



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**Utilizzo di superfici estese e materiali in cambiamento di fase per il
raffreddamento di componenti elettronici**

Relatore: Prof.ssa Luisa Rossetto

Correlatore: Ing. Andrea Diani

Laureando: Giulio Parpinello 1179128

Anno Accademico 2019/2020

Sommario

Il cambiamento climatico è uno dei temi più discussi degli ultimi anni. Per garantire un futuro migliore per le nuove generazioni è fondamentale ridurre le emissioni di gas ad effetto serra e preservare l'ambiente che ci circonda. Per questo motivo negli ultimi anni sta avvenendo una transizione globale verso la produzione di energia pulita congiuntamente ad un uso più efficiente della stessa. Uno dei maggiori problemi delle fonti rinnovabili è la loro discontinuità e imprevedibilità. È quindi di fondamentale importanza avere dei sistemi che permettano di accumulare l'energia termica ed elettrica, in modo da poter sopperire la richiesta quando le fonti funzionano in modo intermittente. Tra i sistemi di accumulo termico spiccano i materiali a cambiamento di fase (in inglese *phase change material*, PCM), che sono quelle sostanze che consentono di accumulare energia tramite il processo di cambiamento di fase da solido a liquido. Il vantaggio di questi materiali è che permettono di stoccare grandi quantità di energia termica grazie al loro elevato calore latente. Tra tutti i PCM esistenti si è deciso di utilizzare la paraffina, in quanto è un materiale economico e che non presenta rischi per la salute umana. Inoltre, durante il cambiamento di fase, la variazione di volume è contenuta, permettendo di utilizzare sistemi compatti ed economici. In particolare, in questa tesi, ci si è concentrati su una possibile applicazione di tali materiali: il raffreddamento dell'elettronica. Uno dei problemi di questi PCM è che presentano basse conduttività termiche (solitamente intorno a $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Per questo motivo sono state poste all'interno della paraffina delle schiume in rame, in modo da aumentare la conduttività termica del sistema.

Nel *Capitolo 1* vengono presentati i PCM, analizzandone tipologie, caratteristiche e applicazioni. Inoltre, vengono discussi i metodi finora utilizzati per aumentare la conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase.

Nel *Capitolo 2* viene riportato l'apparato sperimentale utilizzato in questa tesi.

Nel *Capitolo 3* vengono analizzati i risultati sperimentali ottenuti. Successivamente viene fatto un confronto fra i moduli di prova, le potenze termiche e le paraffine.

Nel *Capitolo 4* vengono tratte le considerazioni sull'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase. Vengono inoltre presentati dei possibili sviluppi futuri.

Indice

Sommario	i
Introduzione.....	v
Capitolo 1 – I materiali a cambiamento di fase.....	1
1.1 PCM e stoccaggio dell'energia termica	1
1.2 Classificazione dei PCM	3
1.2.1 PCM organici	4
1.2.2 PCM inorganici	5
1.2.3 PCM eutettici.....	6
1.3 Applicazioni dei PCM.....	7
1.3.1 PCM nei sistemi ad energia solare	7
1.3.2 Utilizzo dei PCM negli edifici.....	8
1.3.3 Utilizzo dei PCM per il raffreddamento.....	9
1.3.4 Utilizzo di PCM nel settore tessile.....	9
1.3.5 Sistemi di recupero del calore	10
1.4 Incremento della conducibilità termica	10
1.4.1 Incremento della conducibilità termica con l'utilizzo di un mezzo solido.....	11
1.4.1.1 Superfici alettate.....	11
1.4.1.2 Schiume metalliche	12
1.4.1.3 Utilizzo di carbonio.....	16
1.4.2 Incremento della conducibilità termica con nanoparticelle e incapsulamento	18
1.4.2.1 Utilizzo di nanomateriali	18
1.4.2.2 Incapsulamento del PCM	19
Capitolo 2 – Impianto sperimentale e strumentazione.....	21
2.1 Schiume metalliche	21
2.2 Superfici estese.....	25
2.2.1 Struttura Body-Centered-Cubic (BCC).....	26
2.2.2 Strutture reticolari	29
2.3 Paraffine utilizzate.....	32
2.4 Strumentazione.....	33
2.5 Taratura termocoppie	34
2.6 Modulo di prova.....	36
2.7 Contenitore in teflon.....	37

2.8 Riscaldatore elettrico e potenze termiche	39
2.9 Sistema di acquisizione	40
Capitolo 3 – Prove sperimentali	43
3.1 Descrizione prove sperimentali ed elaborazione dati	43
3.2 Risultati delle prove sperimentali	45
3.2.1 Risultati delle prove sperimentali con schiume in rame	46
3.3 Confronto fra i risultati ottenuti	87
3.3.1 Confronto fra i moduli con diversa densità, a parità di paraffina e potenza termica	88
3.3.2 Confronto fra le paraffine	101
3.3.3 Confronto fra le potenze termiche	105
3.3.4 Confronto fra i moduli in rame e i moduli in alluminio	110
3.3.5 Confronto fra i dati acquisiti e le correlazioni presenti in letteratura	129
Capitolo 4 – Conclusioni	135
Bibliografia.....	137

Introduzione

Il fabbisogno di energia mondiale continua a crescere e si prevede che aumenterà ancora del 30% fino al 2040 [1]. I combustibili fossili sostengono la domanda di energia e in particolare il carbone svolge un ruolo fondamentale nella crescita economica dei paesi sviluppati. Tuttavia, queste risorse non sono infinite e hanno un forte impatto ambientale. Per questo motivo diventa sempre più importante studiare nuove tecnologie che possano favorire la crescita economica, senza danneggiare l'ambiente. In questi anni si sta verificando una transizione energetica globale incentrata sulla produzione di energia più pulita e su uso più efficiente di essa, anche se questo processo sta avvenendo più lentamente di quanto sarebbe necessario per raggiungere gli obiettivi sul contenimento delle emissioni. Tuttavia, a causa del loro funzionamento intermittente, le fonti rinnovabili non possono attualmente soddisfare l'intera domanda di energia e rimpiazzare completamente i combustibili fossili. Per questo motivo diventano sempre più importanti i sistemi di stoccaggio dell'energia. In particolare, negli ultimi anni sono stati condotti molti studi riguardanti i sistemi di accumulo termico, in quanto permettono un uso efficiente sia delle fonti tradizionali sia di alcune tecnologie rinnovabili. Tra questi spiccano i materiali a cambiamento di fase (in inglese *phase change material* o PCM) che consentono di immagazzinare grandi quantità di calore con una variazione contenuta di volume. Questi materiali sono solidi a temperatura ambiente e possono accumulare energia termica nel cambiamento di fase dallo stato solido a quello liquido. Inoltre, i PCM possono essere utilizzati in diverse applicazioni: accumulo dell'energia nei sistemi di generazione, isolante termico negli edifici e per la dissipazione del calore. In particolare, in questa tesi, ci si è focalizzati sul raffreddamento dell'elettronica, infatti utilizzando questi materiali è possibile contenere l'aumento di temperatura dei dispositivi elettronici. Durante il cambiamento di fase vengono assorbite grandi quantità di energia termica, sfruttando l'elevato calore latente di questi materiali. Questi sistemi sono detti passivi e consentono quindi di raffreddare il dispositivo anche quando le tecnologie tradizionali non funzionano a causa di un guasto o durante la manutenzione. Questo metodo consente di risparmiare energia, infatti non è richiesto alcun *input* di potenza. In questo caso la temperatura di fusione del materiale deve essere scelta in base all'applicazione considerata. Per questo motivo si è deciso di utilizzare la paraffina, infatti ne esistono diversi tipi con differenti temperature di fusione. Inoltre, questi PCM non sono tossici e sono infiammabili solo ad alte temperature e sono quindi sicuri per la salute dell'uomo. Tuttavia, la paraffina presenta una bassa conducibilità termica, rendendo difficile il trasferimento di calore. Considerando questi limiti, sono state utilizzate delle schiume

metalliche che vengono poste all'interno del PCM per aumentarne la conducibilità termica. I moduli così ottenuti sono stati testati con differenti flussi termici e con paraffine aventi diverse temperature di fusione in modo da trovare le soluzioni che si adattassero meglio ai casi studiati.

Capitolo 1 – I materiali a cambiamento di fase

1.1 PCM e stoccaggio dell'energia termica

Lo stoccaggio dell'energia termica può avvenire in tre modi: tramite accumulo di calore sensibile, di calore latente o termochimico [2].

Nel caso di accumulo di calore sensibile si ha che l'energia termica viene immagazzinata aumentando la temperatura di un solido o di un liquido. Questo sistema utilizza la capacità termica e la variazione di temperatura del materiale durante il processo di carica e scarica. La quantità di calore accumulato dipende dal calore specifico c_p del mezzo, dalla variazione di temperatura tra quella iniziale T_i e finale T_f e dalla massa m del materiale, secondo la relazione:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) \quad (1.1)$$

L'acqua risulta essere il miglior liquido per l'accumulo di calore sensibile perché non è costosa e ha un elevato calore specifico. Tuttavia, al di sopra dei 100° C devono essere usati gli oli, i sali fusi o i metalli liquidi. Attualmente questo tipo di stoccaggio è utilizzato in applicazioni industriali e domestiche o per l'accumulo di acqua calda nelle reti di teleriscaldamento [1]. Inoltre, anche i materiali usati per la costruzione degli edifici che presentano un'elevata capacità termica possono fungere da sistemi di accumulo di energia termica durante i mesi dell'anno. Lo svantaggio di questo sistema è che presenta una bassa densità di energia rispetto ad altri metodi.

L'accumulo di calore latente si basa sull'assorbimento o rilascio di calore durante il cambiamento di fase di un materiale [2]. La capacità di accumulo di questo tipo di sistemi è data dalla seguente relazione:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT \quad (1.2)$$

dove m , c_p , T_i e T_f sono gli stessi parametri visti prima, a_m è la frazione di materiale che fonde o solidifica, Δh_m è il calore latente di fusione per unità di massa e T_m è la temperatura di fusione.

Il cambiamento di fase può essere da solido a liquido (fusione e solidificazione), liquido-gas (evaporazione e condensazione) o solido-solido [1]. L'energia immagazzinata è associata ai legami chimici che si riorganizzano nella struttura del materiale. Pertanto, l'utilizzo del calore latente permette un'alta densità di accumulo di energia e, di conseguenza, è molto più efficiente di quello sensibile.

I sistemi termochimici si basano invece sull'assorbimento e rilascio dell'energia rompendo e ricreando i legami chimici in una reazione reversibile [2]. In questo caso il calore accumulato dipende dalla massa m del sistema, dal calore endotermico di reazione Δh_r e dalla frazione di materiale che reagisce a_r :

$$Q = m \cdot a_r \cdot \Delta h_r \quad (1.3)$$

Questo metodo ha la più alta densità energetica ma esistono dei problemi di stabilità [1]. Infatti, l'efficienza non è costante e i materiali si degradano nel corso del tempo. Questo sistema è attualmente poco utilizzato perché non è stato ancora studiato in modo approfondito.

Tra tutti i tipi di stoccaggio termico, l'accumulo di calore latente è particolarmente interessante per l'alta densità di energia accumulata e perché durante il cambiamento di fase la temperatura è costante [2]. I materiali a cambiamento di fase (*phase change material*, PCM) sono quelle sostanze che vengono utilizzate per accumulare il calore latente [1]. I PCM scambiano energia termica come calore latente in uno stretto intervallo di temperature durante il cambiamento di fase. Al di fuori di questo intervallo di temperatura viene invece scambiato calore sensibile. Come già detto, il cambiamento di fase può essere solido-solido, solido-liquido, solido-gas, liquido-gas e viceversa [2]. Nella transizione solido-solido il calore viene accumulato variando la struttura cristallina del materiale stesso. Queste transizioni presentano piccole variazioni di volume ma anche basso calore latente. I cambiamenti solido-gas e liquido-gas, sebbene abbiano un elevato calore latente, presentano grandi variazioni di volume e quindi vi sono problemi legati al contenimento della sostanza. Infine, nella transizione solido-liquido si ha che il calore latente è minore rispetto al caso liquido-gas ma la variazione di volume è molto contenuta (di solito intorno al 10% o inferiore). Per questo motivo questo sistema è quello ritenuto più interessante per lo stoccaggio di energia termica.

1.2 Classificazione dei PCM

I materiali a cambiamento di fase possono essere classificati in diversi modi [1]. Un primo metodo consiste nel raggrupparli in base alla loro natura chimica. Allora possono essere divisi in:

- Organici
- Inorganici
- Eutettici

I PCM organici sono le paraffine e le non paraffine come esteri, acidi grassi, alcoli, glicoli o polimeri. I PCM inorganici sono i sali idrati o i metalli. Infine, gli eutettici sono delle miscele di PCM organici e non organici. Nei *Paragrafi 1.2.1, 1.2.2 e 1.2.3* viene fatta una trattazione più dettagliata di queste categorie.

In secondo luogo, i PCM possono essere classificati in base alla transizione di fase che può essere:

- Solido-liquido
- Solido-solido
- Solido-gas
- Liquido-gas

Infine, i materiali in cambiamento di fase possono essere raggruppati in base della temperatura di fusione. A seconda dell'applicazione esistono quattro possibili intervalli di temperatura:

- Basse temperature: da -20°C a $+5^{\circ}\text{C}$. In questo caso i PCM vengono usati per la refrigerazione domestica.
- Medio basse temperature: da $+5^{\circ}\text{C}$ a $+40^{\circ}\text{C}$. Questi materiali vengono utilizzati negli edifici.
- Medie temperature: da $+40^{\circ}\text{C}$ a $+80^{\circ}\text{C}$, per sistemi di riscaldamento solari e sistemi di raffreddamento dell'elettronica.
- Elevate temperature: da $+80^{\circ}\text{C}$ a $+200^{\circ}\text{C}$. Questi PCM sono usati nei sistemi frigoriferi ad assorbimento, nella generazione di elettricità e per il recupero del calore.

1.2.1 PCM organici

I PCM organici si dividono in paraffine e non paraffine. Sono composti da catene di atomi di carbonio e idrogeno [3]. Normalmente questi materiali sono stabili e non si degradano nel tempo. Le paraffine sono formate da catene di molecole dette alcani che si presentano nella forma C_nH_{2n+2} [2]. Le paraffine pure contengono normalmente dai 14 a 40 atomi di carbonio, mentre le cere paraffine sono composte da 8 fino a 15 atomi di carbonio [3]. Più è lunga la catena di atomi di carbonio, maggiore è la temperatura di fusione. Questi materiali sono sicuri, affidabili, non corrosivi, economici, chimicamente inerti, stabili al di sotto dei $500^\circ C$ e presentano piccole variazioni di volume durante il cambiamento di fase. Tuttavia, hanno degli svantaggi, infatti presentano una bassa conducibilità termica e in alcuni casi sono infiammabili. Le non paraffine sono i materiali a cambiamento di fase più numerosi e presentano un ampio range di proprietà [2]. Le sostanze più interessanti e studiate sono: alcoli, esteri, glicoli e acidi grassi. Questi materiali sono infiammabili e quindi non dovrebbero essere esposti ad alte temperature, a fiamme o ad agenti ossidanti. Inoltre, sono leggermente tossici. Per quanto riguarda le proprietà termochimiche, si ha che questi materiali presentano un elevato calore latente e una bassa conducibilità termica. Tra le non paraffine gli acidi grassi sembrano essere i più promettenti perché hanno un calore latente di fusione molto simile a quello delle paraffine. Inoltre queste sostanze possono essere fuse e solidificate più volte senza avere sottoraffreddamento nel liquido. Per sottoraffreddamento si intende la solidificazione del materiale ad una temperatura inferiore a quella di cambiamento di fase [3]. Questo può essere un problema perché il PCM durante la fase di raffreddamento non rilascia l'energia precedentemente assorbita e di conseguenza è necessario che la temperatura esterna decresca significativamente affinché possa avvenire il ciclo operativo. Il loro più grande svantaggio è il costo che è circa doppio rispetto a quello delle paraffine. Inoltre, possono essere leggermente corrosivi [2]. Tuttavia, questi materiali risultano molto interessanti per lo stoccaggio dell'energia termica a bassa temperatura.

Riassumendo, i principali vantaggi dei PCM organici sono [3]:

- Disponibilità in un grande range di temperatura
- Elevato calore latente di fusione
- Bassa capacità di sottoraffreddamento del liquido
- Stabilità termica e chimica
- Bassa reattività
- Compatibilità con i materiali da costruzione (non sono corrosivi)

- Possibilità di essere riciclati.

Gli svantaggi di questi materiali sono la bassa entalpia e conducibilità termica e, in alcuni casi, la loro infiammabilità.

1.2.2 PCM inorganici

I materiali a cambiamento di fase inorganici vengono classificati come sali idrati e sali metallici [3]. In particolare, i primi sono stati molto studiati come sistemi di accumulo termico. Le proprietà più interessanti sono: elevato calore latente di fusione, elevata conducibilità termica (quasi doppia rispetto a quella delle paraffine) e bassa variazione di volume durante il cambiamento di fase. Inoltre, i sali idrati non sono corrosivi (e quindi compatibili con le plastiche) ed economici. Gli svantaggi sono la possibile formazione di depositi e il basso tasso di nucleazione. I sali metallici invece non sono stati molto utilizzati per lo stoccaggio dell'energia termica a causa del loro peso. Tuttavia, presentano delle interessanti potenzialità: bassa variazione di volume durante il cambiamento di fase, elevato calore latente di fusione e alta conducibilità termica. Riassumendo i vantaggi di questa categoria sono:

- Elevata entalpia
- Basso costo
- Grande disponibilità
- Elevata conducibilità termica
- Infiammabilità nulla
- Ridotta variazione di volume
- Compatibilità con contenitori in plastica
- Basso impatto ambientale.

Gli svantaggi sono invece:

- Possibilità di sottoraffreddamento del liquido
- Basse proprietà di nucleazione
- Bassa stabilità termica
- Problemi di separazione dei materiali durante il cambiamento di fase
- Elevata decomposizione
- Incompatibilità con alcuni materiali da costruzione (sono corrosivi per i metalli)

- Leggera tossicità.

Confrontando i PCM inorganici con quelli organici si può concludere che questi materiali hanno una più elevata conducibilità termica e non sono infamabili. Tuttavia, la loro tossicità e incompatibilità con alcuni materiali li rendono impossibili da utilizzare in alcune applicazioni.

1.2.3 PCM eutettici

I PCM eutettici sono formati dalla combinazione di due o più composti organici, inorganici o entrambi [3]. In questo modo è possibile ottenere la giusta temperatura di fusione per l'applicazione considerata, cosa che sarebbe impossibile con un PCM puro. I principali svantaggi sono: costo elevato (circa due o tre volte più alto di quello delle precedenti categorie) e limitate proprietà termodinamiche. I principali vantaggi sono l'elevata entalpia e, come già detto, la possibilità di avere la temperatura di fusione necessaria per l'applicazione scelta.

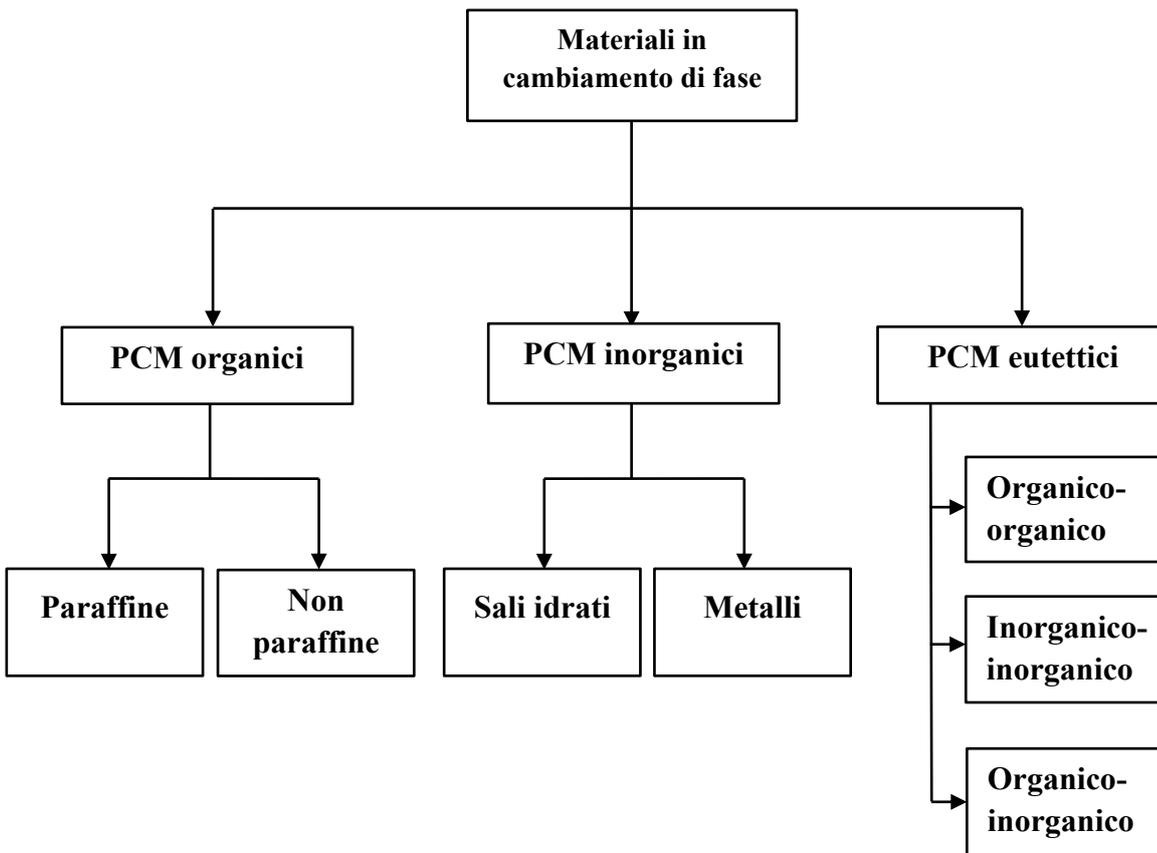


Figura 1.1: classificazione dei PCM in base alla loro natura chimica.

1.3 Applicazioni dei PCM

Per raggiungere gli obiettivi sul clima e preservare l'ambiente sono state sviluppate fonti energetiche rinnovabili che sfruttano l'energia del sole e del vento [4]. Tuttavia, queste fonti funzionano in maniera intermittente e fluttuante nel tempo. I PCM possono colmare questo divario tra domanda e offerta e in questo modo sopperire alla mancata produzione di energia. Inoltre, questi materiali mantengono una temperatura costante durante il processo di cambiamento di fase e quindi possono essere usati in altri campi, ad esempio negli edifici, nel settore tessile e nel recupero di calore dei processi manifatturieri.

1.3.1 PCM nei sistemi ad energia solare

La radiazione solare è ampiamente diffusa su tutto il pianeta, tuttavia è possibile sfruttarla solo durante il giorno e nelle giornate limpide [4]. Da questo punto di vista i PCM sono molto utili, in quanto permettono di stoccare l'energia solare sotto forma di energia termica, rilasciandola in un secondo momento. Esistono due tipi di applicazione: sistemi per riscaldare l'acqua e sistemi termici per la generazione di energia elettrica.

I sistemi per il riscaldamento dell'acqua domestica consentono un risparmio energetico, riducendo in questo modo le emissioni. Tuttavia, questi impianti sono poco utilizzati perché sono inefficienti nelle giornate fredde e nuvolose e disperdono grandi quantità di calore durante la notte. I PCM possono in parte risolvere questi problemi. Narayanan et al. [5] hanno accoppiato un sistema di riscaldamento con un PCM eutettico a cui sono state aggiunte delle nano particelle di grafite per aumentarne la conducibilità termica. Si è visto che questi materiali permettono di migliorare la capacità di raccolta dell'energia solare, rendendo più efficiente la conversione della luce in calore. Si ha inoltre un aumento della conducibilità termica e un più rapido accumulo e trasferimento dell'energia, migliorando l'efficienza complessiva del sistema. Altri studi sono stati compiuti da Su et al. [6] utilizzando come PCM la paraffina, incapsulata all'interno di una resina. I risultati hanno dimostrato che questo sistema permette di aumentare la capacità di stoccaggio del calore, riducendo le dimensioni complessive dell'accumulo rispetto ai sistemi tradizionali. Khalifa et al. [7] hanno studiato dei collettori ad energia solare costituiti da sei tubi in rame di diametro 80 mm al cui interno è stata posta la paraffina. Quando la radiazione solare è assente, il PCM liquido si raffredda, trasferendo calore all'acqua che in questo modo può mantenere per un certo intervallo di tempo una temperatura costante.

Come già detto, i materiali a cambiamento di fase possono essere utilizzati anche per la generazione di energia elettrica [4]. In particolare, nelle torri solari gli specchi parabolici permettono di concentrare la radiazione in un solo punto, riscaldando un fluido termovettore che trasporterà il calore alla centrale dove viene generata l'energia elettrica. In *Figura 1.2* è rappresentato un tipico schema di questi impianti. Grazie alla loro capacità di accumulo del calore latente, i PCM possono esser utilizzati come fluido termovettore. Si è visto che l'utilizzo di questi materiali permette di aumentare l'efficienza exergetica complessiva del sistema, infatti questi PCM presentano un'elevata temperatura di fusione.

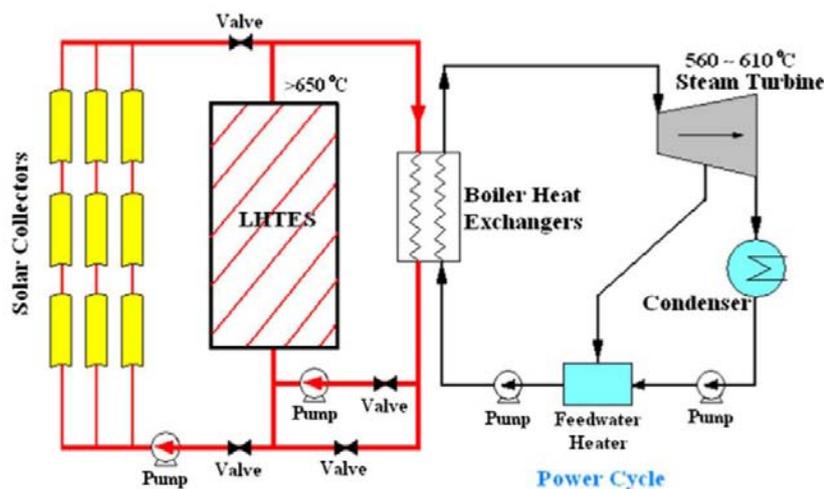


Figura 1.2: diagramma dei flussi di energia in un sistema solare a concentrazione [8].

1.3.2 Utilizzo dei PCM negli edifici

Con il continuo miglioramento degli standard di vita, la richiesta di *comfort* termico all'interno degli edifici è in aumento e si ha quindi un incremento dei consumi energetici [4]. L'utilizzo dei PCM consente non solo di diminuire il consumo energetico, ma anche di migliorare il *comfort* interno. Al fine di migliorare le prestazioni dell'edificio, i materiali a cambiamento di fase possono essere integrati all'interno delle pareti e del pavimento. Sharifi et al. [9] hanno studiato come aumentare le prestazioni termiche dell'edificio utilizzando lastre di gesso unite a PCM. Si è visto che l'efficienza del sistema è direttamente collegata alla temperatura esterna: grandi fluttuazioni di temperatura comportano bassi rendimenti. Tuttavia, in generale, questo sistema permette di avere un grande risparmio energetico e può essere utilizzato in edifici vecchi e nuovi. Altri studi compiuti da Ye et al. [10] hanno dimostrato che l'utilizzo di materiali

a cambiamento di fase permette di diminuire la fluttuazione di temperatura all'interno dell'edificio e si ha quindi una minor variazione di temperatura rispetto al caso senza PCM. Inoltre, le prestazioni termiche dipendono dalla posizione del PCM all'interno del pannello e dallo spessore dello strato di quest'ultimo.

1.3.3 Utilizzo dei PCM per il raffreddamento

I sistemi di raffreddamento possono essere usati in molti campi come, ad esempio, la dissipazione del calore dell'elettronica e la conservazione del cibo [4]. Krishna et al. [11] hanno utilizzato dei tubi di calore con all'interno materiali a cambiamento di fase per il raffreddamento dell'elettronica. I risultati sperimentali hanno dimostrato che, rispetto ai sistemi convenzionali, l'utilizzo di PCM permette di ridurre la temperatura dell'evaporatore tra i 10 e i 15 °C. In questo modo il consumo di energia necessaria per raffreddare il condensatore diminuisce del 53%. Altri esempi di sistemi per il raffreddamento dell'elettronica sono presentati nel *Paragrafo 1.4* dove si analizzerà più nello specifico come aumentare la conducibilità termica dei PCM.

Per quanto riguarda la conservazione dei cibi Yusufoglu et al. [12] hanno utilizzato dei PCM all'interno dei frigoriferi domestici in modo da migliorarne le prestazioni. Nelle prove sono stati usati due tipi di frigoriferi e sono stati testati quattro differenti tipologie di materiali a cambiamento di fase. I risultati hanno dimostrato che utilizzando appena 0,95 kg di materiale è possibile risparmiare fino al 9,4% di energia e inoltre l'effetto del PCM può essere migliorato aumentando l'area del condensatore.

