosità del 94% di

0.8 mm (chiaramente a parità di dimensioni di cella 10 mm). Per le due strutture con cella di 5 mm il parametro  $s$  risulta uguale a 0.565 mm nel caso di porosità 87% e di 0.4 mm per porosità del 94%. Chiaramente le dimensioni principali del modulo sono le medesime per tutti e 6 i moduli, ovvero 100 x 100 x 40 mm. Essendo difficile distinguere la differenza di densità relativa, qui sotto verranno mostrati due moduli con struttura reticolare e densità relativa medesima del 13%.

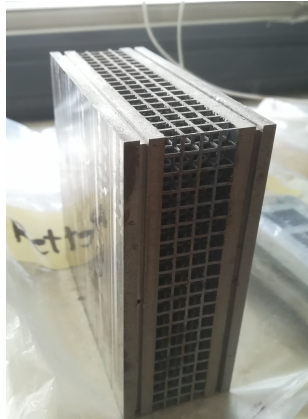


Figura 2.5: Esempio di un modulo di prova a struttura reticolare, cella 5 mm e densità relativa 13%.



Figura 2.6: Esempio di un modulo di prova a struttura reticolare, cella 10 mm e densità relativa 13%.

E' interessante specificare che la stampante 3D dell'Università di Udine ha avuto dei problemi nella realizzazione. Partendo a depositare materiale posizionando il blocco orizzontale, ovvero con pianta 100 x 100 e altezza 40 mm, il peso della parte piena di altezza 10 mm è andato a schiacciare la struttura porosa che non riusciva a reggerne il peso considerando che la solidificazione non è immediata. Di conseguenza una modifica lieve è stata fatta per generare strutture ausiliarie che supportassero il peso stesso nella fase additiva per poi essere rimosse mediante taglio per elettroerosione. Risalta subito all'occhio il principale inconveniente della tecnologia additiva: la necessità di utilizzare strutture in grado di supportare il peso del materiale che si deposita negli strati superiori e deforma la

struttura inferiore già realizzata. Per ovviare a questo inconveniente la struttura con cella reticolare è stata generata ruotando la struttura di  $45^\circ$  in modo che i legamenti, crescendo obliquamente, non avessero necessità di supporti.

## 2.3 Body-Centered-Cubic

Per quanto riguarda questa struttura risulta interessante comprendere come sia stata creata, in particolare si basa sull'articolo di Krishnan et al. [38]. Molto semplicemente ad un volume di un cubo si procede sottraendo il volume di 9 sfere, una per vertice ed una posizionata al centro. Anche in questo caso ci sono dei parametri per caratterizzare la geometria ovvero il lato del cubo ( $l$ ) e il raggio della sfera ( $r$ ). Quello che si ottiene è qui sotto rappresentato

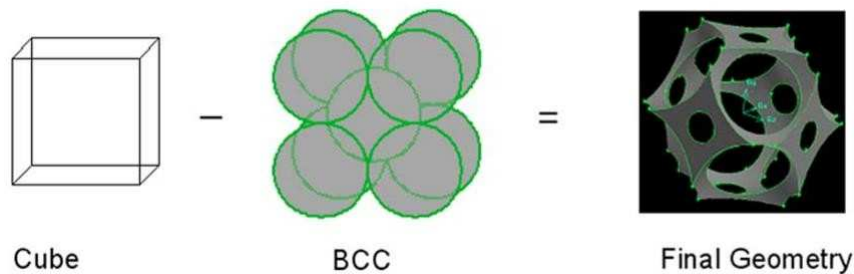


Figura 2.7: Operazione sottrattiva per generare la geometria finale (BCC) [38].

In questo caso però risulta molto difficile cambiare la porosità per cui ci si è limitati nel realizzare due sole strutture che differissero per la dimensione di cella mantenendo la porosità costante. Per cui questi due moduli possono essere confrontati con le rispettive strutture reticolari (con cella a 5 mm e 10 mm) e medesima porosità.

Nel dettaglio una BCC presenta lato del cubo  $l = 5$  mm e raggio della sfera  $r = 5.10$  mm mentre la seconda presenta  $l$  e  $r$  raddoppiati. Quello che si ottiene corrisponde perfettamente alla geometria finale di Krishnan come si evince nell'immagine seguente.

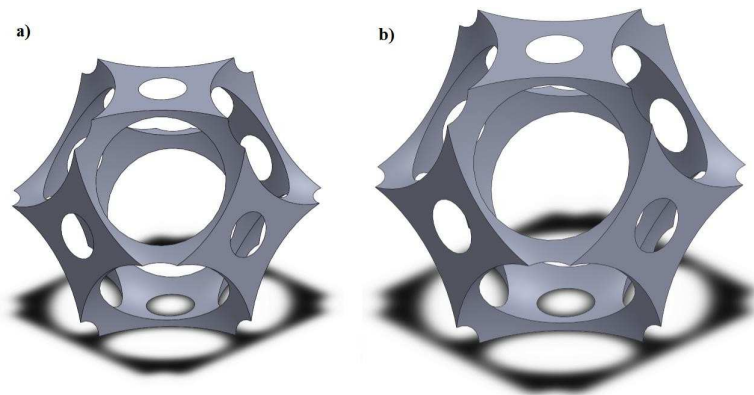


Figura 2.8: Geometria BCC con lato del cubo di a) 5 mm e b) 10 mm.

A questo punto però si presenta un ulteriore problema, diverso rispetto a quello presente per la stampa delle 4 strutture reticolari. In particolare, nella fase di creazione del file necessario per la definizione dei tracciati che la stampante deve effettuare, si vengono a generare dei punti in cui gli spessori sono infinitesimi, fibre troppo sottili e fori troppo piccoli. Di conseguenza, sia l'ugello della stampante e sia i motori che muovono l'ugello non riescono a soddisfare questo genere di precisione. Per ovviare a questo problema sono state ridotte le dimensioni delle sfere che dovevano essere sottratte in volume alla cella cubica incrementando perciò le fibre e gli spessori finali. Infatti, le geometrie finali possono essere viste nell'immagine 3.2 mostrata all'inizio del paragrafo.

Il modulo finale viene creato affiancando 2 o 4 celle, a seconda che la cella principale sia da 5 o 10 mm, e ripetute fino ad occupare un volume di 100 x 100 x 20 mm.



Figura 2.9: Geometria BCC finale con lato del cubo di 5 mm.

Non è disponibile l'immagine della struttura bcc con lato da 10 mm ma è sufficiente raddoppiare la dimensione di una singola cella ed immaginare di disporne 2 affianco invece di 4 (chiaramente sul lato più corto).

### Strutture utilizzate

Delle 6 strutture realizzate si andranno a testare solamente la BCC con  $\epsilon = 87\%$  e cella elementare di 10 mm e la Reticolare con  $\epsilon = 87\%$  e cella elementare di 10 mm in modo da porre l'attenzione sulla diversa geometria.

## 2.4 PCM utilizzati

I PCM che sono stati utilizzati sono PCM organici detti anche paraffine che presentano delle proprietà interessanti. In particolare, queste paraffine sono state

acquistate da un'azienda tedesca chiamata *Rubitherm GmbH* [39]. In totale sono 3 e presentano caratteristiche diverse fra loro come il calore latente e la temperatura di fusione. La scelta è ricaduta sulle paraffine non solo per le loro proprietà termofisiche ma anche per il fatto che non risultano né tossiche né corrosive e perciò sicure se maneggiate dall'uomo.

Qui di seguito verranno elencate le proprietà.

Tipo paraffina	RT42	RT55	RT64HC
Temperatura di fusione [°C]	38-43	51-57	63-65
Temperatura di solidificazione [°C]	43-37	56-57	64-61
Calore specifico [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	2000	2000	2000
Calore latente [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	165	170	250
Densità del solido [ $\text{kg/L}$ ]	0.88	0.88	0.88
Densità del liquido [ $\text{kg/L}$ ]	0.76	0.77	0.78
Conducibilità termica [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	0.2	0.2	0.2
Variazione di volume percentuale [%]	12.5	14	11

Tabella 2.2: Proprietà delle paraffine utilizzate.

L'azienda produttrice delle paraffine (*Rubitherm GmbH*) fornisce, oltre ai dati presentati in tabella, dei diagrammi in cui si osserva come viene distribuita l'entalpia.

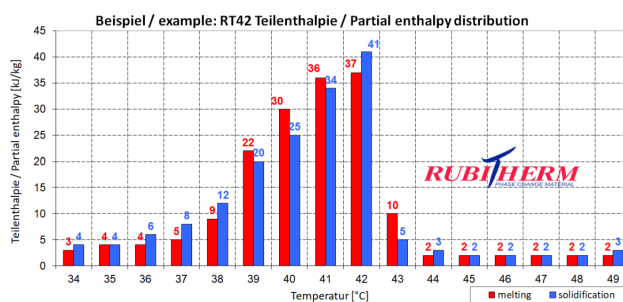


Figura 2.10: Distribuzione delle entalpie della paraffina RT42 [39].

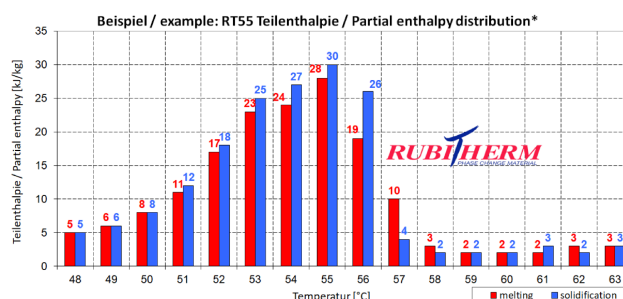


Figura 2.11: Distribuzione delle entalpie della paraffina RT55 [39].

L'interpretazione di questi grafici è presto fatta: ad ogni grado centigrado viene mostrata la quantità di entalpia accumulata durante la fase di fusione o

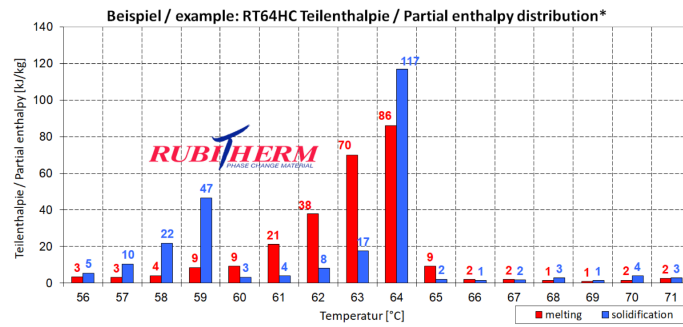


Figura 2.12: Distribuzione delle entalpie della paraffina RT64HC [39].

ceduta nella fase di solidificazione o nel caso di riscaldamento/raffreddamento sensibile. Questo perché i PCM considerati non cambiano di fase esattamente ad una temperatura ma piuttosto all'interno di un range. Perciò il calore latente deve essere ottenuto sommando non solo l'entalpia accumulata a 42°C (prendendo in considerazione la paraffina RT42) ma anche le entalpie prossime in modo da ottenere il valore del calore latente di 165 kJ/kg.

Da notare che la paraffina RT64HC presenta una concentrazione di entalpia molto elevata alla temperatura di 64°C che spiegherà poi alcuni risultati ottenuti. Inoltre, presenta un secondo picco alla temperatura di 60 °C osservabile anche dalle prove sperimentali.

## 2.5 Realizzazione del modulo di prova

Per la realizzazione del modulo di prova è stato considerato il lavoro di tesi di Giulio Parpinello [36]. La struttura portante utilizzata per contenere il PCM in modo tale da evitare eventuali perdite e al contempo fornire un adeguato isolamento termico ha portato alla scelta della bachelite. In seguito all'inserimento delle termocoppie nella struttura i due parallelepipedi di bachelite tagliati sono stati fissati ad essa con una resina epossidica.

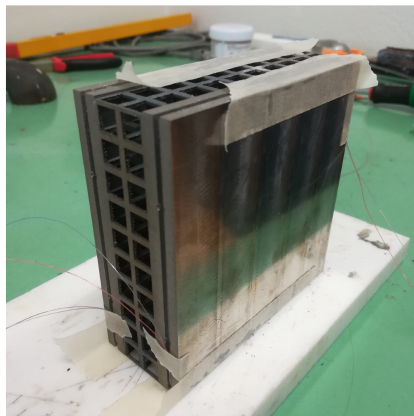


Figura 2.13: Termocoppie inserite nei 12 fori della struttura reticolare, cella 10 mm e porosità 87%.

Per visionare il fronte di fusione un vetro trasparente è stato posizionato sulla parte frontale e fissato con del silicone resistente alle alte temperature. Come si può osservare dalla figura 2.14 altre 3 termocoppie sono state inserite sul fianco ad altezze diverse per monitorare le temperature interne della paraffina. Queste termocoppie inguainate in Inox poi sono state fissate anch'esse con del silicone.

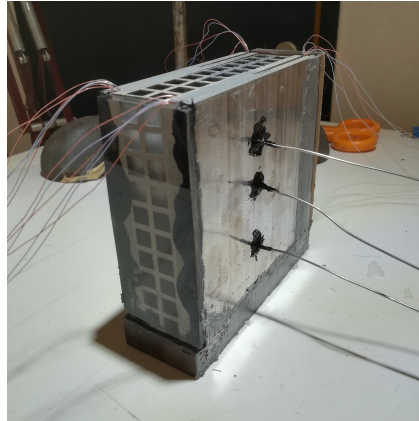


Figura 2.14: Modulo completo di vetro e termocoppie.

Le termocoppie laterali sono state fissate rispettivamente a 30 mm, 50 mm e 70 mm di altezza per quanto riguarda la BCC mentre per il modulo della figura precedente (reticolare con cella 10 mm), a causa della geometria interna è stato necessario traslare i fori. Di conseguenza, sono stati effettuati a 25 mm, 55 mm e 75 mm. Questi fori di diametro 2 mm permettono di inserire le termocoppie per 2 cm in modo da situare la punta esattamente a metà del modulo.

### 2.5.1 Contenitore

Questo modulo completo ma non ultimato è stato posto all'interno di un contenitore di teflon al fine di isolare termicamente le altre superfici rimaste scoperte. La geometria del modulo è stata realizzata su *SolidWorks* e come si può notare dalla figura presenta una rientranza sul lato sinistro che permette di alloggiare il riscaldatore elettrico che genererà il flusso termico. Le dimensioni della cava sono di 102 x 102 x 10 mm mentre dal lato opposto si possono notare i fori per far passare le termocoppie ancorate di lato.



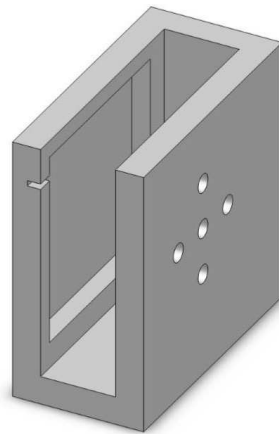


Figura 2.15: Contenitore di teflon [36].

### 2.5.2 Riscaldatore elettrico

Come accennato, all'interno della cava riportata nel teflon verrà posizionato un riscaldatore elettrico. Questo per simulare il comportamento tipico di un apparato elettronico quando si surriscalda (come ad esempio un processore). Il riscaldatore è stato dimensionato per una potenza specifica di  $20 \text{ kW m}^{-2}$  anche se le prove che si effettuano saranno proposte a potenze diverse variando semplicemente la tensione applicata al riscaldatore.

Il riscaldatore è formato da un cavo in lega nichel-cromo 80/20 che ha una resistenza di  $4.4006 \Omega/\text{m}$ . Questo cavo, dopo essere stato ricoperto da una guaina termorestringente, viene posizionato in un percorso a serpentina ricavato da una piastra di rame.



Figura 2.16: Piastra in rame su cui viene scavato l'alloggiamento per il cavo [36].

Questa piastra con all'interno il cavo viene quindi chiusa con una piastra medesima per rendere il tutto sigillato. L'utilizzo del rame in questo caso permette di diffondere in modo uniforme il calore prodotto dal cavo vista l'elevata conducibilità termica del materiale.

Le potenze termiche che verranno applicate sono rispettivamente di 100, 150 e 200 W che, vista la superficie di  $100 \times 100 \text{ mm}$  corrispondono ad un flusso termico

specifico rispettivamente di 10, 15 e 20 kW m<sup>-2</sup>. Questi valori sono stati scelti arbitrariamente ma rappresentano significativamente flussi reali e permettono di osservare, al variare del carico, la risposta del modulo.

### 2.5.3 Modulo finale

A questo punto, unendo al modulo precedente il contenitore in teflon con al suo interno il riscaldatore si ottiene nella sua completezza il provino su cui si inseriscono i 3 diversi PCM e su cui si applicano i 3 diversi flussi termici, per ciascun PCM chiaramente.

Viene applicata della pasta termica altamente conduttiva sulla superficie della piastra riscaldante a contatto con la struttura metallica. In questo modo il calore prodotto viene trasferito omogeneamente in tutta la superficie di contatto.

Per garantire un buon contatto termico tra la piastra riscaldante e il modulo di prova viene aggiunto un morsetto.

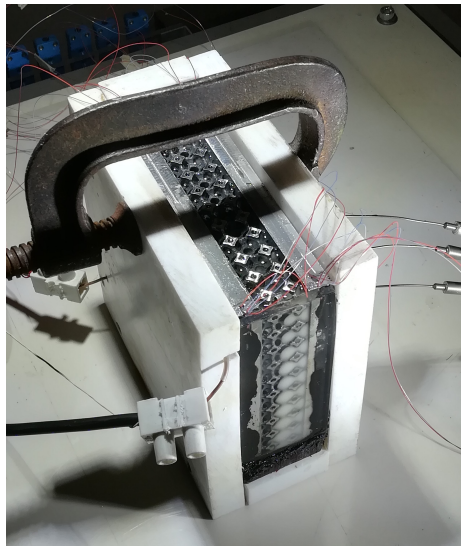


Figura 2.17: Modulo finale con struttura BCC e cella di 10 mm e porosità 87%.

## 2.6 Strumenti di misura e acquisizione

Gli strumenti utilizzati per la corretta esecuzione delle prove e delle tarature sono i seguenti:

- Un dispositivo necessario per fissare la temperatura del giunto freddo delle termocoppie a 0 °C. Per fare questo si utilizzerà il *KayeK170*;
- Un sistema di acquisizione della *National Instruments* necessario per le prove che poi verrà illustrato;
- Un ulteriore sistema di acquisizione, questa volta elettro-meccanico, denominato *Agilent A34970* necessario per la fase di taratura delle termocoppie, vedi paragrafo 2.6.1;

- Un bagno termostatico *Techne RB – 12A* sempre necessario per la fase di taratura;
- Un generatore CEA in corrente continua che permette di regolare tramite manopole la tensione e corrente in modo da ottenere la potenza desiderata;
- Termocoppie di tipo T con fili in rame e costantana e dotate di guaina in inox; Una termoresistenza *Pt100* che presenta un'incertezza di  $\pm 0.03$  °C.

Il sistema di acquisizione della prova è composto da schede della *National Instruments* ognuna delle quali è composta da 20 canali. A seconda delle schede la misura acquisita può essere di tensione o corrente ed in particolare la prima scheda raccoglie segnali provenienti da:

- 3 termocoppie in inox inserite nel PCM;
- 6 termocoppie del lato riscaldato;
- 6 termocoppie del lato adiabatico;
- 3 termocoppie per la temperatura ambiente;

Seppur restino dei canali vuoti, per la misura della tensione e corrente ai fini del calcolo della potenza applicata, si userà un'altra scheda idonea per questi segnali essendo la prima scheda utilizzata per misure di temperatura.

Perciò si avrà un canale per la misura di corrente ed un canale per la misura di tensione. Per la misura di corrente verrà utilizzata una resistenza calibrata messa in serie (*shunt*) ai cui capi si misurerà la tensione che però sarà presto convertita in corrente utilizzando la relazione  $I = V/R$  (nota la resistenza R).

Questi 20 segnali complessivi vengono trasmessi dalla scheda al computer che, mediante il software *LabView*, saranno salvati, convertiti (dai segnali di tensione delle termocoppie a temperature, attraverso i polinomi caratteristici) e infine visualizzati graficamente. Viste le buone prestazioni della scheda e la reattività di risposta degli strumenti di misura di è fissata la raccolta dati ad 1 Hz ovvero una raccolta al secondo. Per la visione dei dati raccolti è possibile consultare l'interfaccia composta da 5 grafici in funzione del tempo.

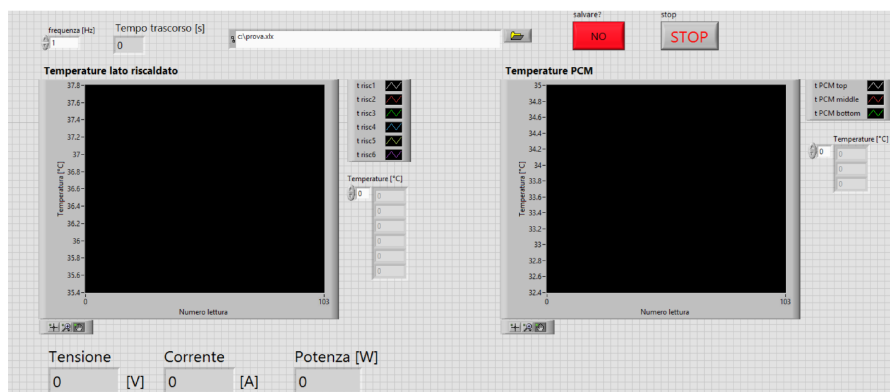


Figura 2.18: Visualizzazione temperatura lato adiabatico e PCM.

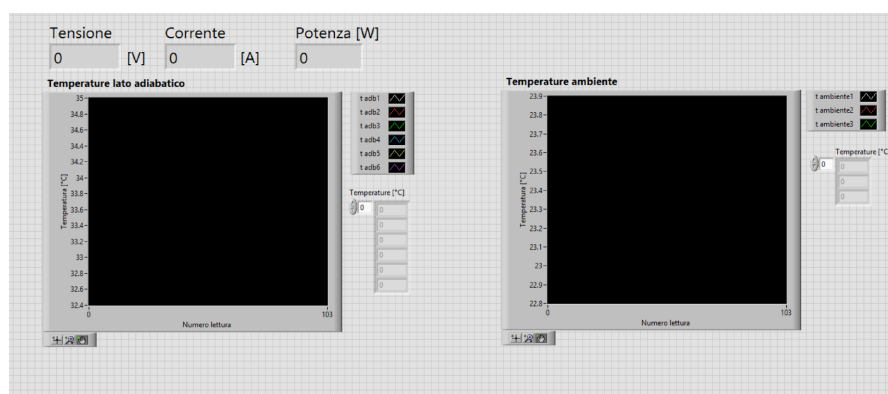


Figura 2.19: Visualizzazione temperatura lato riscaldato, aria e valori di tensione/corrente.

### 2.6.1 Taratura termocoppie

Le 12 termocoppie inserite nel modulo sono state costruite manualmente con due filamenti, uno di rame e uno di costantana, spellati dal rivestimento in teflon e accoppiati per creare la giunzione. Successivamente, assieme alle 3 termocoppie di tipo T rivestite dalla guaina in Inox, è stato necessario procedere con la taratura. La taratura consiste nel creare una relazione, ovvero un polinomio, tra la tensione prodotta ai capi della giunzione e la temperatura. La procedura prevede di raccogliere dei dati di tensione in  $\mu\text{V}$  a cui associamo una temperatura raccolta da una *Pt100* la cui incertezza risulta molto bassa ( $\pm 0.03$  °C). A quel punto con i dati di tensione disponibili si genera un polinomio i cui coefficienti sono trovati affinché l'interpolazione abbia un  $R^2 = 1$ .

Per fare questa raccolta le termocoppie, compresa la *Pt100*, sono state collegate al *KayeK170* ed al sistema di acquisizione elettro-meccanico *Agilent34970A* che converte la misura analogica in un segnale digitale leggibile dal PC. A questo punto ciascuna termocoppia è stata immersa in un bagno termico controllando che le giunzioni oltre ad essere vicine fossero tutte alla stessa altezza in modo da garantire un'uniformità della temperatura fra tutte le giunzioni. Il bagno, dopo aver raggiunto l'equilibrio termico, è stato portato inizialmente da una temperatura di 20°C ad una di 60°C con intervalli di 10°C. Per ciascun intervallo la procedura era la seguente:

- lettura del valore di temperatura misurato dalla *Pt100*;
- inizio della raccolta di almeno 50-100 valori di tensione per ciascuna termocoppia (su cui poi verrà effettuata una media);
- lettura del valore registrato dalla *Pt100* verificando l'assenza di fluttuazioni di temperatura durante la raccolta.

A questo punto per le temperature di 20, 30, 40, 50, 60 °C è stato generato un file al cui interno erano contenuti i valori di tensione delle termocoppie da tarare. A questo punto il polinomio di 4° grado qui mostrato:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (2.1)$$

lega il valori di tensione mediato fra i 50-100 valori raccolti ( $x$ ) al valore di temperatura ( $y$ ). Per un'iniziale verifica sono stati presi i coefficienti precedentemente utilizzati per le termocoppie tarate in precedenza visto che risultavano essere le medesime.

I coefficienti sono i seguenti:

- $a = 0.0228$
- $b = -0.124$
- $c = -0.3676$
- $d = 25.602$
- $e = 0.1644$

Chiaramente per le termocoppie inguainate in Inox i valori di tensione rilevati sono leggermente diversi, di conseguenza i coefficienti del polinomio risulteranno:

- $a = 0.0116683$
- $b = -0.04254688$
- $c = -0.556815$
- $d = 25.6901$
- $e = 0.186496$

Il grado di aderenza risulta essere notevolmente elevato con degli scostamenti massimi fra il polinomio e le temperature della *Pt100* di  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$  che per le necessità della prova da effettuare risultano più che adeguate, ragion per cui verranno utilizzati questi coefficienti senza apportare cambiamenti.

Visto che il polinomio interpolante appare pressoché coincidente con una retta, come si può notare nell'immagine seguente, non verrà presentato quello delle termocoppie in Inox vista la notevole somiglianza.

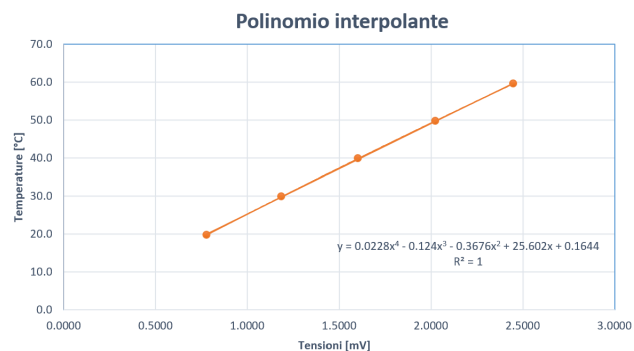


Figura 2.20: Polinomio interpolante i dati sperimentali delle termocoppie in rame-costantana.

## Capitolo 3

# Risultati

### 3.1 Descrizione delle prove

Seppur i moduli preparati con la stampante 3D a metallo siano rispettivamente 6 le prove sono state effettuate solamente con 2 moduli, al cui interno sono state inserite le tre tipologie di paraffine. I test svolti sono stati fatti con diversi flussi termici come presentato precedentemente nel capitolo riguardante il riscaldatore elettrico.

La procedura operativa risulta la seguente per ogni singola prova:

- Accensione del *Kaye K170* almeno un'ora prima dell'inizio della prova in modo da permettere allo strumento di portarsi alla temperatura di riferimento;
- Accensione del PC e della scheda di acquisizione;
- Accensione simultanea del generatore di corrente e della raccolta del sistema di acquisizione. In modo repentino si imposta la tensione del generatore affinché la potenza erogata sia quella desiderata;
- Negli stessi istanti di tempo viene fatto partire la raccolta video della telecamera posta frontalmente al modulo per la successiva visione del fronte di fusione;
- Quando la paraffina risulta completamente fusa viene spento il generatore di corrente in modo da interrompere il flusso termico applicato;
- Il sistema di acquisizione continua a raccogliere dati per un altro paio di ore in modo da osservare anche la fase di solidificazione;
- Prima dell'inizio di un'ulteriore prova il provino deve raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente.
- Se eventualmente le raccolte dati per quella struttura e quella paraffina sono ultimate è necessario sostituire la paraffina attraverso l'utilizzo di un phon industriale.