1.3.4 Utilizzo di PCM nel settore tessile

La funzione dei vestiti è di fornire una temperatura ambiente costante per il corpo umano [4]. Utilizzando i PCM all'interno dei tessuti si può migliorarne le capacità isolanti, infatti questi materiali mantengono una temperatura costante durante il cambiamento di fase. Attualmente i materiali a cambiamento di fase vengono microincapsulati all'interno di fibre, tessuti o schiume. Per queste applicazioni la temperatura di fusione deve essere compresa tra i 18° C e i 35° C. Shaid et al. [13] hanno realizzato delle microparticelle di eicosano e aerogel per rivestire i tessuti e regolare la temperatura corporea. I risultati hanno dimostrato che con questo sistema è possibile ottenere un ottimo *comfort* termico. Inoltre, nei casi in cui la temperatura ambiente era più alta di quella di fusione dell'eicosano, non vi sono state perdite, dimostrando

l'eccezionale stabilità termica di questo materiale che può quindi essere usato anche ad alte temperature. Per migliorare il *comfort* termico del corpo umano durante la stagione calda, Itani et al. [14] hanno analizzato diversi tipi di giubbotti raffreddati utilizzando PCM. L'obiettivo principale era di trovare la posizione migliore in cui inserire il PCM e il numero ottimale di pacchetti di questo materiale da usare, in modo da ottenere un perfetto raffrescamento e massimizzare il *comfort* termico. Si è visto che il numero di moduli dipende dalla temperatura esterna. È allora necessario utilizzare 8, 10 e 20 pacchetti quando la temperatura esterna è rispettivamente 28° C, 35° C e 45° C.

1.3.5 Sistemi di recupero del calore

Il recupero di calore è di grande importanza per il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni, tuttavia vi è un divario temporale e spaziale tra il punto in cui il calore viene prodotto e quello in cui deve essere rilasciato [4]. Questo problema può essere risolto utilizzando sistemi di recupero integrati con PCM, infatti questi materiali presentano un'eccezionale capacità di accumulo del calore latente. Xia et al. [15] hanno progettato un sistema per recuperare calore dal condensatore di un ciclo frigorifero in modo da utilizzarlo per riscaldare acqua ad uso domestico e industriale. I risultati hanno dimostrato che un PCM composto da cera di carnauba e grafite espansa ha un enorme potenziale per lo stoccaggio dell'energia termica. Inoltre, Bertrand et al. [16] hanno sottolineato che il consumo di energia per il riscaldamento dell'acqua rappresenta il 16% del totale per riscaldamento domestico. Per ridurre il consumo di energia è quindi di fondamentale importanza l'utilizzo di sistemi di recupero del calore all'interno degli edifici. Utilizzando la *pinch analysis* è stato creato un metodo per determinare il consumo di energia e il risparmio energetico che si può ottenere utilizzando un recupero di calore dalle acque reflue dell'edificio.

1.4 Incremento della conducibilità termica

Come già detto, uno dei problemi dei materiali a cambiamento di fase è che presentano bassa conducibilità termica e questo può portare al raggiungimento di temperature troppo elevate nel caso in cui si voglia raffreddare un componente elettronico [17]. Per questo motivo si stanno studiando diversi metodi che permettano di aumentare la conducibilità termica dei PCM. Le possibili soluzioni possono essere divise in due categorie. Il primo modo per aumentare le

prestazioni di questi materiali consiste nell'inserire un mezzo solido ad elevata conducibilità all'interno del *PCM*, mentre il secondo metodo si basa sull'utilizzare nanoparticelle o sfere microincapsulate che vengono disperse all'interno del *PCM*.

1.4.1 Incremento della conducibilità termica con l'utilizzo di un mezzo solido

Il primo metodo per aumentare la conducibilità termica è quello di utilizzare un solido che viene posto all'interno del *PCM* in modo da aumentare il trasporto di calore dentro il sistema così formato. Per fare ciò si possono usare delle superfici alettate oppure delle schiume metalliche. Recentemente si stanno studiando materiali a base di carbonio che presentano un'elevata conducibilità termica e porosità. L'uso di schiume in grafite e in grafene ha permesso di ottenere risultati significativi.

1.4.1.1 Superfici alettate

In letteratura sono presenti molti articoli riguardanti l'utilizzo di superfici alettate. Queste ultime consentono di aumentare la superficie di scambio del materiale a cambiamento di fase. Kandasamy et al. [18] hanno testato tre differenti dissipatori di calore per l'elettronica con e senza *PCM*: due composti da alette piatte e di diverse dimensioni e uno di forma ellittica con diverse file di alette (*Figura 1.3*). Come materiale in cambiamento di fase è stata utilizzata una paraffina che presenta una temperatura di fusione di 55° C. I risultati hanno dimostrato che l'inserimento del *PCM* migliora le proprietà di raffreddamento del sistema. Inoltre, gli stessi autori hanno fornito un modello numerico 3D che è in accordo con i risultati sperimentali ottenuti. Fok et al. [19] hanno studiato il raffreddamento di un dispositivo elettronico usando come *PCM* n-eicosano posto all'interno di una sorgente termica con e senza alette. È stato studiato l'effetto del *PCM*, del numero di alette, dell'orientazione del dispositivo e del livello di potenza. È emerso che le alette aiutano a diminuire la temperatura del dispositivo e inoltre aumentando il numero di queste si riesce ad ottenere una migliore dissipazione del calore. Invece l'orientazione delle alette ha un effetto limitato sulle prestazioni del *PCM*.

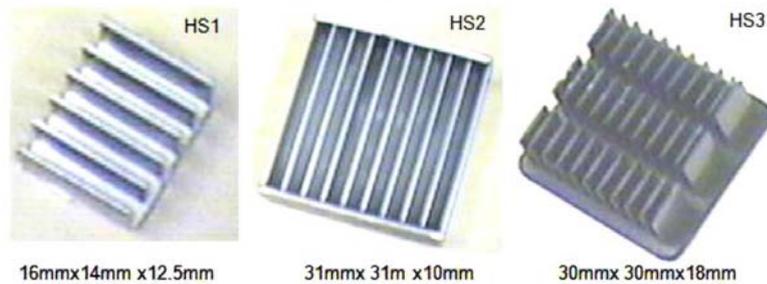


Figura 1.3: tipologie di dissipatori di calore utilizzati da Kandasamy et al. [18]: HS1 (6 alette piatte), HS2 (10 alette piatte) and HS3 (3 file da 11 alette).

1.4.1.2 Schiume metalliche

L'uso di schiume metalliche permette di aumentare la conducibilità termica aggiungendo un mezzo solido all'interno del *PCM*. Le schiume metalliche sono formate da collegamenti interni orientati in modo randomico che possono formare delle celle aperte o chiuse. Solitamente queste strutture sono caratterizzate da due parametri: il numero di pori per pollice PPI e la porosità ϵ ovvero il rapporto tra il volume occupato dall'aria e il volume totale (questi parametri sono spiegati dettagliatamente nel *Paragrafo 2.1*). L'effetto delle schiume metalliche all'interno dei *PCM* è stato molto studiato in letteratura. Xiao et al. [20] hanno utilizzato delle schiume in rame e in nichel di varie porosità e dimensione dei pori, al cui interno è stata posta una paraffina. Dai risultati sperimentali è emerso che la conducibilità termica del composto aumenta drasticamente rispetto al caso con sola paraffina. In particolare, la conducibilità aumenta man mano che la porosità decresce e si è visto che, a parità di porosità, la dimensione dei pori non influisce molto sulla conducibilità termica. Altri studi sulle schiume metalliche sono stati condotti da Zhao et al. [21] che hanno testato sperimentalmente il processo di cambiamento di fase (fusione e solidificazione) della paraffina RT58 (temperatura di fusione intorno ai 58°C) incapsulata all'interno di una schiuma di rame. La struttura così ottenuta è stata scaldata elettricamente dal basso con un flusso termico costante ed è stata misurata la differenza di temperatura tra la parete riscaldata e il *PCM*, in modo da analizzare l'effetto del flusso termico e della struttura metallica. L'aggiunta del mezzo solido aumenta il flusso termico totale di 3-10 volte durante il processo di fusione e nella zona del liquido puro. Inoltre, sono stati fatti studi riguardanti il processo di solidificazione in differenti condizioni di raffreddamento (convezione naturale e forzata). I risultati hanno mostrato che l'uso di schiume metalliche fa in modo che il *PCM* solidifichi più velocemente, infatti il tempo di solidificazione si riduce di più della metà.

Le schiume metalliche in rame sono state analizzate anche da Mancin et al [22]. In questo caso sono state utilizzate tre tipi differenti di paraffina che presentano tre temperature di fusione: 53° C, 57° C e 59° C. I PCM sono stati incapsulati in tre differenti schiume metalliche con diverso numero di pori per pollice (5, 10 e 40 PPI) e con uguale porosità, pari a 95%. I test sono stati condotti riscaldando il composto con tre differenti flussi termici specifici: 6,25, 12,5 e 18,75 kW m⁻². Dai risultati è emerso che la temperatura finale cresce all'aumentare del flusso termico specifico. Invece per quanto riguarda le diverse paraffine e l'effetto del diverso numero di pori per pollice non sono state notate apprezzabili differenze. Si è visto che, a parità di flusso termico specifico, la presenza della schiuma metallica migliora lo scambio termico. Per questo motivo la temperatura finale raggiunta dalla giunzione dopo lo stesso intervallo di tempo è circa 10° C inferiore a quella raggiunta nel caso senza superficie metallica, tuttavia il processo di fusione avviene più velocemente, come rappresentato in *Figura 1.5*. Dai profili di temperatura si nota che la schiuma permette una più uniforme distribuzione del calore che viene trasmesso attraverso la struttura della stessa, facendo sì che la differenza di temperatura tra giunzione e la parte superiore del PCM sia minore. Per spiegare questo fenomeno è possibile considerare la struttura porosa che è stata ricostruita da Diani et al. [23], utilizzando una scansione con il tomografo (*Figura 1.4*). Il calore arriva dalla piastra di rame sulla quale la schiuma è saldobrasata e può essere trasferito attraverso numerosi percorsi che formano la schiuma. L'elevata conducibilità termica (390 W m⁻¹ K⁻¹) delle fibre permette al calore di passare attraverso il PCM. In questo modo il processo di fusione, sebbene inizi dopo rispetto al caso senza schiuma, è più veloce e la temperatura è minore perché il calore viene effettivamente trasmesso attraverso la parte solida e non rimane confinato nella paraffina fusa. Inoltre, la presenza del mezzo solido migliora il processo di solidificazione. Nel caso senza schiuma metallica, quando il carico termico viene rimosso, la solidificazione della paraffina inizia dal lato non riscaldato. Il processo di solidificazione non è simmetrico e la diminuzione di volume associata al cambiamento di fase fa in modo che si generi un volume vuoto al centro del modulo, limitando l'applicabilità in sistemi ciclici. Quando invece viene utilizzata una struttura porosa questo effetto viene mitigato e il processo di solidificazione è più uniforme. Dopo un ciclo di cambiamento di fase il sistema ritorna nello stato iniziale facendo in modo che il processo possa essere ripetuto.

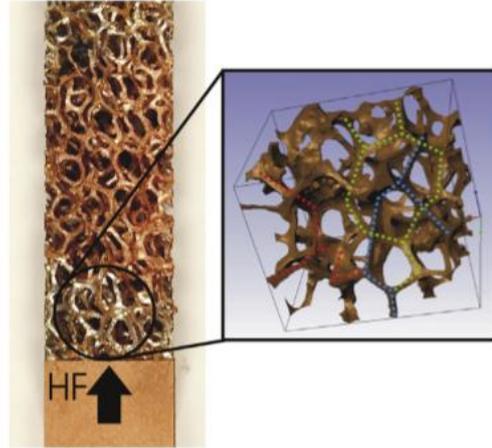


Figura 1.4: foto di una schiuma con 5 PPI e particolare della sua ricostruzione ottenuta utilizzando una scansione con tomografo [22].

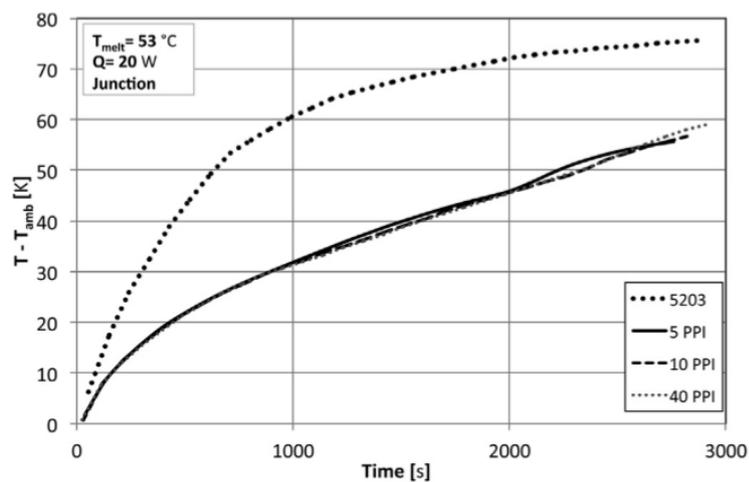


Figura 1.5:andamento della temperatura in funzione del tempo per le varie configurazioni studiate; flusso termico imposto pari a 20 W [22].

Un altro articolo interessante è quello presentato da Diani e Campanale [17]. Sono state condotte diverse prove utilizzando paraffina all'intero di schiume metalliche riscaldate lateralmente. Le prove hanno il fine di analizzare l'effetto del flusso termico, del numero di pori per indice (PPI) e della temperatura di fusione della paraffina. Inoltre, è stato studiato un caso senza schiuma metallica come metodo di paragone. Le tre schiume di alluminio presentano all'incirca la stessa porosità (intorno al 92%) ma diverso numero di pori per pollice, pari a 5, 10 e 40 PPI. Sono inoltre state scelte tre paraffine, chiamate RT42, RT55 e RT64HC, che

presentano rispettivamente una temperatura di fusione di 42° C, 55° C e 64°C. Per studiare l'effetto del flusso termico specifico, la schiuma metallica è stata riscaldata verticalmente utilizzando un flusso termico pari a 10 kW m⁻², 15 kW m⁻² e 20 kW m⁻². Dai risultati è emerso che nel caso senza schiuma metallica vi è una grande differenza tra la temperatura della piastra e quella della paraffina e questo è dovuto al fatto che il PCM presenta una bassa conducibilità termica. Questo fa sì che la temperatura della piastra riscaldata, nel momento in cui tutta la paraffina è sciolta, sia pari a oltre 110° C, che può essere considerata incompatibile con le applicazioni elettroniche. Inoltre, si è visto che la paraffina non si scioglie uniformemente e parallelamente al riscaldatore ma il processo di fusione inizia nella parte superiore. Questo è dovuto al fatto che, in questo caso, il cambiamento di fase è governato dalla convezione naturale: la paraffina liquida assorbe energia dal riscaldatore diminuendo la sua densità e tendendo a spostarsi verso l'alto, accumulandosi nella parte superiore della cavità. Nel caso in cui il PCM sia inserito all'interno di una schiuma metallica si ha che la temperatura della paraffina aumenta più velocemente rispetto al caso precedente, infatti la schiuma di alluminio aumenta la conducibilità termica del materiale. Allo stesso tempo il flusso termico applicato alla piastra di alluminio viene trasferito attraverso il PCM grazie alle fibre solide presenti all'interno della schiuma. In questo modo il tempo necessario per sciogliere completamente la paraffina è minore e si ha che la temperatura raggiunta dalla piastra di alluminio è molto più bassa rispetto al caso precedente. Inoltre, il fronte di fusione della paraffina è parallelo al riscaldatore, infatti la struttura della schiuma metallica inibisce la convezione naturale della paraffina all'interno delle celle (*Figura 1.6*). Per quanto riguarda l'effetto del flusso termico specifico si è visto che maggiore è il flusso termico specifico, minore è il tempo necessario per fondere completamente la paraffina e inoltre la temperatura della piastra alla fine del processo è tanto più alta, quanto più è alto il flusso termico specifico. Nel caso in cui la paraffina abbia una più alta temperatura di fusione si ha che è maggiore il tempo necessario per fondere completamente il blocco e quindi anche la temperatura raggiunta dalla piastra. Di conseguenza nelle applicazioni reali deve essere scelta la temperatura di fusione più adatta e quindi la scelta della paraffina è funzione del tempo durante il quale il sistema passivo deve lavorare. Infine, per quanto riguarda le diverse schiume metalliche si ha che la conducibilità termica aumenta man mano che la porosità diminuisce, mentre il numero di pori per pollice non ha un effetto significativo, infatti in tutti i casi la dimensione del poro fa sì che non vi possa essere convezione naturale.

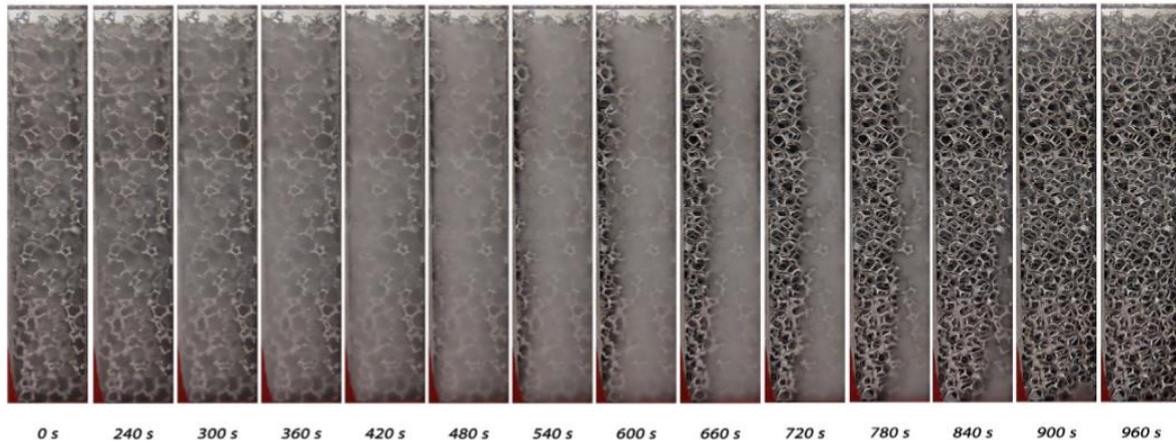


Figura 1.6: fronte di fusione in diversi istanti di tempo nel caso di schiuma Al-5-8,0 con paraffina RT42 e flusso termico specifico pari a 10 kW m^{-2} [17].

1.4.1.3 Utilizzo di carbonio

I materiali a base di carbonio sono uno dei mezzi solidi più utilizzati, infatti presentano elevata conducibilità termica e bassa densità e sono chimicamente stabili [4]. Queste sostanze possono avere diverse strutture morfologiche: grafite espansa, fibra di carbonio, grafene e nanotubi in carbonio.

Alshaer et al. [24] hanno condotto degli esperimenti utilizzando sistemi di controllo termico dell'elettronica costituiti da una schiuma di carbonio pura, una schiuma di carbonio con paraffina e una schiuma di carbonio con paraffina e nanotubi di carbonio per aumentare la conducibilità. Sono state testate due tipi strutture con due diverse conducibilità termiche: una detta CF-20 che presenta una bassa conducibilità termica ($3,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e una detta KL1-250 che ha una più alta conducibilità ($40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Per studiare il comportamento dei diversi moduli è stato analizzato il responso termico a diversi livelli di potenza. I risultati hanno mostrato una diminuzione della temperatura del modulo nel caso di schiuma di carbonio con paraffina rispetto al caso di pura schiuma di carbonio. La riduzione di temperatura era ancora maggiore nel caso in cui nanotubi di carbonio vengano inseriti nel composto. Questo miglioramento può essere spiegato considerando l'aumento di conducibilità termica che si ha nel modulo dovuto alla formazione di una rete conduttiva tra i nanotubi di carbonio e la schiuma. Il risultato ottenuto si è dimostrato essere valido per ogni livello di potenza. Per quanto riguarda la schiuma di carbonio a più alta conducibilità, si ha una diminuzione di temperatura nel caso in cui sia presente la paraffina e nanotubi di carbonio. I risultati hanno mostrato che la schiuma KL1-250 può assorbire una maggiore potenza termica a parità di temperatura e

viceversa, a parità di potenza, viene raggiunta una temperatura minore rispetto al caso in cui si utilizzi la schiuma CF- 20, quindi la schiuma di carbonio con più alta conducibilità presenta una buona capacità di controllare elevati carichi termici. Tuttavia, l'aggiunta di nanotubi di carbonio è più efficace nel caso in cui la struttura solida ha una più bassa conducibilità.

Zhong et al. [25] hanno utilizzato schiume in grafite con diverse proprietà e dimensioni dei pori per aumentare la diffusività termica di un *phase change material*, in questo caso paraffina. L'obiettivo era quello di studiare sistemi per lo stoccaggio dell'energia termica. È stato osservato che le schiume presentano una struttura a celle aperte connesse tramite dei collegamenti di grafite che, avendo un'elevata conducibilità ($18 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), permettono di trasferire il calore attraverso il PCM rapidamente. Le schiume di grafite presentano una struttura porosa con una elevata superficie per unità di volume che può essere riempita con vari materiali. I risultati hanno dimostrato che la diffusività termica del composto aumenta rispetto al caso di pura paraffina e in particolare questo incremento dipende dalla struttura della schiuma di grafite stessa, infatti la dimensione dei pori e lo spessore dei collegamenti nella schiuma giocano un ruolo fondamentale nel migliorare la diffusività termica e la capacità di stoccaggio del composto. Nel caso di pori piccoli e grande spessore dei collegamenti vi è meno paraffina all'interno e si ha una maggiore diffusività termica. Con grandi pori e collegamenti sottili invece si ha un maggiore calore latente, infatti questo parametro cresce all'aumentare della quantità in massa di paraffina presente nel composto. Per ottenere una buona capacità di stoccaggio e diffusività termica bisogna cercare di avere collegamenti spessi e pori di dimensione più grande.

Li et al. [26] hanno studiato l'effetto del grafene spugnoso sul calore latente e sulla conducibilità termica del docosano. Normalmente, come visto in altri studi, si ha che l'aggiunta del grafene comporta un aumento di conducibilità termica ma una riduzione del calore latente. Tuttavia, in questo caso, la conducibilità termica e il calore latente del composto aumentano entrambi rispetto al caso di solo PCM. In particolare, il calore latente passa da $256,1 \text{ J g}^{-1}$ a $262,8 \text{ J g}^{-1}$ e la conducibilità da $0,26 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a $0,59 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, aumentando quindi più del doppio. L'incremento del calore latente è dovuto al fatto che il grafene agisce come agente nucleante aumentando il grado di cristallinità del materiale. Questo può essere spiegato considerando che il calore latente è l'energia richiesta per distruggere il reticolo cristallino durante il processo di fusione. Se il grado di cristallinità cresce, aumenta anche l'energia necessaria per distruggere il cristallo e quindi anche il calore latente diventa maggiore. Invece l'incremento di conducibilità termica è dovuto all'elevata conducibilità termica del grafene stesso.

1.4.2 Incremento della conducibilità termica con nanoparticelle e incapsulamento

Negli ultimi anni si stanno sviluppando dei sistemi innovativi per aumentare la conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase. Questi metodi consistono nell'inserire il materiale a cambiamento di fase all'interno di un involucro (in questo caso si parla di incapsulamento) o nel disperdere delle piccole particelle di materiali ad alta conducibilità all'interno del PCM.

1.4.2.1 Utilizzo di nanomateriali

Uno dei modi utilizzati per aumentare la conducibilità termica è quello di diffondere delle particelle di piccole dimensioni, dette nanomateriali, all'interno del PCM [27]. Questi additivi devono avere un'alta conducibilità termica e devono essere chimicamente stabili in modo tale che non avvengano reazioni chimiche all'interno del PCM. I nanomateriali possono essere nanotubi di carbonio a pareti multiple (*multi-walled carbon nanotubes*, MWCNT) o a parete singola (*single-walled carbon nanotubes*, SWCNT) oppure nanoparticelle di grafite, di grafene, di ossidi di metallo o di metallo. In *Figura 1.7* sono rappresentate le strutture MWCNT e SWCNT viste al microscopio. Inoltre, la forma e la dimensione di queste strutture è fondamentale perché il rapporto superficie su volume determina le proprietà termofisiche del composto [28]. La preparazione di queste strutture può avvenire in due modi: in un solo passaggio o con un metodo a due passaggi [29]. Nel primo processo la produzione delle nanoparticelle e la loro dispersione sono simultanee, mentre nel metodo a due passaggi le particelle vengono dapprima create e successivamente vengono mescolate in diversi modi.

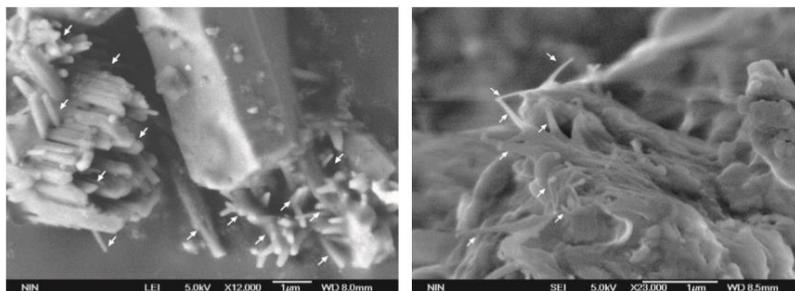


Figura 1.7: immagini al microscopio elettronico di una struttura MWCNT (sinistra) e di una SWCNT (destra) [30].

1.4.2.2 Incapsulamento del PCM

Esistono due tipi principali di incapsulamento: macroincapsulamento e microincapsulamento [3]. Il primo metodo si basa sull'introduzione del PCM all'interno di tubi, pannelli o altri contenitori che hanno solitamente dimensioni maggiori di 1 cm ed è quindi possibile porre grandi quantità di materiale all'interno del sistema di contenimento. I principali vantaggi di questo metodo sono: la buona trasportabilità e maneggevolezza, la possibilità di progettare il contenitore per l'applicazione prevista e la riduzione delle variazioni di volume esterne. Gli svantaggi sono legati alla bassa conducibilità termica, e alla possibilità di solidificazione del PCM negli angoli e nei bordi, riducendo il trasferimento di calore. Il macroincapsulamento viene solitamente utilizzato per incorporare il PCM all'interno di muri e soffitti prefabbricati. In questo caso il materiale a cambiamento di fase non viene mescolato con i materiali da costruzione (ad esempio calcestruzzo o malta) per evitare la diminuzione delle proprietà meccaniche di questi materiali. Le prestazioni di questo tipo di incapsulamento dipendono da molti fattori, come ad esempio la posizione e il tipo di PCM, le condizioni climatiche, la configurazione e le proprietà termiche dell'edificio.

Il microincapsulamento consiste invece nell'inserire una piccola quantità di PCM all'interno di minuscole particelle sferiche rivestite di polimeri. Le microcapsule possono essere sferiche o asimmetriche, con diametro inferiore a 1 cm. Tuttavia, i diametri comunemente utilizzati sono compresi tra 1 e 60 μm . Questo metodo consente di incrementare il trasferimento di calore grazie all'elevata area superficiale specifica. In *Figura 1.8* è rappresentato il funzionamento di questo sistema. La denominazione della microcapsula dipende dal suo nucleo. Vi sono allora microcapsule mononucleate, al cui interno vi è un solo nucleo, e polinucleate composte da molti nuclei all'interno del guscio sferico e una matrice nella quale sono distribuiti omogeneamente i nuclei. I metodi di microincapsulazione si dividono in chimico, chimico-fisico o meccanico. I processi chimici sono essenzialmente dei procedimenti di polimerizzazione o policondensazione nei quali la microcapsula si forma in situ. I metodi chimico-fisici sono quelli nei quali le pareti sono composte da polimeri creati mediante processi di rimozione di un solvente. I processi meccanici possono essere rivestimento con deposizione di fluido o micronizzazione. Uno dei metodi più utilizzati consiste nel disperdere goccioline di PCM in una soluzione acquosa con la conseguente formazione di pareti polimeriche attorno alle goccioline usando tecniche come la coacervazione, la policondensazione interfacciale e altri processi di polimerizzazione in situ. La scelta del processo e del materiale che forma la capsula determinano le proprietà chimiche e meccaniche delle stesse e dipendono quindi dall'applicazione scelta. Ad esempio, se si vuole mescolare le sfere con il calcestruzzo per

inserirle all'interno delle pareti bisogna porre particolare attenzione alle proprietà meccaniche, facendo in modo che non si rompano nella fase di costruzione. Riassumendo i vantaggi di questo metodo sono:

- Possibilità di utilizzo delle sfere all'interno di molti materiali
- Elevato trasferimento di calore per unità di volume
- Grande resistenza alla variazione di volume durante il cambiamento di fase
- Stabilità chimica
- Miglioramento delle proprietà termiche.

Gli svantaggi sono invece:

- Riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali da costruzione se usati negli edifici
- Costo elevato.

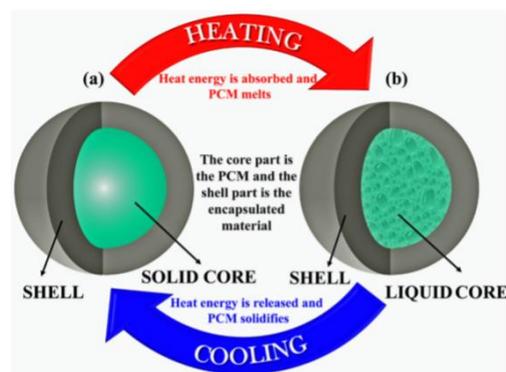


Figura 1.8: principio di funzionamento di un PCM incapsulato [29].

Capitolo 2 – Impianto sperimentale e strumentazione

2.1 Schiume metalliche

Nelle prove sperimentali sono state utilizzate due schiume metalliche in rame per aumentare la conducibilità termica della paraffina. Queste strutture hanno dimensione 100 x 20 x 100 mm e sono saldobrasate a due piastre di 100 x 10 x 100 mm che hanno la funzione di contenere la paraffina e permettere un buon contatto termico tra il riscaldatore e la schiuma. In questo modo si ottiene un sistema come quello rappresentato in *Figura 2.1*, che ha quindi dimensioni 100 x 40 x 100 mm. Dalla *Figura 2.1* si nota che all'interno delle piastre sono presenti delle termocoppie che sono necessarie a misurare la temperatura del lato riscaldato e del lato adiabatico (la posizione e la dimensione dei fori dove sono alloggiate le termocoppie sono rappresentati in *Figura 2.2*). Nella *Tabella 2.1* sono riportati tutti i parametri riguardanti le schiume. In particolare, è possibile notare che tutti i moduli di prova presentano lo stesso numero di pori per pollice (PPI) e simili valori di porosità ε , tuttavia si è scelto di prendere differenti valori di densità in modo da studiare l'effetto di questo parametro.

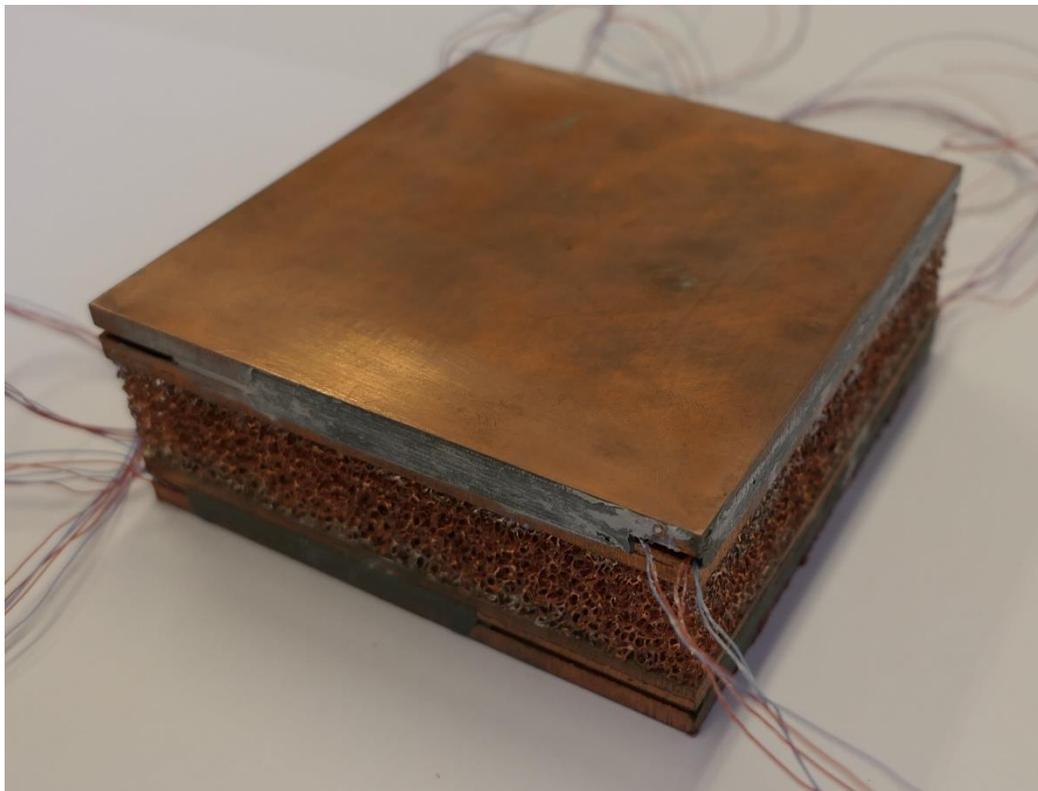


Figura 2.1: Schiuma metallica in rame utilizzata per le prove sperimentali.

Tabella 2.1: Caratteristiche delle schiume in rame.

Schiuma metallica	Cu-10-6,7	Cu-10-9,5
Numero di pori per pollice, PPI [in^{-1}]	10	10
Densità relativa ρ_R [%]	6,7	9,5
Porosità, ε [-]	0,933	0,905
Spessore fibra, t [mm]	0,390	0,403
Lunghezza fibra, l [mm]	1,583	1,378
Area superficiale per unità di volume, α_{sv} [$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$]	698	831

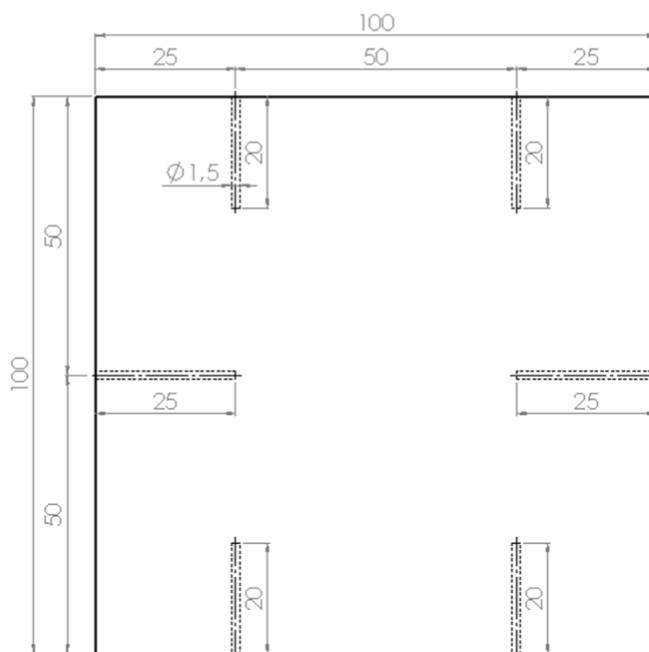


Figura 2.2: dimensioni e posizione dei fori per le termocoppie [17].

La schiuma è una struttura porosa composta da celle aperte e formata da una rete interconnessa di fibre solide. Per ottenere tali geometrie si parte da una schiuma polimerica che viene creata manipolando il processo di formazione in modo tale da ottenere una struttura a celle aperte [31]. La schiuma viene riempita con una sostanza resistente al calore ad esempio una miscela di

mullite, resina fenolica e carbonato di calcio. Dopo che il tutto si è essiccato, il polimero viene rimosso e il metallo fuso viene colato nella struttura vuota che rappresenta esattamente l'originale forma della schiuma. Dopo la rimozione dello stampo, ad esempio tramite acqua ad alta pressione, si ottiene una schiuma metallica che è esattamente uguale alla struttura polimerica iniziale. Queste schiume metalliche sono dette schiume DUOCEL. Altre informazioni sono fornite dall'azienda produttrice, *ERG materials and aerospace* [32]. Le bolle presenti nella schiuma polimerica iniziale sono create in modo da avere tutte la stessa dimensione e vengono perfettamente disposte una accanto all'altra. In questo modo ogni poro all'interno della struttura risulta essere un solido composto da 14 facce, detto tetracaidecaedro. Una volta che la schiuma si è solidificata vengono rimosse le facce del solido che si è formato, lasciando solo il perimetro esterno che costituisce la rete di fibre tra loro interconnesse. Si forma in questo modo una struttura a celle aperte (*Figura 2.3*) che risulta essere uguale in tutte e tre le direzioni e può quindi essere considerata isotropa. Le celle così formate sono tutte interconnesse permettendo ai fluidi di passare attraverso la struttura della schiuma.

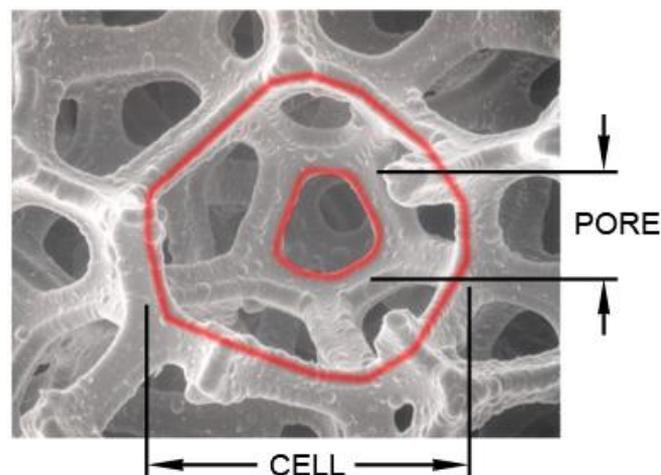


Figura 2.3: struttura interna della schiuma metallica [32].

La schiuma può essere caratterizzata usando tre parametri indipendenti. Il primo è il numero di pori per pollice, detto PPI. Ogni cella può essere considerata un solido formato da 14 facce. In ognuna delle facce è presente un'apertura che viene detta "poro" (*Figura 2.3*). Quest'ultimo può avere forma e dimensioni diverse, tuttavia per semplicità si considera che la geometria sia circolare e si prende una dimensione media. Il numero di pori che sono contenuti in un pollice di materiale è detto dimensione del poro o numero di pori per pollice, PPI. Al variare della

dimensione del poro la forma della cella e della fibra non cambiano, tuttavia la lunghezza e la dimensione della sezione trasversale della fibra variano. Questi parametri influenzano l'area specifica superficiale e la resistenza al flusso del fluido.

Il secondo parametro che caratterizza le schiume è la densità relativa che si definisce come il rapporto tra la densità della schiuma e quella del materiale di cui sono fatte le fibre. In altre parole, questo parametro rappresenta il rapporto tra la massa di rame effettivo presente nella schiuma e la massa che avrebbe un blocco solido delle stesse dimensioni. Questo parametro può variare da 2% a 15% a seconda del materiale e dell'applicazione. Come già detto, la lunghezza e la dimensione delle fibre dipendono dalla dimensione del poro, invece la forma e la dimensione della sezione trasversale dipendono dalla densità relativa (*Figura 2.4*). Inoltre, poiché le schiume possono essere considerate strutture tridimensionali composte da minuscole fibre, è evidente che la dimensione della sezione trasversale influenza le proprietà meccaniche (come rigidità e resistenza) e la conducibilità elettrica e termica. Per riassumere quanto appena detto, in *Figura 2.5* è rappresentata la sezione della fibra al variare del numero di pori per pollice e della densità relativa.

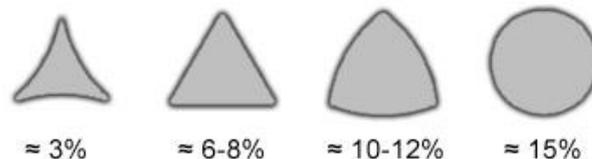


Figura 2.4: Variazione della forma e della dimensione della fibra al variare della densità relativa [32].

Il terzo e ultimo parametro che viene utilizzato per caratterizzare le schiume metalliche è il materiale che le compone. Le proprietà del materiale base determinano tutte le caratteristiche fisiche della struttura: temperatura di fusione, calore specifico, coefficiente di dilatazione termica, durezza della fibra, limiti di ossidazione e reattività chimica. Quindi, insieme alla densità relativa, anche questo parametro influenza le proprietà meccaniche e la conducibilità elettrica e termica del materiale. Tuttavia, per determinare le proprietà meccaniche, la densità relativa è spesso il parametro dominante.

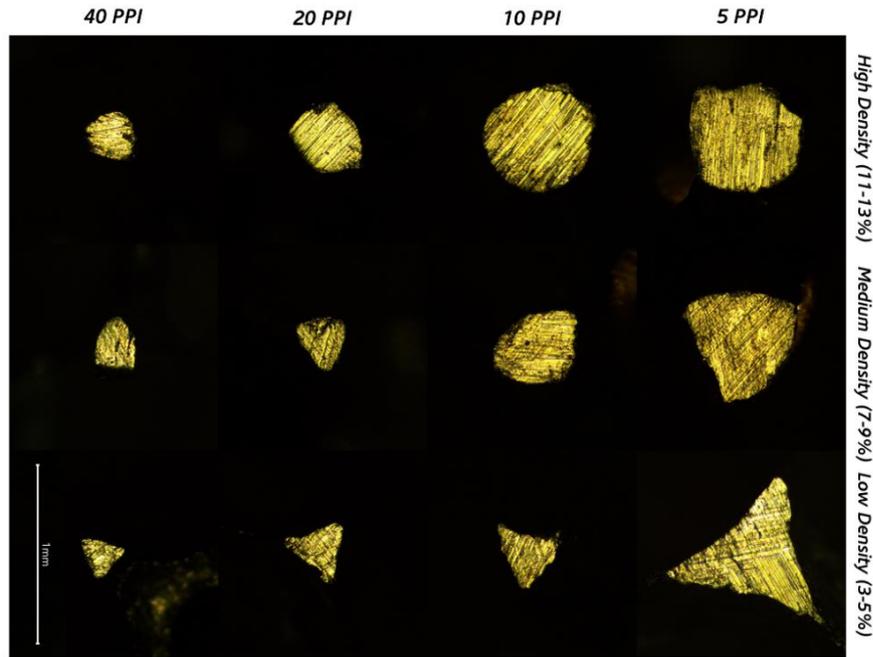


Figura 2.5: sezione della fibra metallica al variare del numero di pori per pollice e della densità relativa [32].

2.2 Superfici estese

Oltre alle schiume in rame presentate nel *Paragrafo 2.1*, sono state progettate in questo lavoro di tesi delle superfici estese con differenti geometrie, in modo da aumentare la conducibilità termica delle paraffine. Queste strutture presentano delle forme e delle dimensioni tali per cui risulta difficile realizzarle con le tecnologie tradizionali. Per questo motivo queste strutture dovranno essere prodotte con una stampante 3D per metallo. Il materiale che deve essere utilizzato è una lega di alluminio e silicio, infatti, per motivi strutturali e tecnologici, risulta attualmente impossibile stampare strutture in alluminio puro. A causa della presenza del silicio questa lega presenta una conducibilità termica inferiore a quella del metallo puro.

Il modello utilizzato dalla stampante 3D è stato realizzato con il *software SolidWorks*. In questo modo sono state create le seguenti geometrie:

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

- Struttura reticolare formata da celle cubiche di lato 5 mm e fibra a sezione quadrata con lato 1,13 mm. La densità relativa di tale geometria risulta essere del 13%.
- Struttura reticolare formata da celle cubiche di lato 10 mm e fibra a sezione quadrata con lato 0,565 mm. La densità relativa di tale geometria risulta essere del 13%.
- Struttura reticolare formata da celle cubiche di lato 5 mm e fibra a sezione quadrata con lato 0,8 mm. La densità relativa di tale geometria risulta essere del 6,86%.
- Struttura reticolare formata da celle cubiche di lato 10 mm e fibra a sezione quadrata con lato 0,4 mm. La densità relativa di tale geometria risulta essere del 6,86%.

Nel successivo *Paragrafo 2.2.1* vengono analizzate le strutture *Body-Centered-Cubic* e nel *Paragrafo 2.2.2* sono presentate le strutture reticolari.

2.2.1 Struttura Body-Centered-Cubic (BCC)

La struttura detta *BCC* (*Body-Centered-Cubic*) è stata creata basandosi sull'articolo di Krishnan et al. [33]. La cella elementare è ottenuta sottraendo ad un volume cubico delle sfere situate al centro e ai vertici del cubo stesso (*Figura 2.6*). I parametri che caratterizzano questa geometria sono:

- il lato del cubo l
- raggio della sfera r .

Per ottenere una struttura a celle aperte è fondamentale che il raggio r sia maggiore della lunghezza del lato del cubo diviso due, ovvero:

$$r > \frac{l}{2} \quad (2.1)$$

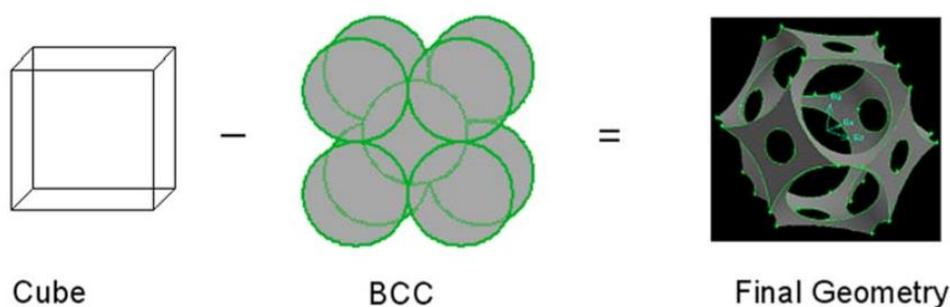


Figura 2.6: procedimento utilizzato per ottenere la cella elementare BCC [33].

Per quanto riguarda le dimensioni reali, si è deciso di creare due strutture che abbiano la stessa densità relativa ma differente dimensione della cella, in modo da studiare l'effetto di questo parametro. In questo modo sono state ottenute due differenti geometrie (*Figura 2.7*):

- Una struttura *BCC* formata da un cubo di lato $l = 5$ mm e intersecata da sfere aventi raggio $r = 5,10$ mm. In questo modo la cella ha una dimensione molto simile a quella delle schiume presentate nel *Paragrafo 2.1*.
- Una struttura *BCC* formata da un cubo di lato $l = 10$ mm intersecata da sfere aventi raggio $r = 10,20$ mm, in modo tale da avere la stessa densità relativa del caso precedente.

Le dimensioni della seconda cella sono state aumentate e non diminuite per due motivi:

- Incrementando la grandezza della cella si ha la possibilità che si formino dei moti convettivi migliorando lo scambio termico
- Dal punto di vista tecnico, la stampante 3D presenta dei limiti tali per cui risulta difficile creare strutture molto piccole.

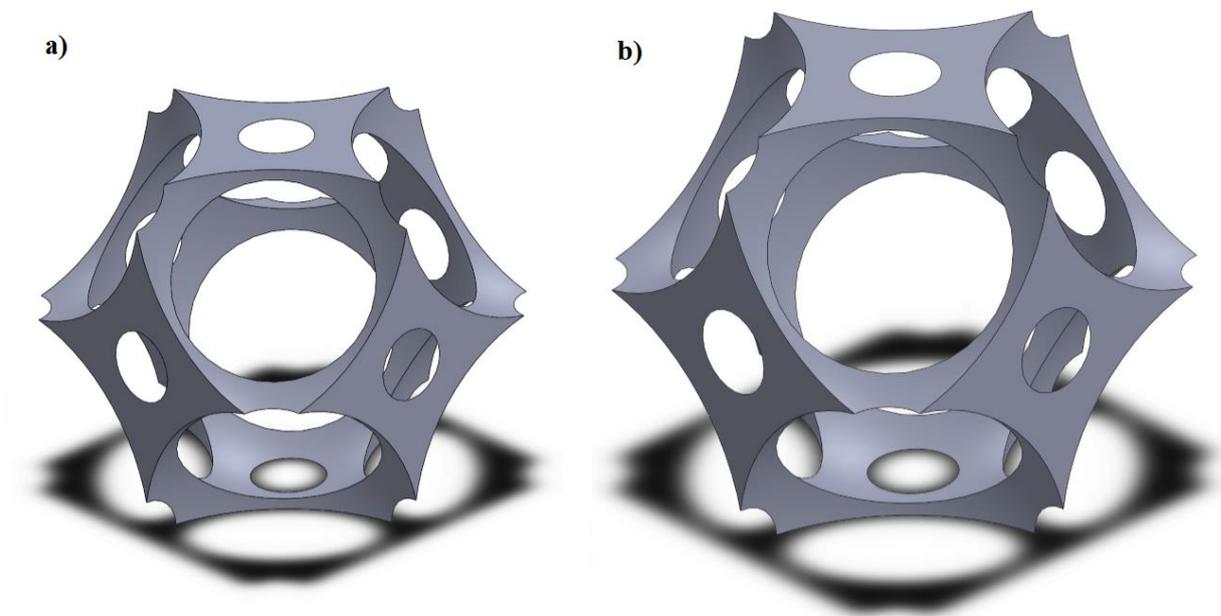


Figura 2.7: geometria BCC con lato del cubo di a) 5 mm e b) 10 mm.

Le superfici così create presentano dei limiti che le rendono tecnicamente impossibili da realizzare: spessori infinitesimi, fibre troppo sottili e fori troppo piccoli. Per questo motivo le celle sono state modificate variando la grandezza dei fori e lo spessore della fibra ma mantenendo le dimensioni del cubo di partenza. In questo modo si ottengono delle strutture molto simili a quelle create in precedenza ma che presentano una densità relativa maggiore, pari al 13% (*Figura 2.8*).

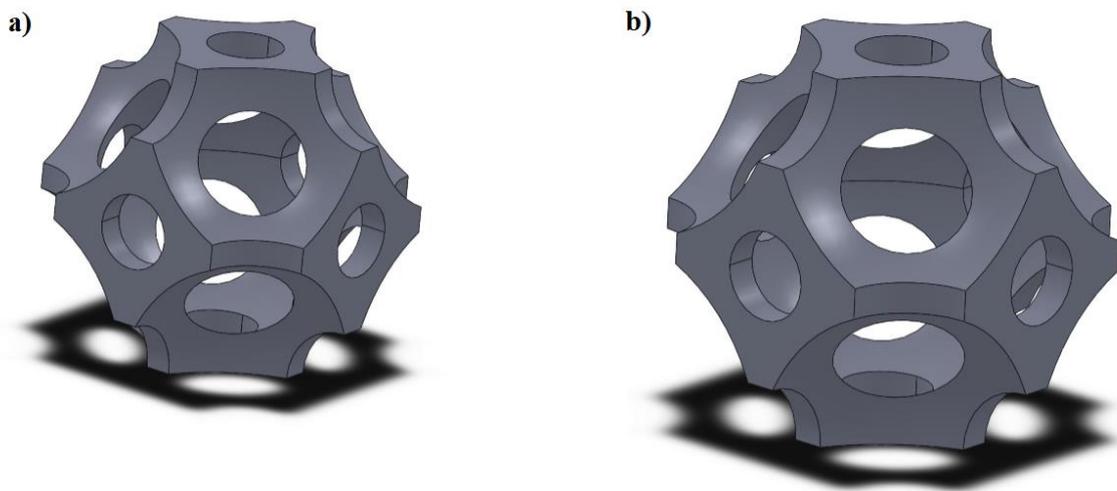


Figura 2.8: celle elementari modificate: BCC con lato di a) 5 mm e b) 10 mm.

Le celle elementari sono poste una accanto all'altra in modo tale da ottenere un'unica struttura che presenta le stesse dimensioni delle schiume in rame del *Paragrafo 2.1*, ovvero 100 x 20 x 100 mm. Inoltre, per trasmettere il calore dal riscaldatore alle fibre e contenere la paraffina, due piastre in lega di alluminio di dimensioni 100 x 10 x 100 mm sono state posizionate alla base e nella parte superiore della struttura. Si ottengono in questo modo due moduli di prova aventi le stesse dimensioni esterne, 100 x 40 x 100 mm, ma diverso numero di celle (*Figura 2.9*). I sostegni cilindrici visibili in *Figura 2.9* fungono da supporto durante la fase di stampaggio, verranno poi rimossi in un secondo momento a stampa avvenuta. Inoltre, per poter confrontare le varie strutture e utilizzare lo stesso apparato sperimentale, devono essere realizzati dei fori e delle cave (come rappresentato in *Figura 2.2*) in modo da poter inserire le termocoppie che misurano la temperatura del lato riscaldato e del lato adiabatico.

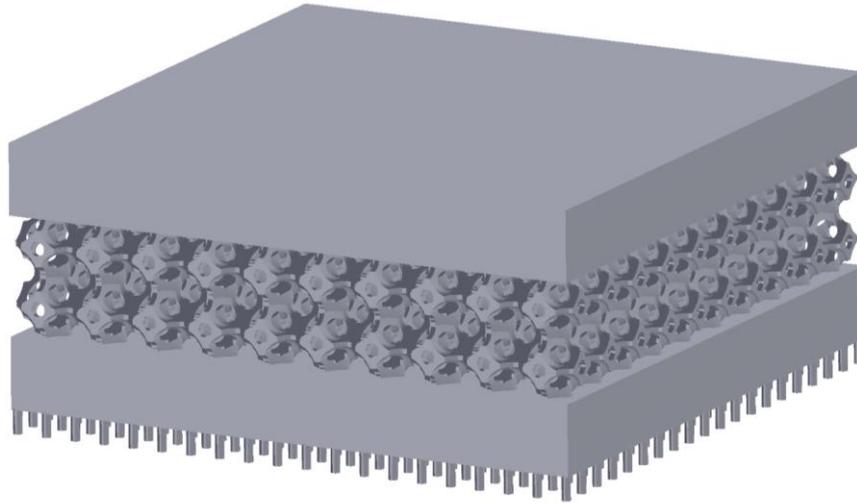


Figura 2.9: modulo ottenuto dall'unione delle celle BCC di dimensione 10 mm.

2.2.2 Strutture reticolari

Per creare le superfici reticolari si è preso come riferimento la geometria 3D studiata da Hu e Gong [34]. Questa struttura è formata da un insieme di celle cubiche che presentano fibre a sezione quadrata (*Figura 2.10*). Anche in questo caso le celle possono essere caratterizzate attraverso due parametri:

- lunghezza del lato del cubo l
- spessore della fibra s , che corrisponde al lato del quadrato in sezione.

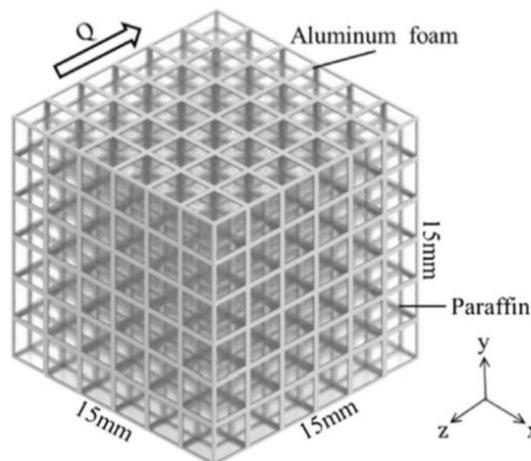


Figura 2.10: geometria in alluminio studiata da Hu e Gong [34].

Per confrontare queste geometrie con quelle viste nel paragrafo precedente, sono stati creati due provini:

- Una struttura che ha come cella elementare un cubo di lato $l = 5$ mm e densità relativa pari al 13%, come nel caso delle superfici *BCC*. Per ottenere tale densità lo spessore della fibra risulta essere $s = 0,565$ mm
- Una struttura che ha come cella elementare un cubo di lato $l = 10$ mm e densità relativa pari al 13%, come nel caso delle superfici *BCC*. Per ottenere tale densità lo spessore della fibra risulta essere doppio rispetto al caso precedente, ovvero $s = 1,13$ mm.

Per poter confrontare i moduli e utilizzare lo stesso apparato sperimentale, due piastre in lega di alluminio sono state poste alla base nella superficie superiore. In questo modo si ottengono due provini aventi dimensione 100 x 40 x 100 mm (*Figura 2.11* e *Figura 2.12*).

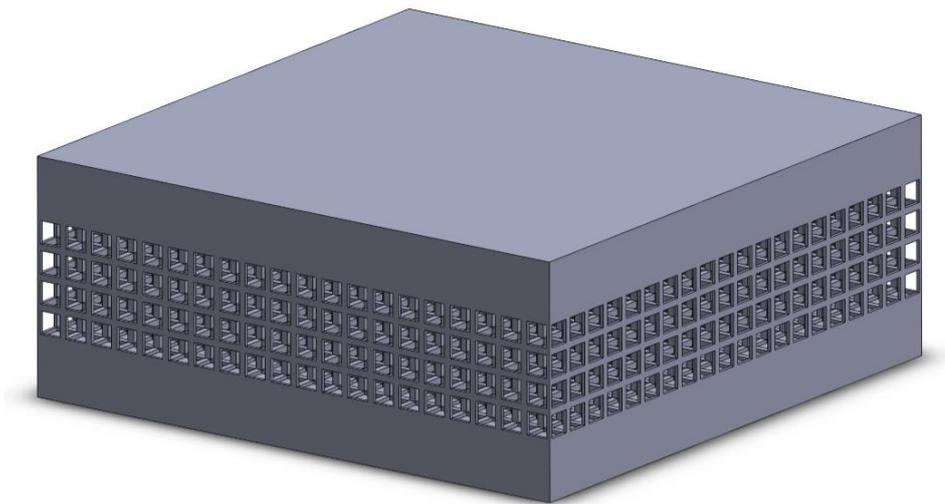


Figura 2.11: struttura reticolare con celle elementare di lato 5 mm e densità relativa 13%.

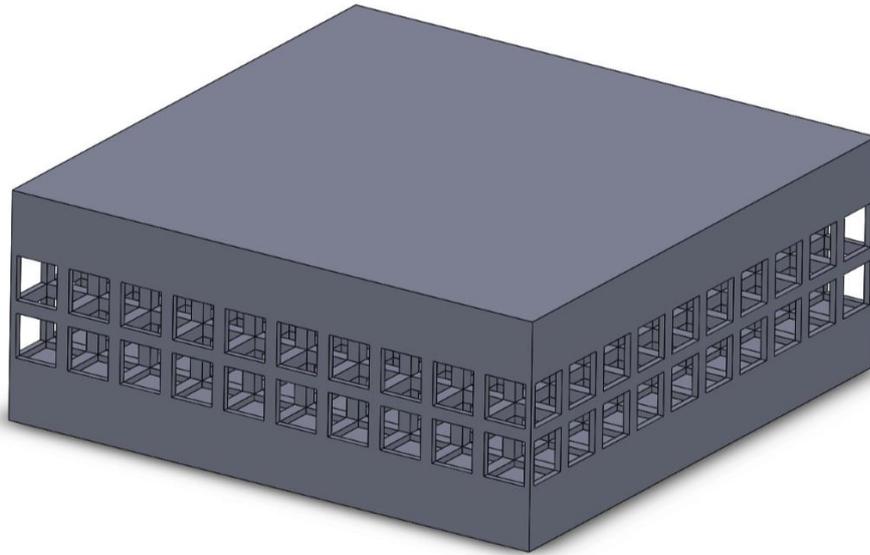


Figura 2.12: struttura reticolare con celle elementare di lato 10 mm e densità relativa 13%.

Per poter realizzare ulteriori confronti sono state realizzate altre due geometrie che presentano un diverso spessore della fibra:

- Una struttura reticolare formata da celle cubiche di $l = 5$ mm e densità relativa 6,86%. In questo caso lo spessore della fibra risulta essere $s = 0,4$ mm.
- Una struttura reticolare formata da celle cubiche di lato $l = 10$ mm e densità relativa 6,86%. In questo caso lo spessore della fibra risulta essere $s = 0,8$ mm.