Non è stato specificato ma dal video registrato sarà poi prodotta un'immagine composta dai fotogrammi più significativi in modo da visionare il l'avanzamento del fronte di fusione.

I dati raccolti dal *Labview* vengono salvati in un file *.txt* al cui interno si trovano rispettivamente 21 colonne così composte:

- Nella prima colonna è posizionato il tempo trascorso da quando viene azionato il sistema di raccolta;
- Nelle 6 colonne successive si trovano  $T_{risc1}$ ,  $T_{risc2}$ ,  $T_{risc3}$ ,  $T_{risc4}$ ,  $T_{risc5}$ ,  $T_{risc6}$  misurate dalle termocoppie poste sul lato riscaldato;
- Allo stesso modo, dalla colonna 8 alla colonna 13 si trovano la misura di  $T_{adb1}$ ,  $T_{adb2}$ ,  $T_{adb3}$ ,  $T_{adb4}$ ,  $T_{adb5}$ ,  $T_{adb6}$ , corrispondenti alle 6 termocoppie inserite nel lato adiabatico;
- Procedendo in ordine troviamo poi le misure delle tre termocoppie di Inox per la misura della temperatura del PCM rispettivamente in alto, a metà e in basso ( $T_{pcm_{top}}$ ,  $T_{pcm_{middle}}$ ,  $T_{pcm_{bottom}}$ );
- Altre tre colonne dedicate alla misura della temperatura ambiente rispettivamente  $T_{amb1}$ ,  $T_{amb2}$ ,  $T_{amb3}$ ;
- Infine, una colonna per la misura della corrente ( $I$ ) ed una per la misura della tensione ( $V$ ).

Non è stato specificato ma il numero di righe del file dipende dal numero di punti raccolti, chiaramente se il sistema di misura ha acquisito per 3 ore i dati raccolti saranno 10800, uno per ogni secondo.

Essendo la mole di dati molto elevata risulta utile procedere attraverso l'importazione nel software *Matlab* trattando questi file o come vettori colonna o come matrici a seconda della capacità di manovra. A questo punto, per procedere con la realizzazione dei grafici, risulta necessario calcolare la temperatura media del lato riscaldato ( $T_{risc_{media}}$ ), del lato adiabatico ( $T_{adb_{media}}$ ) e dell'ambiente ( $T_{amb_{media}}$ ). Inoltre, viene effettuato il calcolo della Potenza  $P$ , istante per istante, come prodotto di  $V$  e  $I$ . Per effettuare i confronti si calcoleranno delle differenze di temperatura tra cui  $T_{risc_{media}} - T_{amb_{media}}$  ed inoltre  $T_{risc_{media}} - T_{adb_{media}}$ .

A questo punto con *Matlab* sono state eseguite altre operazioni, ovvero il calcolo del tempo finale  $t_{melt}$  in cui viene spento il generatore di corrente identificando con un ciclo quando la  $P$  risulta inferiore al valore stabilito dalla prova.

Risulta perciò possibile produrre dei grafici utili per osservare l'andamento delle varie temperature misurate, in particolare verranno prodotti i seguenti grafici:

- Andamento della temperature misurate nel lato riscaldato  $T_{risc_n}$ ;
- Andamento della  $T_{risc_{media}}$  e delle  $T_{pcm_{top}}$ ,  $T_{pcm_{middle}}$ ,  $T_{pcm_{bottom}}$  nella fase di fusione;
- Andamento delle  $T_{pcm_{top}}$ ,  $T_{pcm_{middle}}$ ,  $T_{pcm_{bottom}}$  durante il processo di solidificazione.

Per dare chiarezza alla lettura di questo paragrafo, i 3 grafici uniti all'immagine dei frame estrapolati dal video, saranno presentati nel seguente ordine per ciascuna paraffina:

1. Raccolta dei frame identificativi;
2. Andamento della temperature misurate nel lato riscaldato  $T_{risc_n}$ ;
3. Andamento della  $T_{risc_{media}}$  e delle  $T_{pcm_{top}}$ ,  $T_{pcm_{middle}}$ ,  $T_{pcm_{bottom}}$  nella fase di fusione;
4. Andamento delle  $T_{pcm_{top}}$ ,  $T_{pcm_{middle}}$ ,  $T_{pcm_{bottom}}$  durante il processo di solidificazione.

Questa serie verrà ripetuta per i 3 flussi termici scelti: 100, 150, 200 W.

Al termine di queste tre serie si passerà ad una paraffina diversa, esaurite tutte le paraffine si procederà con un'altra struttura. Al termine di queste prove ci saranno ulteriori grafici per la struttura reticolare però senza paraffina.

### 3.2 Struttura Body-Centered-Cubic 87% con cella di 10 mm

#### Paraffina RT42 e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

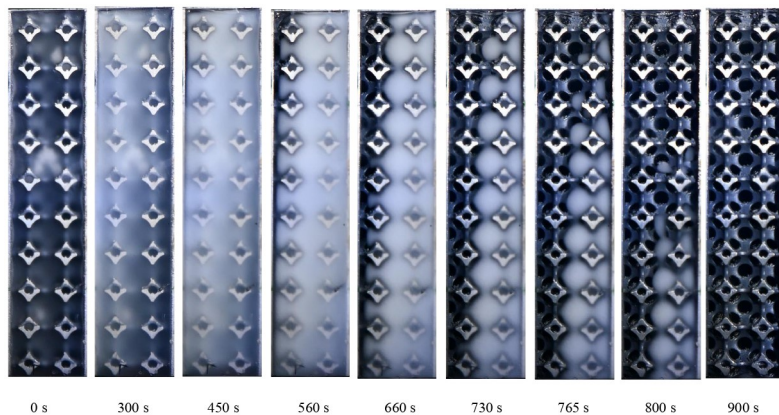


Figura 3.1: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.2 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà direttamente la  $T_{risc_{media}}$  presente nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM..



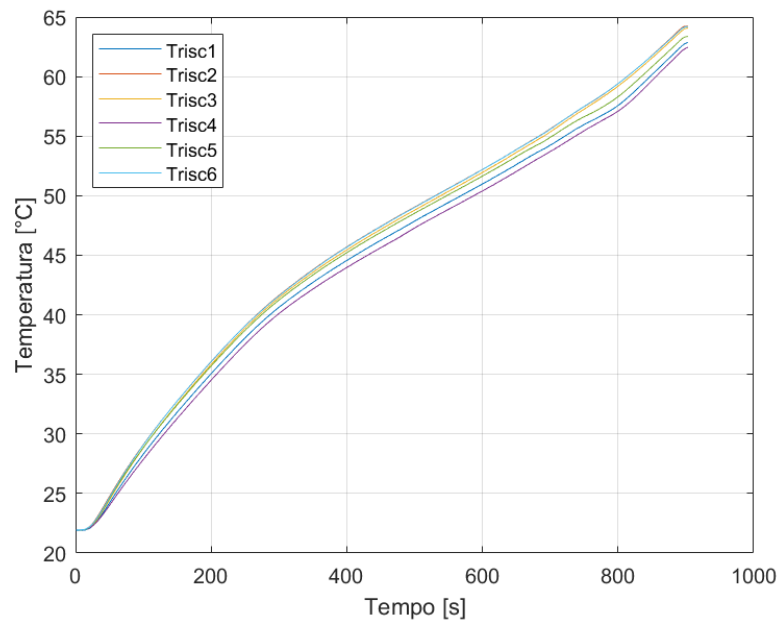


Figura 3.2: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W.

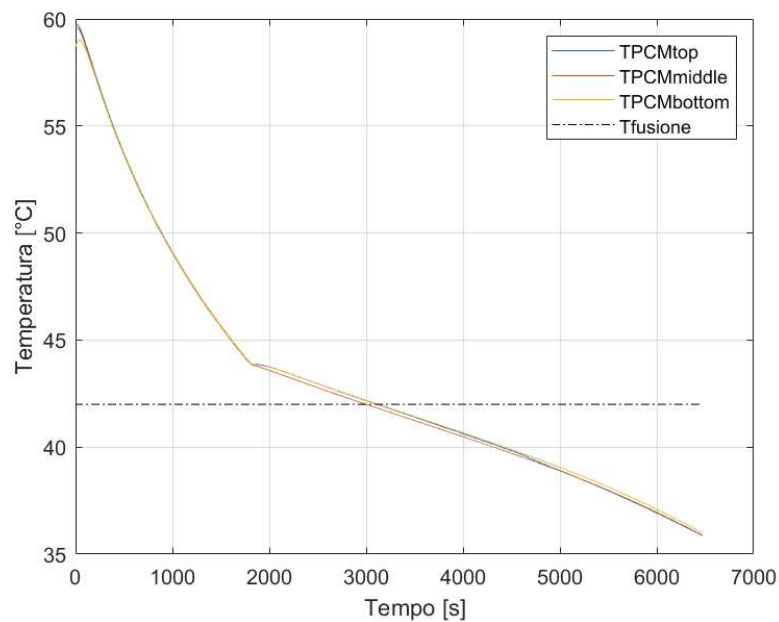


Figura 3.3: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W.

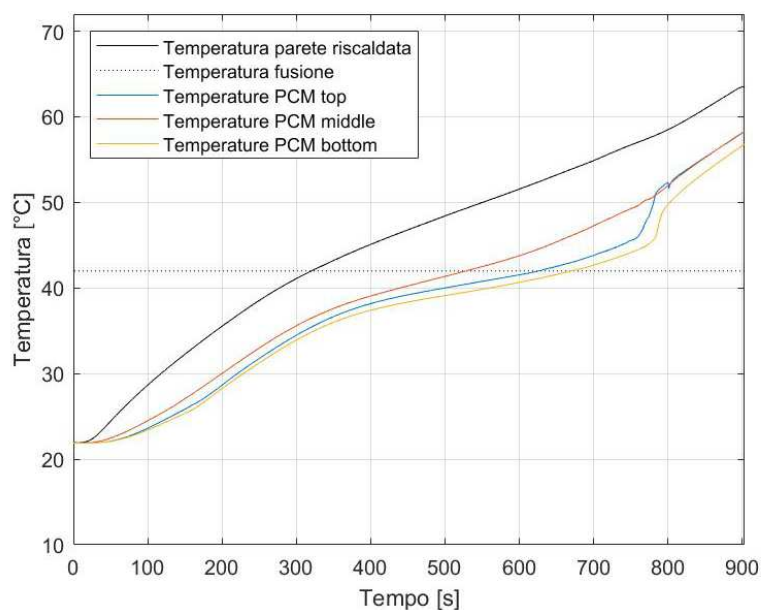


Figura 3.4: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 100 W.

#### Paraffina RT42 e flusso termico 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

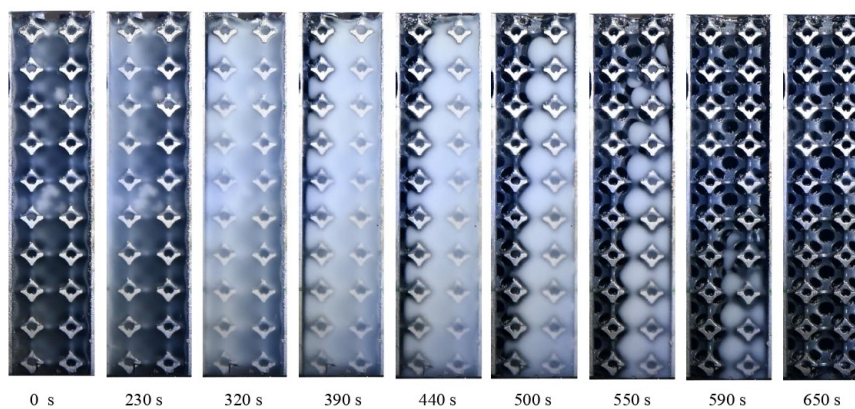


Figura 3.5: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 150 W.

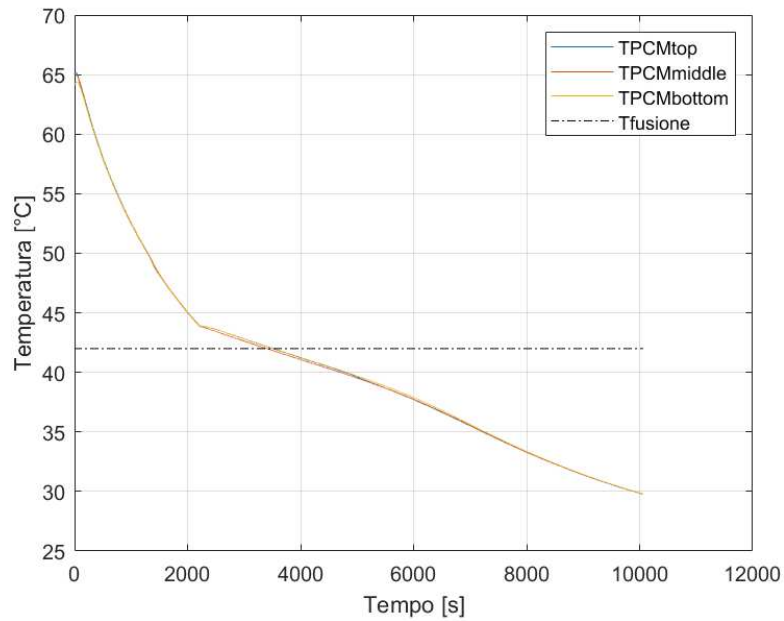


Figura 3.6: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 150 W.

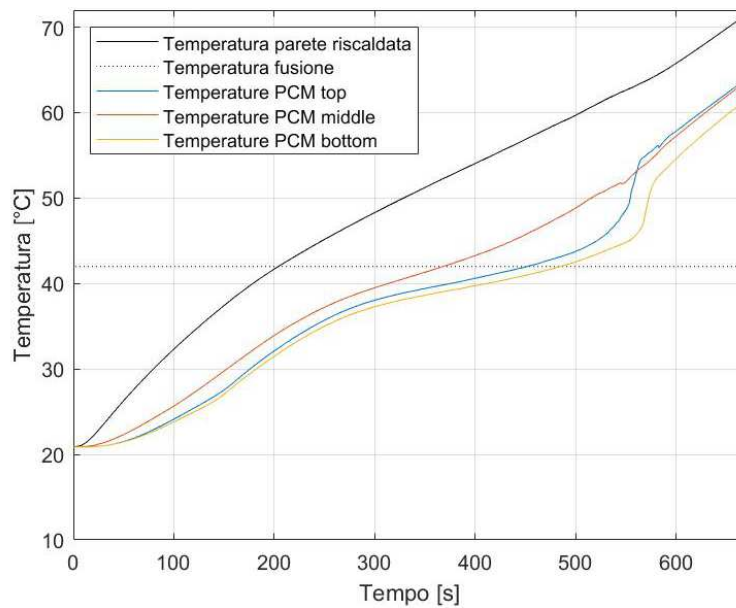


Figura 3.7: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 150 W.

### Paraffina RT42 e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

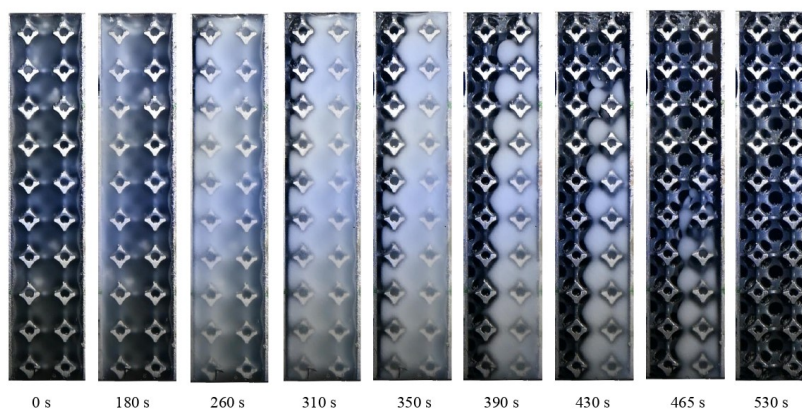


Figura 3.8: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 200 W.

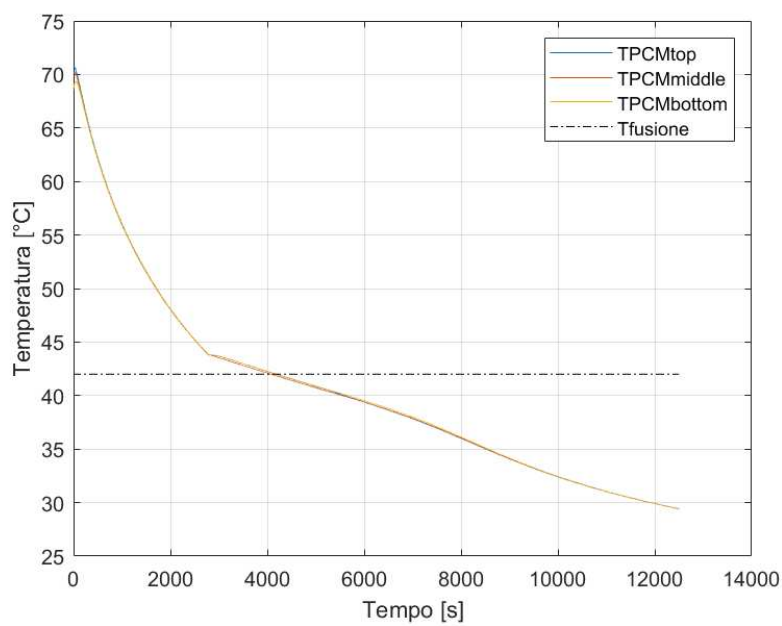


Figura 3.9: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 200 W.

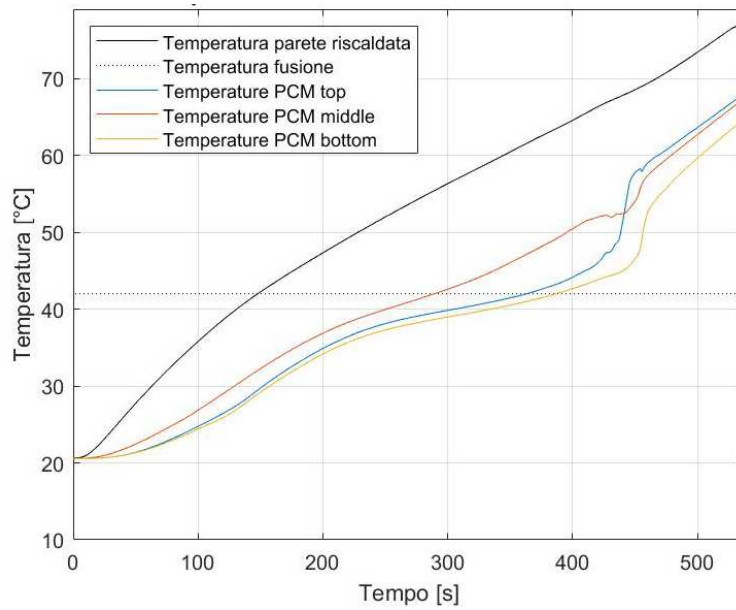


Figura 3.10: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 200 W.

### Paraffina RT55 e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

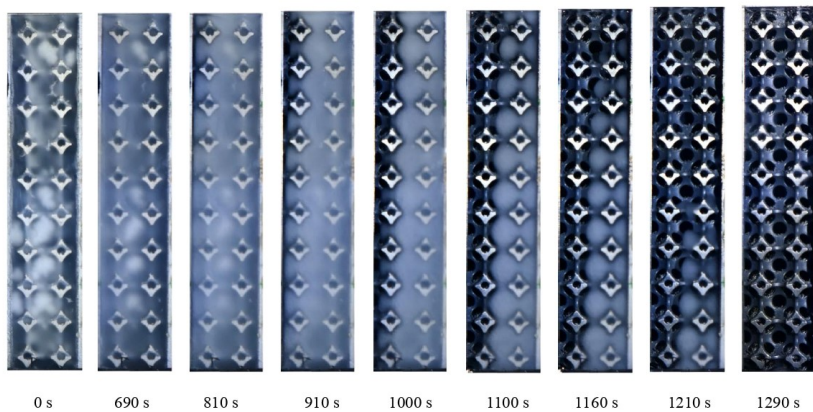


Figura 3.11: Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.12 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà la  $T_{risc_{media}}$  presente invece nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM.

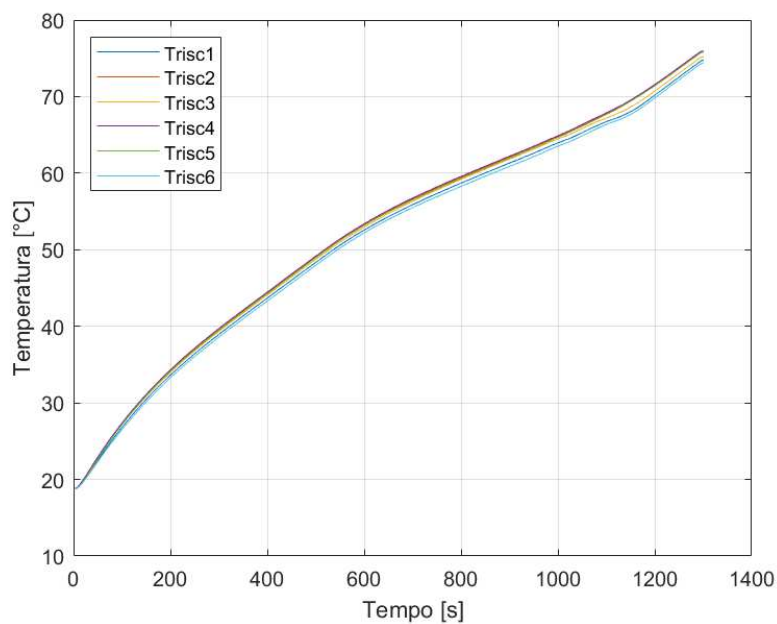


Figura 3.12: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W.

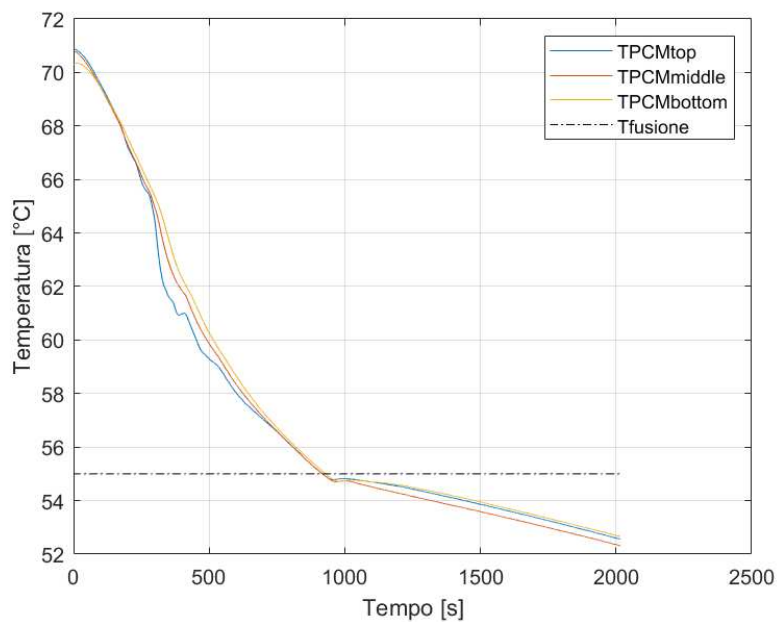


Figura 3.13: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W.

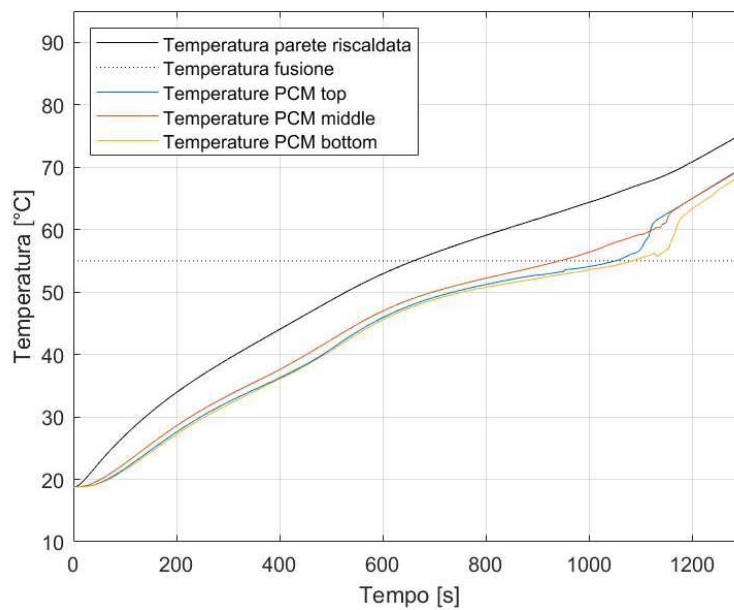


Figura 3.14: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 100 W.

### Paraffina RT55 e flusso termico 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

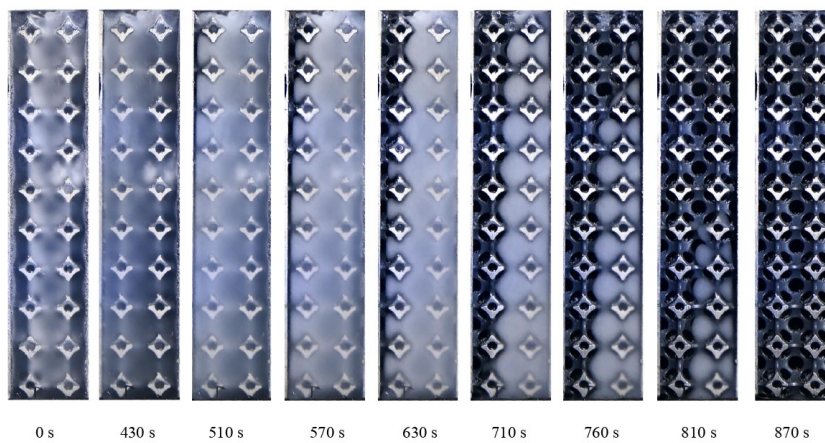


Figura 3.15: Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 150 W.

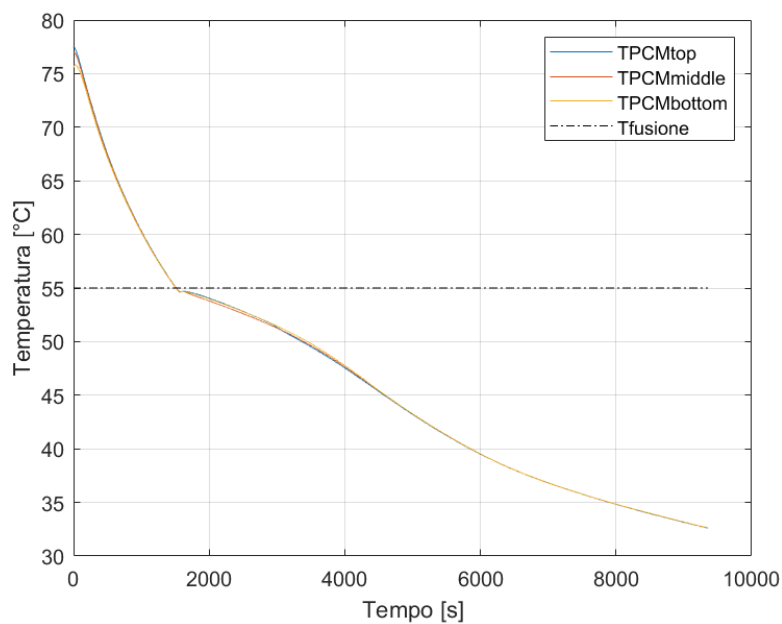


Figura 3.16: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 150 W.