Queste superfici sono state disegnate con l'intento di ottenere dei provini che abbiano una densità relativa minore rispetto al caso precedente e quindi un'elevata porosità ε con valori molto simili a quelli delle schiume in rame viste nel *Paragrafo 2.1*. Anche in questo caso, per poter confrontare tutte le geometrie e utilizzare lo stesso apparato sperimentale, sono state disegnate due piastre in alluminio di dimensione 100 x 10 x 100 mm. I moduli così ottenuti sono rappresentati in *Figura 2.13* e *Figura 2.14*.

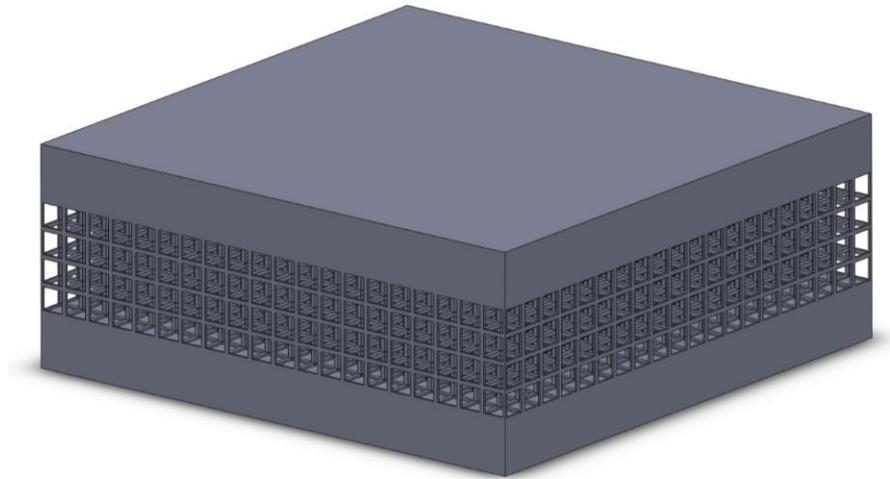


Figura 2.13: struttura reticolare con celle elementare di lato 5 mm e densità relativa 6,86%.

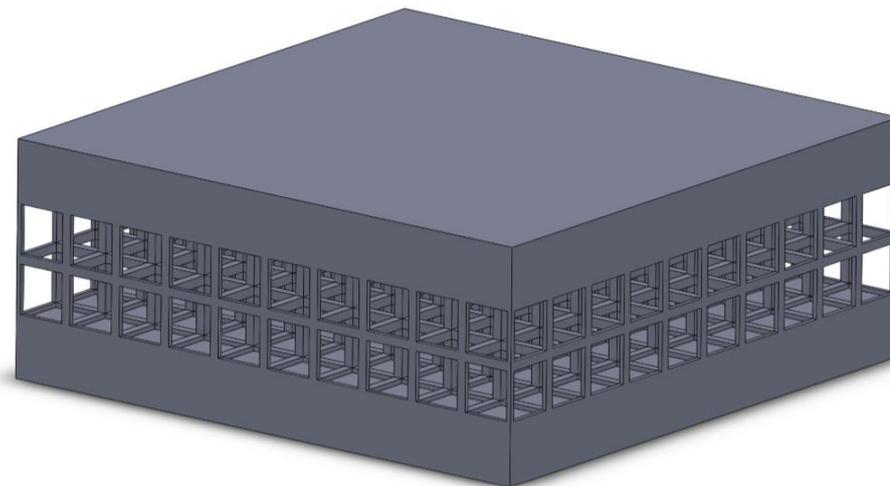


Figura 2.14: struttura reticolare con celle elementare di lato 10 mm e densità relativa 6,86%

2.3 Paraffine utilizzate

In tutti i casi studiati si è scelto di utilizzare come materiale a cambiamento di fase la paraffina che, come già detto, è un *PCM* organico. Sono state acquistate dall'azienda tedesca *Rubitherm* tre differenti paraffine che presentano diverse temperature di fusione. La scelta è stata guidata dal fatto che questi materiali non sono tossici né corrosivi e sono quindi sicuri per la salute dell'uomo. Le caratteristiche delle paraffine sono riportate in *Tabella 2.2*. Questi materiali presentano un elevato calore latente e la variazione di volume durante il cambiamento di fase è

contenuta, tuttavia la conducibilità termica è bassa e assume valori compresi tra 0,21 e 0,24 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Tabella 2.2: Caratteristiche delle paraffine [35].

Tipo paraffina	RT42	RT55	RT64HC
Temperatura di fusione, T_{fus} [$^{\circ}\text{C}$]	38÷43	51÷57	63÷65
Temperatura di solidificazione, T_{sol} [$^{\circ}\text{C}$]	43÷37	56÷57	64÷61
Calore specifico, c_p [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	2	2	2
Calore latente, h [kJ kg^{-1}]	165	170	250
Densità del solido, ρ_{sol} [kg L^{-1}]	0,88	0,88	0,88
Densità del liquido, ρ_{liq} [kg L^{-1}]	0,76	0,77	0,78
Conducibilità termica, k [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	0,2	0,2	0,2
Variazione di volume percentuale [%]	12,5	14	11
Massima temperatura operativa, T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	72	90	95
Punto di infiammabilità T_{flash} [$^{\circ}\text{C}$]	186	>200	>190

2.4 Strumentazione

Durante le prove sono stati utilizzati diversi strumenti, riportati di seguito:

- Un dispositivo che dà il riferimento di temperatura per il giunto freddo delle termocoppie, ovvero 0°C . In questo caso il sistema utilizzato è il *Kaye K170*.
- Un sistema di acquisizione *Agilent A34970* che permette di convertire i segnali analogici di tensione in arrivo dalle termocoppie in un segnale digitale che viene inviato al PC. Questo sistema è composto da tre schede, ognuna delle quali presenta 20 canali.

- Un bagno termostatico *Techne RB-12A* in cui è possibile impostare tramite *display* la temperatura dell'acqua che si desidera mantenere costante. Questo sistema è stato utilizzato per la taratura delle termocoppie come spiegato nel *Paragrafo 2.5*.
- 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. Queste termocoppie sono state installate all'interno della schiuma metallica, come spiegato nel *Paragrafo 2.6*, in modo da poter misurare la temperatura del PCM a diverse altezze. La scelta di utilizzare questo tipo di termocoppie è stata guidata dal fatto che era necessario avere una guaina rigida per inserire le termocoppie all'interno della schiuma. Le termocoppie, una volta tarate, presentano un'incertezza di $\pm 0,08$ K.
- Una termoresistenza *Pt100* che presenta un'incertezza di $\pm 0,03$ K che è stata utilizzata come riferimento per la taratura, come spiegato nel *Paragrafo 2.5*.

2.5 Taratura termocoppie

Come già detto, per misurare la temperatura del PCM sono state usate tre termocoppie di tipo T (con fili in rame e costantana) rivestite da una guaina in inox. Queste termocoppie sono state tarate usando come riferimento una termoresistenza *Pt100* che presenta una bassa incertezza e ha una precisione del centesimo di grado. Le termocoppie sono state collegate al *Kaye K170* e al sistema di acquisizione *Agilent 34970A* (a cui è collegata anche la *Pt100*) che permette di convertire la misura analogica di tensione delle termocoppie in un segnale digitale che viene inviato al *PC*. Le termocoppie da tarare e la termoresistenza sono state posizionate all'interno di un bagno termostatico, facendo attenzione che fossero tutte alla stessa altezza e non ci fosse contatto tra i vari elementi. Il bagno termostatico è stato inizialmente portato a 10° C e, una volta raggiunta la temperatura di regime, è stato registrato il valore misurato dalla termoresistenza ed è stata inizializzata l'acquisizione. Il sistema d'acquisizione misura di volta in volta, ogni quattro secondi, la tensione ai capi della termocoppia in [μ V] e successivamente il programma in *LabVIEW* utilizza un polinomio già presente per convertire i valori di tensione in valori di temperatura. Il polinomio è del tipo:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (2.2)$$

dove y rappresenta la temperatura in [$^{\circ}$ C], x è il valore di tensione misurato in [mV] e i coefficienti a , b , c , d ed e sono stati ottenuti da precedenti tarature. In questo modo sono stati

registrati cento valori di temperatura misurati dalle termocoppie. Alla fine della lettura è stata nuovamente rilevata la temperatura dalla termoresistenza in modo da verificare che fosse uguale a quella misurata prima di far partire il sistema di acquisizione. La procedura così descritta è stata ripetuta aumentando ad ogni *step* la temperatura del bagno termostatico di 10°C e aspettando che la termoresistenza raggiungesse il valore di regime. In questo modo sono stati ottenuti i valori di temperatura in un *range* da 10° C a 70° C, con un intervallo di 10° C. Così facendo si è potuto andare a confrontare i valori misurati dalla termoresistenza con quelli delle termocoppie. Si è visto che i valori di temperatura registrati dalle termocoppie erano diversi da quelli ottenuti con la termoresistenza ed è stato quindi necessario trovare un nuovo polinomio. Per fare ciò è stato utilizzato il programma *Excel*. Per ogni valore di temperatura utilizzato (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 °C) è stata calcolata la media delle tensioni su 100 valori misurati. Successivamente è stato creato un grafico in cui sono stati inseriti in ascissa i valori di tensione ottenuti e in ordinata il corrispondente valore misurato dalla termoresistenza, per ogni valore di temperatura del bagno termostatico. In questo modo è stato possibile interpolare con un polinomio di quarto grado i punti sperimentali così ottenuti (*Figura 2.15*).

Il polinomio così ottenuto si presenta nella forma vista precedentemente e i coefficienti assumono i seguenti valori:

$$a = 0,017$$

$$b = -0,0425$$

$$c = -0,5568$$

$$d = 25,69$$

$$e = 0,1865$$

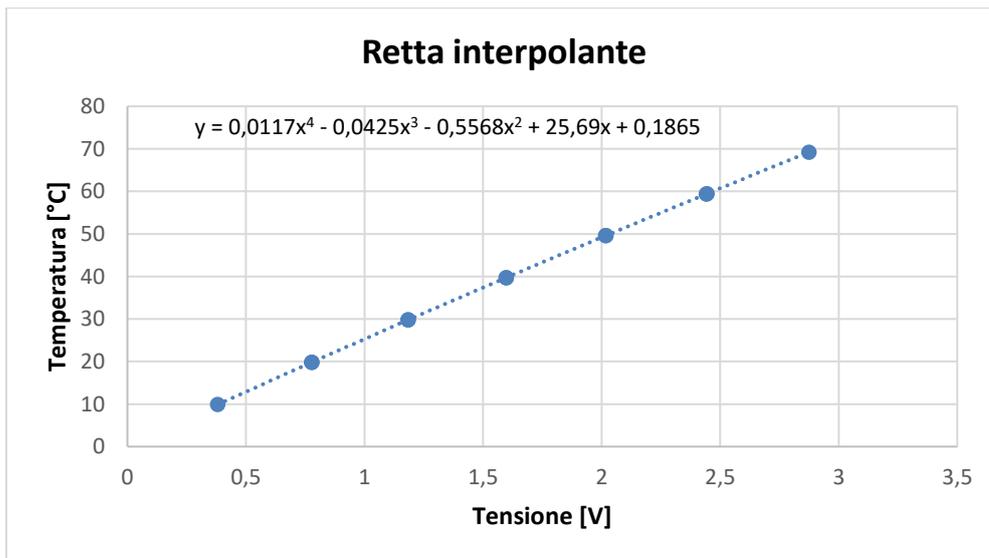


Figura 2.15: retta interpolante dei dati sperimentali.

2.6 Modulo di prova

Il modulo di prova è stato creato prendendo come riferimento quello riportato nella tesi di Alberto Pellizzari [36]. Per contenere la paraffina fusa e non avere dispersioni di calore si è scelto di utilizzare due pareti di bachelite, un materiale isolante, che sono state incollate sulla base e sul retro delle schiume metalliche descritte nel *Paragrafo 2.1*. Per poter osservare il fenomeno di fusione e solidificazione della paraffina si è deciso di incollare un vetro sulla superficie frontale delle strutture. Gli elementi sono mantenuti a stretto contatto utilizzando un silicone sigillante resistente ad alta temperatura *Saratoga*, infatti questo materiale permette di avere una buona tenuta tra i vari elementi senza dispersioni di paraffina e senza creare ingombro.

In questo modo il modulo di prova risulta essere come quello riportato in *Figura 2.16*. Si possono quindi notare i seguenti elementi:

- Una base di bachelite di dimensioni 15 x 40 x 120 mm
- Una parete di bachelite di dimensioni 100 x 40 x 15 mm
- Un vetro di dimensioni 100 x 40 x 4 mm
- Due piastre laterali con dimensioni 100 x 10 x 100 mm che sono già state precedentemente descritte.

La piastra posta nel lato del riscaldatore ha la funzione di trasmettere il calore dal riscaldatore stesso (vedere *Paragrafo 2.8*) alla struttura metallica. Per ottenere un buon contatto termico è

stata utilizzata una pasta termoconduttiva. Nell'altra piastra, sul lato opposto, sono stati praticati tre fori a diverse altezze: uno a 25 mm dalla base, uno nel mezzo e uno a 75 mm dalla base. Questi fori sono necessari per inserire le termocoppie inguainate in inox e ottenere l'andamento di temperatura del PCM all'interno della struttura metallica o della schiuma durante il processo di cambiamento di fase. Come già osservato in [36], utilizzando un maggior numero di termocoppie disposte orizzontalmente nella parte centrale della superficie non si osserva una variazione di temperatura tale da comportare la necessità di un maggior numero di strumenti. La differenza di temperatura misurata nel caso in cui si abbiano tre termocoppie nella zona centrale è infatti molto piccola, pari a $0,2^{\circ}$ C. Le termocoppie sono state quindi inserite all'interno dei fori, che presentano un diametro di 2 mm e una profondità di 20 mm. Per ottenere una buona tenuta e fare in modo che le termocoppie non si spostino è stato utilizzato il silicone (vedere *Figura 2.16*).

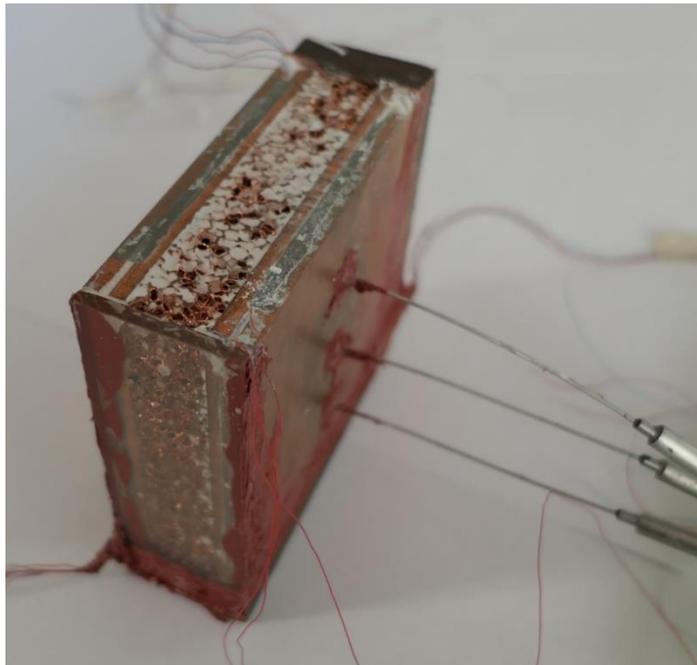


Figura 2.16: foto del modulo di prova in cui sono state incollate le pareti di bachelite e inserite le termocoppie inguainate in inox.

2.7 Contenitore in teflon

Il modulo di prova descritto nel paragrafo precedente è stato posto all'interno di un contenitore in teflon. Questa operazione è necessaria per isolare termicamente il modulo e ottenere quindi

delle condizioni molto simili in tutte le prove. Il contenitore è stato realizzato in teflon perché esso presenta una bassa conducibilità termica e quindi permette di isolare termicamente il modulo dall'esterno. Come si nota dalla *Figura 2.17* il contenitore è composto da quattro pareti che possono essere smontate. In un lato del contenitore è presente una cava di dimensioni 102 x 10 x 102 mm dove può essere posto il riscaldatore, mentre nella parete opposta sono presenti tre fori di diametro 10 mm per permettere il passaggio delle tre termocoppie precedentemente descritte. In *Figura 2.18* è rappresentato il modulo all'interno del contenitore.

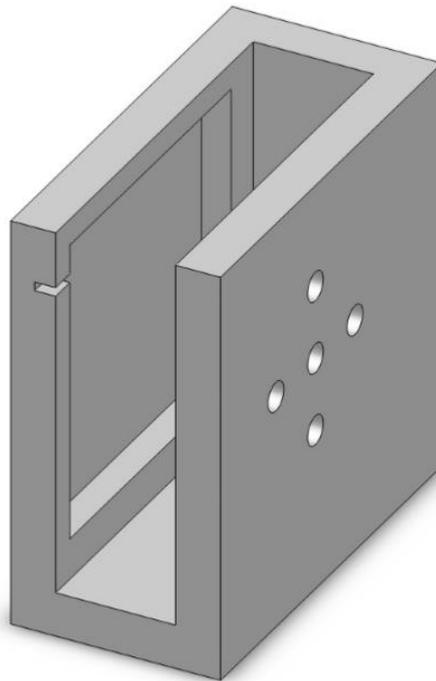


Figura 2.17: contenitore in teflon utilizzato per isolare il modulo [36].

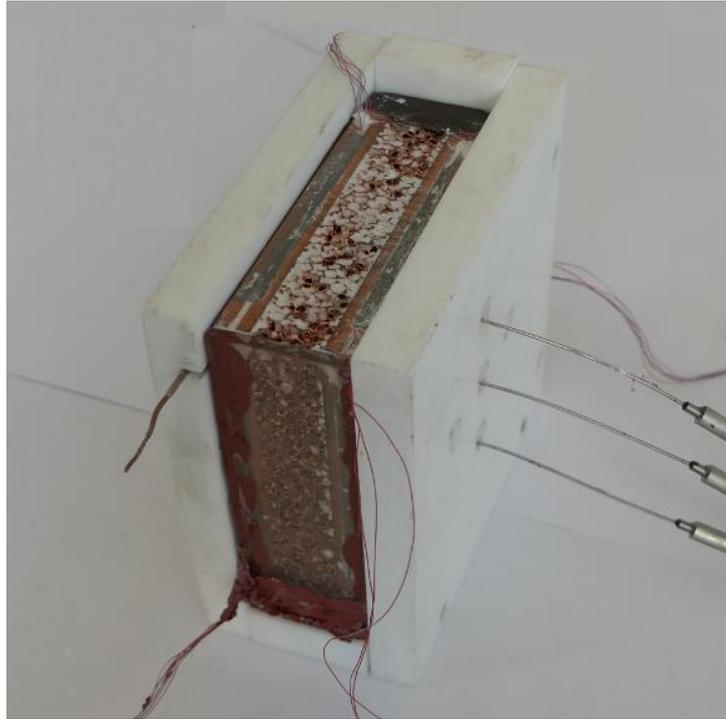


Figura 2.18: modulo di prova all'interno del contenitore in teflon.

2.8 Riscaldatore elettrico e potenze termiche

Per fornire il flusso termico e imitare in questo modo il calore da dissipare di un dispositivo elettronico si è deciso di utilizzare un riscaldatore elettrico alimentato da un generatore in corrente continua. Il riscaldatore è dimensionato per una potenza specifica pari a 20 kW m^{-2} , tuttavia variando la tensione e corrente del generatore è possibile ottenere potenze specifiche minori rispetto al valore precedente. Il riscaldatore è composto da un cavo in lega nichel-cromo 80/20 che ha una resistenza pari a $4,4006 \Omega \text{ m}^{-1}$ alle cui estremità sono stati saldati due cavi in rame che servono per disperdere meno calore. Il componente così ottenuto viene ricoperto da una guaina termorestringente e posto in un percorso a serpentina scavato all'interno di una piastra in rame (*Figura 2.19*). La piastra viene quindi unita con un'altra superficie delle stesse dimensioni dove non è presente la serpentina. Per ottenere un buon contatto viene inserita una pasta termoconduttiva. Il materiale utilizzato è il rame, infatti grazie all'elevata conducibilità termica è possibile ottenere una diffusione uniforme del calore generato dalla resistenza elettrica.

Il riscaldatore è stato quindi dimensionato per una potenza termica specifica pari a 20 kW m^{-2} a cui corrisponde una potenza termica generata pari a 200 W , infatti la superficie consiste in un quadrato di lato 100 mm . Tuttavia, nella realtà i dispositivi elettronici hanno la necessità di

dissipare dei valori di potenza che possono essere diversi da quelli riportati. Si è deciso quindi di testare i moduli utilizzando tre diversi flussi termici specifici: 10, 15 e 20 kW m⁻². Considerando quindi le dimensioni del riscaldatore, risulta che ogni modulo sarà testato fornendo una potenza pari a 100, 150 e 200 W.



Figura 2.19: Piastra del riscaldatore in cui vi è il percorso per la resistenza elettrica [36].

2.9 Sistema di acquisizione

Come già detto, il sistema di acquisizione è composto da tre schede ognuna delle quali ha venti canali disponibili. Il numero di canali utilizzati dipende da quanti sensori sono presenti, infatti il numero di termocoppie può variare nel caso in cui alcune di esse non funzionino. In particolare, i canali sono stati così suddivisi:

- Tre canali per le tre termocoppie inserite nel PCM con guaina in inox;
- Un canale per misurare la corrente prodotta dal generatore di tensione;
- Un canale per misurare la tensione prodotta dal generatore di corrente;
- Sei canali per la misura di temperatura sulla piastra riscaldata;
- Cinque canali per la misura di temperatura sulla piastra non riscaldata.

È necessario specificare che la misura di corrente viene fatta utilizzando una resistenza posta in serie al riscaldatore (detta *shunt*). Il sistema di acquisizione misura la tensione ai capi di questa resistenza e conoscendo il valore di quest'ultima è possibile ricavare la corrente, secondo la relazione:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

Il sistema di acquisizione converte i valori misurati e li trasmette al *PC* dove il *software LabView* registra e mostra in tempo reale i dati acquisiti durante le prove sperimentali. In *Figura 2.18* è rappresentata l'interfaccia del programma. Si possono notare i grafici che rappresentano i valori acquisiti in funzione del tempo. In particolare, si possono vedere durante le prove sperimentali i diagrammi che riportano i valori di temperatura misurati sul lato riscaldato, sul lato adiabatico e all'interno della paraffina. Altri due grafici mostrano i valori di tensione e corrente forniti dal generatore.



Figura 2.20: interfaccia del programma LabView utilizzato.

Capitolo 3 – Prove sperimentali

3.1 Descrizione prove sperimentali ed elaborazione dati

Nelle prove sperimentali sono state utilizzate due differenti schiume in rame che presentano diversa densità relativa. Inoltre, i moduli sono stati testati con tre tipologie di paraffine e con diversi flussi termici.

In tutti i casi la metodologia utilizzata è stata sempre la stessa:

- Accensione del *Kaye KI70* lasciando trascorrere un certo intervallo di tempo affinché lo strumento raggiungesse la temperatura di regime;
- Accensione del sistema di acquisizione e del PC al fine di raccogliere i dati acquisiti dagli strumenti di misura;
- Accensione del generatore di corrente e contemporanea inizializzazione del sistema di acquisizione. Va precisato che la tensione e corrente erogate dal generatore vengono impostate all'inizio di ogni prova in modo da ottenere all'istante iniziale la potenza desiderata. Tuttavia, prima dell'inizio della prova viene lasciato trascorrere un determinato intervallo di tempo in modo tale che il modulo di prova raggiunga nuovamente la temperatura ambiente;
- Quando la paraffina è completamente fusa il generatore di corrente viene spento in modo da cessare l'erogazione di potenza;
- Il sistema di acquisizione viene lasciato acceso in modo da raccogliere i dati durante la fase di solidificazione.

Inoltre, al fine di osservare il fenomeno di fusione, all'istante iniziale viene accesa una videocamera in modo da poter poi ricavare i singoli fotogrammi che mostrano il processo di fusione all'interno della schiuma. I fotogrammi sono stati presi ogni 30 secondi, infatti questo intervallo di tempo permette di capire bene ciò che succede. Si è scelto inoltre di non scattare delle foto durante la fase di solidificazione: il processo inizia dal vetro e dalla parte superiore, dove il modulo non è isolato e si nota solamente un graduale cambiamento di colore della paraffina. Per questo motivo si è deciso quindi di non riportare le immagini scattate durante la fase di solidificazione.

I dati sperimentali così ottenuti sono salvati dal programma *LabView* in un file di testo che è strutturato nel seguente modo:

- Nella prima colonna vi è il tempo trascorso dall'istante iniziale in cui viene acceso il sistema di acquisizione e il generatore di corrente;
- Nelle colonne successive vi sono le temperature TC_{risc} e TC_{adb} misurate dalle termocoppie poste all'interno del lato riscaldato e del lato adiabatico del modulo di prova;
- Tre colonne sono dedicate alle temperature TC_{pcm1} , TC_{pcm2} e TC_{pcm3} misurate dalle termocoppie poste all'interno della schiuma che misurano la temperatura del PCM, durante la prova;
- Infine, le ultime due colonne rappresentano la tensione V e la corrente I che vengono erogate dal generatore di corrente durante la prova.

I dati così ottenuti sono stati elaborati utilizzando il *software Excel* di *Office* e il *software Matlab*. Il programma carica i dati presenti nel foglio di testo e successivamente vengono ricavate tutte le variabili di interesse:

- Temperatura T_{risc} data dalla media delle temperature TC_{risc} misurate dalle termocoppie presenti in questo lato del provino;
- Temperatura del lato adiabatico T_{adb} data dalla media delle temperature TC_{adb} misurate dalle termocoppie;
- Potenza P erogata istante per istante dal generatore di corrente, ottenuta dal prodotto tra la tensione V e la corrente I ;
- Differenza di temperatura tra il lato riscaldato e il lato adiabatico $T_{risc} - T_{adb}$
- Differenza di temperatura tra il lato riscaldato e l'ambiente esterno $T_{risc} - T_{amb}$, calcolata prendendo come temperatura ambiente la T_{risc} all'istante iniziale;
- Temperatura iniziale T_i , calcolata come media delle tre temperature TC_{pcm1} , TC_{pcm2} e TC_{pcm3} all'istante iniziale.

Inoltre, utilizzando il programma *Matlab*, è stato ricavato l'istante di tempo in cui termina il processo di fusione. Per fare ciò il programma trova il valore del tempo t in cui la potenza va a zero, ovvero quando viene interrotta l'erogazione di corrente.

I dati così ottenuti sono stati rappresentati in modo da poter ottenere una visualizzazione grafica di ciò che accade durante ogni prova:

- Grafico della temperatura TC_{risc} misurata dalle termocoppie presenti nel lato riscaldato in funzione del tempo t trascorso dall'inizio della prova;

- Grafico della temperatura media del lato riscaldato T_{risc} e delle temperature TC_{pcm1} , TC_{pcm2} e TC_{pcm3} in funzione del tempo t trascorso dall'inizio della prova, durante la fase di fusione;
- Grafico della temperatura media del lato riscaldato T_{risc} e delle temperature TC_{pcm1} , TC_{pcm2} e TC_{pcm3} in funzione del tempo t trascorso dall'inizio della prova, durante la fase di solidificazione.

Ulteriori grafici sono presenti nel *Paragrafo 3.3* dove sono stati comparati i moduli di prova, le paraffine e le potenze termiche. In particolare, sono stati considerati i seguenti confronti:

- Confronto fra i moduli in rame aventi diverse densità ma stesso numero di pori per pollice (*Paragrafo 3.3.1*);
- Confronto delle tre differenti paraffine a parità di potenza termica e modulo (*Paragrafo 3.3.2*);
- Confronto fra i tre diversi flussi termici a parità di paraffina e modulo di prova (*Paragrafo 3.3.3*);
- Confronto tra i moduli in rame e quelli in alluminio precedentemente testati nella tesi di Pelizzari [36] (*Paragrafo 3.3.4*);
- Confronto fra risultati ottenuti e i valori forniti dalla correlazione di Diani e Campanale [17] (*Paragrafo 3.3.5*);

3.2 Risultati delle prove sperimentali

Nel *Paragrafo 3.2.1* sono riportati i risultati sperimentali ottenuti per le schiume in rame. Per tutte le prove è stato rappresentato l'andamento delle temperature misurate dalle termocoppie TC_{risc} presenti nel lato dove è posto il riscaldatore, in modo da poter verificare che il riscaldamento fosse uniforme. In questo modo, una volta constatato che le temperature sono molto simili tra loro, nei grafici successivi è stata rappresentata la temperatura media del lato riscaldato T_{risc} . Inoltre, dopo aver verificato che ciò avvenisse per ogni prova, si è deciso, per motivi di spazio, di riportare l'andamento delle temperature misurate dalle termocoppie solo per una singola prova.

Una volta verificato che il riscaldamento fosse uniforme, è stato rappresentato l'andamento della temperatura del lato riscaldato T_{risc} in funzione del tempo t fino alla fusione completa della paraffina. Nello stesso grafico sono rappresentate anche le temperature misurate dalle tre

termocoppie inguainate in inox presenti all'interno del *PCM*. Ricordando quanto detto al *Paragrafo 2.6*, si ha che vi sono tre termocoppie poste a diverse altezze: $T_{PCM,t}$ corrisponde alla termocoppia che è posta a 25 mm dalla parte superiore della schiuma, $T_{PCM,m}$ corrisponde invece alla termocoppia che è posta a 50 mm dalla parte superiore della schiuma, ovvero al centro di quest'ultima, e infine $T_{PCM,b}$ rappresenta la temperatura misurata dalla termocoppia posta nella parte inferiore, ad una distanza di 75 mm della parte superiore della schiuma. Nello stesso grafico è stata riportata anche una linea tratteggiata che rappresenta la temperatura di fusione T_{fus} di ogni paraffina. Come già detto nel *Paragrafo 2.3*, ogni paraffina ha una temperatura di fusione che varia all'interno di un determinato range. Si è deciso allora di riportare come temperatura di fusione quella che è indicata nel nome della paraffina stessa. Questi parametri sono stati riportati anche nei grafici che rappresentano l'intero processo, considerando quindi anche la fase di solidificazione.

Infine, per ogni prova sono state riportate le foto scattate all'istante iniziale $t = 0$ s e quelle che meglio rappresentavano l'avanzamento del fronte di fusione. In particolare, la seconda foto rappresenta il momento in cui inizia la fusione e l'ultima è stata scattata quando la paraffina è completamente fusa. Le foto non sono state scattate anche durante la fase di solidificazione perché, come già evidenziato da Pellizzari [36], non si ha un fronte di solidificazione che si sposta, ma solo un cambiamento di colore della paraffina che passa dall'essere trasparente ad assumere un colore bianco opaco. Questo è dovuto al fatto che la solidificazione inizia e si propaga in maniera uniforme nelle zone dove il modulo non è isolato: il vetro e la parte superiore.

3.2.1 Risultati delle prove sperimentali con schiume in rame

In questo paragrafo sono riportati i grafici che rappresentano il comportamento delle paraffine all'interno delle schiume metalliche in rame. Essendo gli andamenti molti simili tra loro è possibile riassumere in maniera generale il fenomeno. Osservando le foto si può notare che, ad un determinato istante di tempo (che dipende dal tipo di paraffina, dalla schiuma e dal flusso termico) il *PCM* inizia a fondere, diventando trasparente. All'avanzare del tempo t , il fronte di fusione si sposta da sinistra, dove è presente il lato riscaldato, verso destra, fino al lato adiabatico a fusione completa. In alcuni casi si nota che il fronte non è perfettamente parallelo rispetto alle piastre in rame. Questo fenomeno può essere dovuto al fatto che il modulo non è chiuso nella parte superiore e quindi non è adiabatico verso l'esterno. Per lo stesso motivo,

essendo il modulo scoperto nella parte superiore, può avvenire che la paraffina liquida si porti al di sopra di quella ancora solida. In questo modo il PCM allo stato liquido riscalda la parte solida, spostando il fronte di fusione. Per ogni schiuma si è verificato che il riscaldamento fosse uniforme ed è stato rappresentando l'andamento delle temperature TC_{risc} durante il processo di fusione (*Figura 3.4, Figura 3.32*). Una volta fatto ciò, è possibile rappresentare la temperatura media del lato riscaldato in funzione del tempo T_{risc} . Osservando l'andamento di quest'ultimo parametro durante la fase di fusione si nota che, dopo un primo tratto, la pendenza diminuisce leggermente. Questo è dovuto al fatto che, dopo un certo periodo di tempo, la paraffina inizia a fondere e a sfruttare il calore latente e non più sensibile. È possibile vedere meglio questo andamento nel caso delle temperature misurate dalle termocoppie inguainate in inox, poste all'interno del PCM. In questo caso si nota che dopo un certo tempo t la pendenza della curva diminuisce, indicando che la paraffina ha iniziato a fondere, scambiando calore latente e non più sensibile. Successivamente la pendenza aumenta nuovamente: questo è dovuto al fatto che, in corrispondenza del punto in cui sono posizionate le termocoppie (al centro della schiuma) è avvenuta la fusione completa e di conseguenza la paraffina inizia a scambiare nuovamente calore sensibile. Da un punto di vista termodinamico ci si aspetterebbe che durante il cambiamento di fase vi sia un tratto orizzontale con temperatura costante e c_p infinito. Tuttavia, all'interno della schiuma, si ha in ogni istante cambiamento di fase e surriscaldamento della paraffina già fusa. Per questo motivo durante la fase di fusione l'andamento non è perfettamente orizzontale ma si ha una variazione di pendenza.

È possibile anche rappresentare gli andamenti della temperatura del lato riscaldato T_{risc} e del PCM ($T_{PCM,t}$, $T_{PCM,m}$, $T_{PCM,b}$) in funzione del tempo t durante tutto il processo, considerando anche la fase di solidificazione. Dopo un primo tratto in cui la paraffina liquida si raffredda, scambiando calore sensibile con l'ambiente, si nota che la pendenza della curva cambia in corrispondenza della temperatura di solidificazione. Questo è dovuto al fatto che, durante il cambiamento di fase, la paraffina inizia a scambiare calore latente e non più solo sensibile con l'ambiente esterno. Inoltre, si ha che il processo di solidificazione è molto più lento rispetto alla fase di fusione: in questo caso il modulo scambia calore con l'ambiente esterno, portandosi all'equilibrio termico. Come già evidenziato, si ha che durante la solidificazione il processo è uniforme e non si ha un vero e proprio fronte, ma un progressivo cambiamento di fase che inizia dal vetro e dalla parte superiore e procede verso l'interno del modulo, infatti queste due regioni non sono isolate rispetto all'ambiente esterno.

Di particolare interesse è il caso della paraffina RT64HC. Questa paraffina presenta un calore latente molto più elevato rispetto alle altre due (*Tabella 2.2*) e si ha inoltre un diverso comportamento durante la fase di solidificazione. Come si nota dai grafici, si ha che intorno ai 60° C la temperatura del PCM aumenta invece che diminuire, per poi ricominciare a scendere dopo un certo intervallo di tempo. Questo comportamento potrebbe essere dovuto alla struttura molecolare stessa della paraffina. Per spiegare questo fenomeno si può osservare i grafici che rappresentano l'andamento delle entalpie specifiche in fase di fusione e di solidificazione per diverse temperature (*Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3*) [35]. La paraffina RT64HC ha una diversa distribuzione delle entalpie specifiche: mentre nel caso della RT42 e della RT55 si ha che durante la solidificazione l'entalpia specifica decresce costantemente al diminuire della temperatura, nel caso della RT64HC si ha che l'entalpia diminuisce nell'intervallo compreso tra 62 e 63° C per poi aumentare per una temperatura di 61° C.

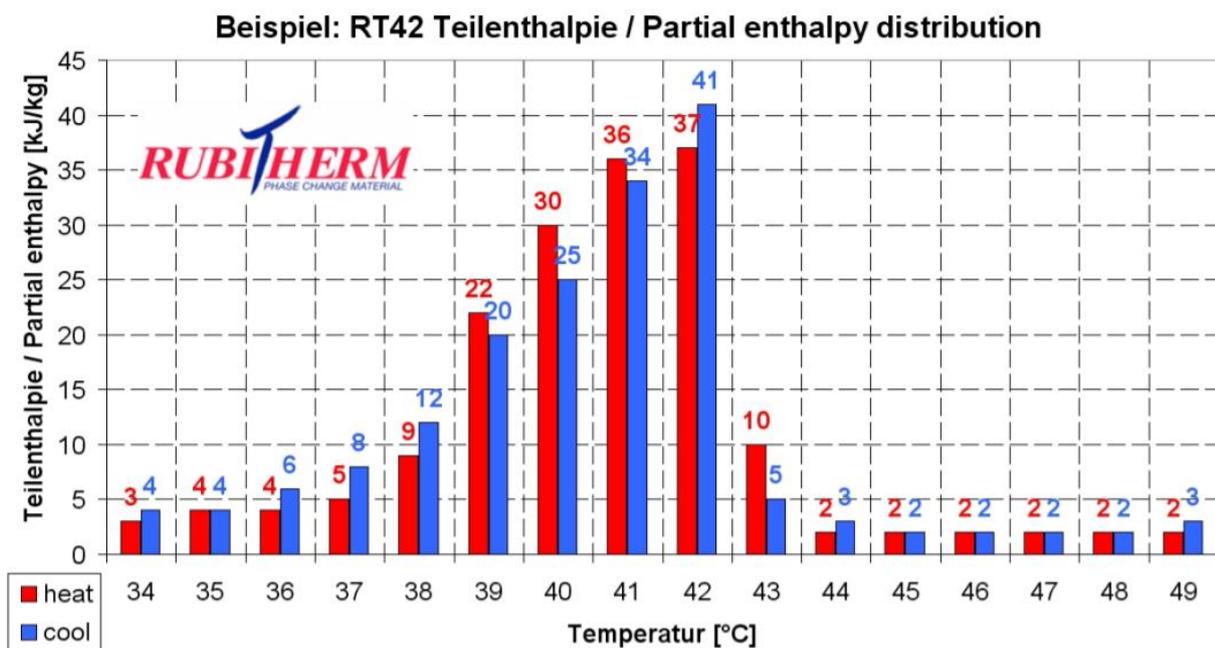


Figura 3.1: entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT42 [35].

Beispiel: RT55 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution

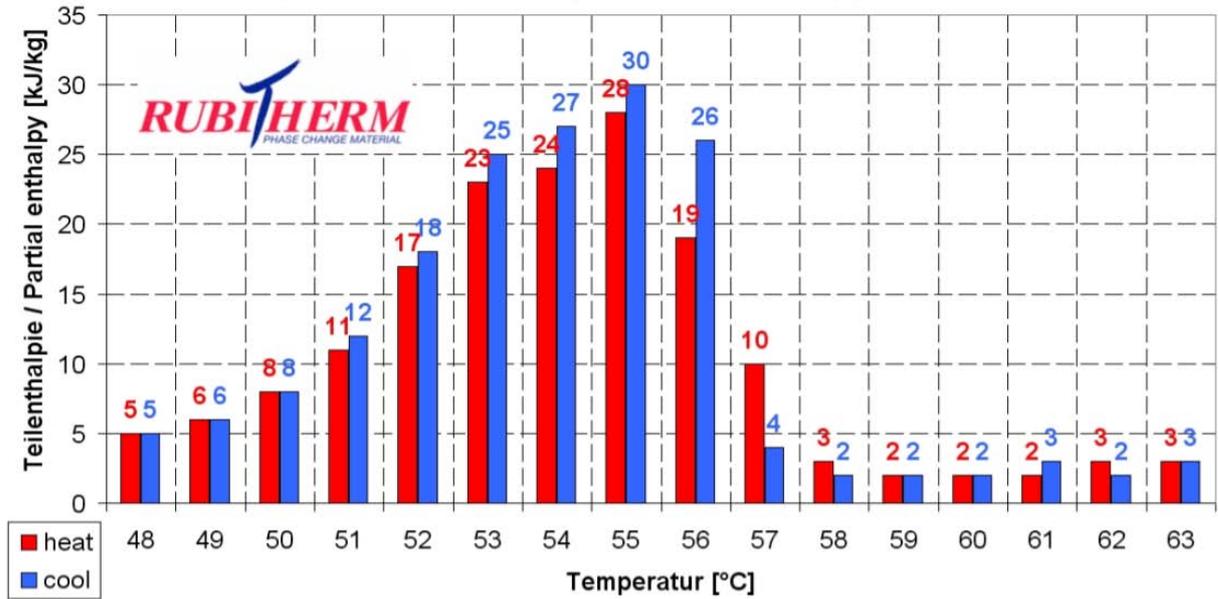


Figura 3.2: entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT55 [35].

Beispiel: RT64HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution

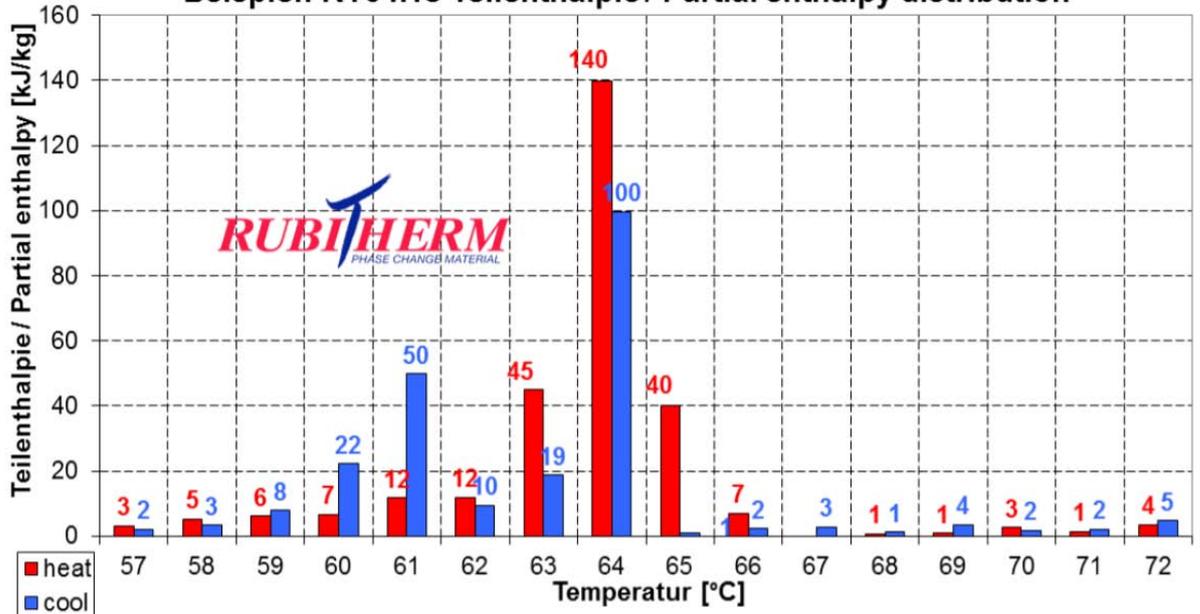


Figura 3.3: entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT64HC [35].

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT42 e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.4:* andamento delle termocoppie poste nel lato riscaldato nel processo di fusione;
- *Figura 3.5:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.6:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.7:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1.*

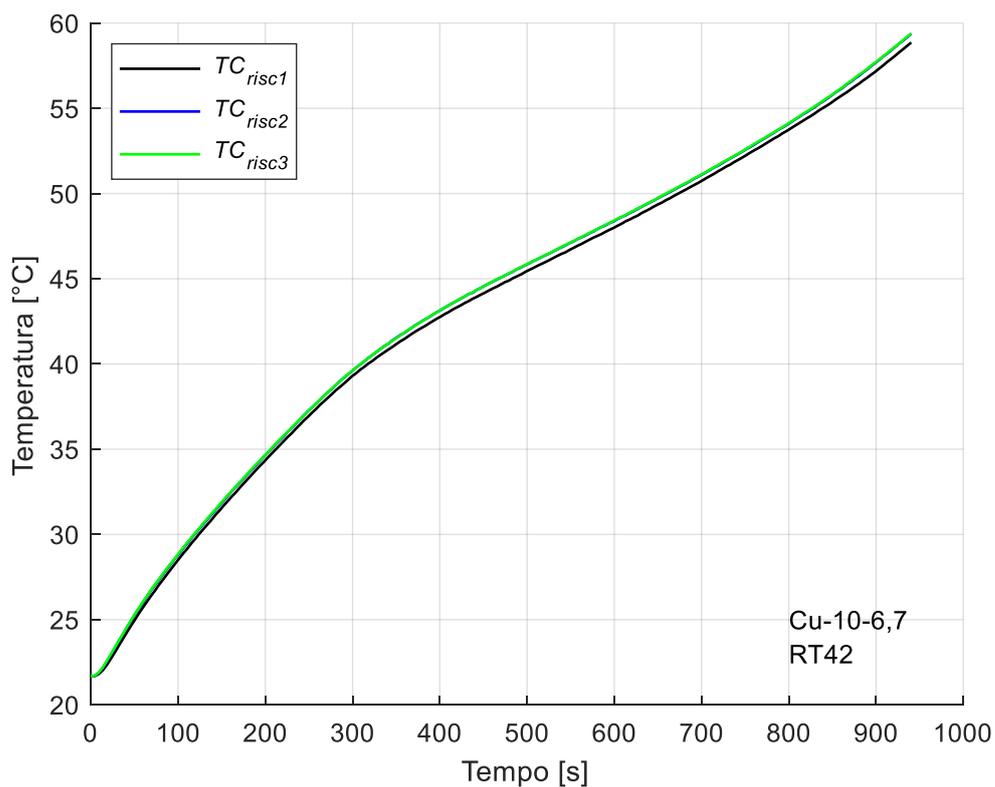


Figura 3.4: temperature misurate dalle termocoppie poste sul lato riscaldato durante la fase di fusione.

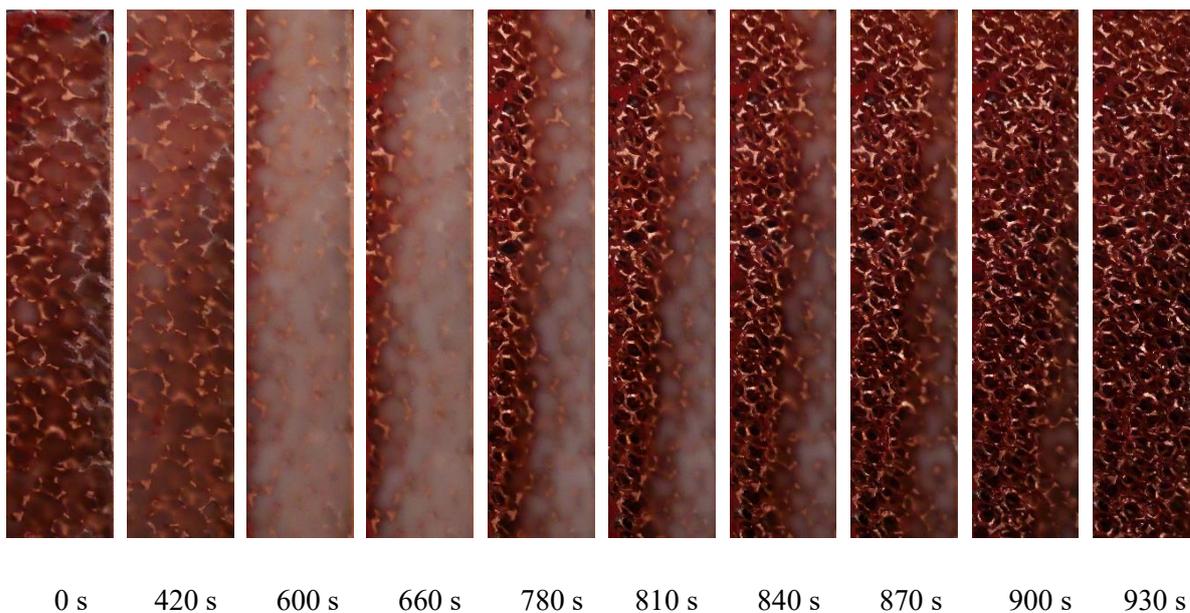


Figura 3.5: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

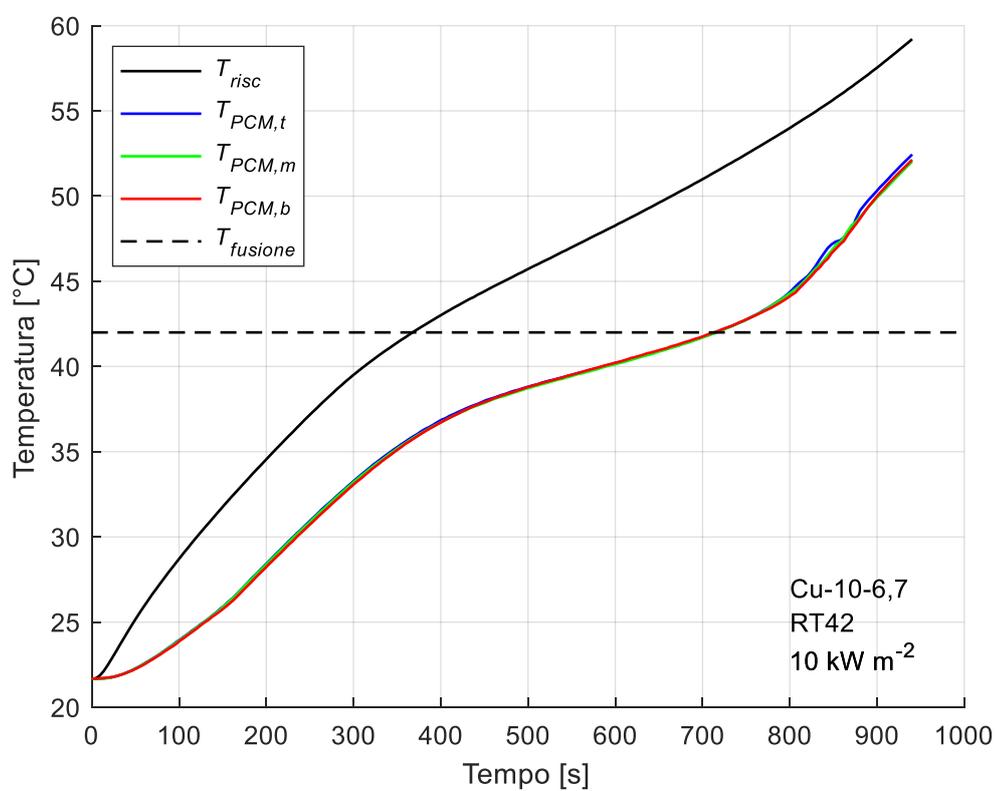


Figura 3.6: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

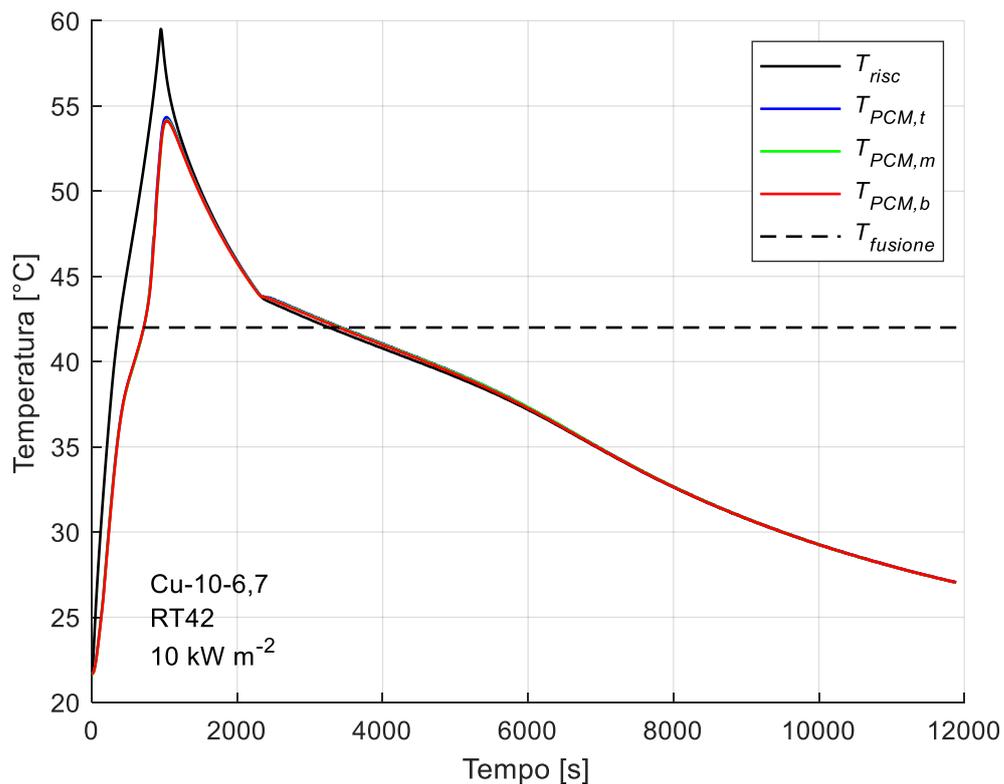


Figura 3.7: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT42 e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.8:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.9:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.10:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

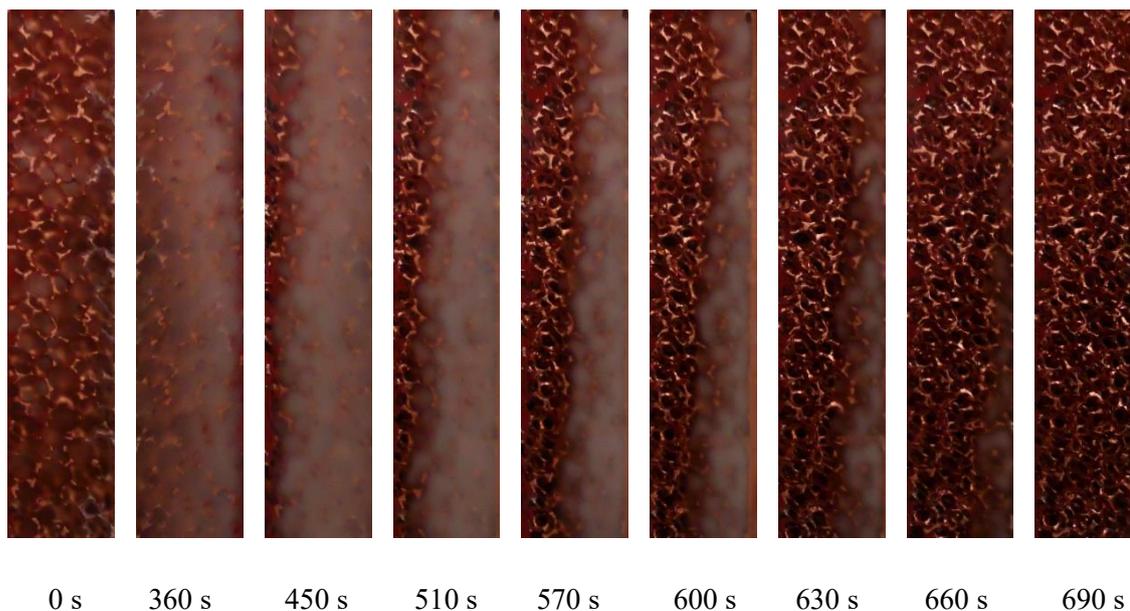


Figura 3.8: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

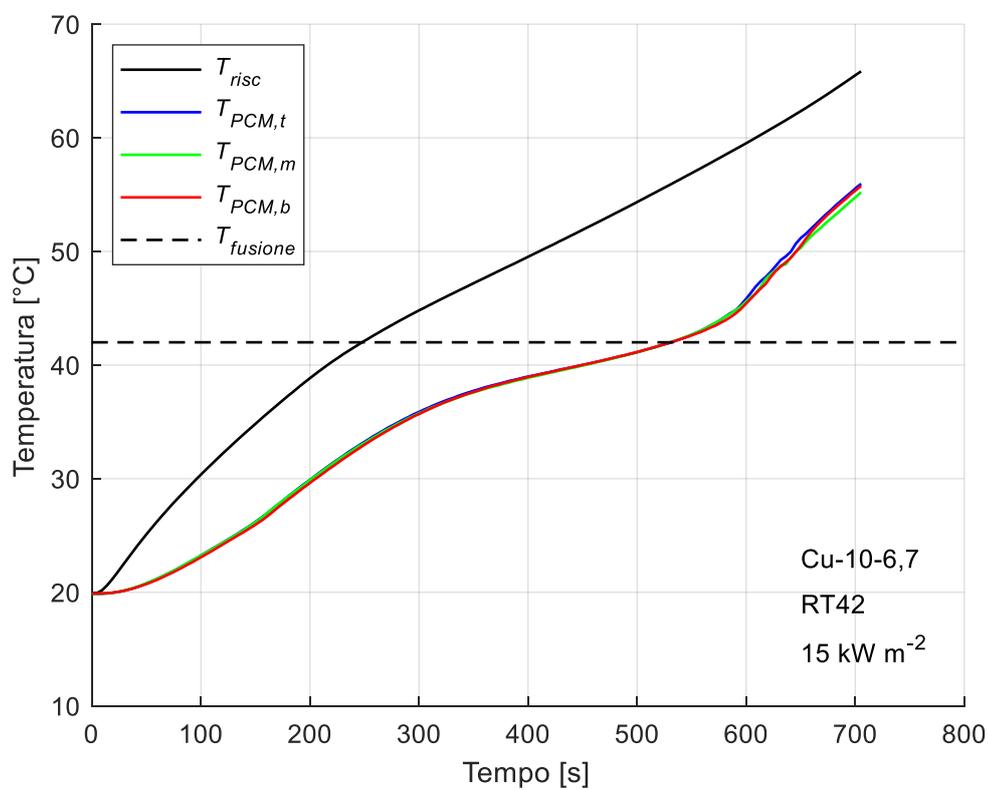


Figura 3.9: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

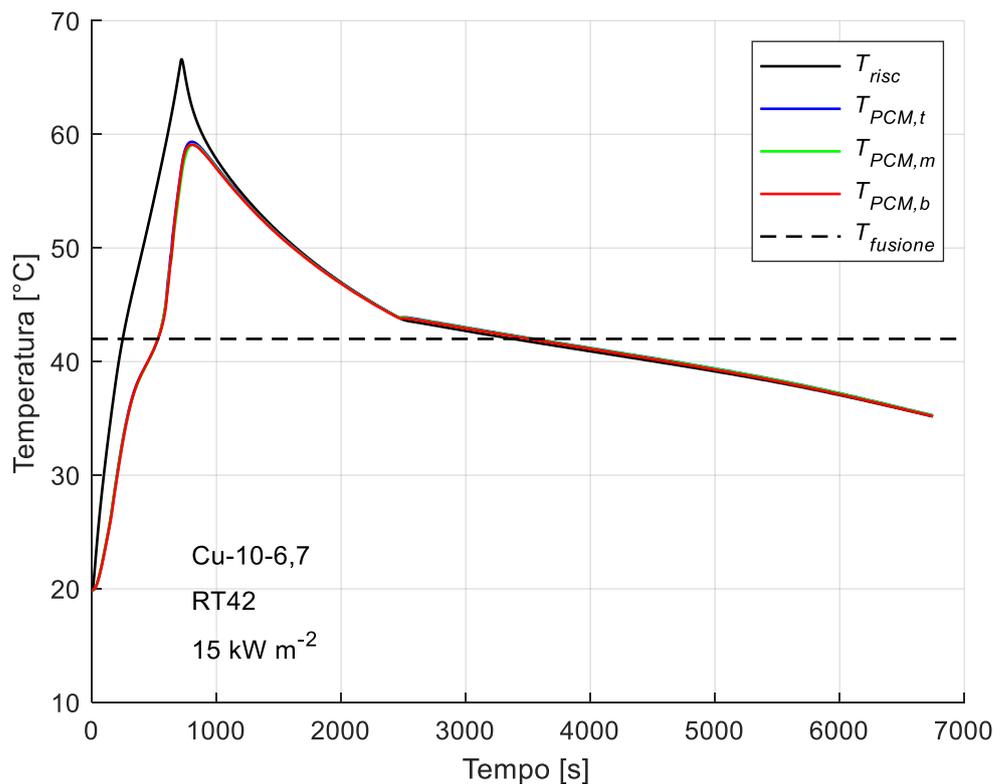


Figura 3.10: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT42 e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.11:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.12:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.13:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