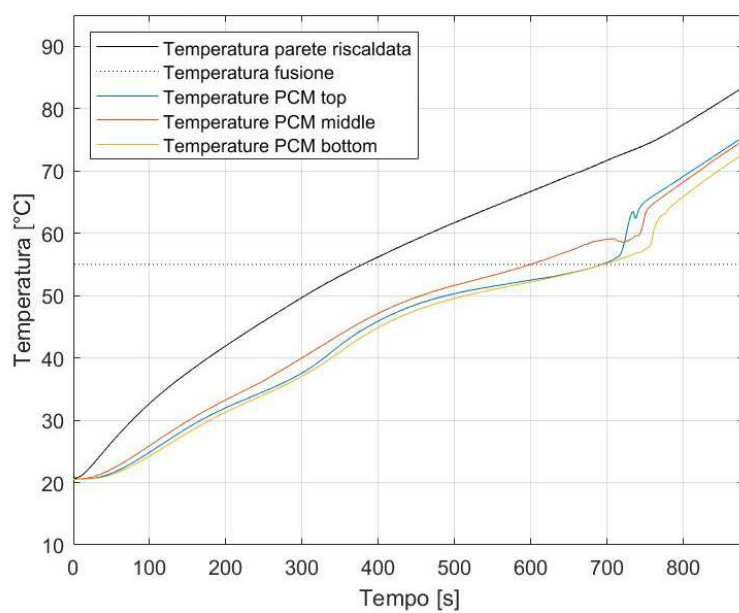


Figura 3.17: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 150 W.



### Paraffina RT55 e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

Purtroppo a causa di problemi presenti alla video camera non è stato possibile registrare il video di questa prova e di conseguenza estrarre i frame.

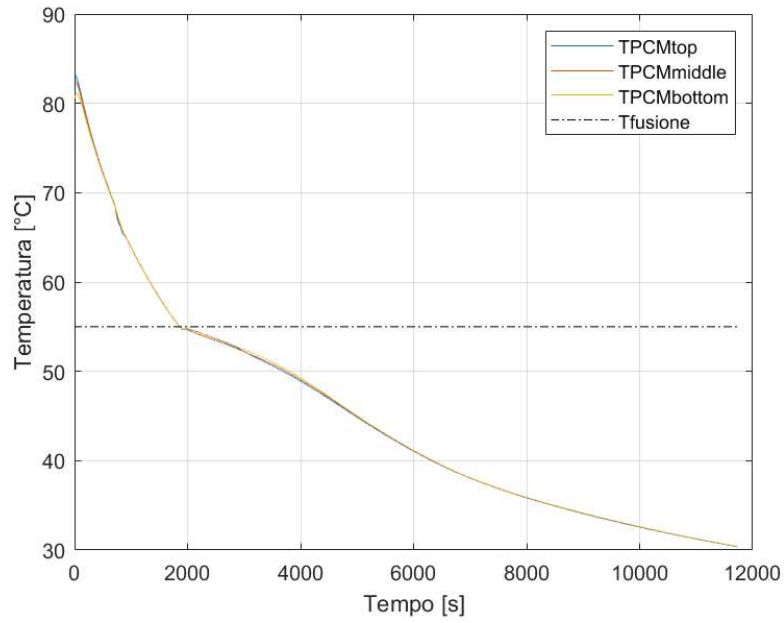


Figura 3.18: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 200 W.

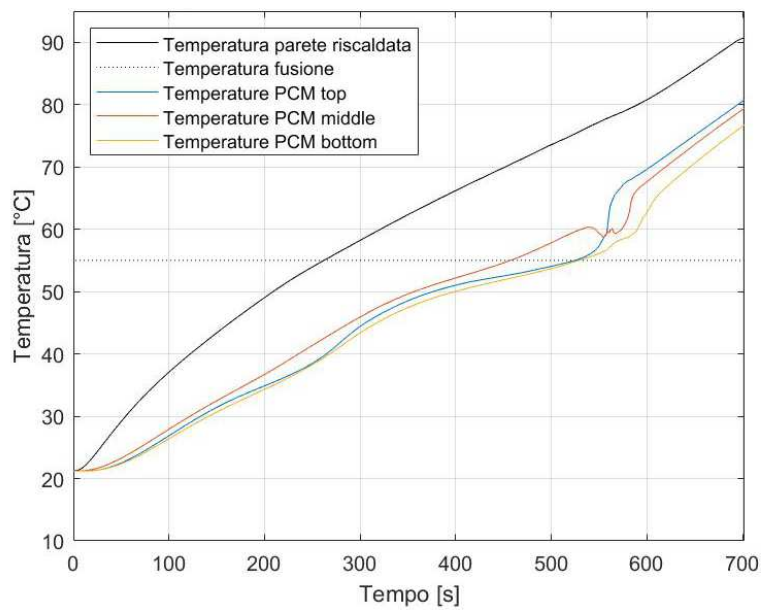


Figura 3.19: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 200 W.

### Paraffina RT64HC e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

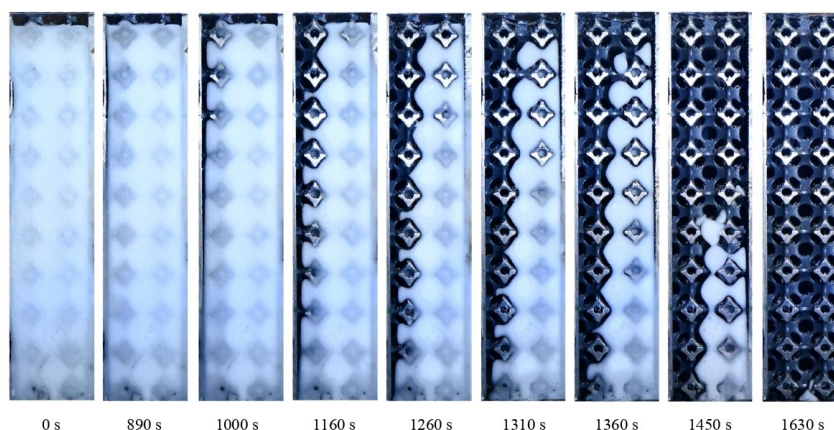


Figura 3.20: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.21 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà la  $T_{risc_{media}}$  presente invece nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM.

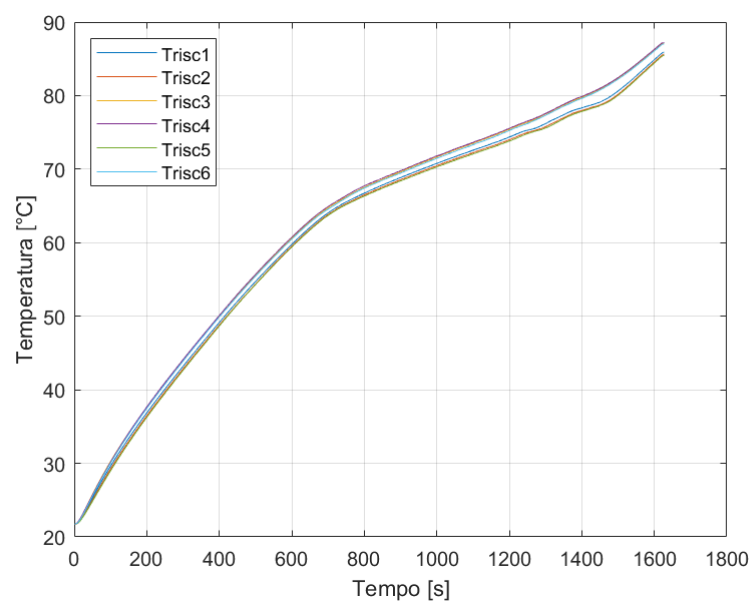


Figura 3.21: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W.

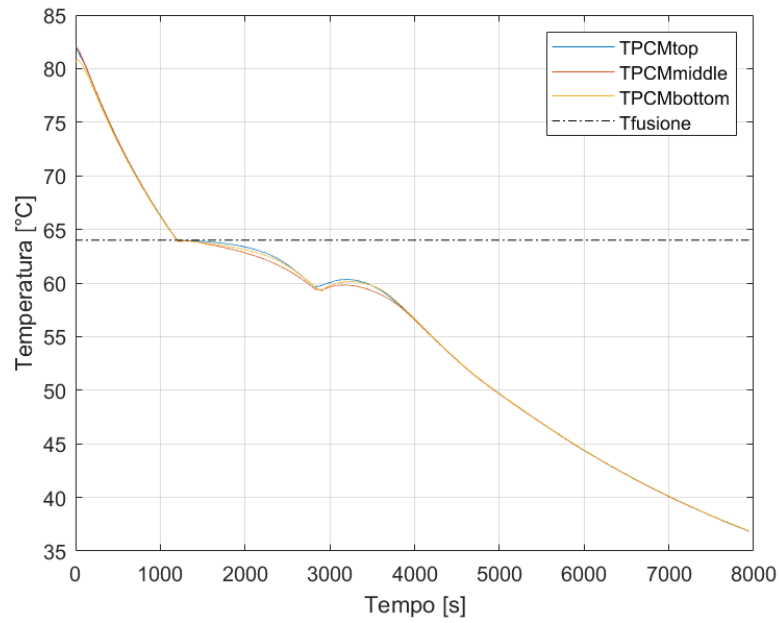


Figura 3.22: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W.

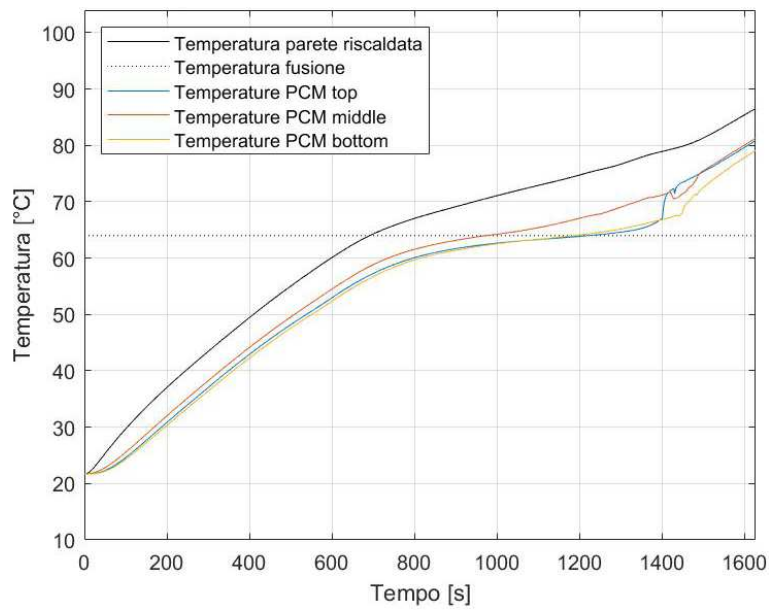


Figura 3.23: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 100 W.

### Paraffina RT64HC e flusso termico 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

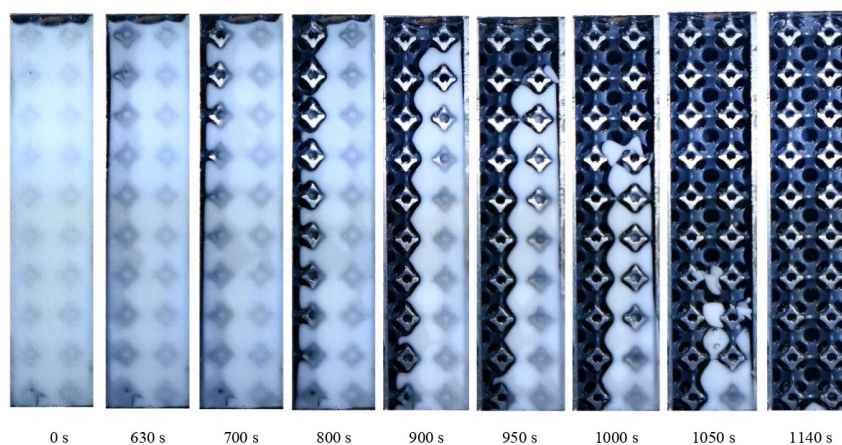


Figura 3.24: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 150 W.

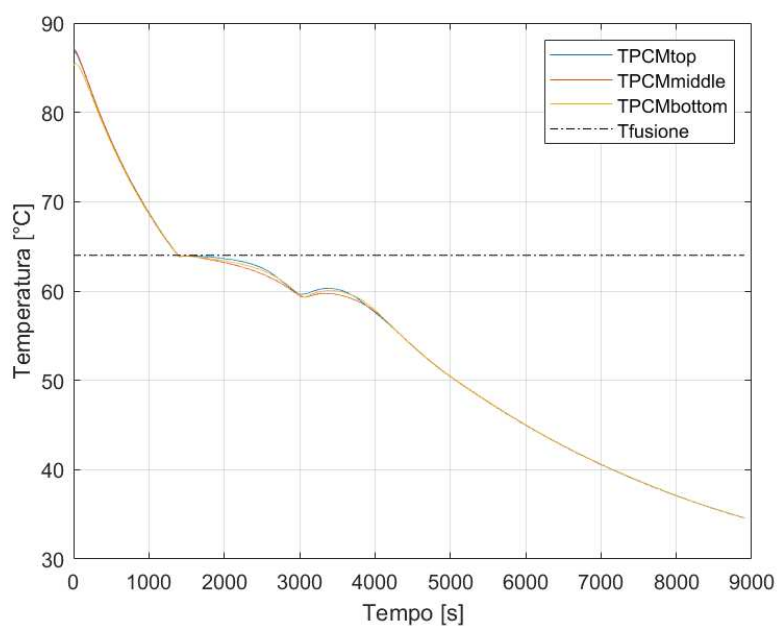


Figura 3.25: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 150 W.

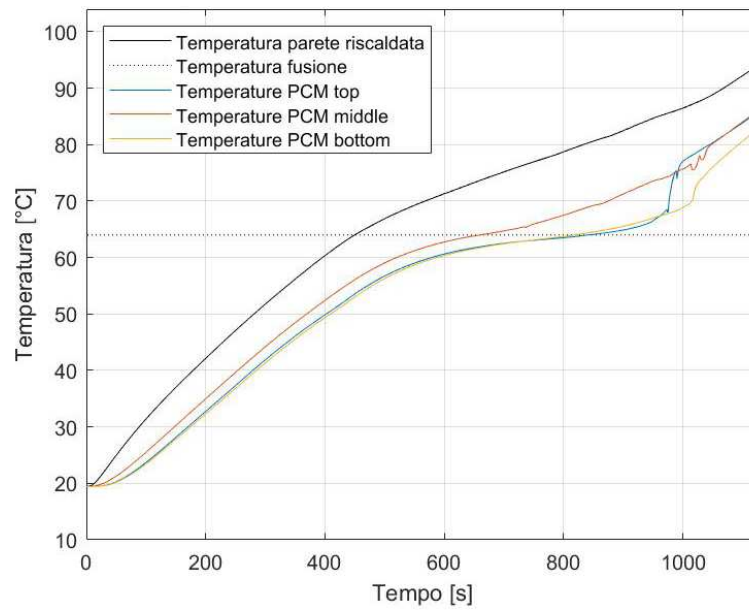


Figura 3.26: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 150 W.

### Paraffina RT64HC e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

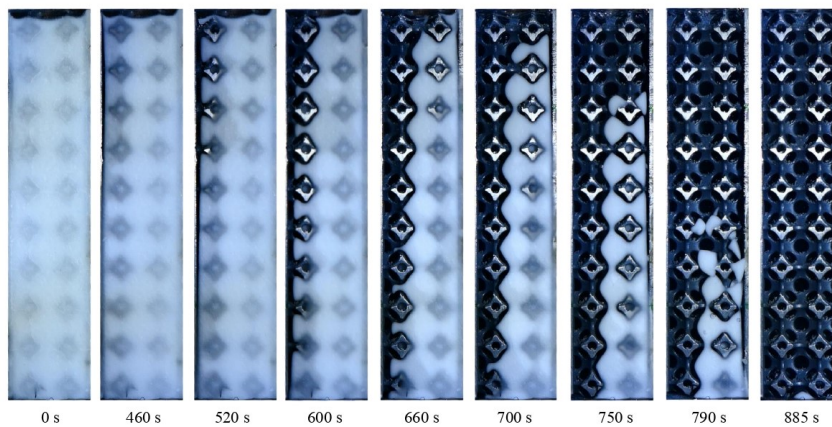


Figura 3.27: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 200 W.

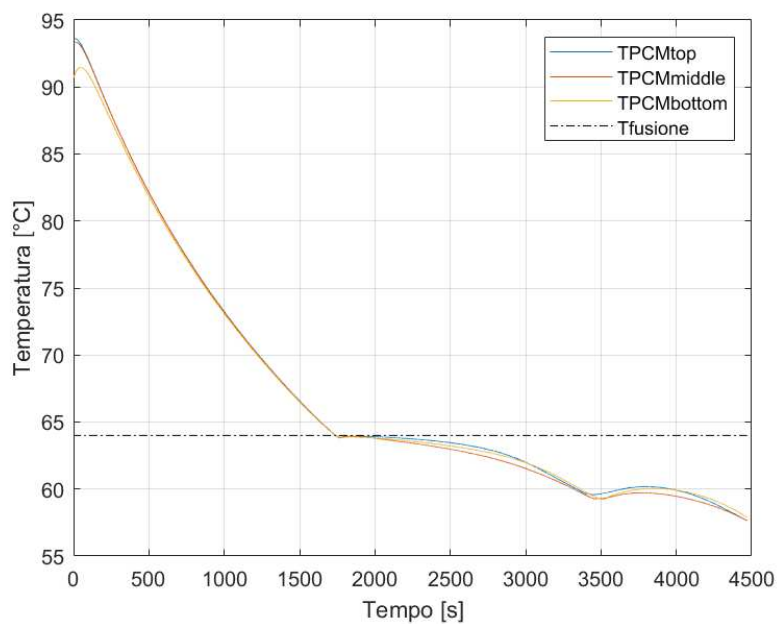


Figura 3.28: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 200 W.

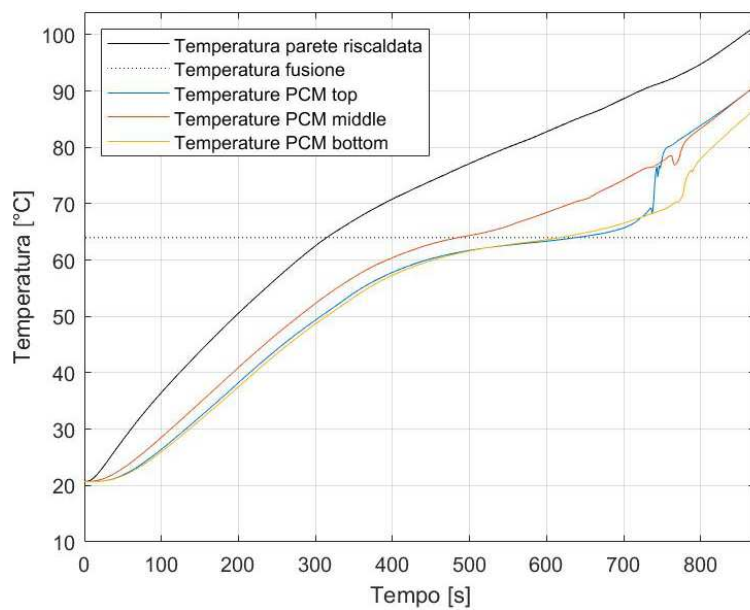


Figura 3.29: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 200 W.

### 3.3 Struttura reticolare 87% con cella 10 mm

#### Paraffina RT42 e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

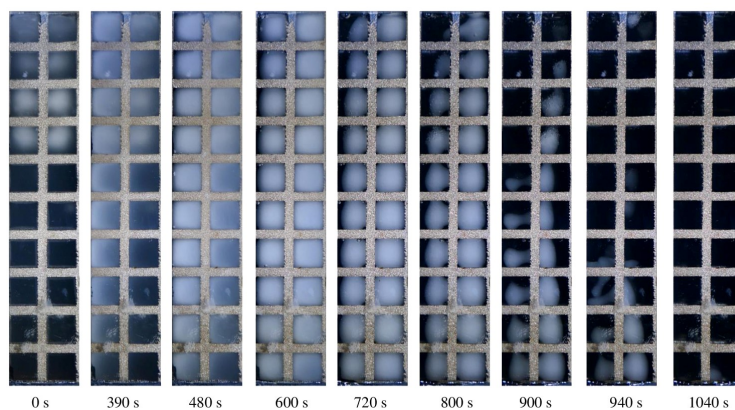


Figura 3.30: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

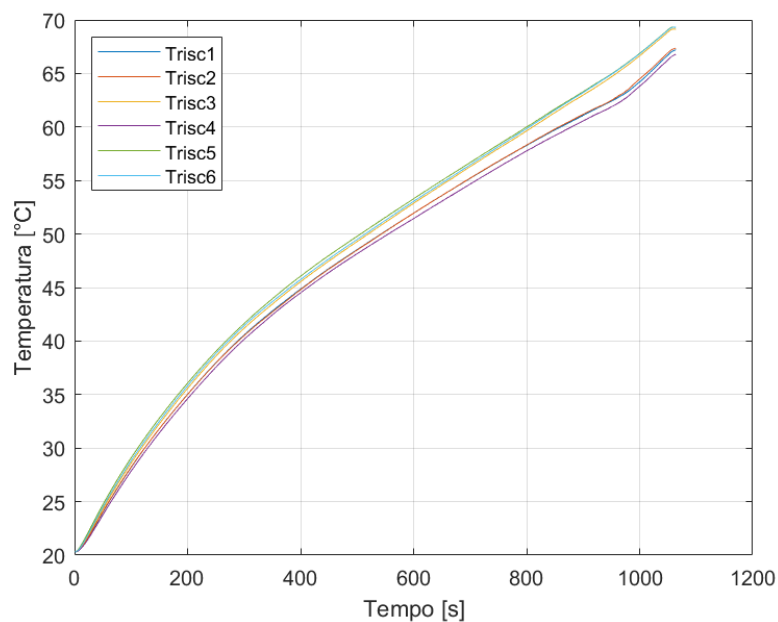


Figura 3.31: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.31 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme

la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà la  $T_{risc_{media}}$  presente invece nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM.

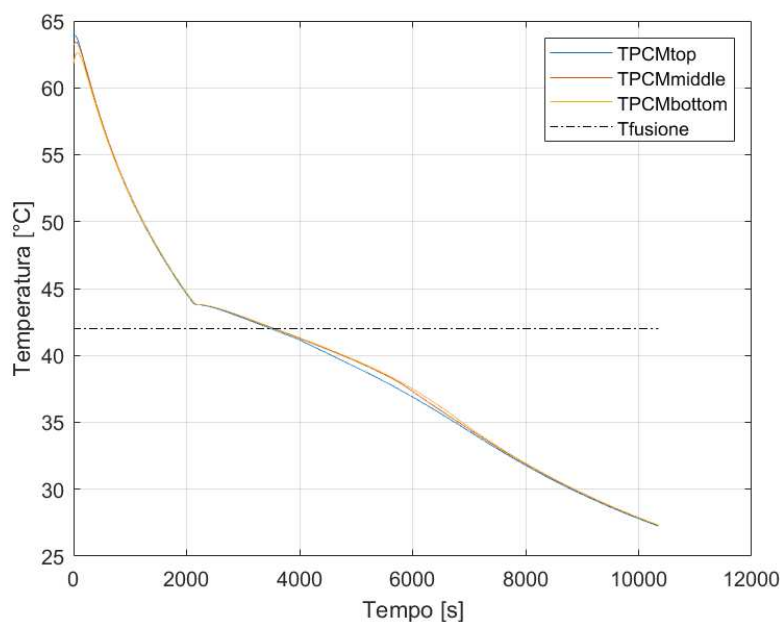


Figura 3.32: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

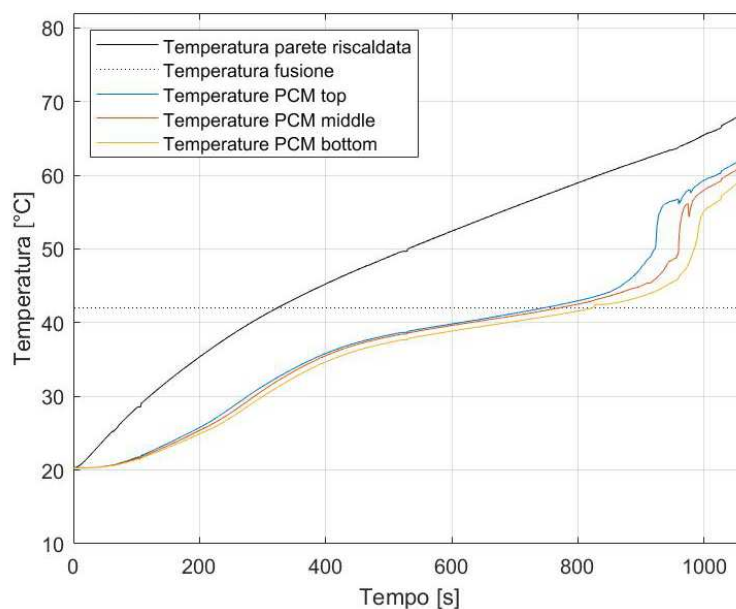


Figura 3.33: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 100 W.



### Paraffina RT42 e flusso termico 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

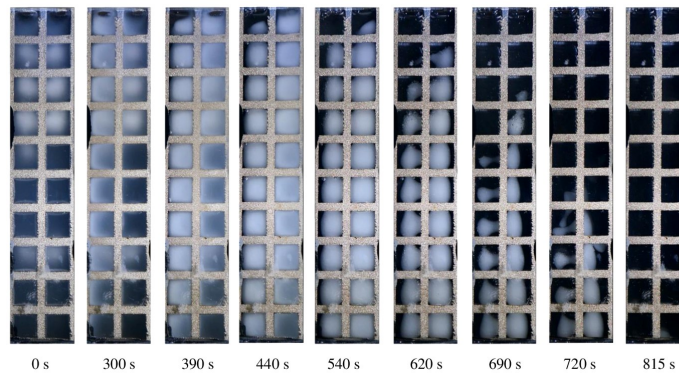


Figura 3.34: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

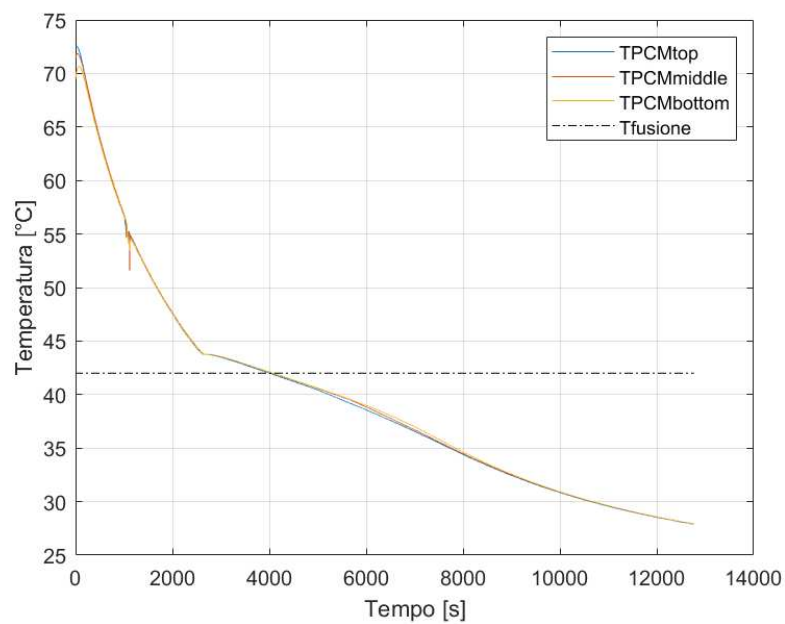


Figura 3.35: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

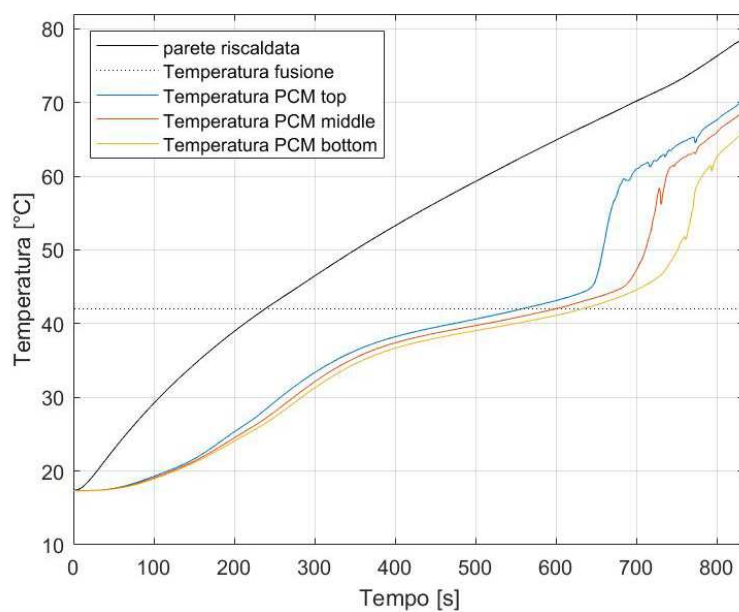


Figura 3.36: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 150 W.