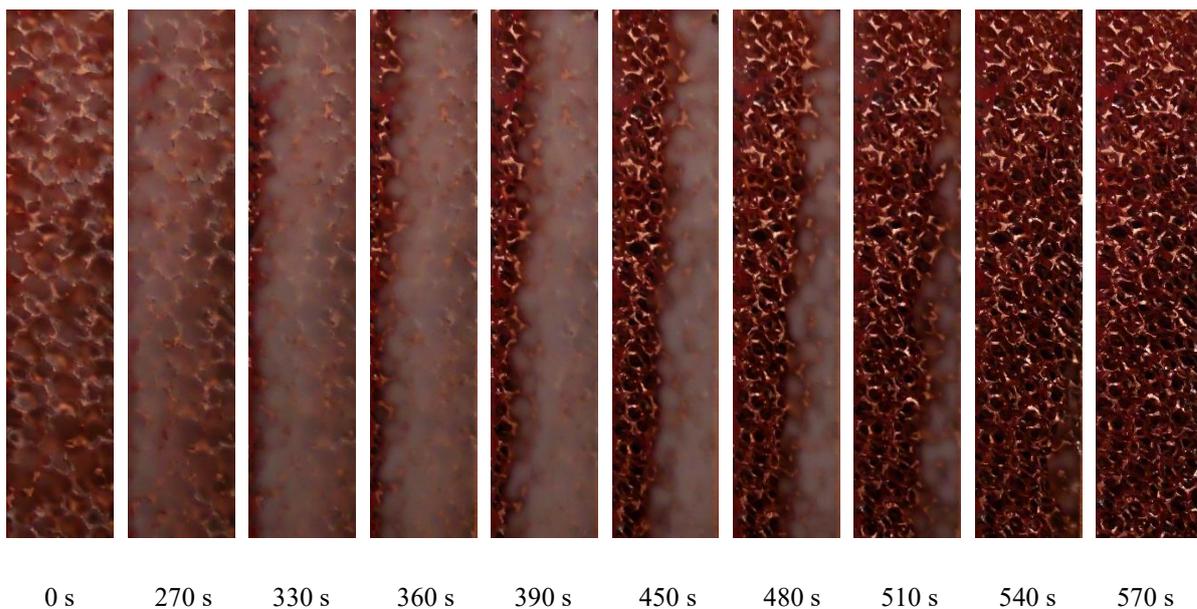


Figura 3.11: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

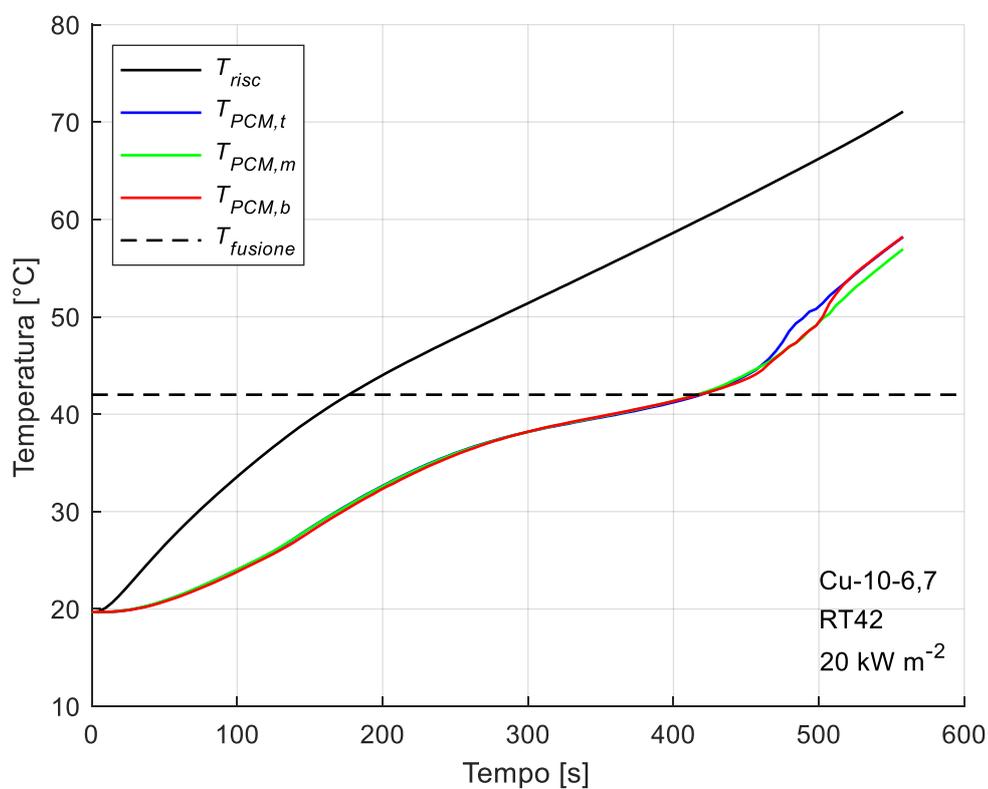


Figura 3.12: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

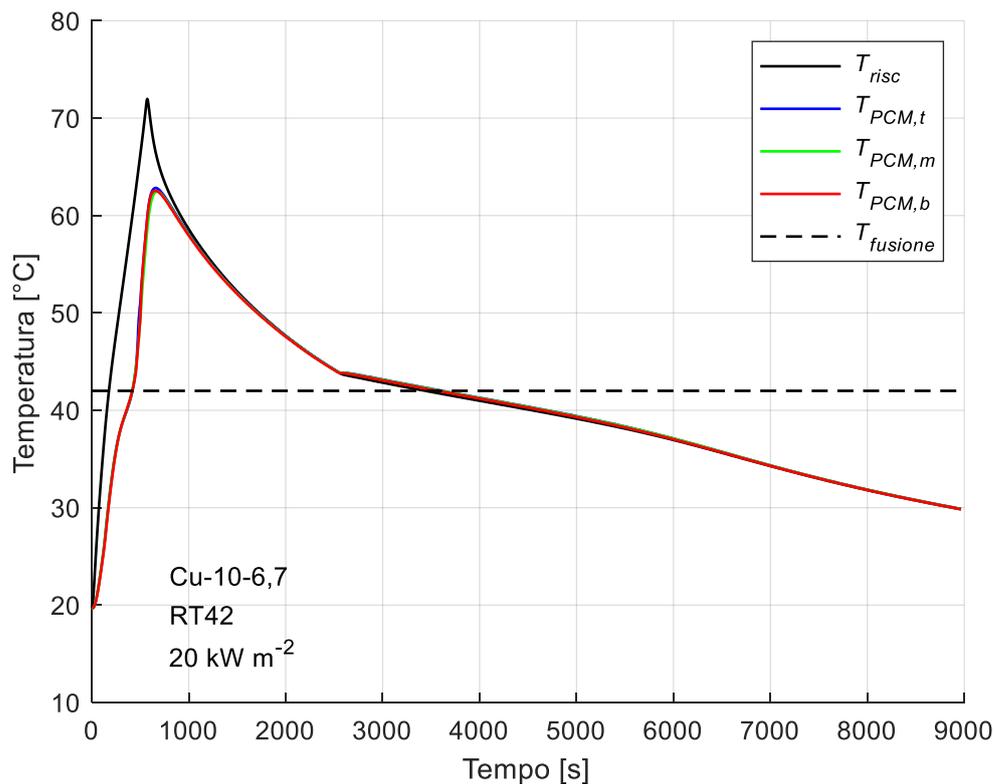


Figura 3.13: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT55 e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.14:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.15:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.16:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

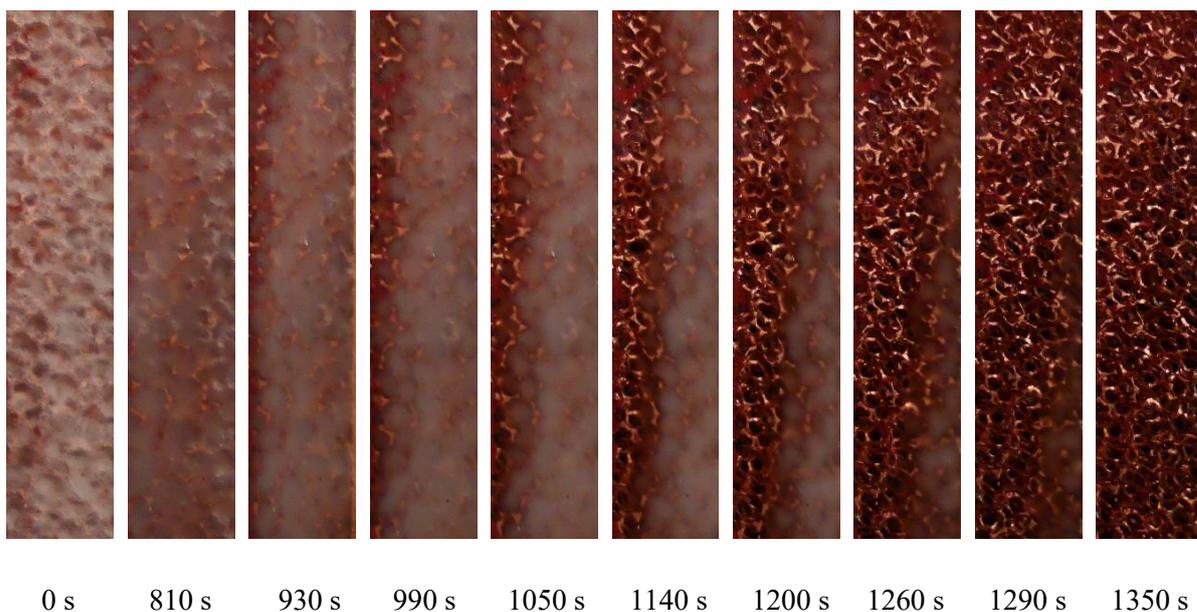


Figura 3.14: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

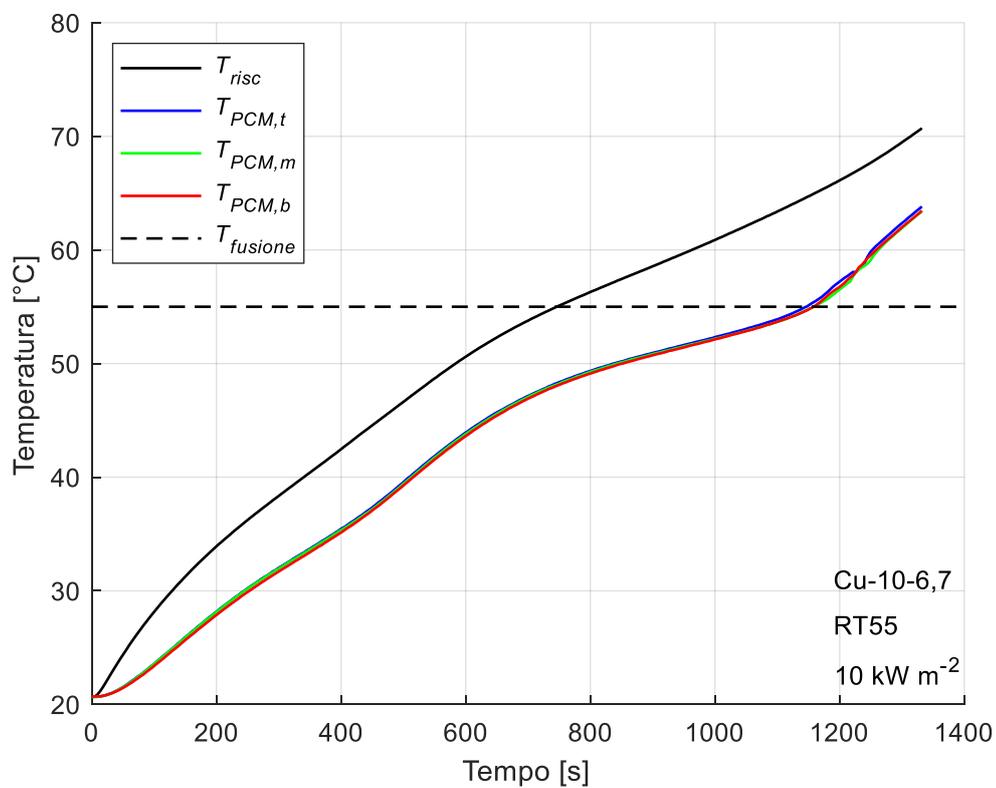


Figura 3.15: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

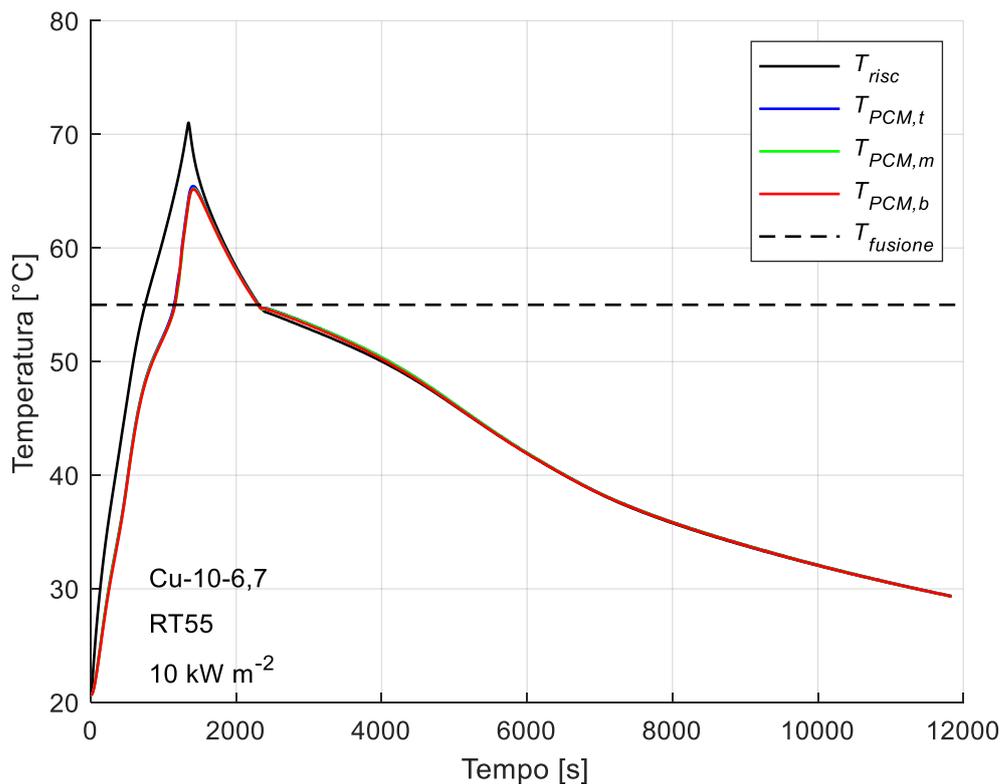


Figura 3.16: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT55 e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.17:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.18:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.19:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

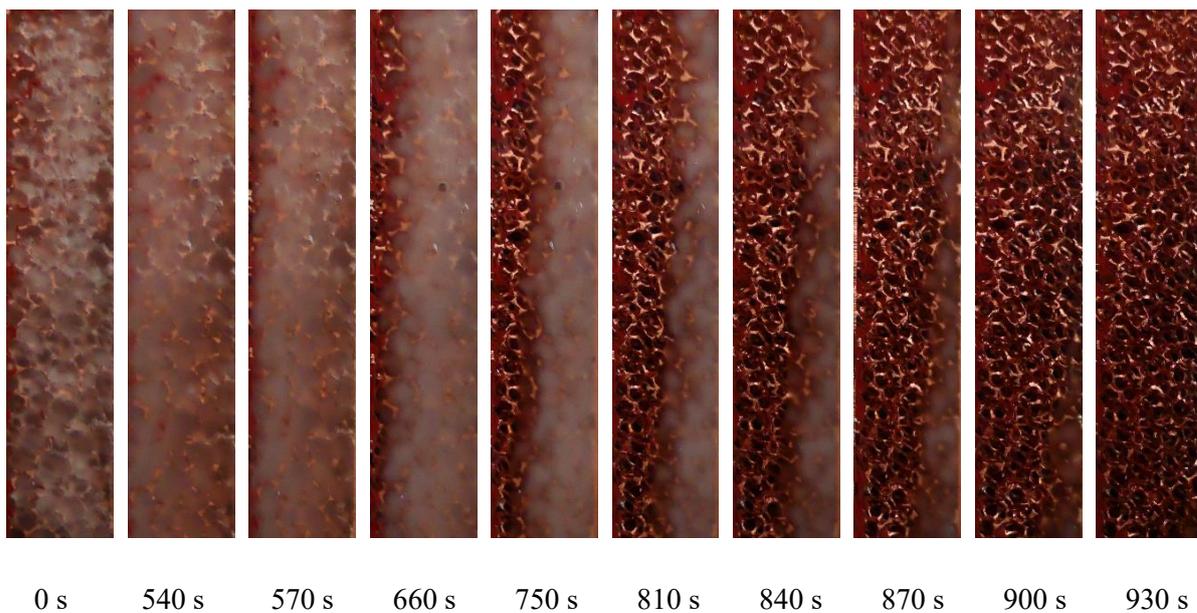


Figura 3.17: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W

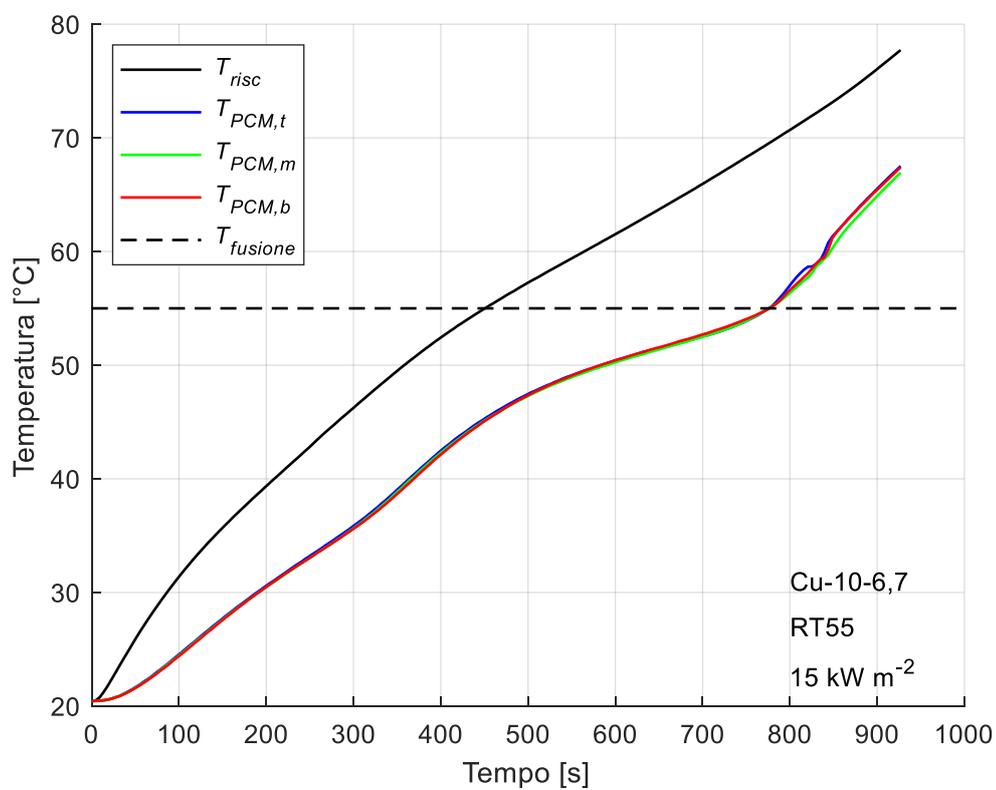


Figura 3.18: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

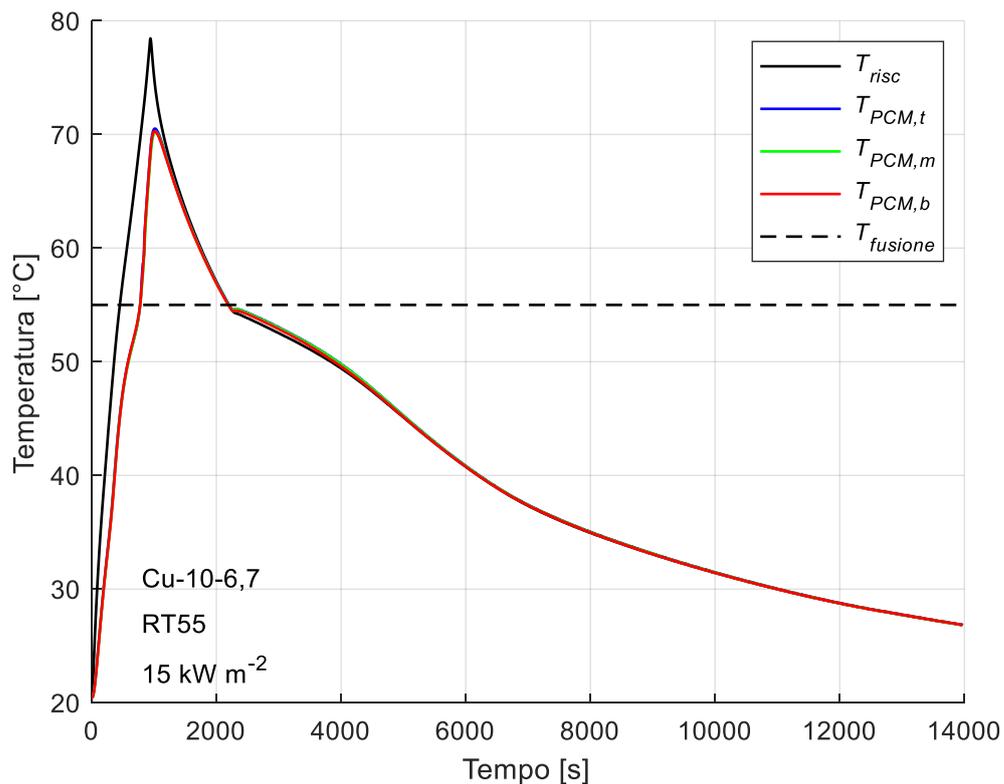


Figura 3.19: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT55 e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.20:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.21:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.22:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

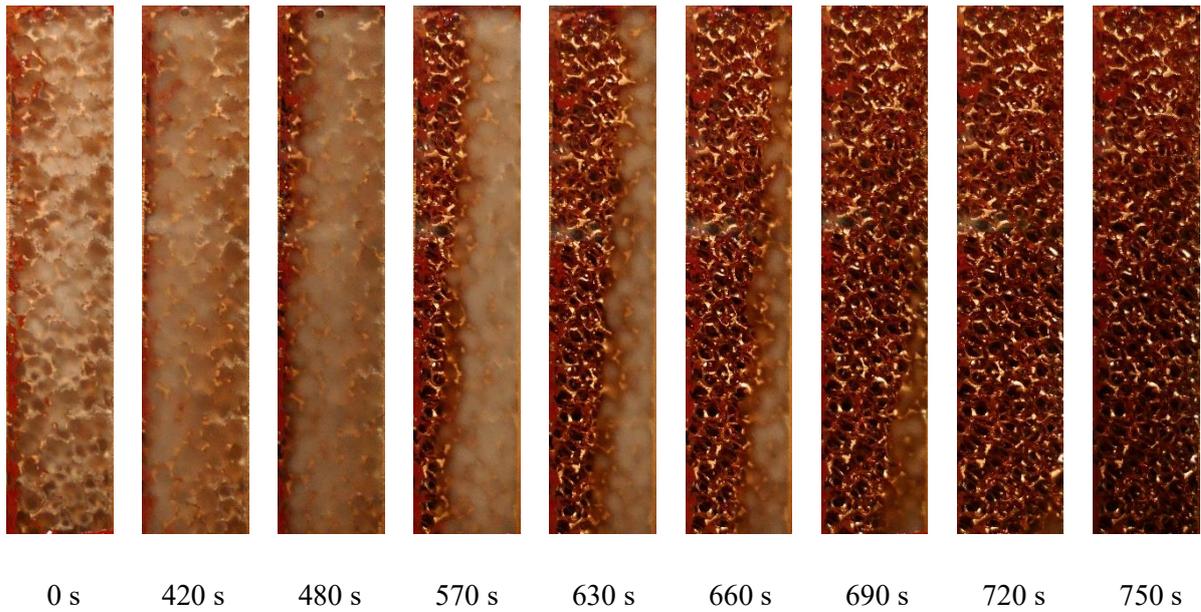


Figura 3.20: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

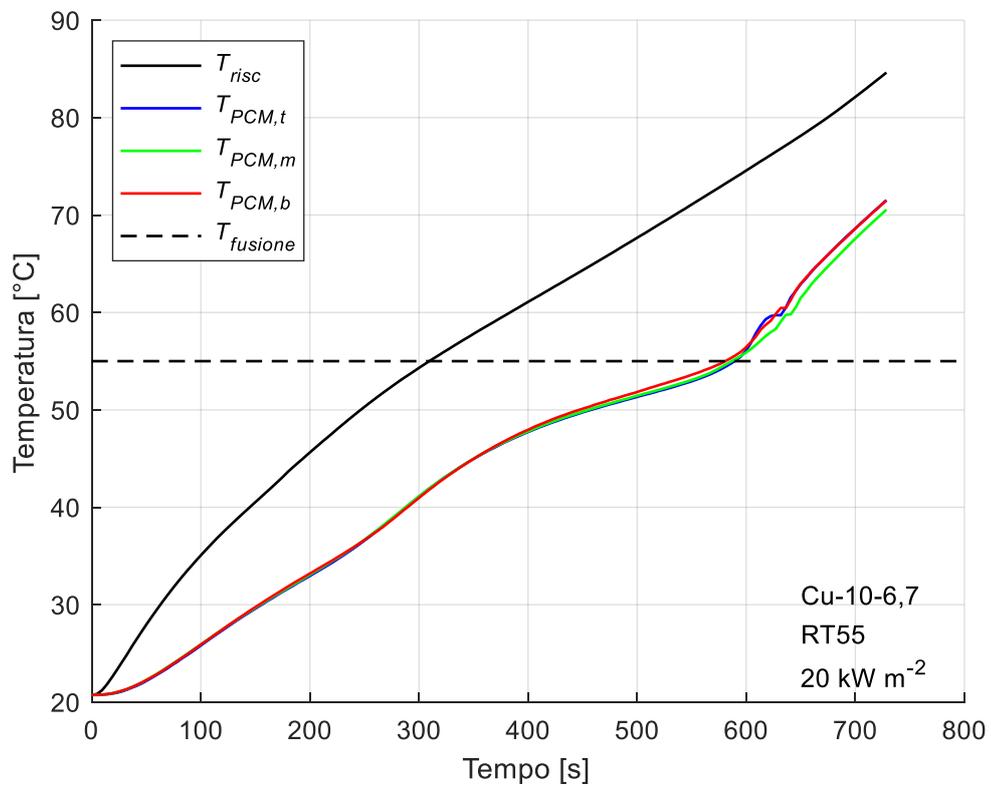


Figura 3.21: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

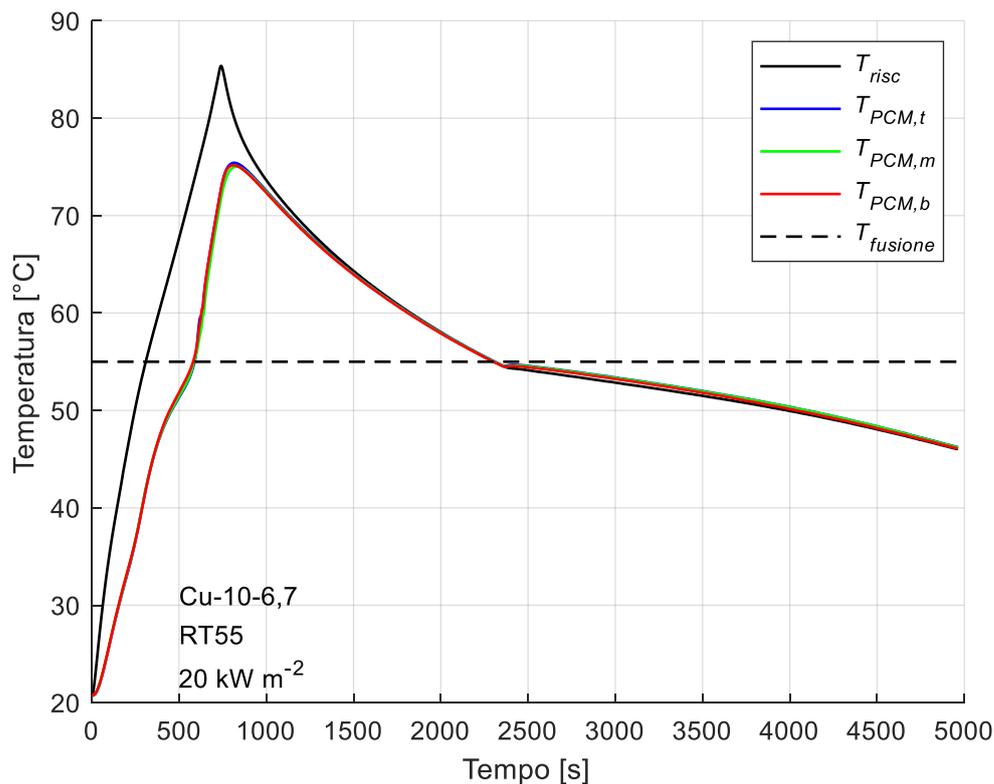


Figura 3.22: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.23:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.24:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.25:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