#### Paraffina RT42 e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

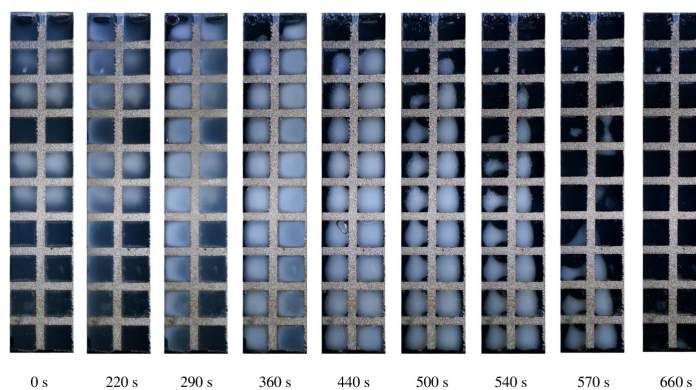


Figura 3.37: Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

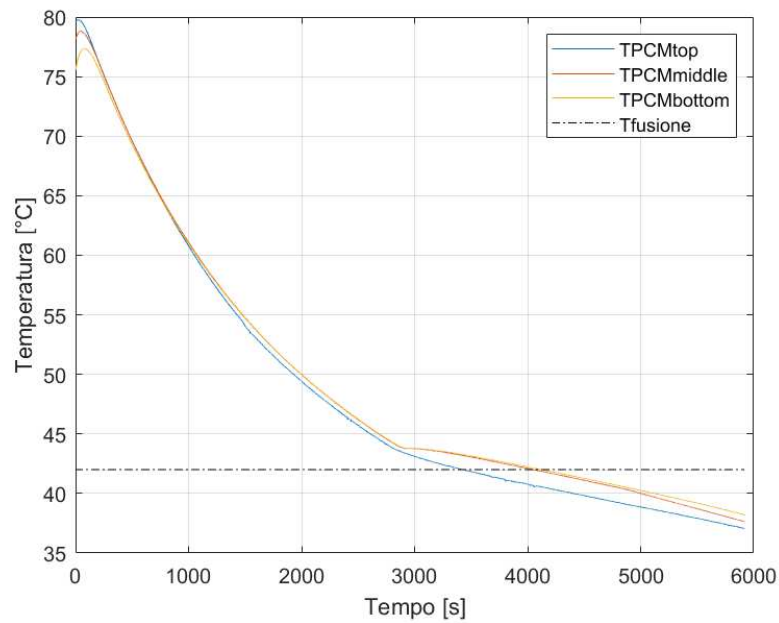


Figura 3.38: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

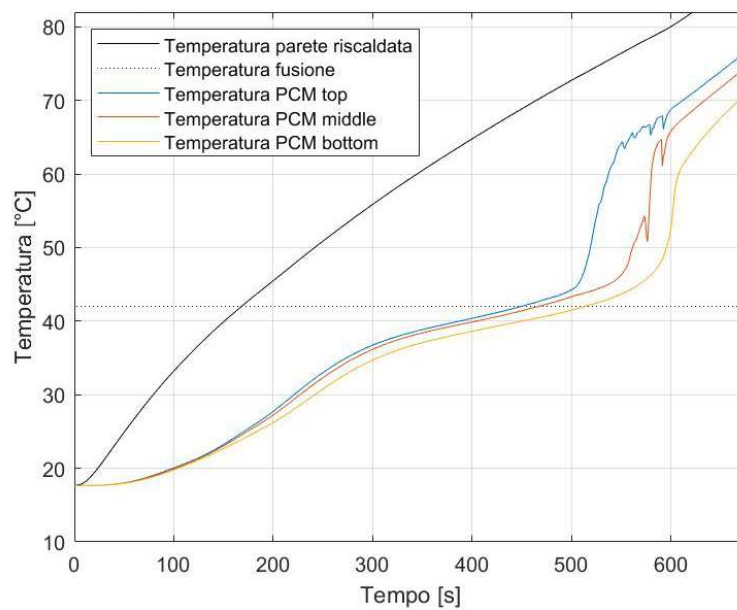


Figura 3.39: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 200 W.

### Paraffina RT55 e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

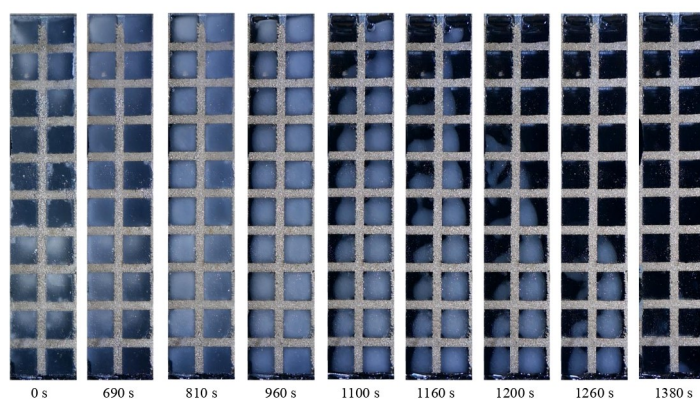


Figura 3.40: Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

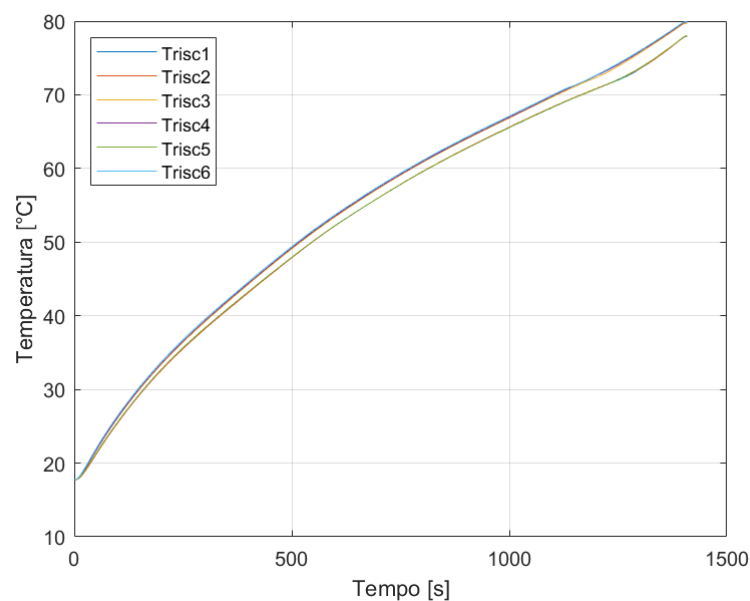


Figura 3.41: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.41 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà la  $T_{risc_{media}}$  presente invece nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM.

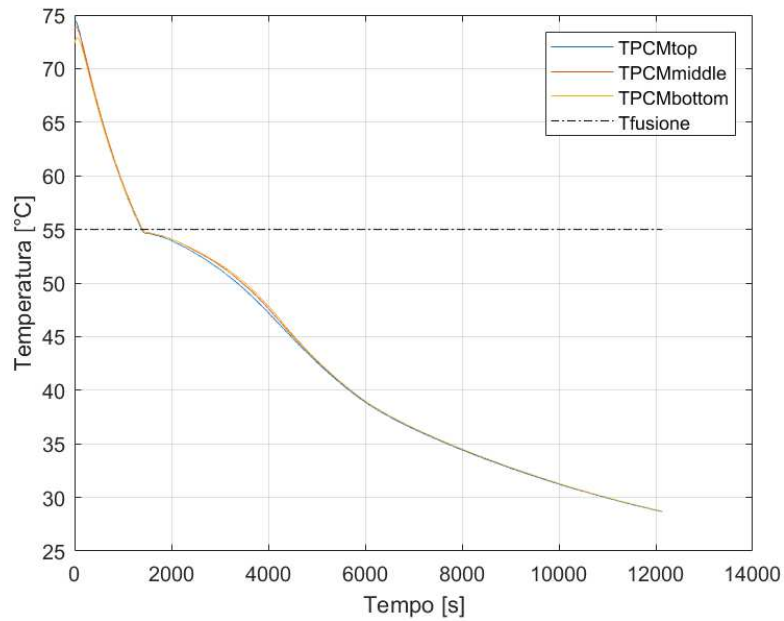


Figura 3.42: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

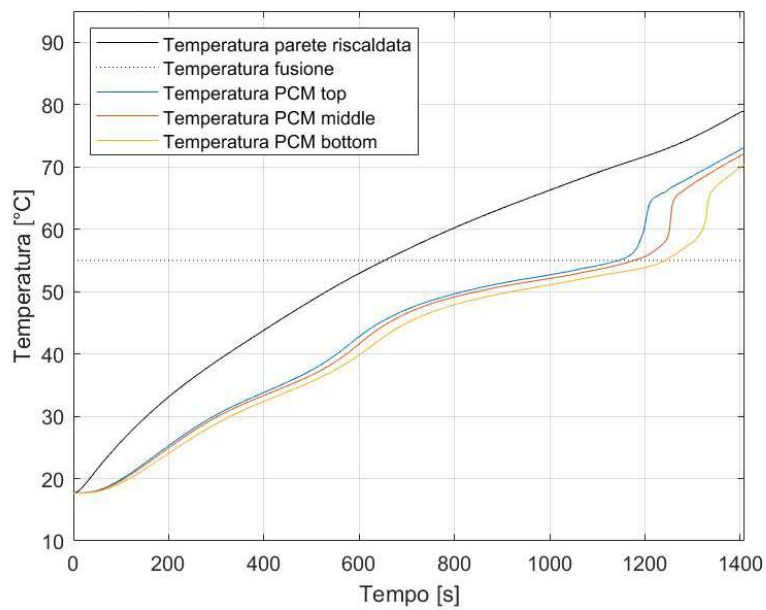


Figura 3.43: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 100 W.

**Paraffina RT55 e flusso termico 150 W**

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

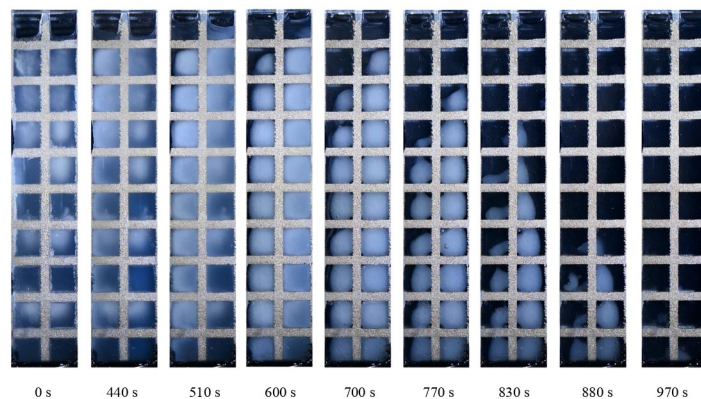


Figura 3.44: Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

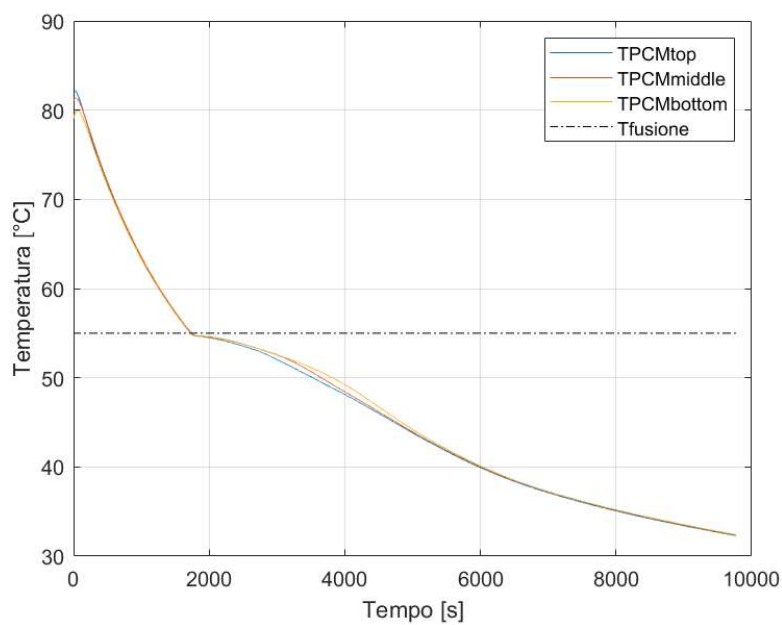


Figura 3.45: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

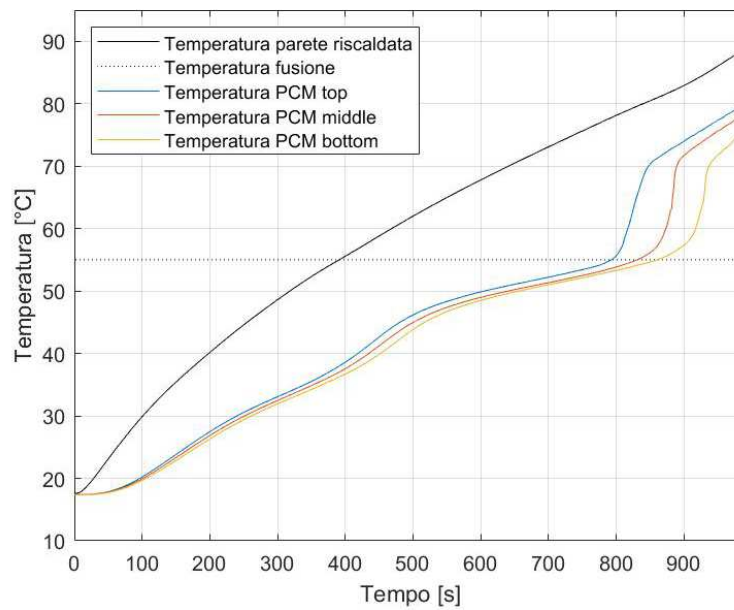


Figura 3.46: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 150 W.

#### Paraffina RT55 e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

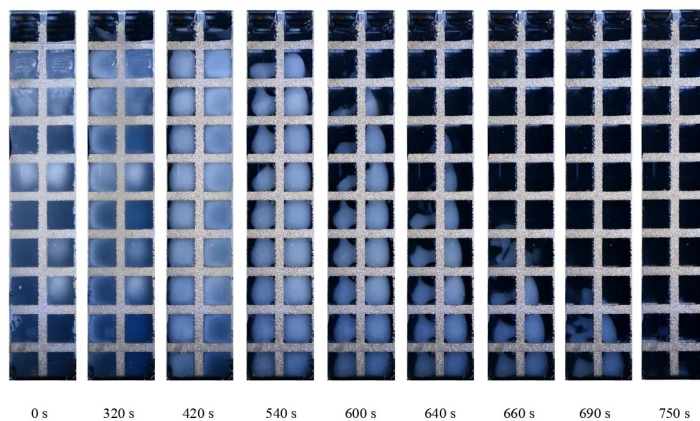


Figura 3.47: Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

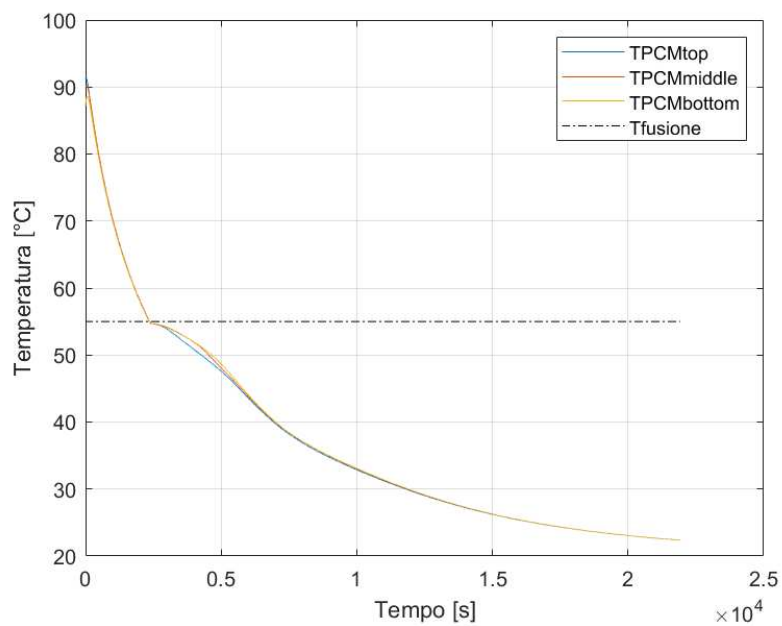


Figura 3.48: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

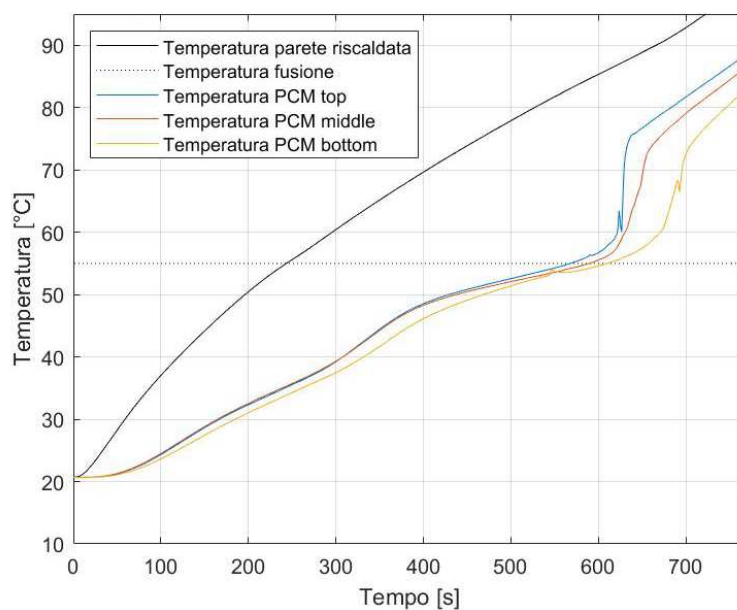


Figura 3.49: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 200 W.



### Paraffina RT64HC e flusso termico 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

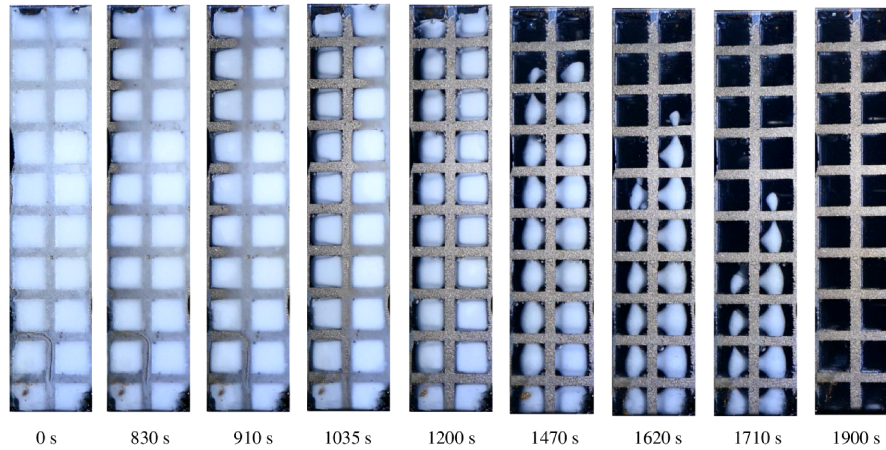


Figura 3.50: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

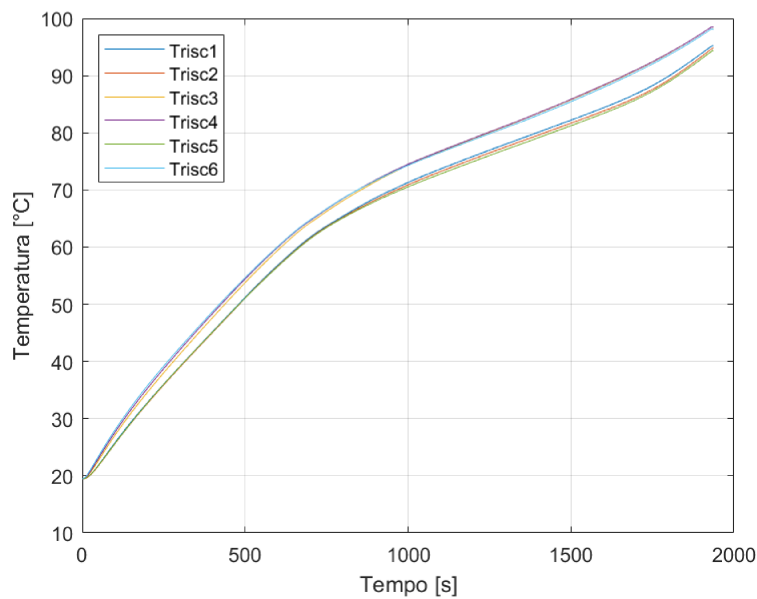


Figura 3.51: Temperatura lato riscaldato con paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

Nel grafico di figura 3.51 le 6 termocoppie misurano temperature molto vicine fra di loro grazie alla pasta termica ed alla piastra di rame che rendono uniforme la distribuzione del calore. Avendo controllato le stesse termocoppie anche per i flussi termici di 150 e 200 W non verrà riportato tale grafico ma si utilizzerà

la  $T_{riscmedia}$  presente invece nei grafici degli andamenti di temperatura del lato riscaldato e del PCM.

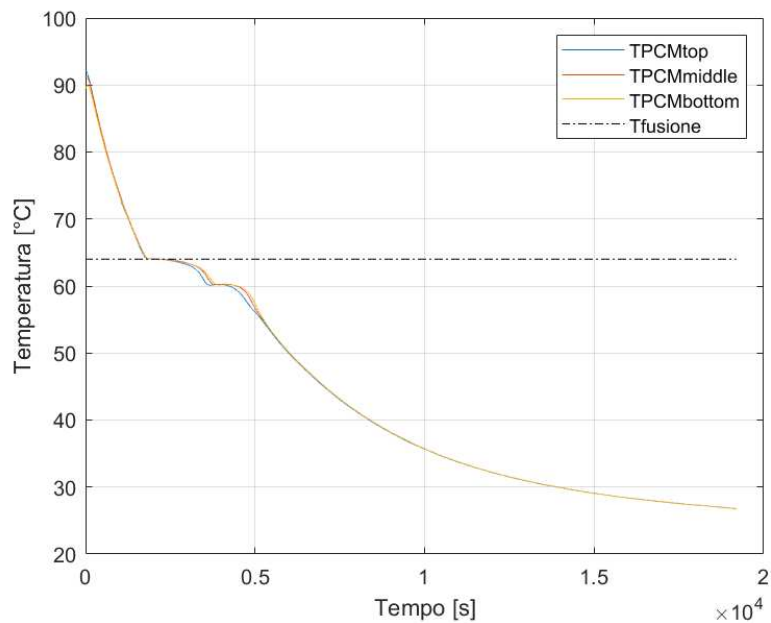


Figura 3.52: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W.

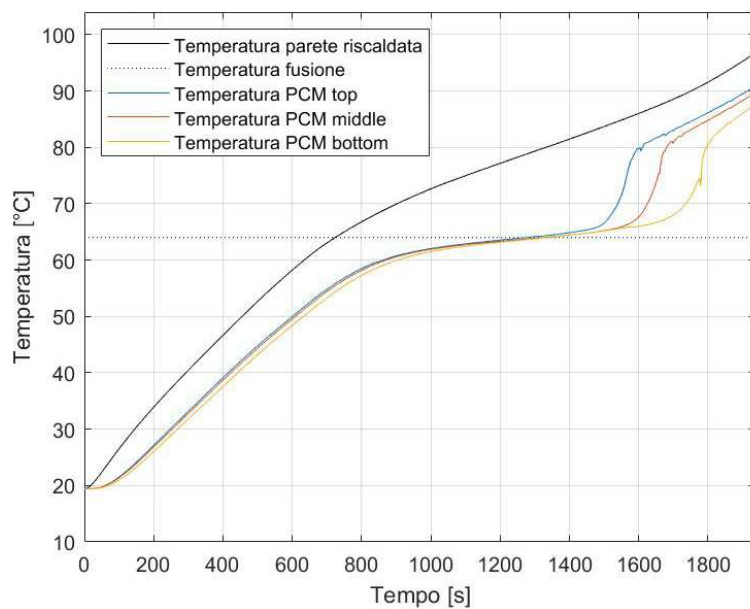


Figura 3.53: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 100 W.

### Paraffina RT64HC e flusso termico 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

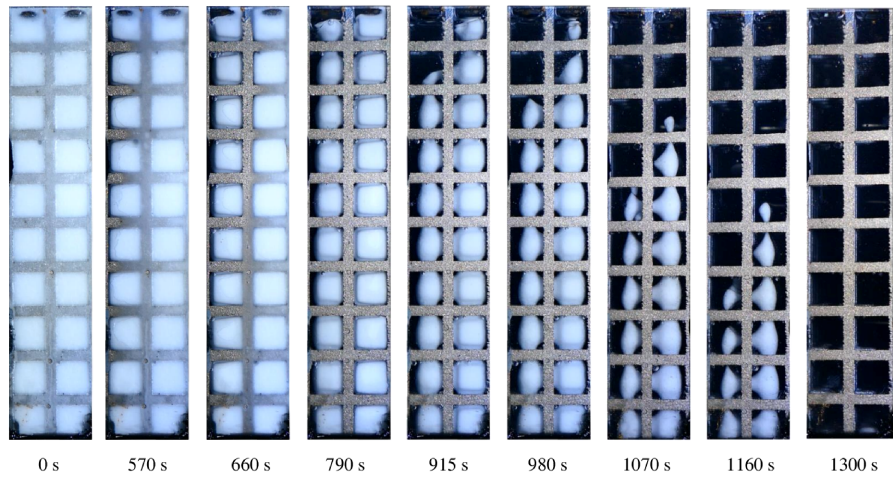


Figura 3.54: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

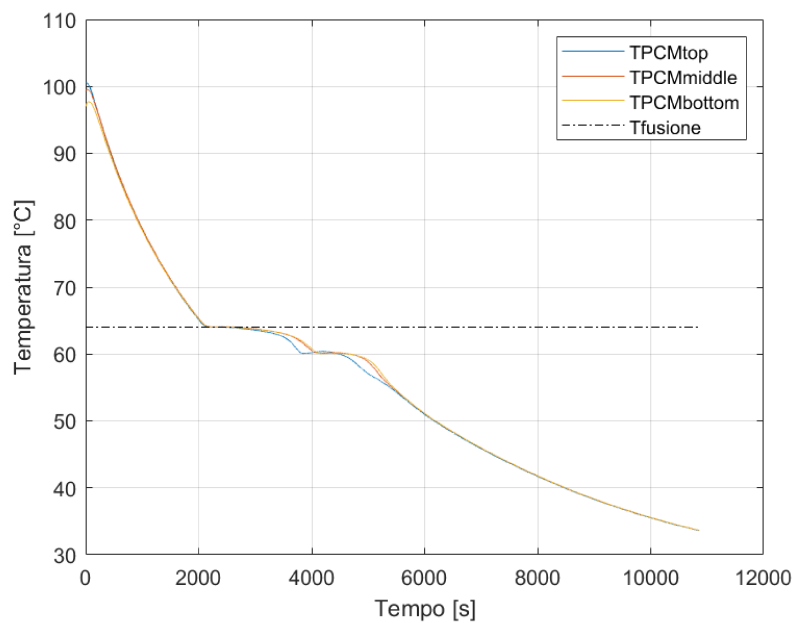


Figura 3.55: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 150 W.

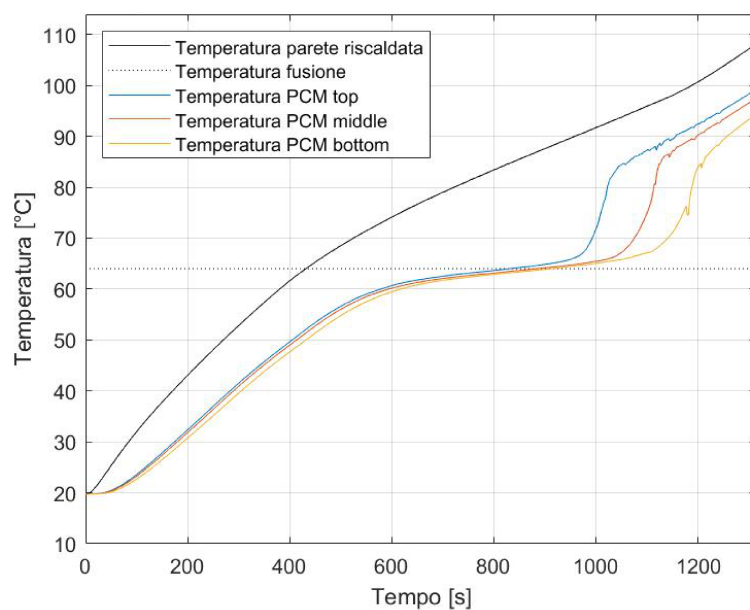


Figura 3.56: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 150 W.

#### Paraffina RT64HC e flusso termico 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

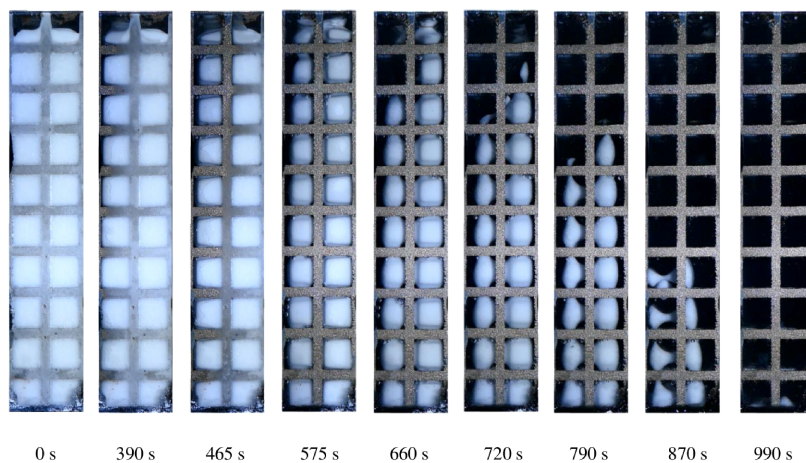


Figura 3.57: Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

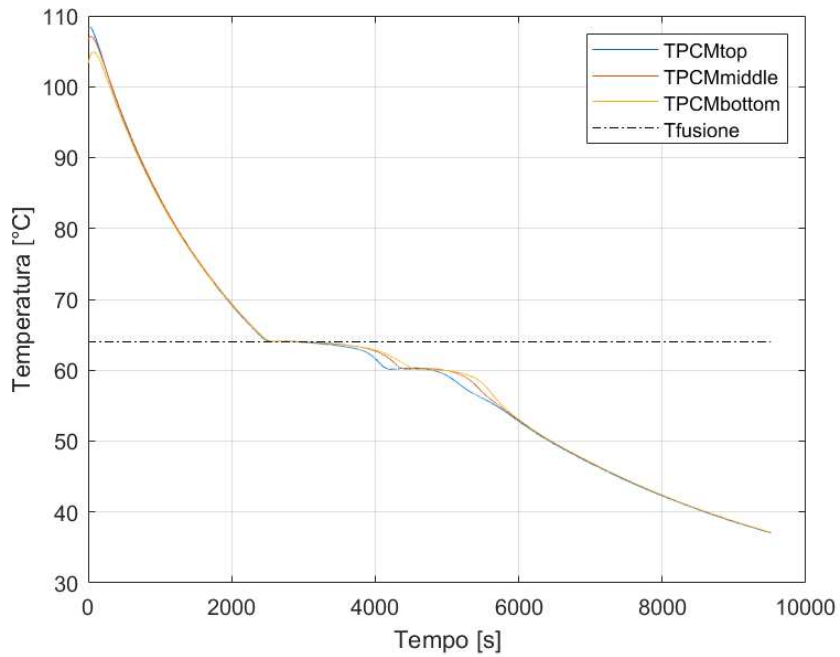


Figura 3.58: Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 200 W.

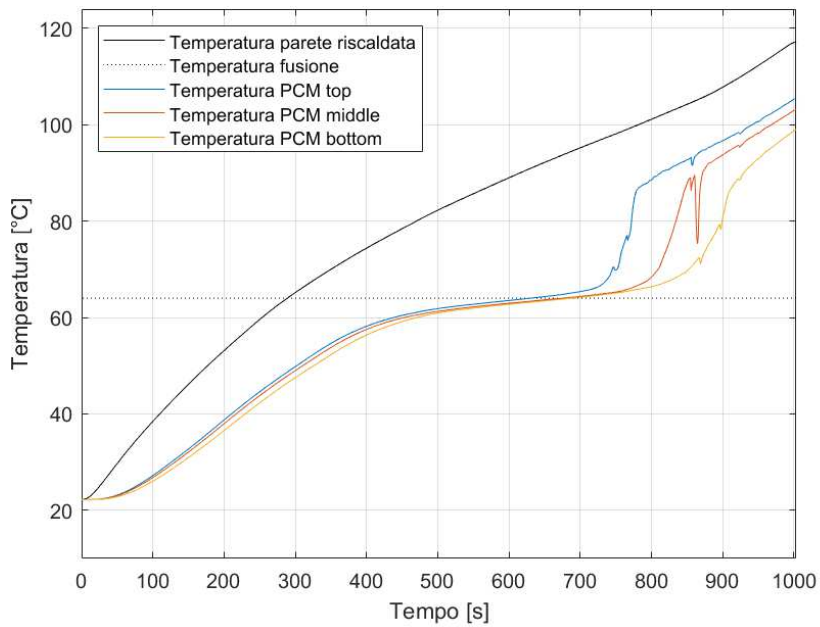


Figura 3.59: Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 200 W.

### 3.4 Struttura reticolare 87% con cella 10 mm senza paraffina

Per eseguire successivamente dei confronti è stato deciso di eseguire delle prove senza l'aggiunta di paraffina. Purtroppo non è risultato possibile effettuare le medesime prove in assenza di paraffina anche per la struttura BCC per cause di forza maggiore.

Non essendoci appunto paraffina non verranno proposti grafici riguardanti la solidificazione e neppure la raccolta dei frame raffiguranti il fronte di fusione. Avendo precedentemente verificato l'uniformità della temperatura del lato riscaldato si preferisce riportare solamente la  $T_{riscmedia}$ .

#### Flusso termico di 100 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

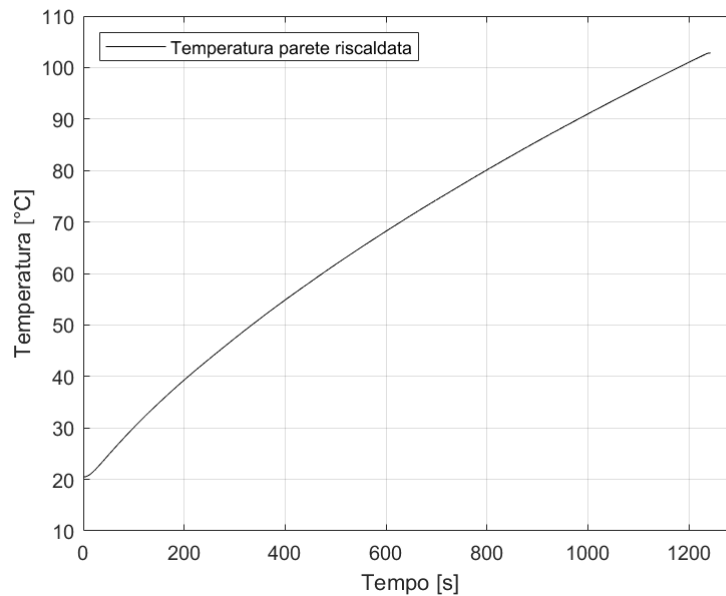


Figura 3.60: Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 100 W.

### Flusso termico di 150 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

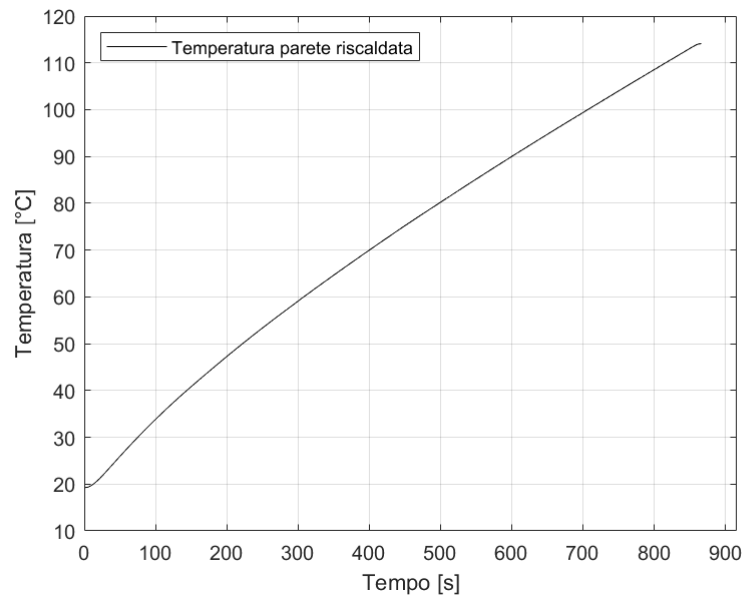


Figura 3.61: Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 150 W.

### Flusso termico di 200 W

I risultati di questa prova sono qui di seguito riportati.

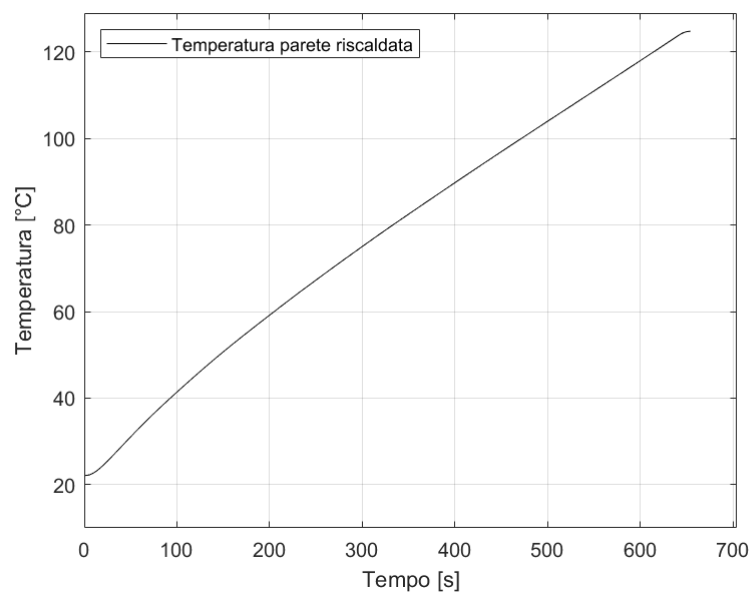


Figura 3.62: Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 200 W.

Verrà qui di seguito presentata una tabella che raccoglie i tempi di fusione, le temperature iniziali e finali di ciascuna prova.

	Paraffina	Flusso termico [W]	$t_{melt}$ [s]	$T_i$ [°C]	$T_f$ [°C]
	RT42	100	903	21.5	63.5
	RT42	150	668	20.9	70.9
	RT42	200	537	20.6	76.9
	RT55	100	1301	18.8	75.3
BCC10	RT55	150	880	20.8	83.2
	RT55	200	702	21.3	90.6
	RT64HC	100	1627	21.7	86.3
	RT64HC	150	1125	19.5	93.5
	RT64HC	200	871	20.7	101
	RT42	100	1064	20.3	68.1
	RT42	150	834	17.5	78.4
	RT42	200	675	17.7	86.9
	RT55	100	1409	17.8	78.8
RET10	RT55	150	991	17.5	88.5
	RT55	200	767	20.7	99
	RT64HC	100	1937	19.5	96.6
	RT64HC	150	1314	19.8	107.8
	RT64HC	200	1003	22.3	117.1

Figura 3.63: Tabella riassuntiva delle prove sperimentali effettuate.

### 3.5 Risultati delle prove

Nella figura 3.1 ed affini viene rappresentata una ricostruzione per fotogrammi del video registrato per ciascuna prova. Risulta interessante osservare l'avanzamento del fronte di fusione nella struttura BCC, che appare quasi verticale e procede da sinistra a destra. Per quanto riguarda invece il fronte di fusione del modulo con struttura reticolare, come si osserva in figura 3.30 e successive, procede in una fase iniziale da sinistra a destra per poi rallentare ed essere seguito da un nuovo fronte che parte da destra e procede verso sinistra. Per tutte le paraffine testate per questa struttura resta perciò una certa quantità di PCM sospeso nella parte centrale della struttura. Si può inoltre notare come la parte superiore del fronte di fusione proceda più velocemente a causa dei moti convettivi generati dalla paraffina liquida che permettono di scambiare una quantità maggiore di calore fondendo la paraffina in tempi minori rispetto alla parte inferiore.

Osservando i dati misurati dalle termocoppie del lato riscaldato è stato possibile giungere alla conclusione che le temperature fossero molto vicine fra loro confermando l'uniformità nella distribuzione del calore. Di conseguenza, dopo aver verificato che ciò accadesse in ogni prova, è stato deciso di mostrare direttamente l'andamento della  $T_{risc,media}$ . Non sono stati mostrati i grafici relativi alle temperature misurate dalle 6 termocoppie di lato riscaldato nelle prove da 150 W e 200 W di ogni paraffina per motivi di spazio e per il motivo sopra citato.

Un altro aspetto interessante è osservabile dall'andamento della temperatura nella fase di solidificazione del PCM (figura 3.3 e affini). Infatti, per le paraffine RT42 ed RT55, la cui distribuzione delle entalpie in cambio di fase (fornite dalla Rubitherm GmbH) risulta coprire un range di 5 °C circa, si può notare un cambio di pendenza della curva rispettivamente attorno ai 42 e 55 gradi ma procede comunque con pendenza non nulla perché appunto il cambiamento di fase non avviene esattamente a temperatura costante. Invece, per la paraffina RT64HC l'entalpia in cambiamento di fase è concentrata principalmente alle temperature di 64 e 61 °C ed è perciò possibile notare due cambi di pendenza. Anche in



questo caso il processo complessivamente non avviene a temperatura costante ma nell'intorno di questi due valori la temperatura resta pressoché costante per qualche centinaio di secondi. Questo è spiegato sia dalla distribuzione di entalpia ma anche dal maggior calore latente che fornisce maggior inerzia al sistema e quindi un tempo maggiore per far avvenire completamente la transizione dovendo cedere una maggior quantità di calore all'ambiente.

Spostando l'attenzione nei grafici raffiguranti la fase di fusione in cui viene riportata la  $T_{risc_{media}}$  assieme alle  $T_{PCM_{top}}$ ,  $T_{PCM_{middle}}$ ,  $T_{PCM_{bottom}}$  sono molte le osservazioni possibili. In particolare, salta all'occhio come la  $T_{PCM_{middle}}$  di tutte le prove della BCC 10 mm proceda diversamente nella fase finale della fusione rispetto alle altre termocoppie immerse nel PCM. Questo è probabilmente dovuto ad un contatto fisico fra la termocoppia e la struttura metallica che perciò non permette una misurazione in linea con le aspettative.

Generalmente però è possibile notare un trend costante: essendo il fronte di fusione non parallelo alla parete comporta un cambiamento di fase completo del PCM diverso in termini di tempo a seconda dell'altezza che desideriamo considerare. Questo è osservabile in prima battuta dai video raccolti e successivamente dai tre picchi prodotti dalle  $T_{PCM_{top}}$ ,  $T_{PCM_{middle}}$ ,  $T_{PCM_{bottom}}$  nella figura 3.4 e affini. La spiegazione di questo fenomeno, seppur il flusso termico risulti uniforme ed applicato verticalmente su tutta la superficie, risiede nel fatto che si generano dei moti convettivi che incrementano il trasferimento di calore nella parte alta facendo predominare in basso la conduzione e distorcendo così il fronte di fusione. Infatti, i tre picchi citati precedentemente avvengono sempre in momenti temporali diversi.

Per quanto riguarda strettamente la fase di fusione della paraffina RT64HC (figura 3.23) si nota come il processo avviene quasi a temperatura costante, al contrario delle altre due paraffine: potenzialmente deducibile osservando i grafici legati alla distribuzione delle entalpie. Questo però si ricollega ad un alto aspetto, forse il più importante: la temperatura del lato riscaldato presenta un cambio di pendenza nell'istante in cui le paraffine iniziano la fusione. Il cambio di pendenza è dovuto ai profili di temperatura, in particolare alla differenza di temperatura. Il PCM nella fase di fusione si trasforma in un serbatoio termico a temperatura costante che permette al lato riscaldato di poter trasferire una quantità maggiore di calore rallentando così il suo costante innalzamento di temperatura. Infatti, l'allontanamento dei due profili termici ( $T_{risc}eT_{pcm}$ ) farebbe incrementare il  $\Delta T$  e quindi il trasferimento di calore. Visto che la potenza fornita è costante ed ogni altro parametro resta costante, un incremento  $\Delta T$  comporta un maggior trasferimento di calore che di conseguenza viene ridimensionato grazie all'abbassamento della temperatura del lato riscaldato in modo da ridurre il  $\Delta T$ . Fra tutte la paraffina l'RT64HC rende molto più marcato questo cambio di pendenza a causa della transizione di fase molto più costante e del suo maggior calore latente.

Per quanto riguarda le prove con le strutture vuote (figura 3.60, 3.61, 3.62) è giusto specificare che le tre termocoppie in inox misurano in realtà la temperatura dell'aria interna, di conseguenza è stato ritenuto non opportuno mostrarne gli andamenti. Chiarito questo aspetto, si vede chiaramente come l'innalzamento di temperatura procede in modo lineare senza subire cambi di pendenza come di fatto ci si aspettava.

### 3.6 Confronti tra i risultati

All'interno di questo paragrafo verranno presentate delle sezioni, ciascuna delle quali si focalizzerà su un particolare confronto: tra paraffine, strutture oppure flussi termici. Per una corretta interpretazioni dei grafici ottenuti si dedicherà un piccolo spazio all'inizio di ogni sezione per spiegare come si è deciso di porre in relazione dati ottenuti da prove diverse. Infine, verrà posta l'attenzione su un ulteriore confronto riguardante la struttura senza paraffina.

#### Confronto tra flussi termici

Le variabili in gioco presenti per ciascuna prova sono il flusso termico, la paraffina e la struttura utilizzata. Se si intende confrontare i flussi termici risulta fondamentale fissare le altre due variabili: la paraffina e la struttura. Inoltre il parametro di interesse risulta essere principalmente la differenza tra la temperatura del lato riscaldato e l'ambiente, di conseguenza verrà mostrato come varia  $T_{risc}-T_{amb}$  (chiaramente  $T_{risc}$  e  $T_{adb}$  corrispondono ai valori medi) a parità di paraffina e struttura utilizzata ma variando il flusso termico. L'obiettivo consiste nell'osservare se il flusso termico possa influenzare ciascuna prova o se non risulta rilevante.

I risultati sono qui di seguito riportati.

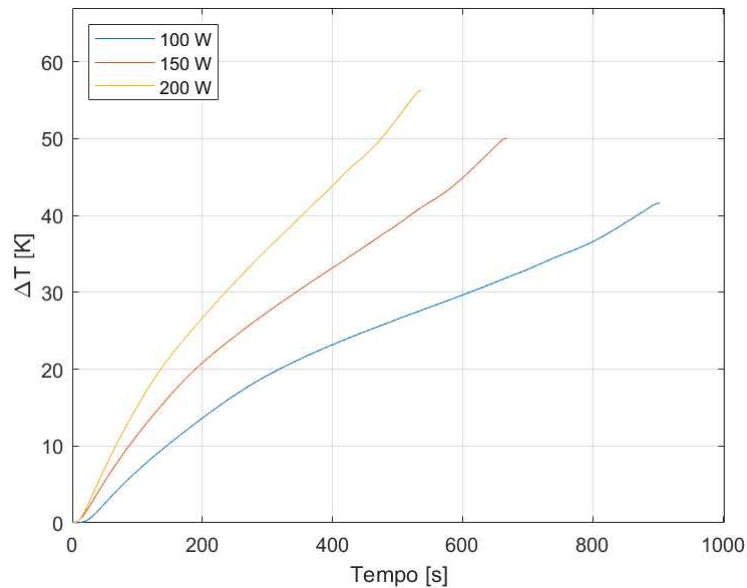


Figura 3.64: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT42.

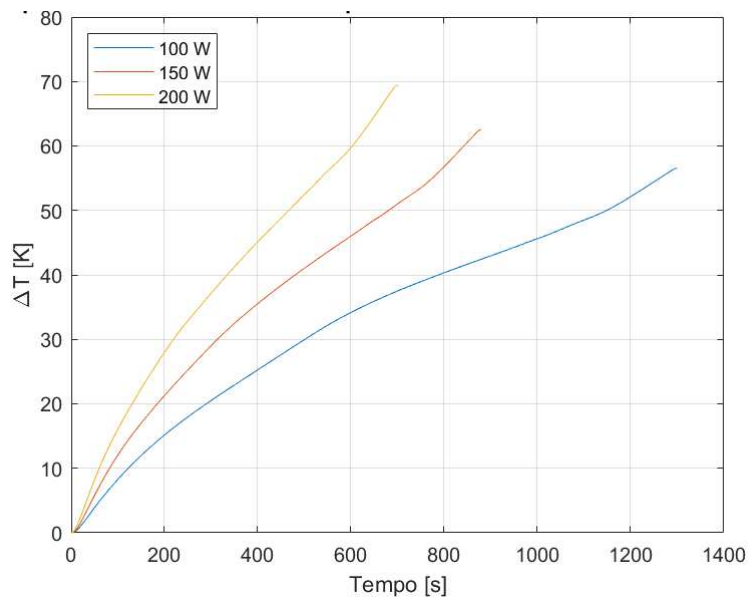


Figura 3.65: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT55.

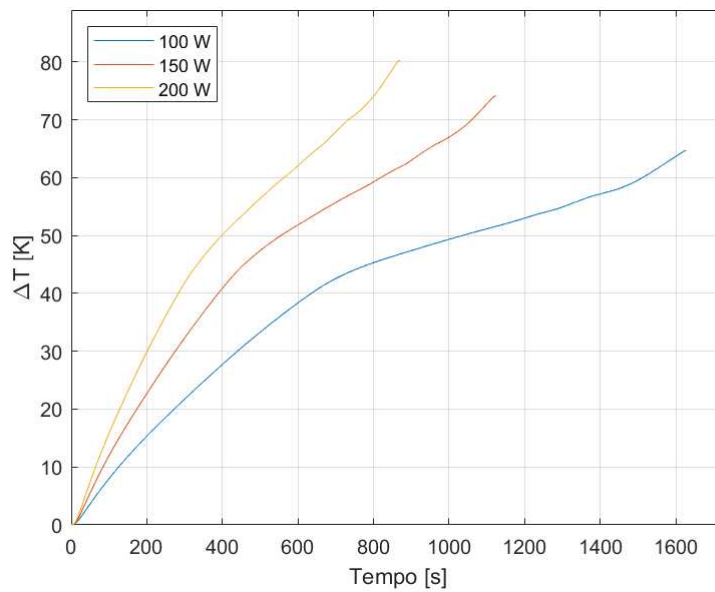


Figura 3.66: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT64HC.

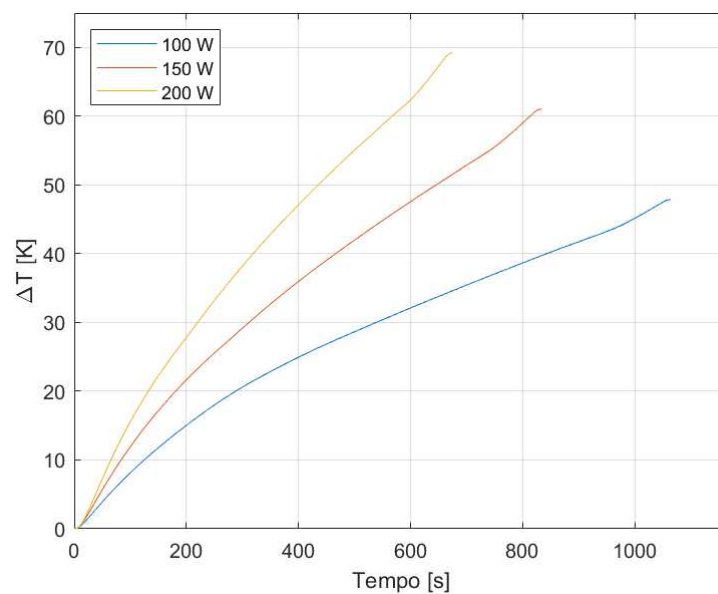


Figura 3.67: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT42.

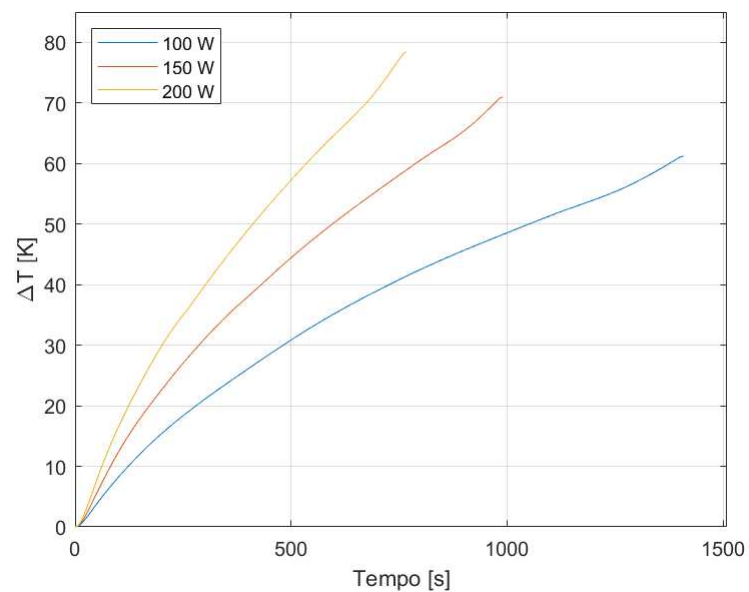


Figura 3.68: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT55.

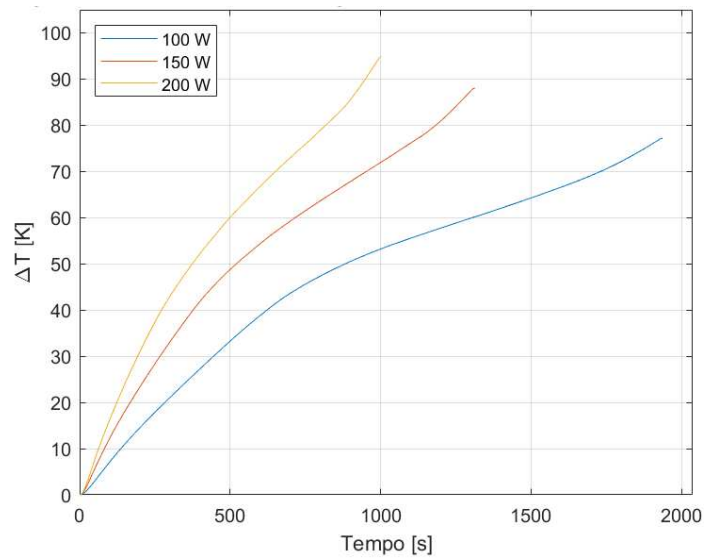


Figura 3.69: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT64HC.

### Confronto tra paraffine

Molte informazioni su come queste tre paraffine possano influenzare la temperatura del lato riscaldato si possono reperire nel lavoro svolto da Parpinello [36]. Chiaramente i risultati attesi devono risultare in linea con quelli di Parpinello però le strutture da lui utilizzate risultano differenti. Allo stesso modo dovranno essere fissati per ciascuna comparazione il flusso termico e la struttura, mentre la variabile libera di cambiare sarà la paraffina.