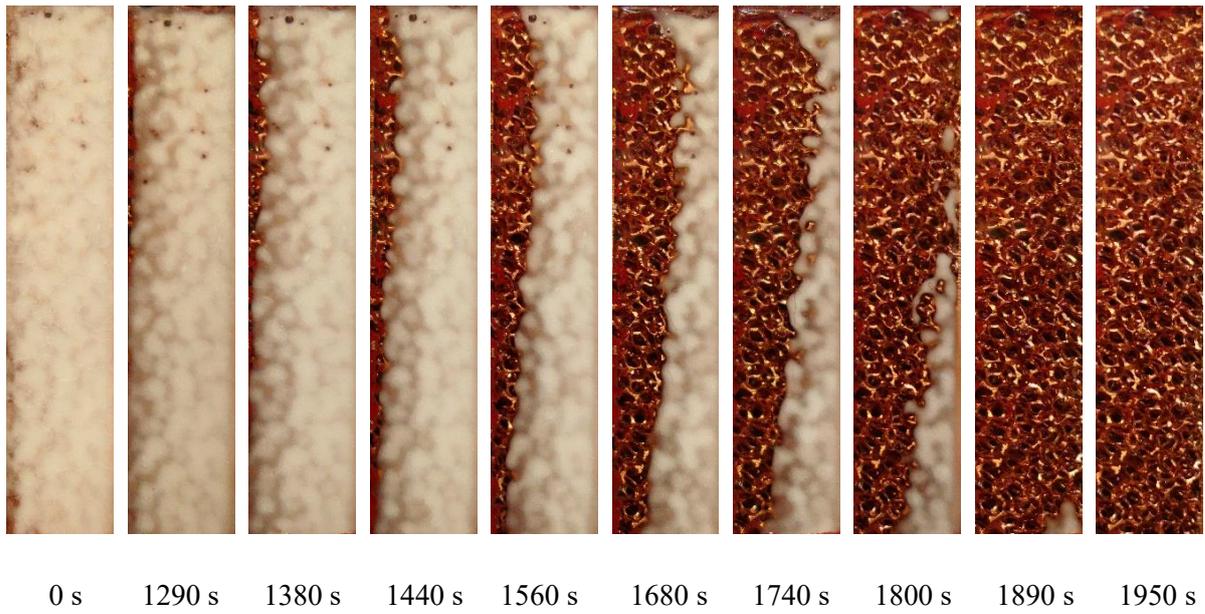


Figura 3.23: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

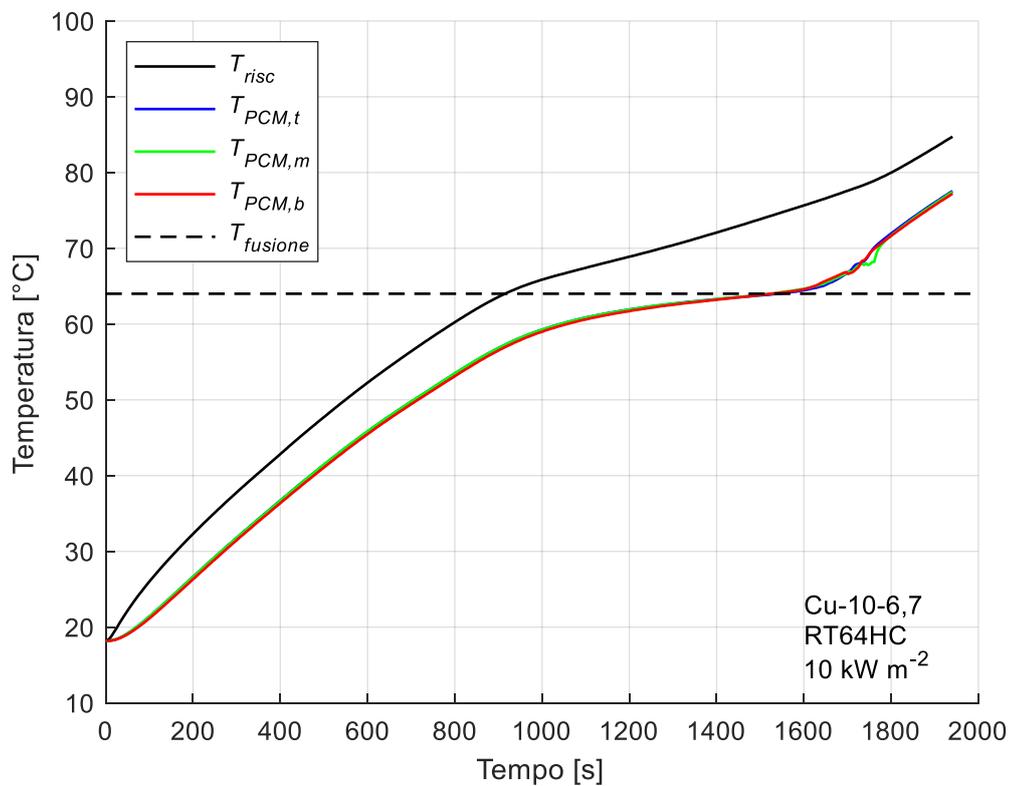


Figura 3.24: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

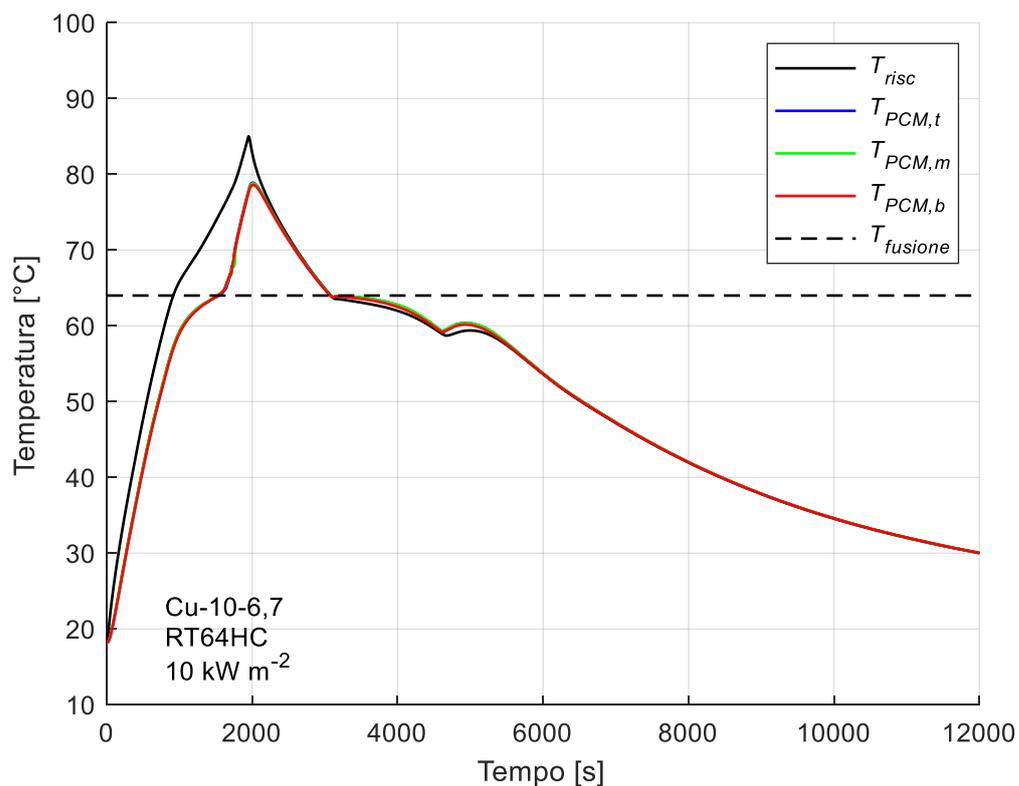


Figura 3.25: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.26:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.27:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.28:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

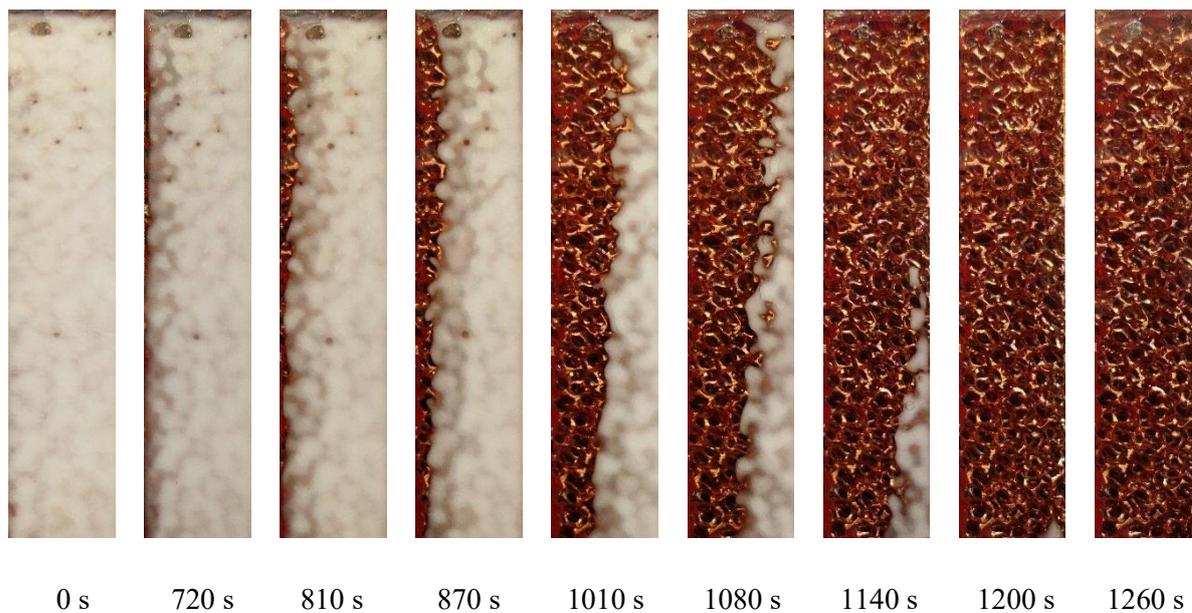


Figura 3.26: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

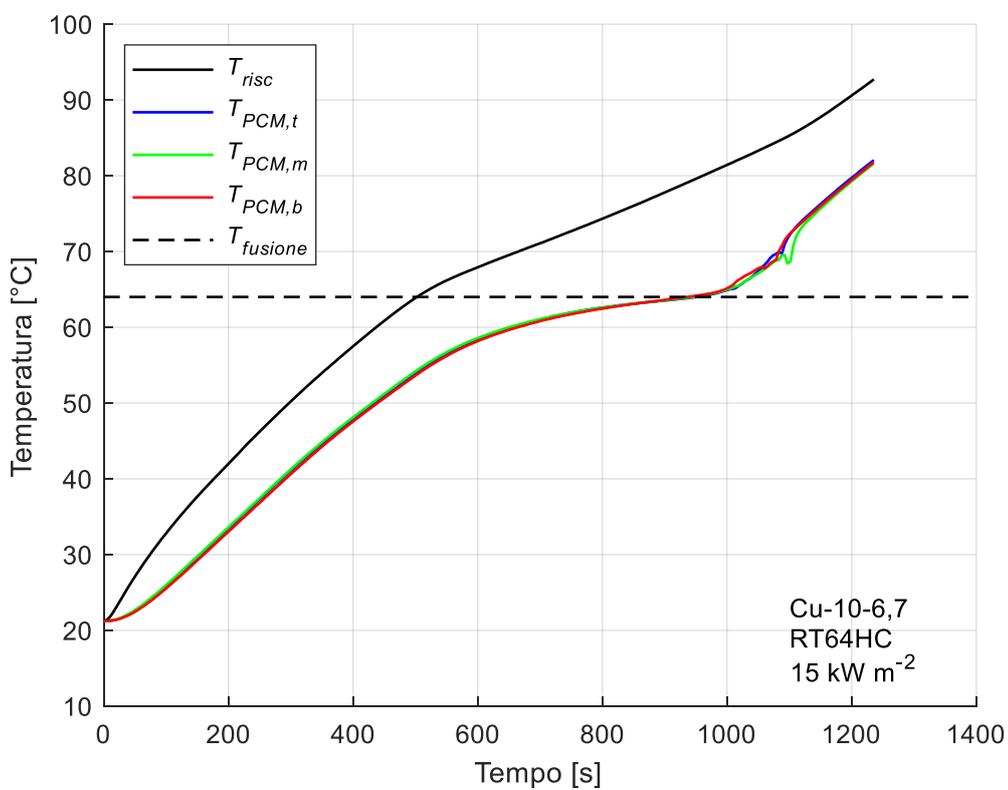


Figura 3.27: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

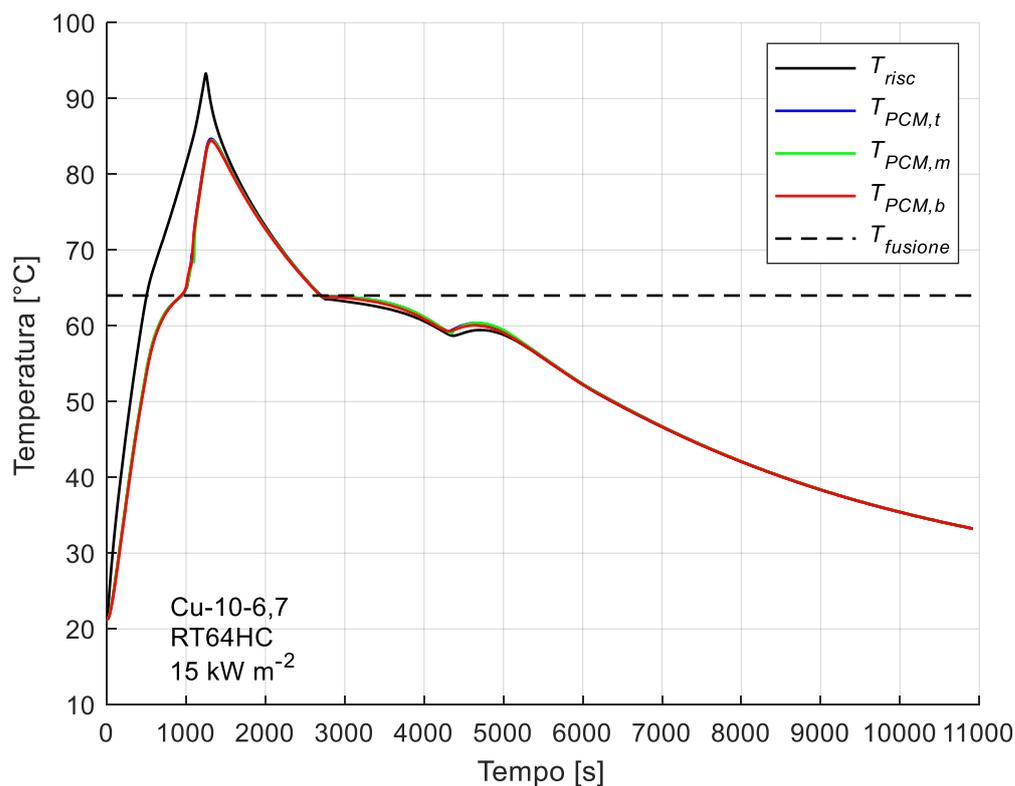


Figura 3.28: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.29:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.30:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.31:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

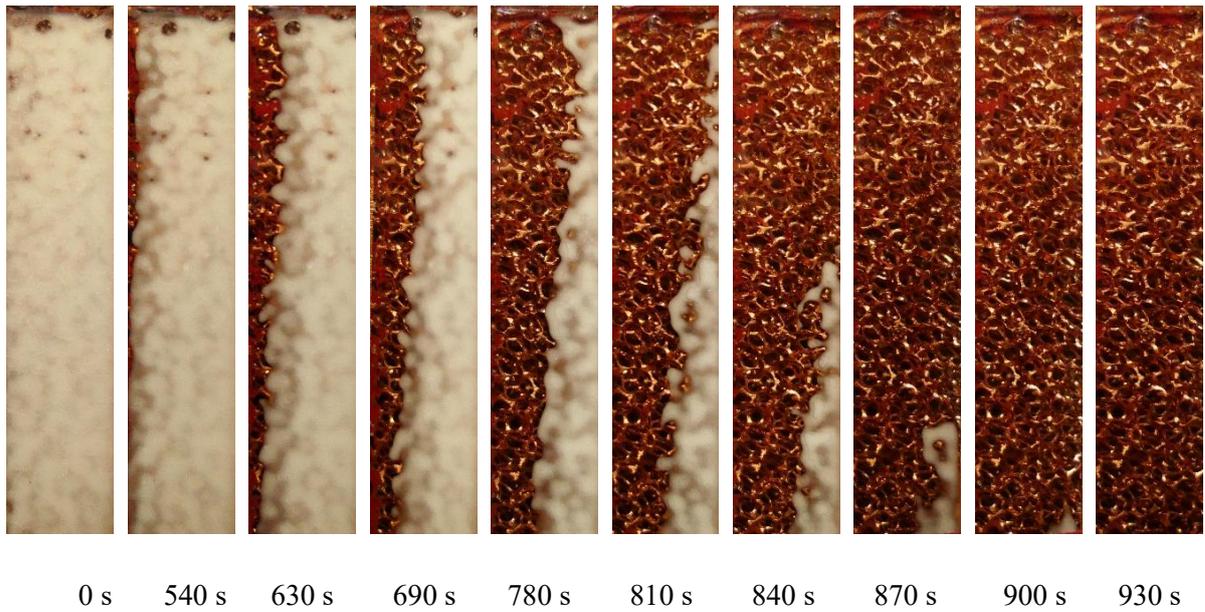


Figura 3.29: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

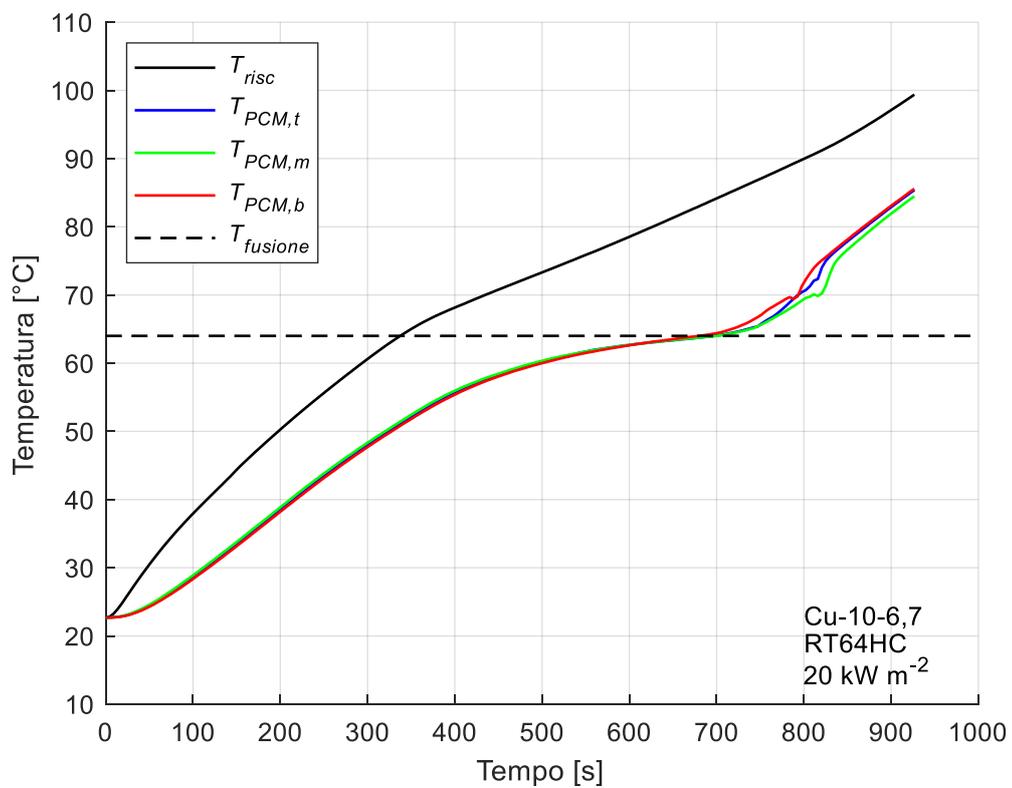


Figura 3.30: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

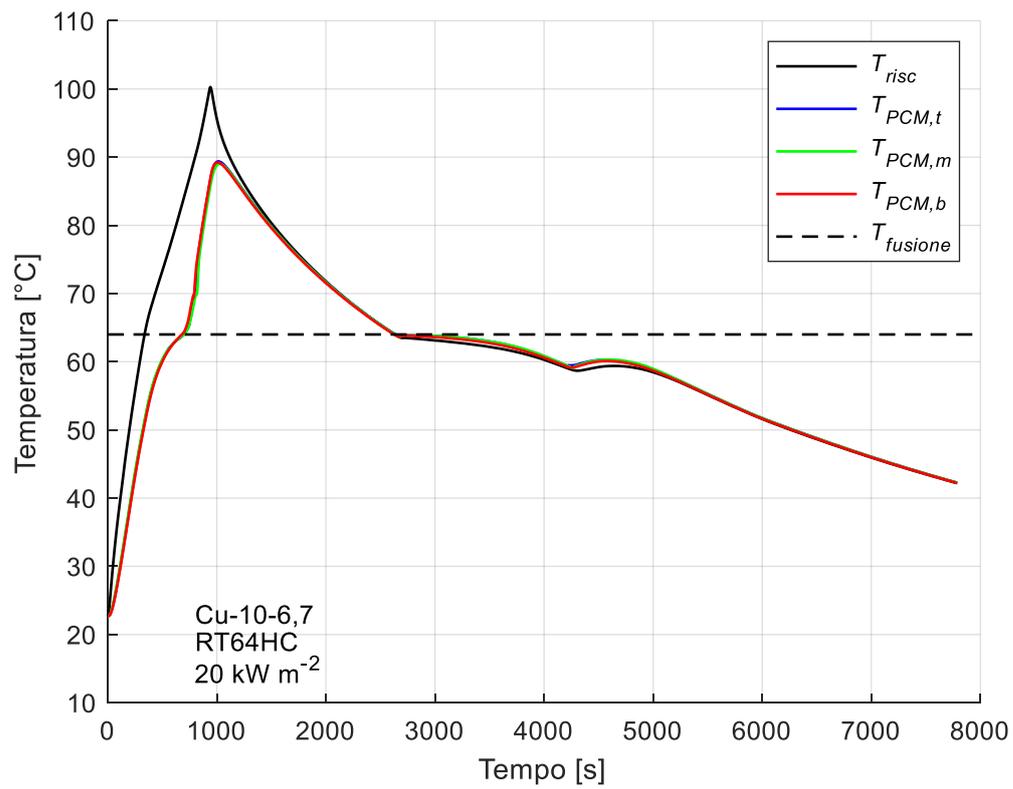


Figura 3.31: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT42 e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.32*: andamento delle termocoppie poste nel lato riscaldato nel processo di fusione
- *Figura 3.33*: fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.34*: andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.35*: andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*.

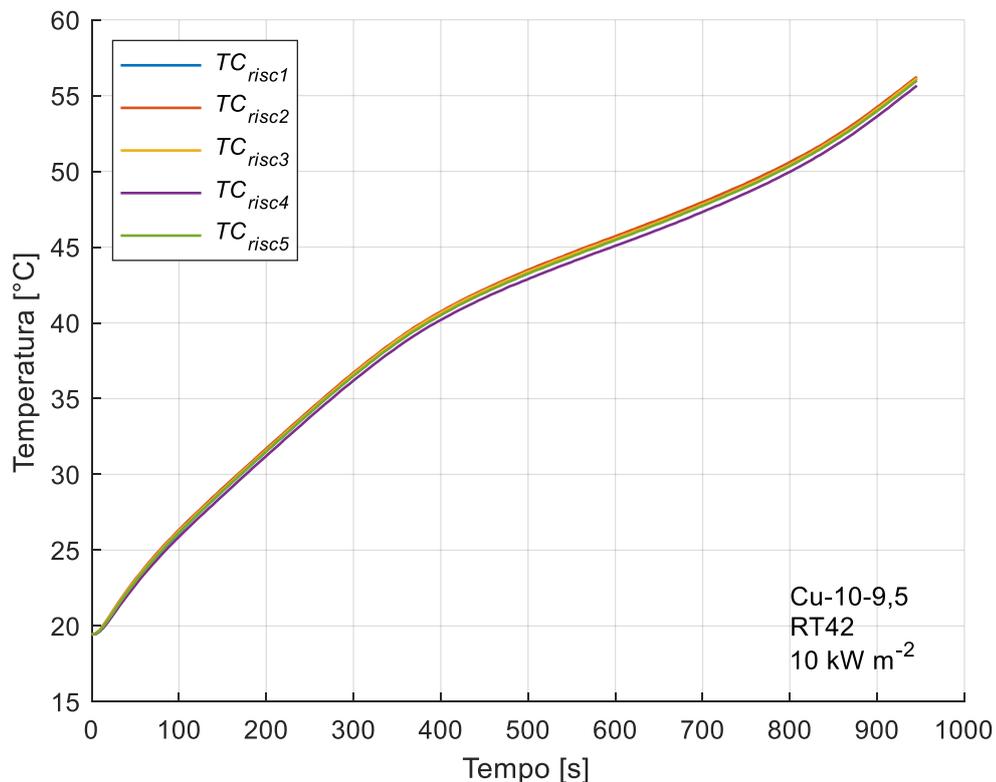


Figura 3.32: Temperature misurate dalle termocoppie poste sul lato riscaldato durante la fase di fusione.