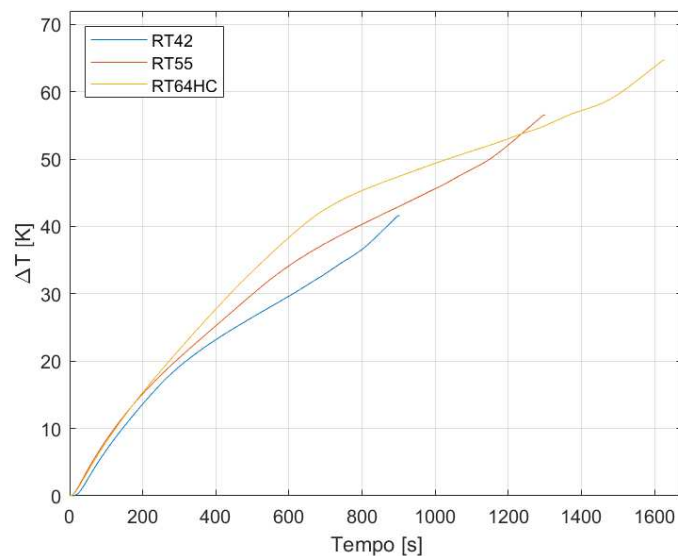


Figura 3.70: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 100 W.

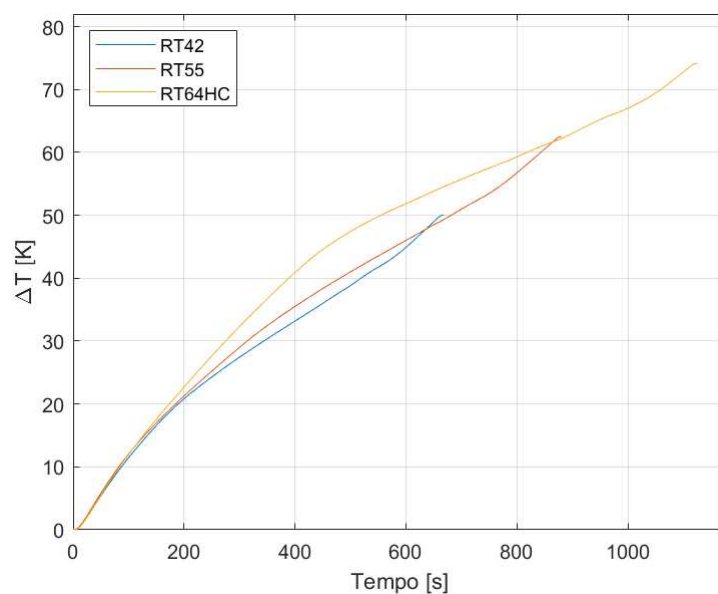


Figura 3.71: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 150 W.

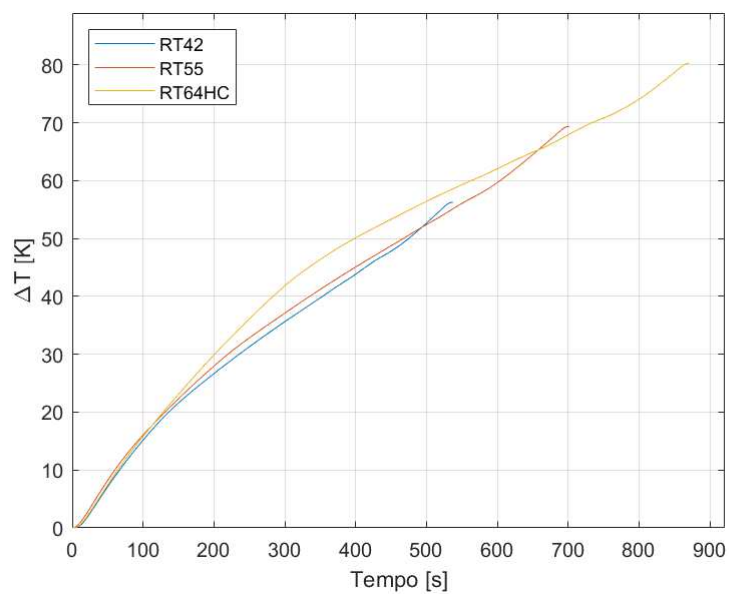


Figura 3.72: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 200 W.

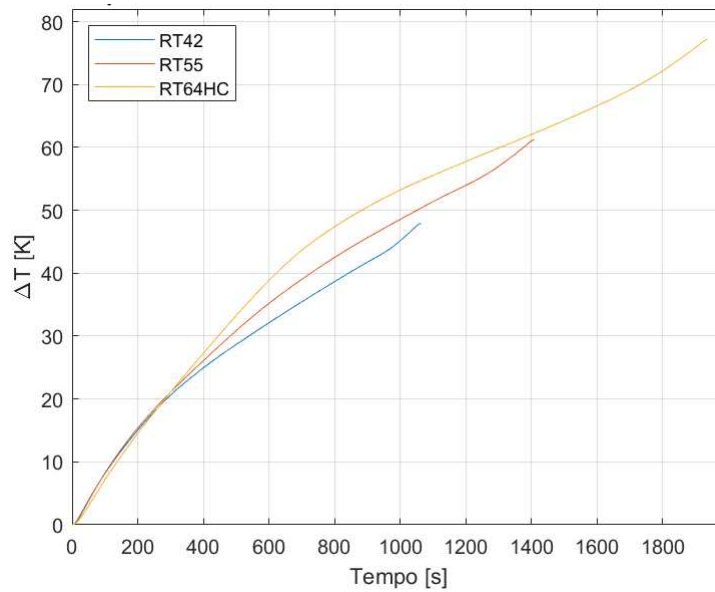


Figura 3.73: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 100 W.

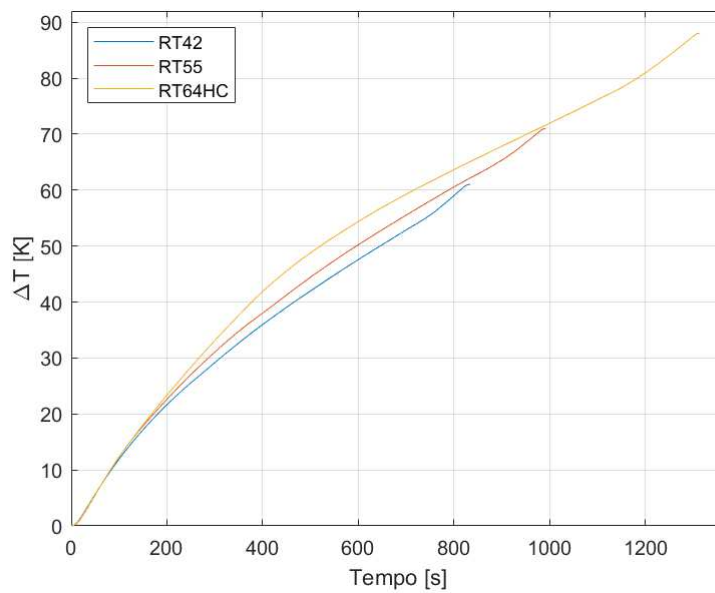


Figura 3.74: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 150 W.

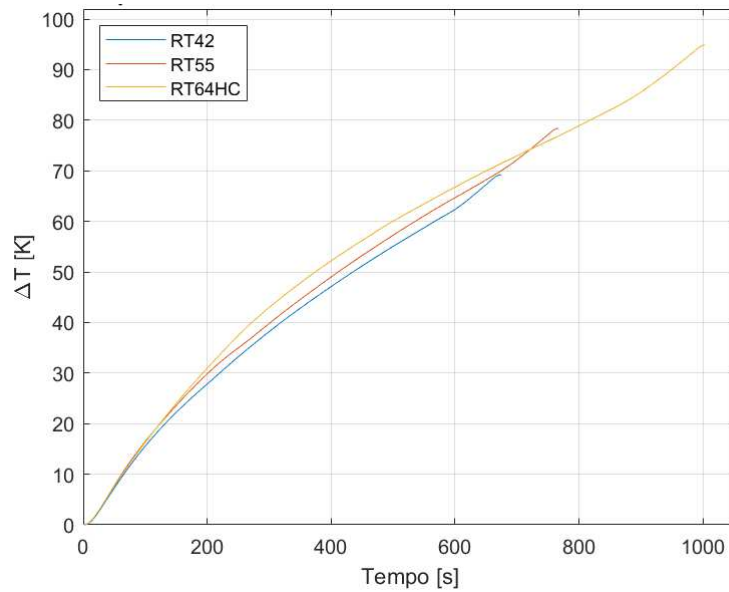


Figura 3.75: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 200 W.

### Confronto fra strutture

In questa sezione si cercherà di osservare se le geometrie vadano ad influenzare la trasmissione del calore. Essendo la porosità pari all' 87% in entrambe le strutture, significa che la quantità di materiale depositato risulta la medesima per cui l'unico aspetto che differenzia le strutture è la forma della cella. A tal proposito, le 2 strutture utilizzate fra le 6 disponibili non sono state scelte a caso: si è cercato appositamente di mantenere costante la porosità e di prendere geometrie diverse.

In questo caso le tipologie di grafici proposti sono due. Si andrà inizialmente a paragonare il  $\Delta T$  generato dalla differenza fra la temperatura della parete riscaldata e quella adiabatica ( $T_{risc} - T_{adb}$ ) vedi figura 3.76 e affini. Successivamente si osserverà l'andamento del  $\Delta T$  calcolato come la differenza di temperatura del lato riscaldato e l'ambiente ( $T_{risc} - T_{amb}$ ) come si evince dal grafico 3.85 e seguenti.

Come negli altri confronti le variabili mantenute costanti sono la paraffina e il flusso termico andando perciò a confrontare le differenti strutture a parità delle condizioni appena presentate.



## Paraffina RT42

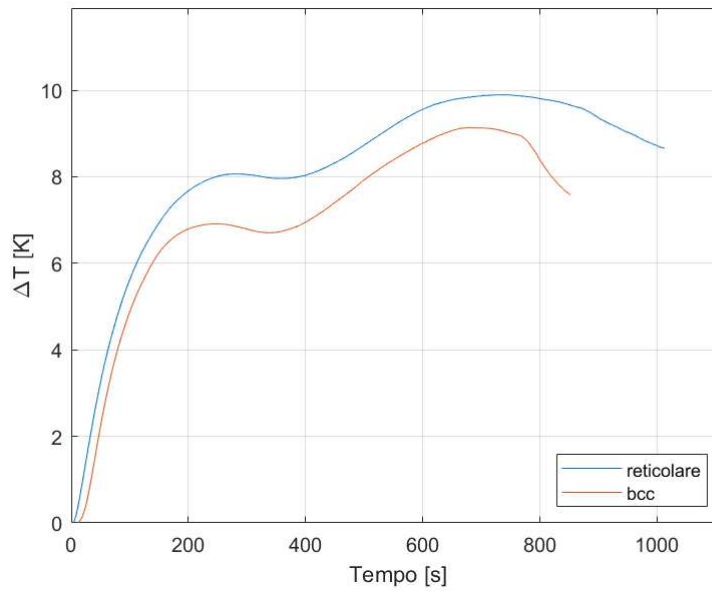


Figura 3.76: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina R42 flusso di termico di 100 W.

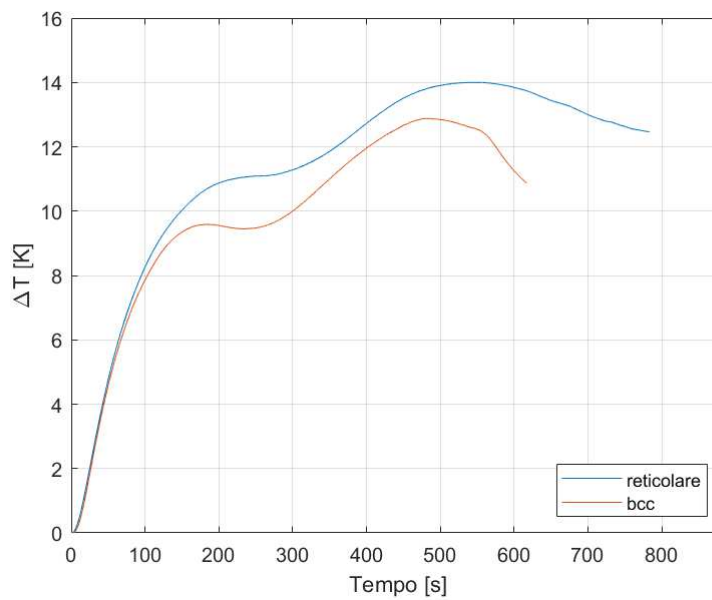


Figura 3.77: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina R42 flusso di termico di 150 W.

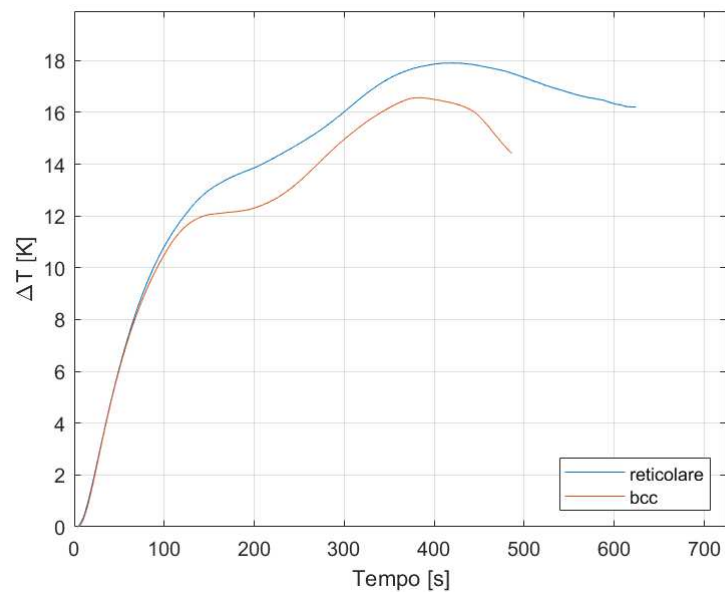


Figura 3.78: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina R42 flusso di termico di 200 W.

### Paraffina RT55

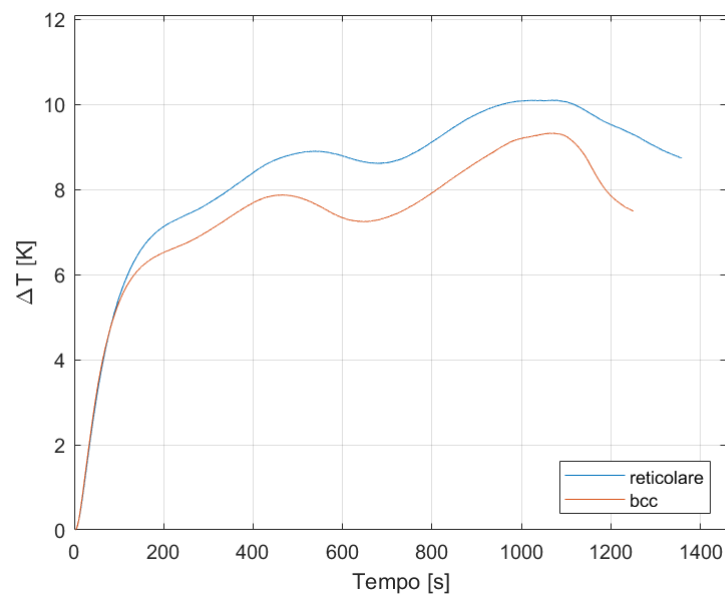


Figura 3.79: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 100 W.

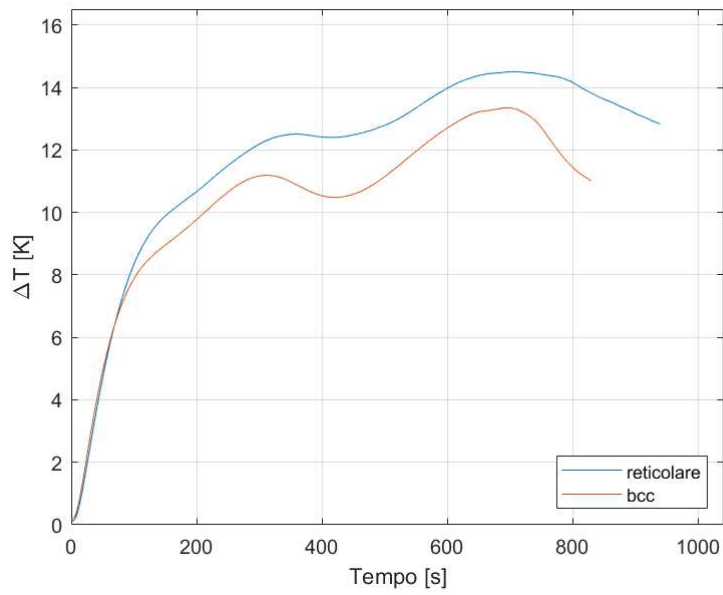


Figura 3.80: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 150 W.

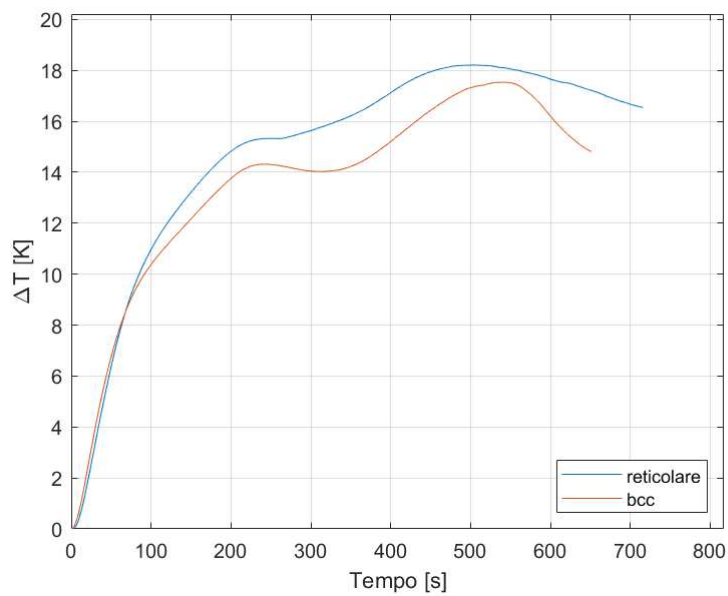


Figura 3.81: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 200 W.

## Paraffina RT64HC

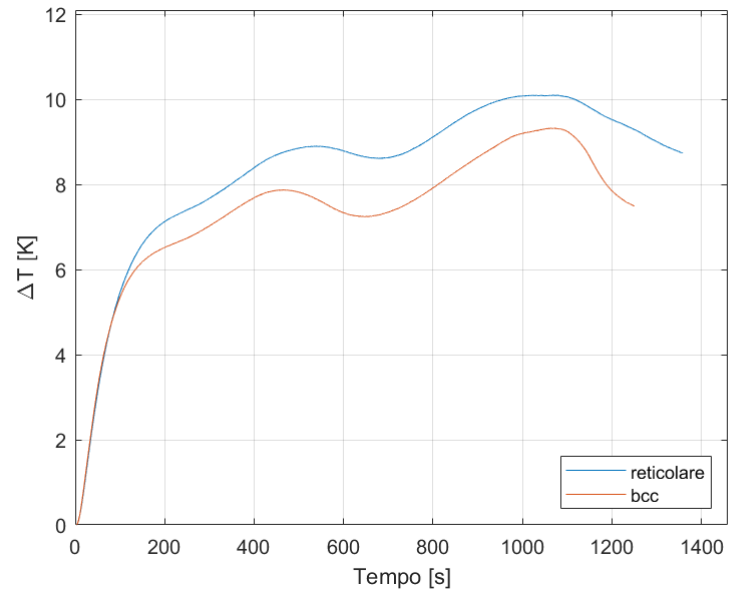


Figura 3.82: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT64HC flusso di termico di 100 W.

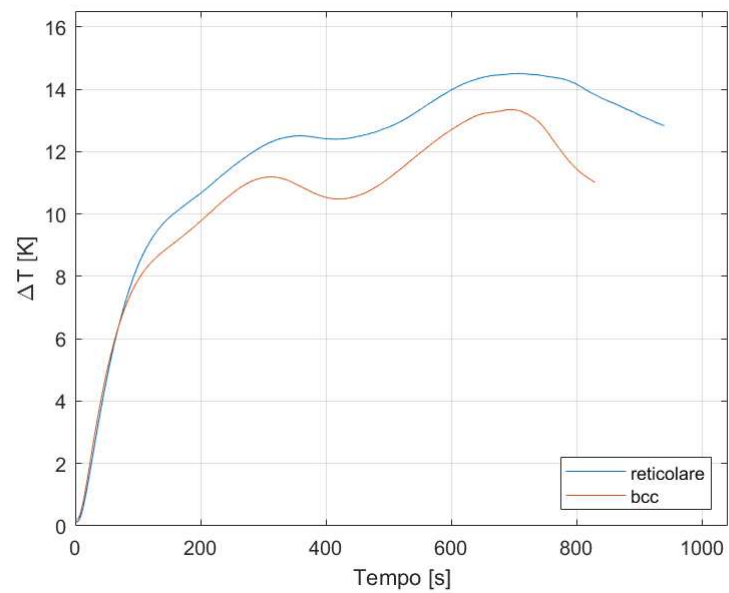


Figura 3.83: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT64HC flusso di termico di 150 W.

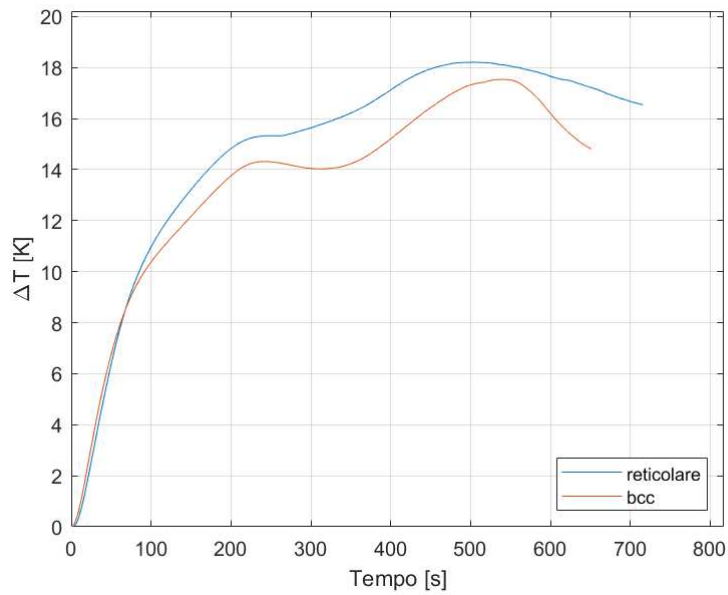


Figura 3.84: Andamento di  $T_{risc} - T_{adb}$  con paraffina RT64HC flusso di termico di 200 W.

Come anticipato verranno proposti altri grafici che pongono in relazione le strutture osservando non più come varia la differenza di temperatura fra i due estremi delle strutture ma come prosegue l'incremento di temperatura del lato riscaldato.

### Paraffina RT42

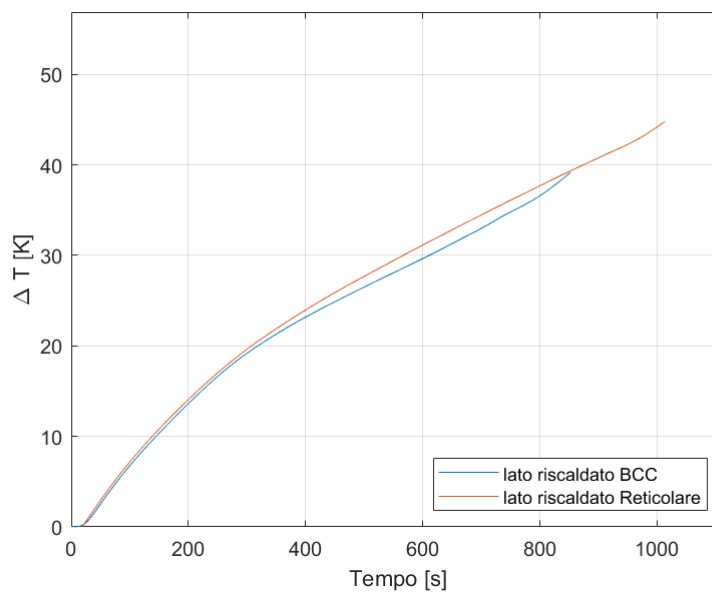


Figura 3.85: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT42 flusso di termico di 100 W.

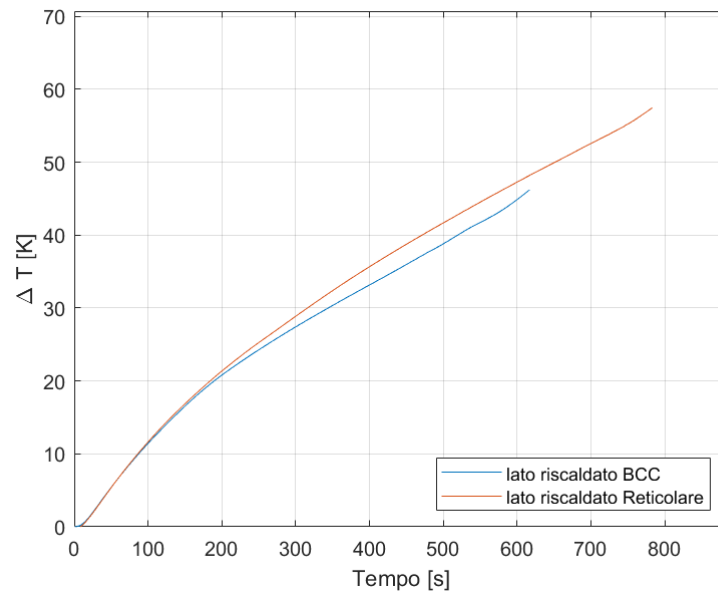


Figura 3.86: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT42 flusso di termico di 150 W.

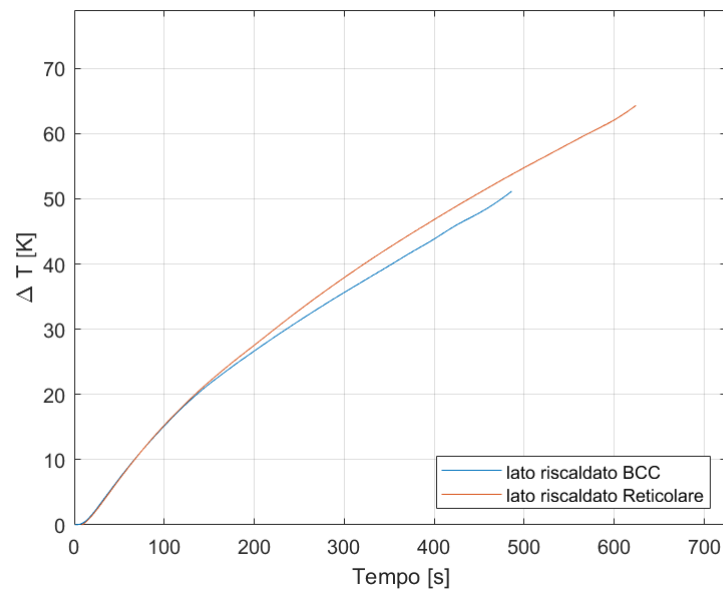


Figura 3.87: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT42 flusso di termico di 200 W.

## Paraffina RT55

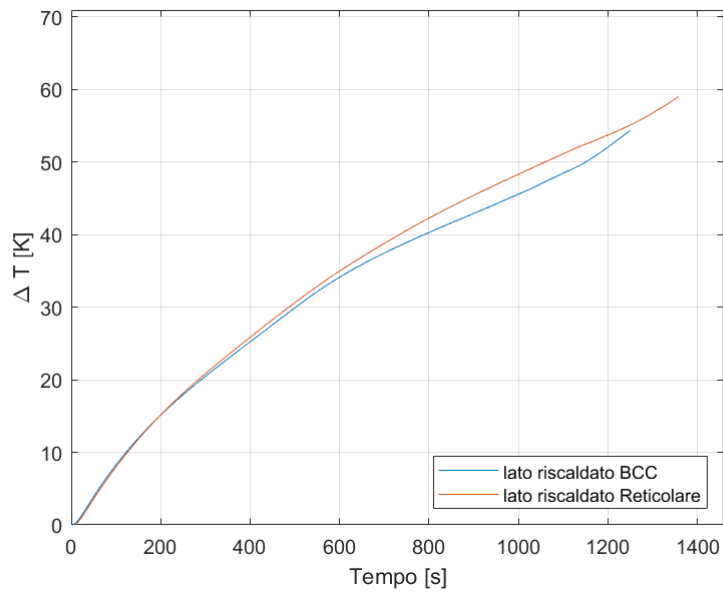


Figura 3.88: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 100 W.

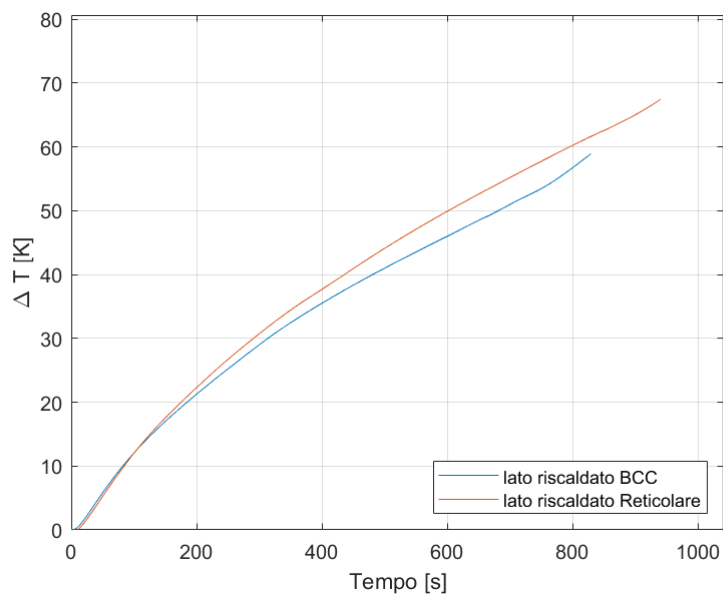


Figura 3.89: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 150 W.

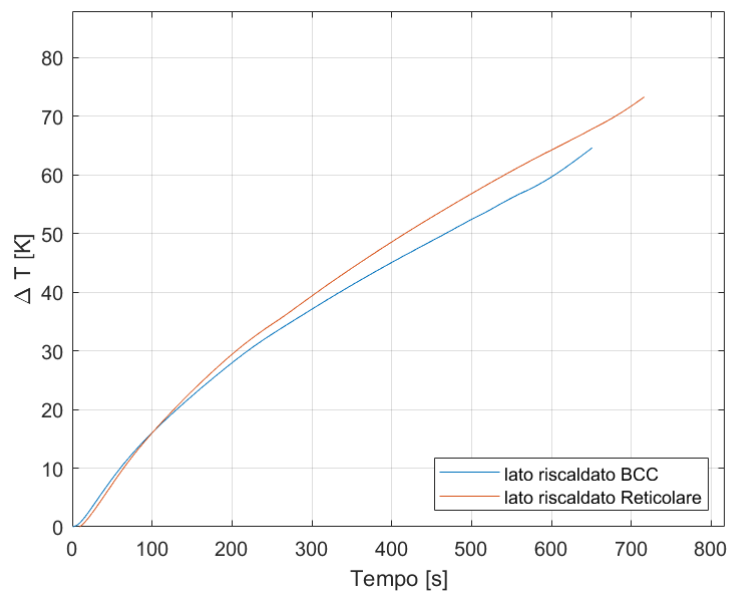


Figura 3.90: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT55 flusso di termico di 200 W.

### Paraffina RT64HC

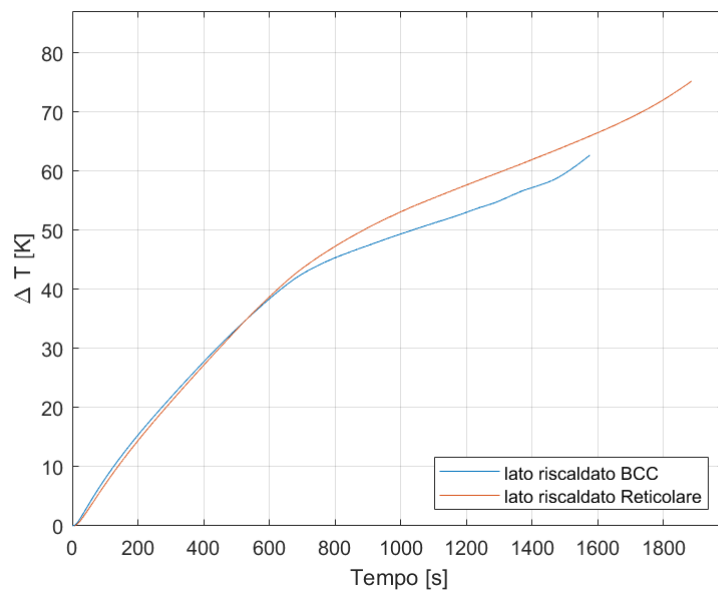


Figura 3.91: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT64 flusso di termico di 100 W.



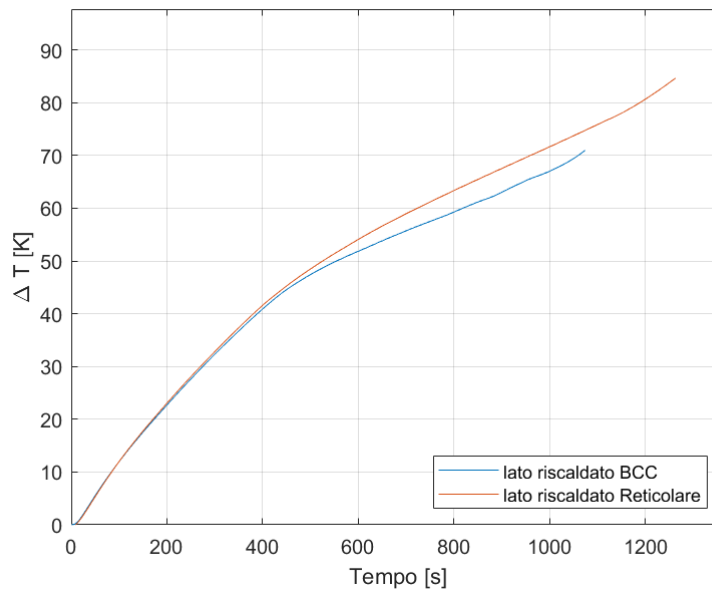


Figura 3.92: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT64 flusso di termico di 150 W.

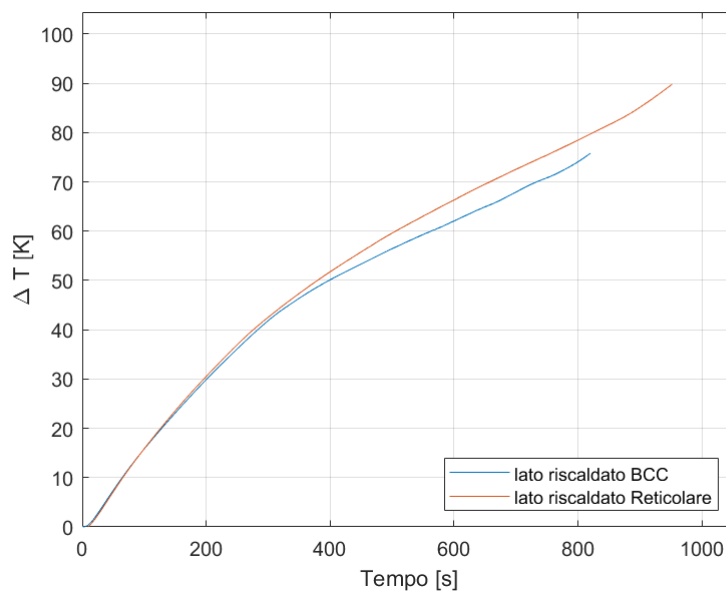


Figura 3.93: Andamento di  $T_{risc} - T_{amb}$  con paraffina RT64 flusso di termico di 200 W.

### Confronto fra struttura vuota e con paraffina

Questo interessante confronto risulta possibile solamente con la struttura a geometria reticolare, l'unica con cui sono state effettuate le prove in assenza di paraffina. Probabilmente, non ci si aspetterebbe di trovare risultati molto discordi fra misure a vuoto della reticolare e BCC in quanto le masse di esse sono le medesime per cui il riscaldamento sensibile della struttura a vuoto risulterebbe sicuramente confrontabile (ovvero dipendente dal  $c_p$ ). Per ogni condizione di flusso termico si è deciso di mostrare l'andamento del lato riscaldato della struttura reticolare vuota assieme agli andamenti dei lati riscaldati della medesima struttura in condizioni uguali di flusso termico con la presenza delle tre paraffine.

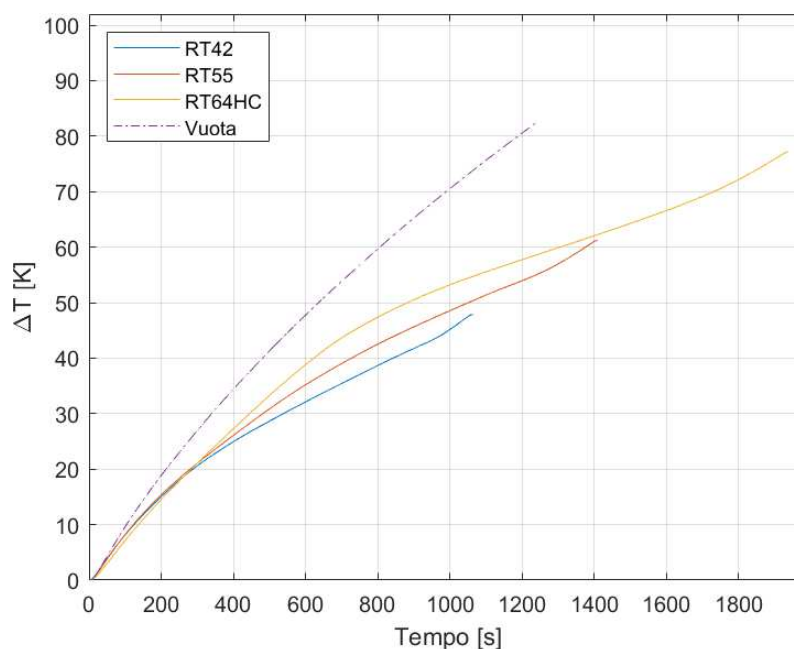


Figura 3.94: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 100 W.

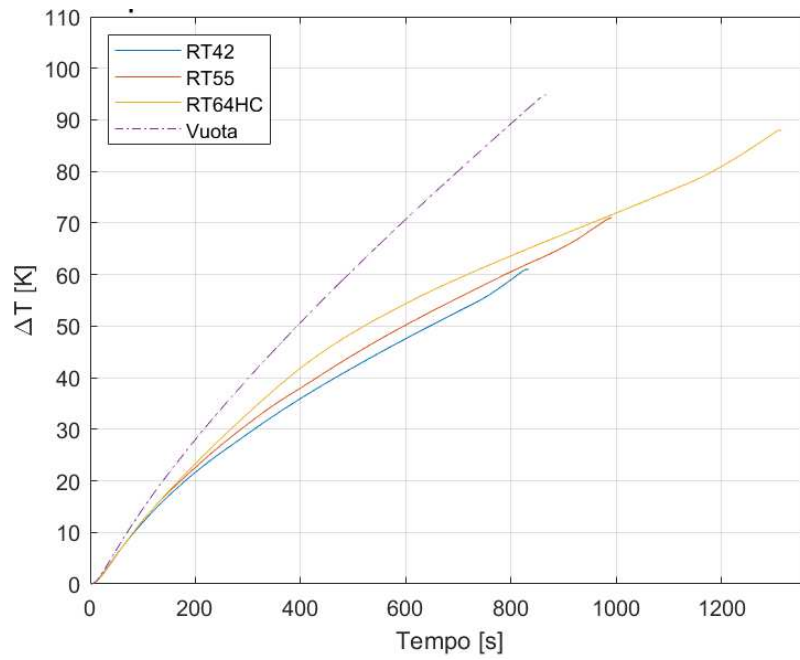


Figura 3.95: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 150 W.

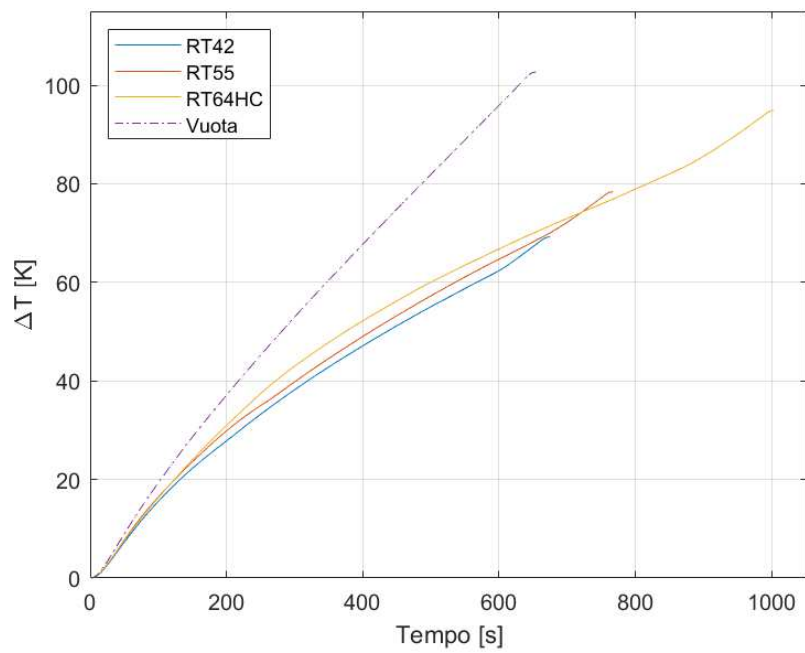


Figura 3.96: Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 200 W.

### 3.7 Risultati dei confronti

Le comparazioni effettuate tra i flussi termici (figura 3.64) sono molto simili se confrontati con i risultati trovati da Parpinello. Come si poteva immaginare, all'aumentare della potenza termica applicata, la temperatura del lato riscaldato si alza: l'area ed lo scambio termico conduttivo restano invariati rendendo necessario l'incremento del  $\Delta T$  (calcolato come  $T_{risc} - T_{PCM}$ ). Inoltre, osservando graficamente gli andamenti, la differenza esistente tra le curve associate ai flussi di 100 e 150 W risulta essere molto simile alla differenza presente fra le curve dei 150 e 200 W. Questo effetto potrebbe determinare una relazione lineare fra il flusso termico e la temperatura del lato riscaldato.

Procedendo con ordine il confronto fra le paraffine si concentra prevalentemente sugli aspetti che le differenziano come il calore latente e la temperatura di fusione. In particolare, a prescindere dalla struttura e dal flusso termico, si possono notare andamenti molto simili delle temperature: la paraffina con la temperatura di fusione più bassa tende a mantenere la temperatura del lato riscaldato più bassa. Questo è dovuto alla transizione di fase del PCM che, avvenendo a temperatura pressoché costante costituisce, per un breve periodo di tempo, una fonte di "raffreddamento" non irrilevante per la struttura che invece tenderebbe a scaldarsi. In altre parole, con il flusso termico, l'area e lo scambio termico conduttivo fissati la differenza di temperatura  $T_{risc} - T_{PCM}$  viene vincolata. Ma se ad un certo punto  $T_{PCM}$  smette di crescere, perché comincia il cambiamento di fase, anche la  $T_{risc}$  dovrà adeguarsi a questa variazione riducendo la crescita.

Questo cambio di pendenza "primario" porta la curva della temperatura del lato riscaldato con paraffina RT42 ad essere sempre inferiore rispetto all'utilizzo delle paraffine RT55 ed RT64HC. A questo punto, seppur possa sembrare migliore la paraffina RT42, bisogna considerare il cambio di pendenza "secondario": quel momento in cui si esaurisce lo scambio attraverso calore latente e si riprende con il calore sensibile il cui incremento di temperatura dipende dal  $c_p$ . Se però prendiamo in considerazione come che il calore latente della paraffina RT64HC risulta essere il 51% più elevato della RT42 allora il calore da fornire risulterà maggiore ed il secondo cambio di pendenza avverrà dopo un tempo più lungo. Infatti, si può supporre osservando i grafici (figura 3.70 e seguenti) come le curve in azzurro (RT42) se prolungate si intersecherebbero con le curve in giallo (RT64HC) portando nel lungo termine delle temperature dei lati riscaldati superiori. Ragion per cui si può dedurre che il compromesso ottimale potrebbe essere rispecchiato da una paraffina con bassa temperatura di fusione ed elevato calore latente, chiaramente basandosi semplicemente sulla temperatura del lato riscaldato in una fase di riscaldamento a potenza termica costante.

Nella sezione riguardante il confronto fra le strutture sono stati presentati due tipologie di grafico. In particolare, nella prima tipologia (figura 3.76 e affini), si nota molto facilmente che la differenza di temperatura aumenti in entrambi i moduli quando il flusso termico cresce. La BCC però permette di ottenere valori generalmente più bassi, probabilmente dovuti alla maggior superficie di contatto fra struttura e PCM che permette una maggiore uniformità nella distribuzione del calore. Infatti, analizzando la geometria delle celle si ottiene un valore teorico dell'area della BCC pari al 62% superiore rispetto alla struttura reticolare. Il tempo finale in cui terminano le curve corrisponde al tempo impiegato per fondere tutta

la paraffina: si può osservare come la curva azzurra legata alla geometria reticolare sia sempre più lunga in quanto il tempo per portare alla fusione completa della paraffina risulta sempre superiore rispetto alla BCC (a parità di paraffina e flusso). Anche in questo caso la spiegazione potrebbe essere racchiusa nella differenza fra le superfici di contatto con il PCM. Gli andamenti fra loro risultano molto simili, entrambi presentano due "massimi locali". L'origine di tali andamenti risiede nel fatto che in determinati momenti cambia la tipologia di scambio termico che permette una diversa asportazione del calore. In particolare, il primo plateau che si viene a generare nel momento in cui il fronte di fusione avanza e, nello spazio creatosi tra PCM e parete, si iniziano ad instaurare dei moti convettivi. Questi moti sono generati dal PCM liquido che lambendo la parete riscaldata permette così una migliore asportazione del calore ed una riduzione della differenza fra questa temperatura e quella del lato adiabatico. Per quanto riguarda il secondo "massimo" invece si manifesta verso la fine del processo di completa fusione: dal momento in cui persiste solamente lo stato liquido, la miscelazione interna viene ad aumentare, rendendo la distribuzione della temperatura fra i due lati più omogenea. La seconda tipologia di grafico (figura 8.85 e seguenti) mostra una notevole vicinanza fra le curve. Si può dedurre perciò come la geometria possa influenzare il tempo di fusione, come è stato visto, ma in termini di temperatura del lato riscaldato non si trovano differenze sostanziali. Probabilmente la porosità e la tipologia di materiale influiscono maggiormente sulla temperatura del lato riscaldato.

L'ultimo confronto effettuato risulta essere molto chiaro fin da subito. Nella struttura senza la presenza di paraffina lo scambio termico fra struttura ed aria avviene attraverso il calore sensibile, di conseguenza viene a mancare il cambio di fase del PCM che rendeva più contenuta la temperatura della struttura grazie alla capacità termica infinita disponibile per un certo intervallo di tempo. Il flesso che subisce la curva della temperatura del lato riscaldato è molto evidente quando si utilizza la paraffina. In relazione a questo la temperatura limite attorno ai 100-120 °C viene raggiunta in un tempo sicuramente inferiore nella struttura vuota, la cui curva procede ragionevolmente a pendenza superiore. Non ci si poteva aspettare un risultato diverso essendo questo l'obiettivo principale per cui si era deciso di inserire un materiale a cambiamento di fase: ovvero sfruttare la sua inerzia termica per contrastare l'innalzamento, altrimenti molto brusco, della temperatura. Forse si poteva desiderare una differenza più marcata ma la bassa conduttività della paraffina rende comunque il trasferimento di calore molto lento.

### 3.8 Confronto con il modello sviluppato da Diani e Campanale

In questo paragrafo viene presentato un modello sviluppato all'Università di Padova da Diani e Campanale [40] che nel lavoro di Parpinello [36] ha riscontrato una notevole aderenza ai dati sperimentali. In quel caso però le strutture analizzate erano schiume di rame, molto simili alle schiume in alluminio utilizzate dalle prove effettuate da Diani e Campanale. In questo lavoro si cercherà di determinare se il modello proposto sia in linea con i dati sperimentali ottenuti mediante le strutture "quasi porose" o se invece risulta necessario effettuare delle modifiche.

Il modello si articola sfruttando una serie di parametri adimensionali come il numero di Fourier (Fo) che identifica il rapporto tra il trasporto diffusivo e l'energia accumulata:

$$Fo = \frac{k_{eff} \cdot t_{melt}}{\rho_{eff} \cdot c_{p,eff} \cdot h^2} \quad (3.1)$$

Dove:

- $t_{melt}$  corrisponde al tempo necessario per fondere l'intera paraffina [s];
- $k_{eff}$  è la conducibilità termica effettiva calcolata come:

$$k_{eff} = 0.33 \cdot k_{solid} \cdot (1 - \epsilon) \quad (3.2)$$

dove  $k_{solid}$  corrisponde alla conduttività del materiale che compone la struttura, ovvero  $175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  per la lega *AlSi10Mg* ed  $\epsilon$  la porosità pari a 0.87;

- $\rho_{eff}$  corrisponde alla densità effettiva che viene calcolata pesando la struttura e il PCM in base al volume occupato in questo modo:

$$\rho_{eff} = \epsilon \cdot \rho_{PCM} + (1 - \epsilon) \cdot \rho_{solid} \quad (3.3)$$

con  $\rho_{PCM}$  corrispondente alla densità del PCM allo stato solido corrispondente a  $880 \text{ kg m}^{-3}$  e  $\rho_{solid}$  riferito alla densità della lega utilizzata pari a  $2670 \text{ kg m}^{-3}$ ;

- $h$  indica la distanza del fronte di fusione dal lato riscaldato a quello adiabatico, pari a 0.02 m;
- $c_{p,eff}$  si riferisce al calore specifico effettivo pesato sul volume e sulla densità in questo modo:

$$c_{p,eff} = \epsilon \cdot \frac{\rho_{PCM}}{\rho_{eff}} \cdot c_{p,PCM} + (1 - \epsilon) \cdot \frac{\rho_{solid}}{\rho_{eff}} \cdot c_{p,solid} \quad (3.4)$$

con  $c_{p,PCM}$  e  $c_{p,solid}$  i calori specifici del PCM e del materiale della struttura rispettivamente pari a  $2000$  e  $920 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;

Il secondo parametro adimensionale è il numero di Stefan ( $Ste$ ) che è definito come il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente, e può essere calcolato come:

$$Ste = \frac{c_{p,eff} \cdot (T_{melt} - T_i)}{L_{eff}} \quad (3.5)$$

Dove:

- $c_{p,eff}$  corrisponde al calore specifico effettivo calcolato precedentemente [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ];
- $T_{melt}$  indica la temperatura di fusione tipica della paraffina utilizzata in ciascuna prova [ $^{\circ}C$ ];
- $T_i$  rappresenta la temperatura ad inizio della prova, corrispondente alla temperatura ambiente  $T_{amb}$ ;
- $L_{eff}$  indica il calore latente effettivo calcolato in questo modo:

$$L_{eff} = \epsilon \cdot \frac{\rho_{PCM}}{\rho_{eff}} \cdot L_{PCM} \quad (3.6)$$

con  $L_{PCM}$  corrispondente al calore latente del PCM [ $J kg^{-1}$ ].

Il terzo parametro adimensionale corrisponde alla temperatura adimensionale, definita come:

$$\theta = \frac{T_f - T_{melt}}{T_{melt} - T_i} \quad (3.7)$$

in cui:

- $T_f$  corrisponde alla temperatura finale raggiunta dal lato riscaldato [ $^{\circ}C$ ];

Successivamente si procede calcolando il prodotto del numero di Fourier e di Stefan:

$$Fo \cdot Ste = \frac{k_{eff} \cdot t_{melt} \cdot (T_{melt} - T_i)}{\rho_{eff} \cdot h^2 \cdot L_{eff}} \quad (3.8)$$

Risulta possibile infine rappresentare graficamente le temperature adimensionali sull'asse  $y$  in funzione dei prodotti  $Fo \cdot Ste$ . L'interpretazione dei punti sul grafico può essere così fatta: alti valori del prodotto  $Fo \cdot Ste$  e bassi valori di  $\theta$  corrispondono a bassi flussi termici in quanto il tempo  $t_{melt}$  necessario a fondere la paraffina completamente risulta elevato e la  $T_f$  generalmente più bassa. Caso contrario, ovvero per alti flussi termici, la temperatura adimensionale cresce essendo la temperatura finale del lato riscaldato più elevata mentre il prodotto dei numeri adimensionali decresce a causa della diminuzione del tempo necessario per la completa fusione. Questo caratterizza perciò i punti che si trovano sulla parte sinistra del grafico.

Il modello identificato da Diani e Campanale che lega la temperatura adimensionale  $\theta$  al prodotto  $Fo \cdot Ste$  si presenta in questa forma:

$$\theta = 1.9073 \cdot (Fo \cdot Ste)^{-0.717} \quad (3.9)$$

Nella seguente immagine vengono riportati i punti calcolati (distinguendo le strutture) con l'andamento della correlazione proposta.

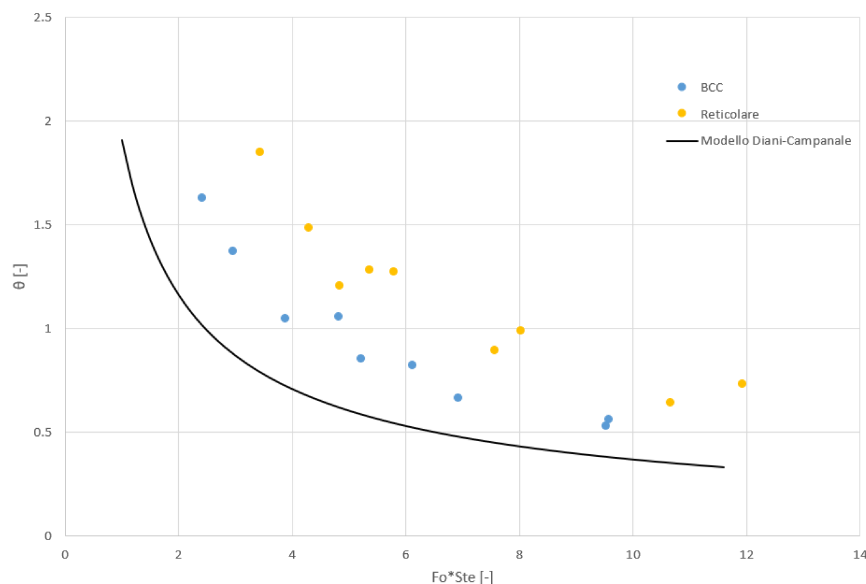


Figura 3.97: Temperatura adimensionale in funzione del prodotto  $Fo \cdot Ste$  relativi alle strutture BCC e Reticolare con  $\epsilon=87\%$ .

Come si può notare i dati non aderiscono alla curva ma risultano traslati in alto a destra mantenendo comunque un andamento tipico esponenziale. Si è deciso di andare a revisionare i punti gialli riferiti alla struttura reticolare per un semplice motivo. Il fronte di fusione analizzato con le schiume metalliche, ed anche con la BCC, procede linearmente da sinistra a destra portando la conclusione del processo di fusione in prossimità del lato adiabatico. Questo però non accade con la struttura reticolare (figura 3.30) dove la paraffina inizia a fondere da sinistra (lato riscaldato) per poi trovare un momento di stallo seguito da un secondo fronte di fusione che si innesca dal lato adiabatico (il lato destro). Questo genera una stasi: della paraffina solida resta sospesa nella parte centrale dilatando il tempo di fusione. Di conseguenza, il tempo e la temperatura finale si innalzano. Si è deciso perciò di revisionare i dati considerando come  $t_{melt}$  il tempo in cui la paraffina inizia a fondersi in corrispondenza del lato adiabatico in modo da rappresentare più adeguatamente il reale tempo impiegato dal fronte per percorrere il tragitto da sinistra a destra. A seguito di questo anche la  $T_f$  è stata modificata perché riducendo il tempo complessivo la temperatura finale del lato riscaldato risulta essere più bassa.

Qui di seguito verrà riportato il grafico con i punti della reticolare modificati.



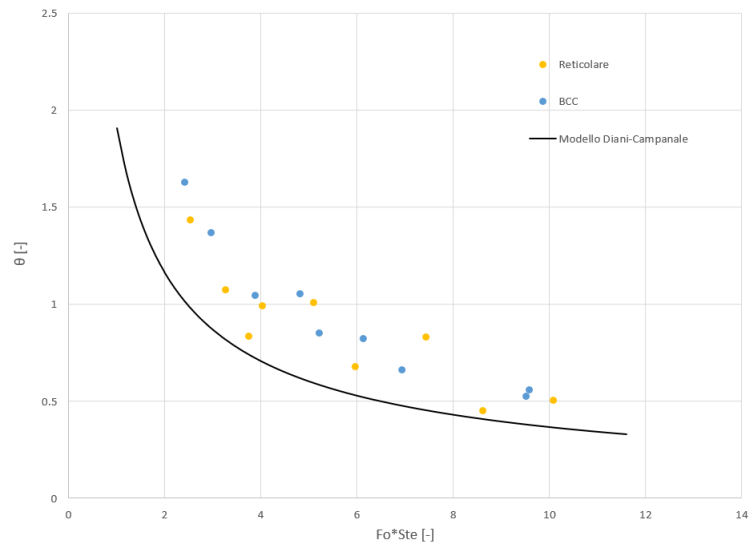


Figura 3.98: Temperatura adimensionale in funzione del prodotto  $Fo \cdot Ste$  relativi alle strutture BCC e Reticolare con  $\epsilon=87\%$ .

Si può notare come la dispersione dei punti sia migliorata e come si siano avvicinati al modello iniziale. Restando però non perfettamente aderente ai dati sperimentali raccolti, risulta necessario andare a ricalcolare i coefficienti presenti nel modello ottenendo questo risultato:

$$\theta = 2.5804 \cdot (Fo \cdot Ste)^{-0.701} \quad (3.10)$$

Qui di seguito i punti sperimentali e la correlazione Diani-Campanale modificata.

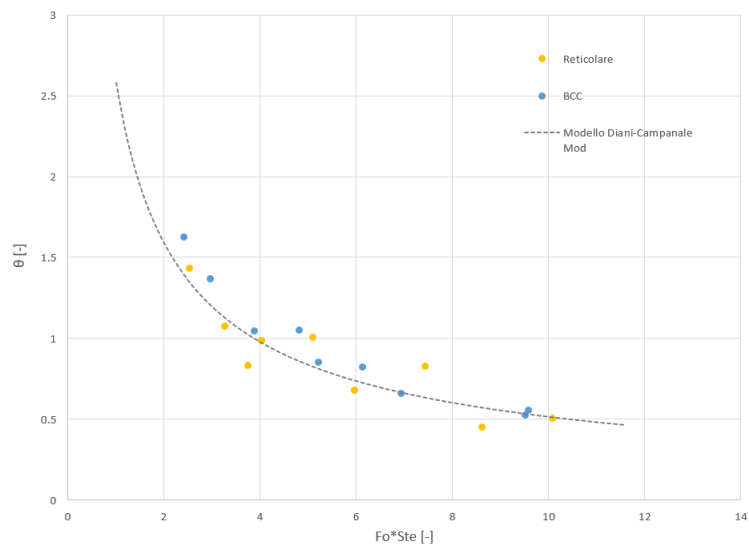


Figura 3.99: Temperatura adimensionale in funzione del prodotto  $Fo \cdot Ste$  relativi alle strutture BCC e Reticolare con  $\epsilon=87\%$ .

Per osservare la dispersione delle singole prove sperimentali attorno al modello proposto verranno calcolati alcuni parametri utili per la comprensione statistica: deviazione relativa, deviazione assoluta e deviazione standard.

Dove la deviazione relativa ottenuta risulta:

$$DR = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{(\theta_{calcolato,k} - \theta_{sperimentale,k})}{\theta_{sperimentale,k}} \cdot 100 = -21.664\% \quad (3.11)$$

Con:

- $\theta_{calcolato,k}$  rappresenta la temperatura adimensionale calcolata con il modello;
- $\theta_{sperimentale,k}$  rappresenta la temperatura adimensionale calcolata con i dati sperimentali;
- $N$  rappresenta il numero di campioni;

Essa indica la media della distanza presente tra il dato calcolato con il modello rispetto a quello sperimentale. Effettuando la media i valori con segno opposto tendono a compensarsi, di conseguenza risulta opportuno calcolare la deviazione assoluta. Infatti, la presenza del modulo permette di ottenere una somma di valori positivi annullando qualsiasi possibile compensazione.

Dove:

$$DA = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|(\theta_{calcolato,k} - \theta_{sperimentale,k})|}{\theta_{sperimentale,k}} \cdot 100 = 21.731\% \quad (3.12)$$

Un altro indice molto utile viene rappresentato dalla deviazione standard che migliora la comprensione dei parametri precedenti.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (DR_k - DR_{media})^2} = 15.32\% \quad (3.13)$$

La nuova correlazione potrebbe essere poi verificata nuovamente andando ad analizzare i dati delle restanti 4 strutture in modo da confermarla come definitiva per le geometrie realizzate con stampante 3D. In aggiunta, una modifica alternativa potrebbe essere fatta al modello: variare il coefficiente uguale a 0.33 utilizzato per determinare la  $k_{eff}$  in quanto dipendente dalla "tortuosità" della struttura. Non sono stati trovati in letteratura dei metodi per poter determinare questo parametro per le strutture utilizzate ma potrebbe essere uno spunto interessante per oggetto di lavori futuri.



## Capitolo 4

# Conclusioni

La grande potenzialità dei PCM viene immediatamente ridimensionata dalla bassa conducibilità termica che genera il principale collo di bottiglia per ogni genere di applicazione. Tra le varie tecniche studiate al fine di migliorare questa proprietà, le superfici estese risultano essere la soluzione più economica. Nell'applicazione proposta per l'utilizzo di PCM (raffreddamento passivo di componenti elettronici), si è deciso di utilizzare proprio delle superfici estese generate però mediante delle tecniche non convenzionali di produzione. L'elettronica presenta generalmente dei sistemi attivi che asportano calore mediante ventole o sistemi idraulici che necessitano di una costante alimentazione. Pensando ad un sistema più affidabile risulta scontato spostare l'attenzione verso una soluzione che non necessita di energia elettrica, ovvero un sistema passivo. Un materiale a cambiamento di fase, grazie alla sua elevata inerzia termica, potrebbe trasformarsi perciò in un serbatoio di accumulo abbastanza grande da assorbire il calore in eccesso raffreddando così la sorgente.

Il principale obiettivo consiste nell'analizzare come viene influenzato l'andamento del calore latente di fusione utilizzando queste strutture innovative al variare dei PCM utilizzati, flussi termici applicati e geometrie utilizzate nelle celle elementari dei moduli realizzati mediante AM. L'analisi mira perciò nella caratterizzazione della struttura "porosa" piuttosto che nella validazione di un reale prototipo funzionante. Le considerazioni finali hanno portato ad affermare che aumentando il flusso termico il tempo necessario per il processo di fusione chiaramente diminuisce (a parità di PCM utilizzato) e la temperatura finale raggiunta dal lato riscaldato aumenta. Per quanto riguarda la paraffina, tanto più alta è la temperatura a cui essa inizia il processo di fusione e tanto maggiore sarà la temperatura finale del lato riscaldato a parità di tempo di riscaldamento. Di conseguenza, iniziando prima il processo di fusione per la paraffina RT42, essa risulterà più idonea se il flusso termico venisse applicato per periodi brevi. Nel momento in cui l'energia fornita aumenta (quindi la potenza viene applicata per periodi di tempo maggiori) allora non basta considerare il parametro legato alla temperatura di fusione perché un ruolo importante viene svolto anche dal calore latente tipico del materiale che, aumentando, permette di prolungare l'assorbimento di potenza termica. Per cui per tempi maggiori risulta migliore la scelta della paraffina RT64HC. Le strutture, a parità di porosità, incontrano delle differenze: la BCC a causa di una maggiore superficie all'interfaccia (62% maggiore) presenta dei tempi di completa fusione generalmente più bassi ed un fronte di

fusione molto più regolare. Per entrambe, essendo le celle elementari di 10 mm, i moti convettivi della parte fusa esistono e risultano essere la principale causa di distorsione del fronte di fusione anche se agevolano lo scambio termico. Infatti, seppur la differenza di superficie sia molto eclatante, non sussiste una differenza così marcata nei tempi di fusione: probabilmente la cella reticolare essendo più "vuota" risulta essere molto più generosa verso la generazione di moti convettivi che compensano, anche se non del tutto, la minor superficie esposta. Infatti, per via dei maggiori tempi necessari alla fusione, la struttura reticolare presenta delle temperature finali generalmente più elevate. Entrambe le strutture però si discostano dal modello originale proposto da Diani e Campanale mostrando come i punti raccolti stiano tutti più in alto nel grafico: simbolo di temperature e tempi più elevati rispetto alle schiume metalliche in rame e in alluminio analizzate rispettivamente dal lavoro di Parpinello e Pelizzari [41].

Si può dedurre che le superfici estese svolgono il proprio ruolo egregiamente anche se risulta preferibile incrementare la superficie esposta senza interferire con la generazione di moti convettivi che recherebbero danno allo scambio termico complessivo. L'additive manufacturing si presta come una tecnologia che presumibilmente potrebbe aprire nuovi orizzonti nello scambio termico. Altre strutture con grandezze di cella e porosità diverse devono ancora essere testate lasciando perciò ulteriori possibilità di ricerca e sviluppo. In particolare, mi sento di suggerire un approccio ibrido miscelando le strutture con della paraffina nano-additivata in modo da agire contemporaneamente con due tecniche diverse.

# Ringraziamenti

Il timore di non essere all'altezza di questo percorso, nel momento in cui scelsi di intraprendere la facoltà di ingegneria, mi ha accompagnato per molto tempo. Una paura accresciuta dai numerosi pregiudizi e voci che avevo ormai preso per veri. La fortuna di aver avuto un corpo docente altamente preparato, unito ad un ambiente molto stimolante hanno contribuito a trasformare questa esperienza in un viaggio personale impensabile. Desidero perciò porgere i miei ringraziamenti verso tutti quei professori che non si sono limitati ad insegnare ma che hanno saputo allargare i miei orizzonti di pensiero, attraverso la passione e la dedizione per il proprio lavoro. In particolare, al ricercatore Andrea Diani per avermi accompagnato con molta attenzione durante il progetto di tesi ed alla professoressa Luisa Rossetto per avermi dato la possibilità di seguire questo lavoro.

L'Università di Padova ha saputo donarmi, oltre ad un enorme bagaglio accademico, anche numerose occasioni di dialogo che mi hanno permesso di conoscere e confrontarmi con tantissimi studenti pieni di entusiasmo e desiderio di vita.

Difficilmente avrei potuto raggiungere questo traguardo se non fosse stato per il supporto dei miei genitori sempre disponibili nei momenti di sconforto e fonte inesauribile di consiglio. A tutti gli amici che mi sono stati vicini in questi anni: il gruppo dei Fantastici 4 con Mattia, Elisabetta, Elena; gli inseparabili compagni di avventure Leonardo, Ianna e Viola, Alessia, Marco, Aurora, Giovanni, Carlotta; ai vicini di banco e poi grandi amici Mauro, Emanuele, Marco e Stefano; le immancabili "sorprese" padovane composte da Edoardo ed Alberto. Ultima ma non per questo meno importante ringrazio Elisa, la mia dolce metà. L'empatia che ci lega, unita alla tua dolcezza smisurata, non mi permettono di immaginare questo viaggio senza te al mio fianco.



# Bibliografia

- [1] H. Jouhara, A. Żabnieńska Góra, N. Khordehgah, D. Ahmad, and T. Lipinski. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5-6:100039, 2020.
- [2] V.A. Rohachev, O.M. Terekh, A.V. Baranyuk, Yu.E. Nikolaenko, Yu.V. Zhukova, and A.I. Rudenko. Heataerodynamic efficiency of small size heat transfer surfaces for cooling thermally loaded electronic components. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20:100726, 2020.
- [3] H.T. Cui. Experimental investigation on the heat charging process by paraffin filled with high porosity copper foam. *Applied Thermal Engineering*, 39:26 – 28, 2012.
- [4] M. K. Rathod and J. Banerjee. Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins. *Applied Thermal Engineering*, 75:1084 – 1092, 2015.
- [5] J. M. Mahdi and E. C. Nsofor. Solidification of a pcm with nanoparticles in triplex-tube thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 108:596 – 604, 2016.
- [6] R. P. Singh, S.C. Kaushik, and D. Rakshit. Solidification behavior of binary eutectic phase change material in a vertical finned thermal storage system dispersed with graphene nano-plates. *Energy Conversion and Management*, 171:825 – 838, 2018.
- [7] C. N. Elias and V. N. Stathopoulos. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia*, 161:385 – 394, 2019. Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains including Workshop on Energy Recovery Conversion and Management; ICSEF 2018, 17 – 19 October 2018, Paphos, Cyprus.
- [8] L. Yang, J. Huang, and F. Zhou. Thermophysical properties and applications of nano-enhanced pcms: An update review. *Energy Conversion and Management*, 214:112876, 2020.
- [9] D. Li, Yangyang Wu, B. Wang, C. Liu, and M. Arıcı. Optical and thermal performance of glazing units containing pcm in buildings: A review. *Construction and Building Materials*, 233:117327, 2020.



- [10] R. Raud, R. Jacob, F. Bruno, G. Will, and T. A. Steinberg. A critical review of eutectic salt property prediction for latent heat energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70:936 – 944, 2017.
- [11] J. S. Prasad, P. Muthukumar, Fenil Desai, D. N. Basu, and M. M. Rahman. A critical review of high-temperature reversible thermochemical energy storage systems. *Applied Energy*, 254:113733, 2019.
- [12] Miglioramento del trasferimento di calore in un sistema di accumulo termico a cera di paraffina.
- [13] R. Velraj, R.V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, and K. Schwarzer. Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit. *Solar Energy*, 60(5):281 – 290, 1997.
- [14] U. Stritih. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings. *Energy and Buildings*, 35(11):1097 – 1104, 2003.
- [15] A. Sciacovelli, F. Gagliardi, and V. Verda. Maximization of performance of a pcm latent heat storage system with innovative fins. *Applied Energy*, 137:707 – 715, 2015.
- [16] Lafdi, Khalid, Mesalhy, Shaikh, and Shadab. Studio sperimentale sull'influenza della porosità della schiuma e della dimensione dei pori sulla fusione dei materiali a cambiamento di fase. *Journal of Applied Physics*, 102(8):083549, 2007.
- [17] Li, WQ, Qu, ZG, He, YL, Tao, and WQ. Studi sperimentali e numerici sul trasferimento di calore a cambiamento di fase di fusione in schiume metalliche a celle aperte riempite con paraffina. *Applied Thermal Engineering*, 37:1–9, 2012.
- [18] Shabgard, Hamidreza, Faghri, Amir, L. Theodore Bergman, Andraka, and E. Charles. Numerical simulation of heat pipe-assisted latent heat thermal energy storage unit for dish-stirling systems. *Journal of solar energy engineering*, 136(2), 2014.
- [19] J.R. Turnpenny, D.W. Etheridge, and D.A. Reay. Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part i: testing and theoretical modelling. *Applied Thermal Engineering*, 20(11):1019 – 1037, 2000.
- [20] J.M. Khodadadi and S.F. Hosseinizadeh. Nanoparticle-enhanced phase change materials (nepcm) with great potential for improved thermal energy storage. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(5):534–543, 2007.
- [21] Wu, S.Y. e Wang, H, Xiao, S. e Zhu, and DS. Un'indagine sulle caratteristiche di fusione / congelamento dei materiali a cambiamento di fase potenziati da nanoparticelle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110(3):1127–1131, 2012.

- [22] Lin, C. Saw, Al-Kayiem, and H. Hussain. Evaluation of copper nanoparticles - paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, 132:267–278, 2016.
- [23] Fukai and J. Kanou, Makoto, Yoshikazu Kodama, Miyatake, and Osamu. Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers. *Energy Conversion and Management*, 41(14):1543–1556, 2000.
- [24] Elgafy and Ahmed, Lafdi, and Khalid. Effetto degli additivi in nanofibre di carbonio sul comportamento termico dei materiali a cambiamento di fase. *Carbon*, 43(15):3067–3074, 2005.
- [25] Aumento della conducibilità termica degli mwnt sul pcm con forma stabile di pani / tetradecanolo. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91.
- [26] S. S. Magendran, F.A.S Khan, N.M. Mubarak, M. Vaka, R. Walvekar, M. Khalid, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, and R.R. Karri. Synthesis of organic phase change materials (pcm) for energy storage applications: A review. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 20:100399, 2019.
- [27] Q. Li, Chuan Li, Z. Du, F. Jiang, and Y. Ding. A review of performance investigation and enhancement of shell and tube thermal energy storage device containing molten salt based phase change materials for medium and high temperature applications. *Applied Energy*, 255:113806, 2019.
- [28] P.K.S. Rathore and S.K. Shukla. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated pcm for energy savings. *Renewable Energy*, 149:1300 – 1313, 2020.
- [29] Costruire concetti e applicazioni di immagazzinamento dell’energia termica. In *12th ROOMVENT Conference*.
- [30] A. Maccarini, G. Hultmark, N. C. Bergsøe, and A. Afshari. Free cooling potential of a pcm-based heat exchanger coupled with a novel hvac system for simultaneous heating and cooling of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 42:384 – 395, 2018.
- [31] J. Jaguemont, N. Omar, P. Van den Bossche, and J. Mierlo. Phase-change materials (pcm) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 132:308 – 320, 2018.
- [32] J. Yao, P. Zhu, L. Guo, L. Duan, Z. Zhang, S. Kurko, and Z. Wu. A continuous hydrogen absorption/desorption model for metal hydride reactor coupled with pcm as heat management and its application in the fuel cell power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(52):28087–28099, 2020. The 18th Conference of China Association for Hydrogen Energy (CAHE2019), 15 - 18 November 2019, Guangzhou, China.
- [33] J. Krishna, P.S. Kishore, and A. Brusly Solomon. Heat pipe with nano enhanced-pcm for electronic cooling application. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81:84–92, 2017.

- 
- [34] C. Buchanan and L. Gardner. Metal 3d printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180:332 – 348, 2019.
- [35] S. Bi, E. Chen, and S. Gaitanaros. Additive manufacturing and characterization of brittle foams. *Mechanics of Materials*, 145:103368, 2020.
- [36] G. Parpinello. Utilizzo di superfici estese e materiali in cambiamento di fase per il raffreddamento di componenti elettronici, 2019/2020.
- [37] X. Hu and X. Gong. Pore-scale numerical simulation of the thermal performance for phase change material embedded in metal foam with cubic periodic cell structure. *Applied Thermal Engineering*, 151:231 – 239, 2019.
- [38] Krishnan, Shankar, Murthy, Jayathi, Garimella, and Suresh. Direct simulation of transport in open-cell metal foam. *Journal of Heat Transfer-Transactions of The Asme - J HEAT TRANSFER*, 128, 08 2006.
- [39] Rubitherm GmbH. Sito rubitherm gmbh :<https://www.rubitherm.eu/>. Online: accessed 13-january-2021.
- [40] A. Diani and M. Campanale. Transient melting of paraffin waxes embedded in aluminum foams: Experimental results and modeling. *International Journal of Thermal Sciences*, 144:119 – 128, 2019.
- [41] A. Pellizzari. Fusione di paraffine in schiume metalliche in alluminio, 2017/2028.

# Elenco delle figure

1.1	Classificazione dei materiali in cambiamento di fase [7]. . . . .	3
1.2	Riepilogo delle principali proprietà dei PCM [1]. . . . .	5
1.3	Tipologie di accumulo di energia termica [8]. . . . .	6
1.4	Andamento della temperatura durante l'assorbimento di calore [8].	7
1.5	distinzioni principali per le varie metodologie di accumulo termico [11]. . . . .	10
1.6	[8]. . . . .	11
1.7	Tecniche per migliorare la conduttività termica dei PCM [8]. . . . .	12
1.8	Diverse configurazioni di alette immerse in PCM [5]. . . . .	13
1.9	Vista dettagliata all'interno di una schiuma metallica [5]. . . . .	14
1.10	Vista dettagliata all'interno di una schiuma metallica [5]. . . . .	16
1.11	CNT di tipo a parete singola (A) e multipla (B) [5]. . . . .	18
1.12	Morfologia di diversi tipi di microcapsule [1]. . . . .	19
1.13	a) piastra piana; (b) Shell e tubo: flusso interno; (c) fascio tubiero - flusso parallelo; d) fascio tubiero - flusso incrociato; (e) Letto imballato [27]. . . . .	20
1.14	Applicazioni legate a ciascuna tecnica di incapsulamento [1]. . . . .	21
1.15	Schema che mostra la differenza tra (a) un ufficio con raffreddamento HVAC convenzionale e (b) un ufficio integrato con TABS e PCM [1]. . . . .	22
1.16	Centrale elettrica a torre solare con dispositivo TES a cascata a base di sali fusi [1]. . . . .	23
1.17	Scambiatore di calore [30]. . . . .	24
1.18	Prototipo di sistema di batterie con TMS passivo [31]. . . . .	25
1.19	Ugello carburante GE Aviation prodotto in modo additivo [34]. . . . .	28
1.20	Esempio di componenti con spessori variabili [34]. . . . .	29
1.21	Struttura a nido d'ape con porosità variabile [34]. . . . .	30
1.22	Topologie di generazione di schiume: (a) impaccamento di sfere, (b) tassellazione di Laguerre, (c) struttura di schiuma casuale [35].	31
1.23	Topologie di generazione di schiume: (a) impaccamento di sfere, (b) tassellazione di Laguerre, (c) struttura di schiuma casuale [35].	31
2.1	Vista in pianta delle posizioni dei fori di un singolo lato [36]. . . . .	33
2.2	Celli elementari BCC di a) 5 mm e b) 10 mm. . . . .	34
2.3	Celli elementari reticolari di a) 5 mm e b) 10 mm. . . . .	35
2.4	Geometria studiata da Hu e Gong [37]. . . . .	35
2.5	Esempio di un modulo di prova a struttura reticolare, cella 5 mm e densità relativa 13%. . . . .	36

2.6	Esempio di un modulo di prova a struttura reticolare, cella 10 mm e densità relativa 13%. . . . .	36
2.7	Operazione sottrattiva per generare la geometria finale (BCC) [38].	37
2.8	Geometria BCC con lato del cubo di a) 5 mm e b) 10 mm. . . . .	37
2.9	Geometria BCC finale con lato del cubo di 5 mm. . . . .	38
2.10	Distribuzione delle entalpie della paraffina RT42 [39]. . . . .	39
2.11	Distribuzione delle entalpie della paraffina RT55 [39]. . . . .	39
2.12	Distribuzione delle entalpie della paraffina RT64HC [39]. . . . .	40
2.13	Termocoppie inserite nei 12 fori della struttura reticolare, cella 10 mm e porosità 87%. . . . .	40
2.14	Modulo completo di vetro e termocoppie. . . . .	41
2.15	Contenitore di teflon [36]. . . . .	42
2.16	Piastra in rame su cui viene scavato l'alloggiamento per il cavo [36].	42
2.17	Modulo finale con struttura BCC e cella di 10 mm e porosità 87%. . . . .	43
2.18	Visualizzazione temperatura lato adiabatico e PCM. . . . .	44
2.19	Visualizzazione temperatura lato riscaldato, aria e valori di tensione/corrente. . . . .	45
2.20	Polinomio interpolante i dati sperimentali delle termocoppie in rame-costantina. . . . .	46
3.1	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	49
3.2	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	50
3.3	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	50
3.4	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	51
3.5	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	51
3.6	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	52
3.7	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	52
3.8	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	53
3.9	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	53
3.10	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	54
3.11	Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	54
3.12	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	55
3.13	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	55
3.14	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	56

3.15	Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	56
3.16	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	57
3.17	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	57
3.18	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	58
3.19	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	58
3.20	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	59
3.21	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	59
3.22	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	60
3.23	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 100 W. . . . .	60
3.24	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	61
3.25	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	61
3.26	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 150 W. . . . .	62
3.27	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	62
3.28	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	63
3.29	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura BCC e potenza termica 200 W. . . . .	63
3.30	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	64
3.31	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	64
3.32	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	65
3.33	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	65
3.34	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	66
3.35	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	66
3.36	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	67
3.37	Vista del fronte di fusione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	67
3.38	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT42, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	68

3.39	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT42 con struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	68
3.40	Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	69
3.41	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	69
3.42	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	70
3.43	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	70
3.44	Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	71
3.45	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	71
3.46	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	72
3.47	Vista del fronte di fusione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	72
3.48	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT55, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	73
3.49	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT55 con struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	73
3.50	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	74
3.51	Temperatura lato riscaldato con paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	74
3.52	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	75
3.53	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	75
3.54	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	76
3.55	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	76
3.56	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	77
3.57	Vista del fronte di fusione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	77
3.58	Temperatura in fase di solidificazione paraffina RT64HC, struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	78
3.59	Andamenti temperatura lato riscaldato e paraffina RT64HC con struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	78
3.60	Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 100 W. . . . .	79
3.61	Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 150 W. . . . .	80
3.62	Andamenti temperatura lato riscaldato con struttura reticolare e potenza termica 200 W. . . . .	80

3.63	Tabella riassuntiva delle prove sperimentali effettuate. . . . .	81
3.64	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT42. . . . .	83
3.65	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT55. . . . .	84
3.66	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura BCC e paraffina RT64HC. . . . .	84
3.67	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT42. . . . .	85
3.68	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT55. . . . .	85
3.69	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della potenza termica, con struttura Reticolare e paraffina RT64HC. . . . .	86
3.70	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 100 W. . . . .	86
3.71	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 150 W. . . . .	87
3.72	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura BCC e flusso di 200 W. . . . .	87
3.73	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 100 W. . . . .	88
3.74	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 150 W. . . . .	88
3.75	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente al variare della paraffina, con struttura Reticolare e flusso di 200 W. . . . .	89
3.76	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina R42 flusso di termico di 100 W. . . . .	90
3.77	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina R42 flusso di termico di 150 W. . . . .	90
3.78	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina R42 flusso di termico di 200 W. . . . .	91
3.79	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 100 W. . . . .	91
3.80	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 150 W. . . . .	92



3.81	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 200 W. . . . .	92
3.82	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT64HC flusso di termico di 100 W. . . . .	93
3.83	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT64HC flusso di termico di 150 W. . . . .	93
3.84	Andamento di $T_{risc} - T_{adb}$ con paraffina RT64HC flusso di termico di 200 W. . . . .	94
3.85	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT42 flusso di termico di 100 W. . . . .	94
3.86	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT42 flusso di termico di 150 W. . . . .	95
3.87	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT42 flusso di termico di 200 W. . . . .	95
3.88	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 100 W. . . . .	96
3.89	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 150 W. . . . .	96
3.90	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT55 flusso di termico di 200 W. . . . .	97
3.91	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT64 flusso di termico di 100 W. . . . .	97
3.92	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT64 flusso di termico di 150 W. . . . .	98
3.93	Andamento di $T_{risc} - T_{amb}$ con paraffina RT64 flusso di termico di 200 W. . . . .	98
3.94	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 100 W. . .	99
3.95	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 150 W. . .	100
3.96	Differenza fra la temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente della struttura reticolare con flusso termico di 200 W. . .	100
3.97	Temperatura adimensionale in funzione del prodotto $Fo*Ste$ relativi alle strutture BCC e Reticolare con $\epsilon=87\%$ . . . . .	105
3.98	Temperatura adimensionale in funzione del prodotto $Fo*Ste$ relativi alle strutture BCC e Reticolare con $\epsilon=87\%$ . . . . .	106
3.99	Temperatura adimensionale in funzione del prodotto $Fo*Ste$ relativi alle strutture BCC e Reticolare con $\epsilon=87\%$ . . . . .	106