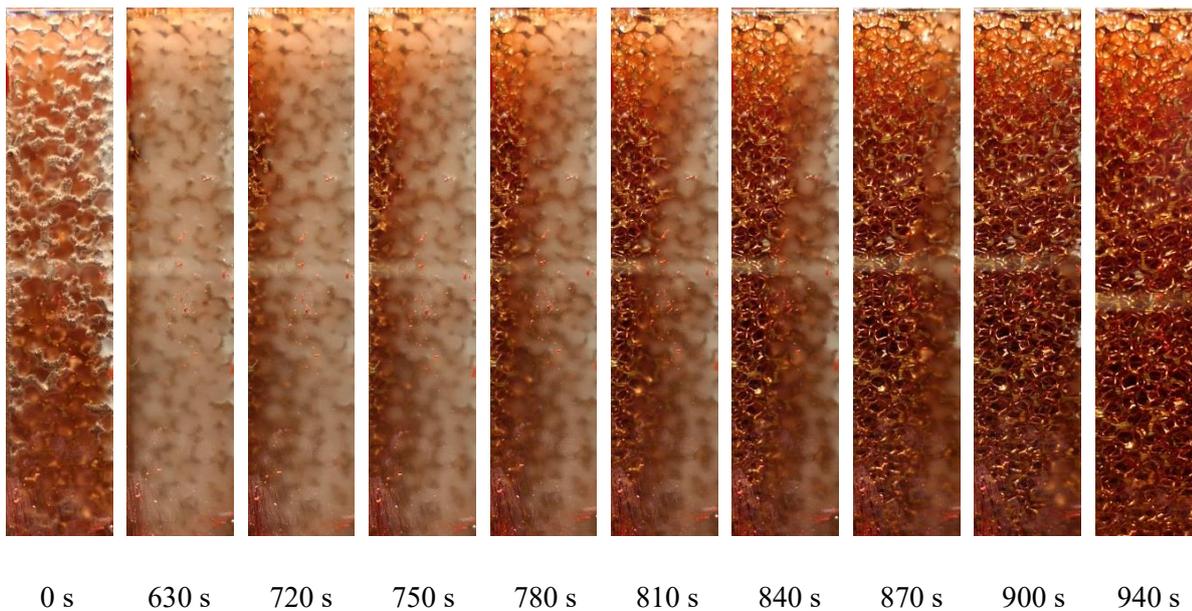


Figura 3.33: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

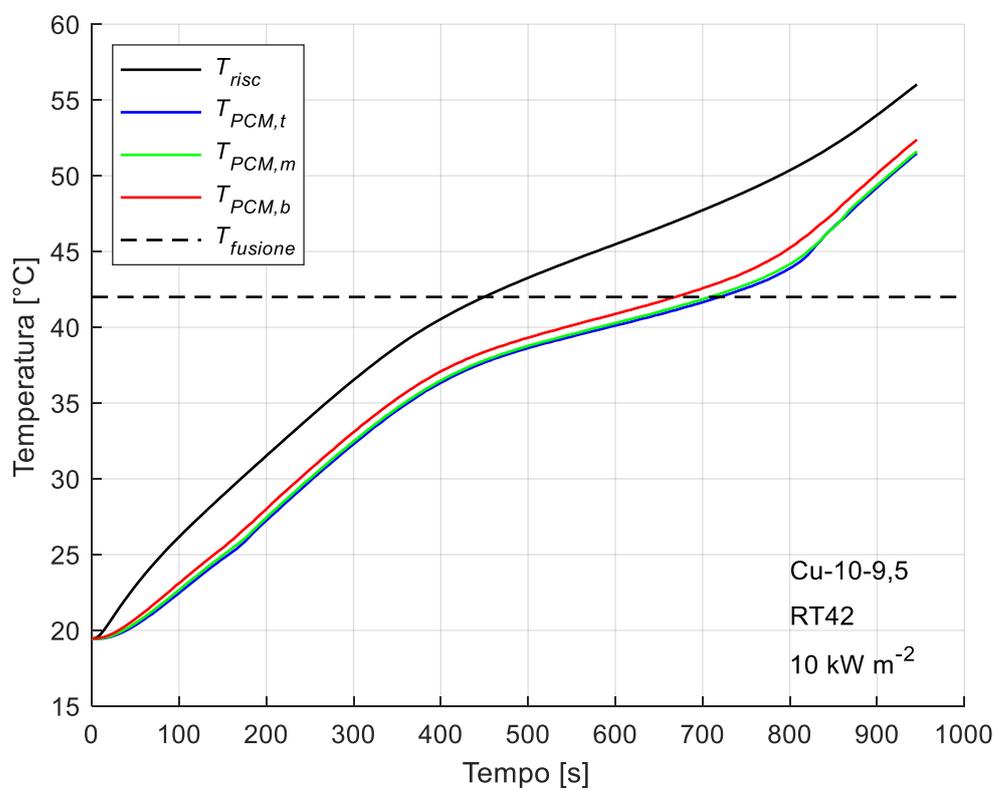


Figura 3.34: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

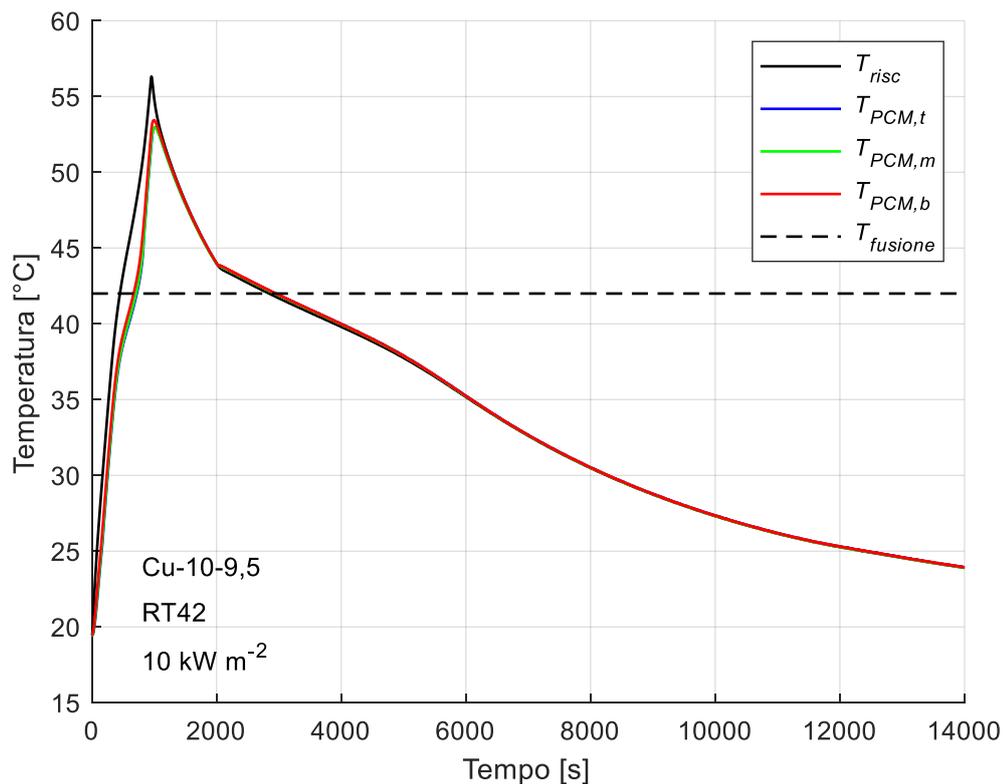


Figura 3.35: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT42 e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.36:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.37:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.38:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

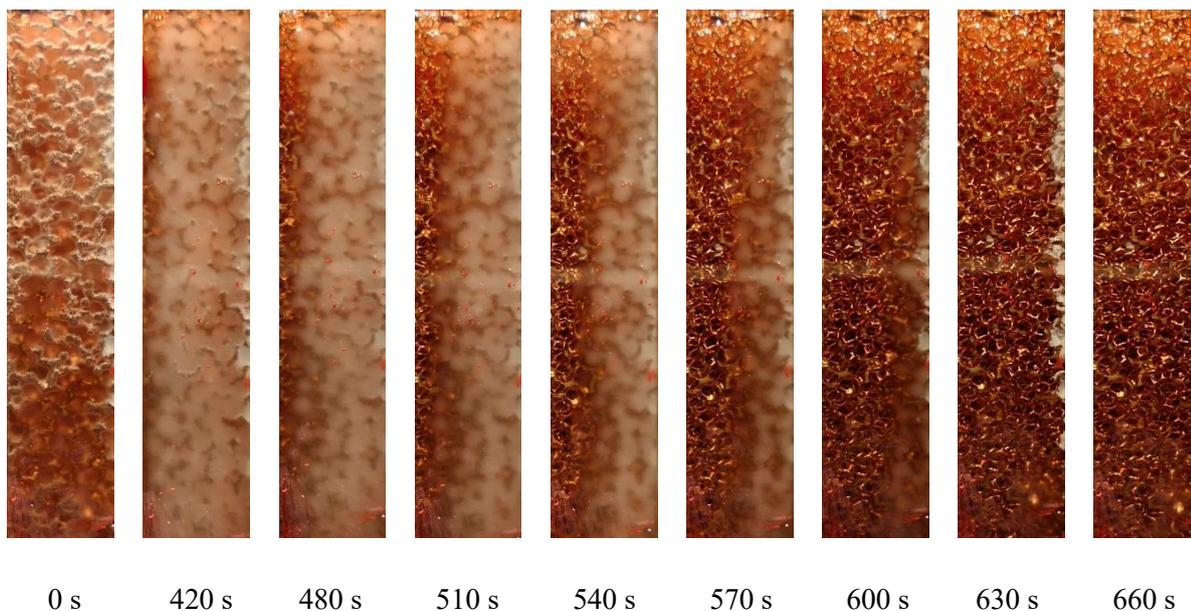


Figura 3.36: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

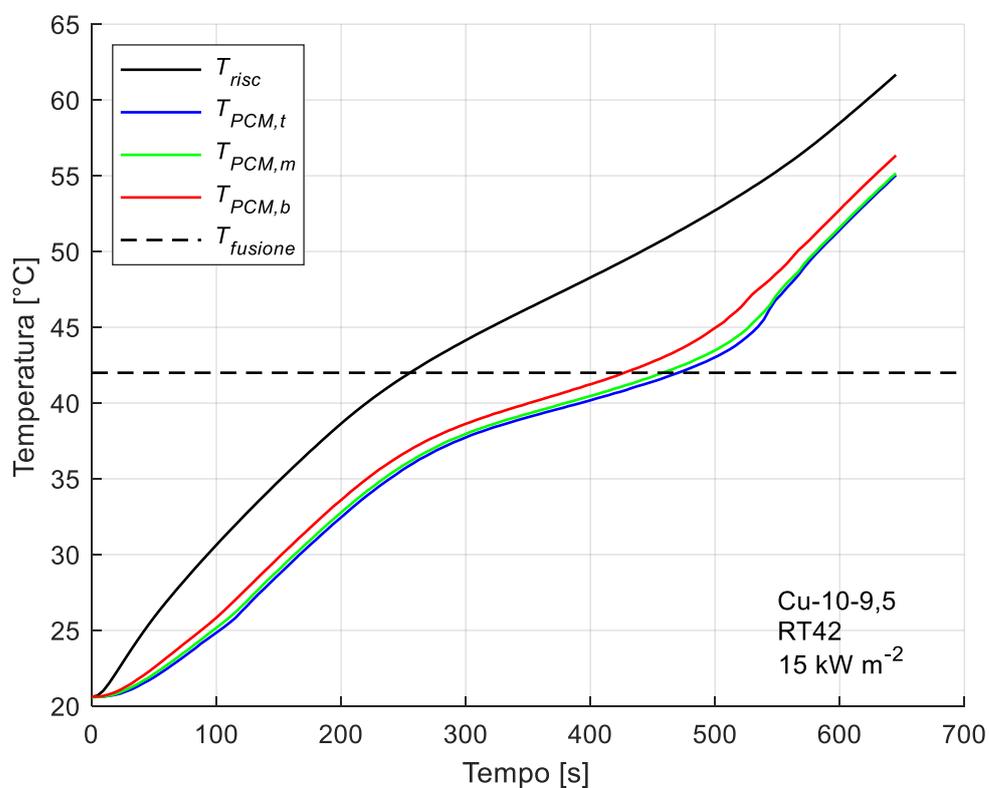


Figura 3.37: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

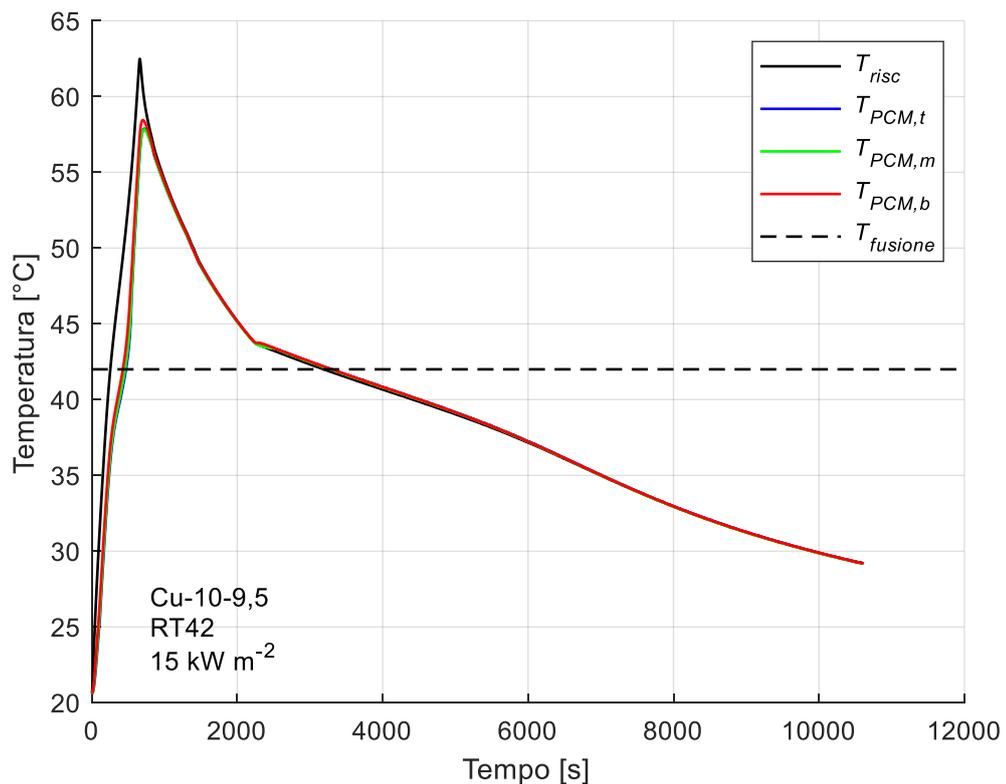


Figura 3.38: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT42 e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.39:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.40:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.41:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

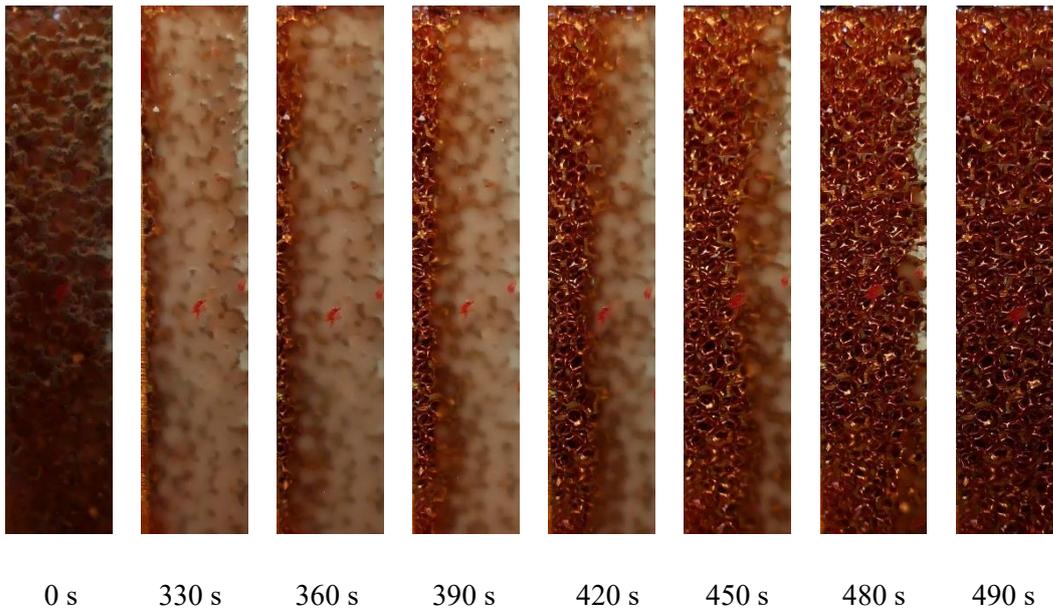


Figura 3.39: Fronte di fusione della paraffina RT42 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W

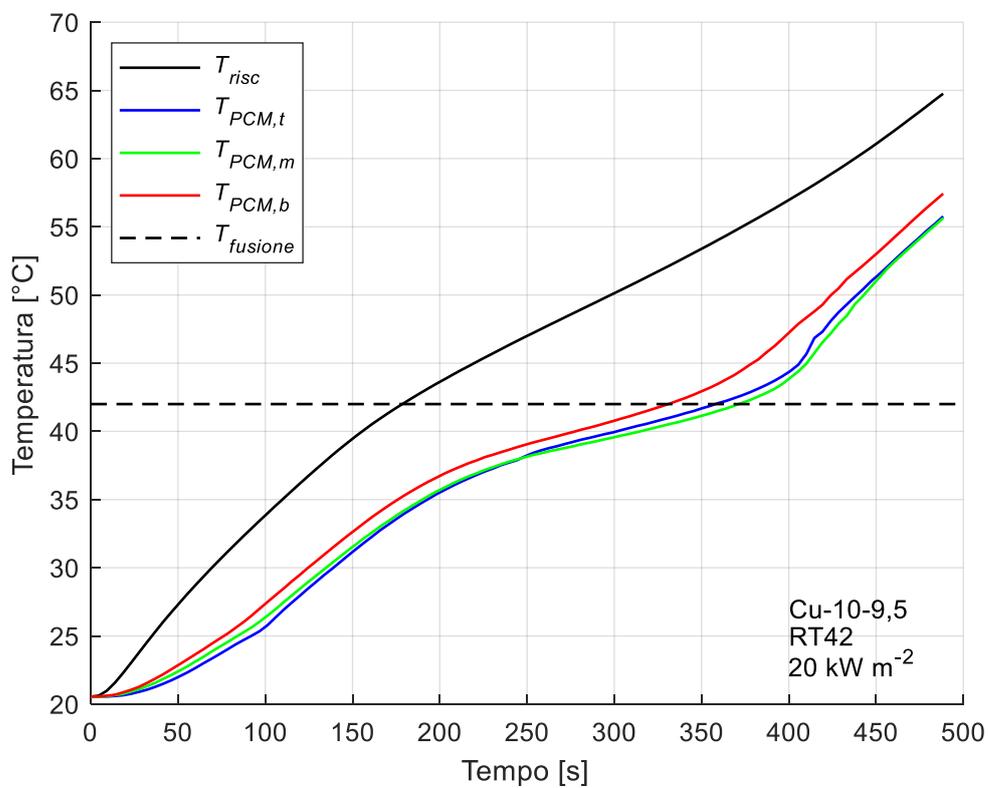


Figura 3.40: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

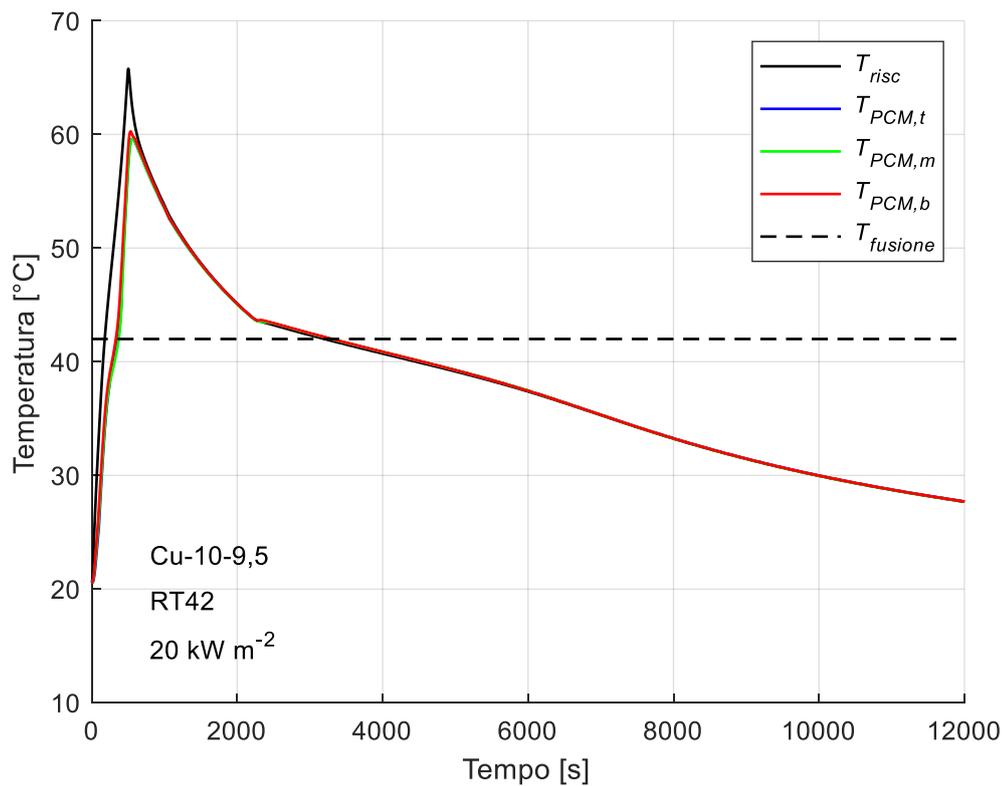


Figura 3.41: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT55 e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.42:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.43:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.44:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

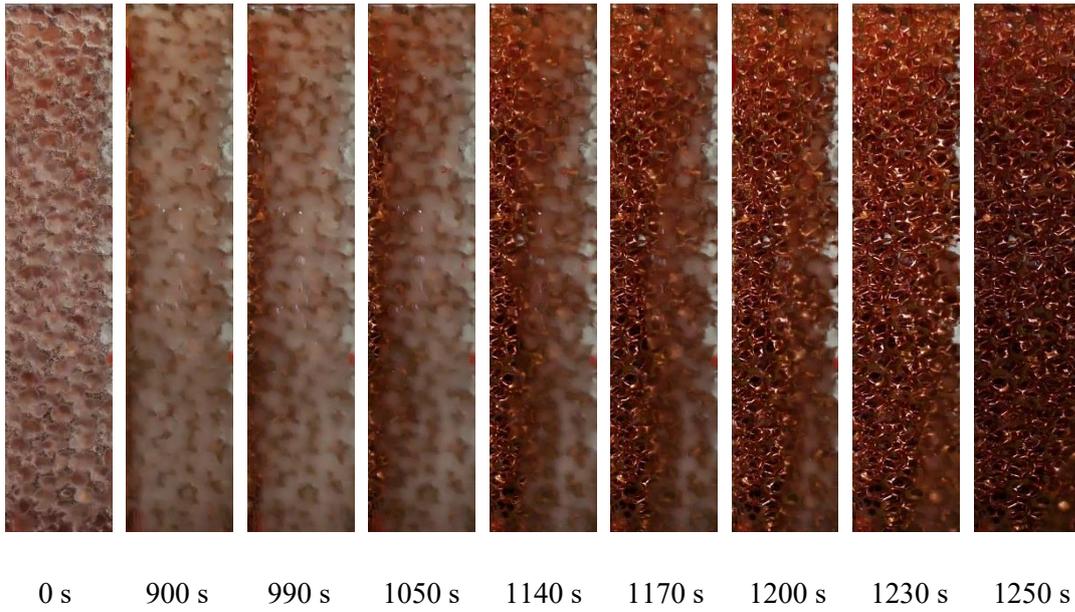


Figura 3.42: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

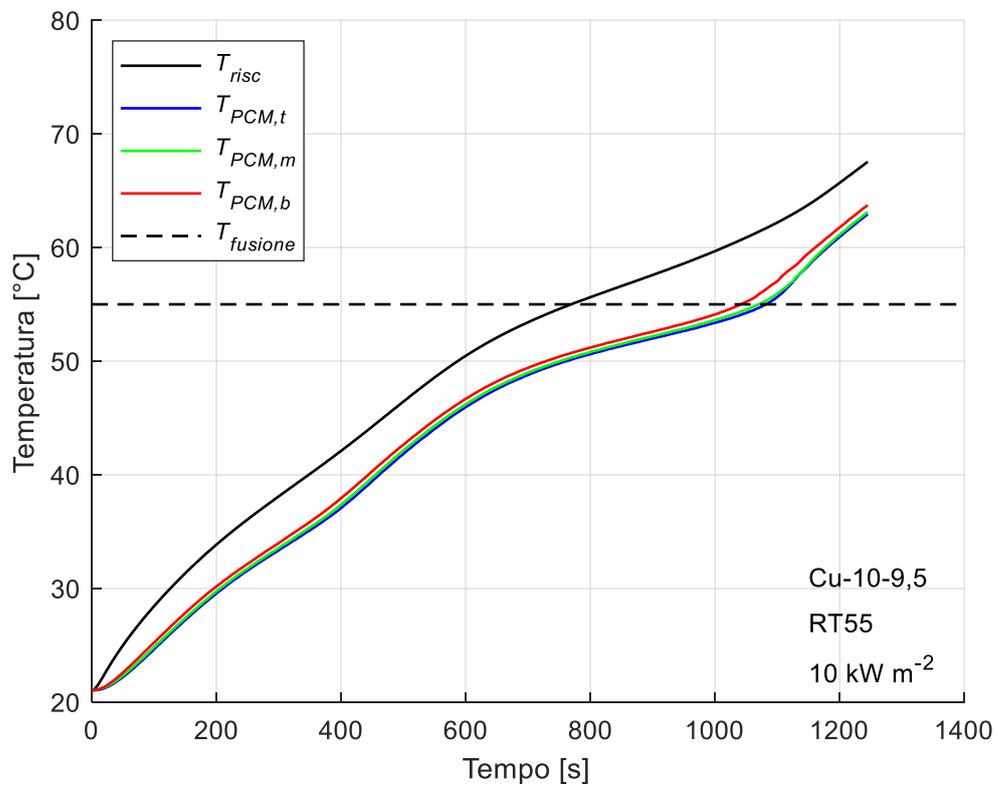


Figura 3.43: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

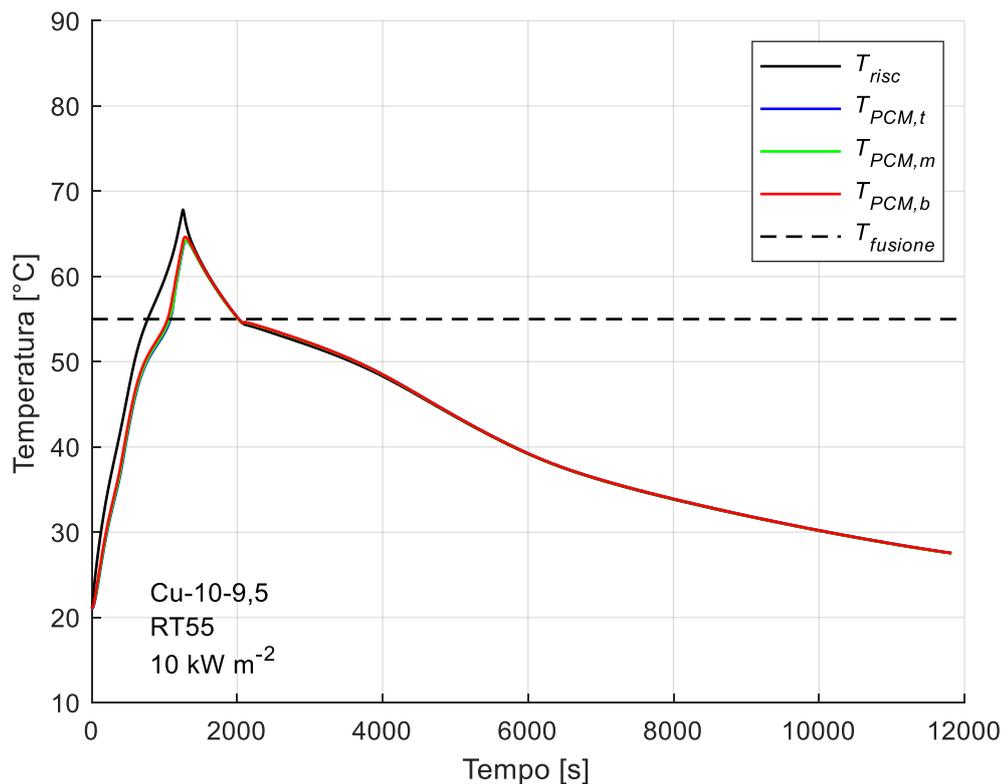


Figura 3.44: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT55 e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.45:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.46:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.47:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

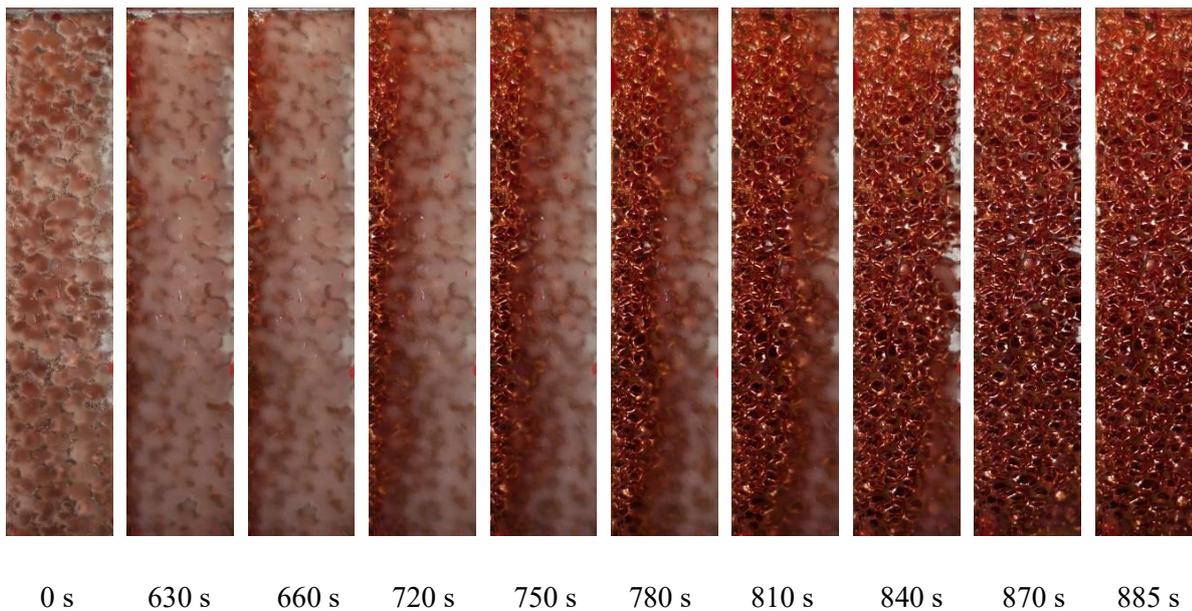


Figura 3.45: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

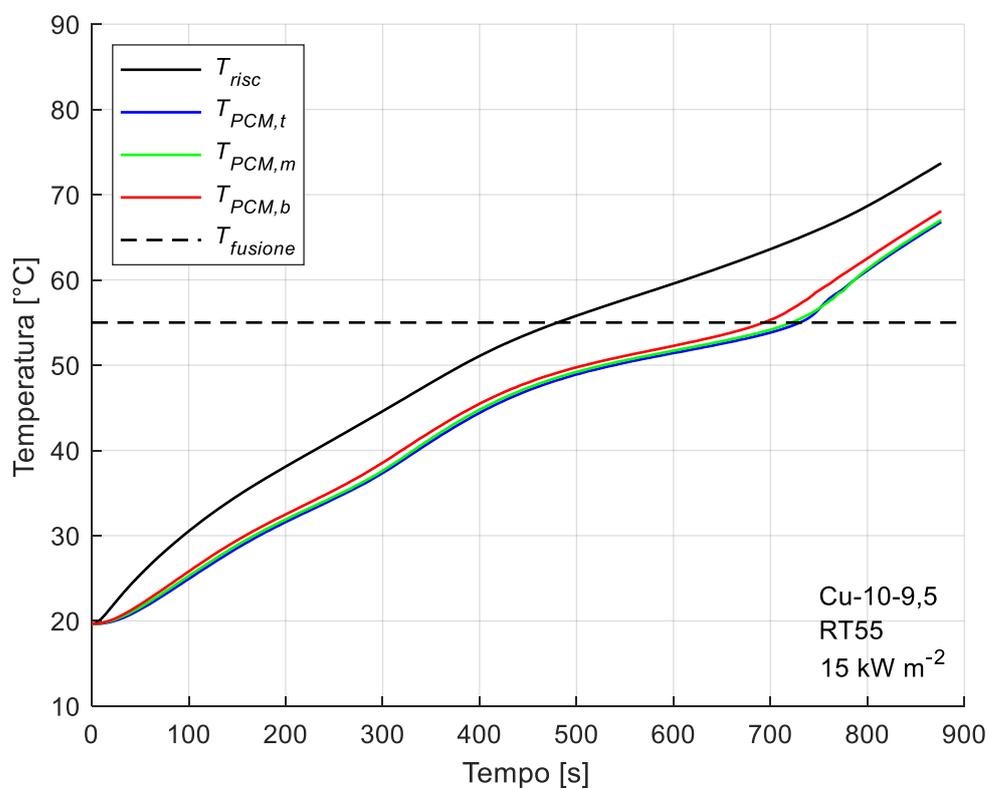


Figura 3.46: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

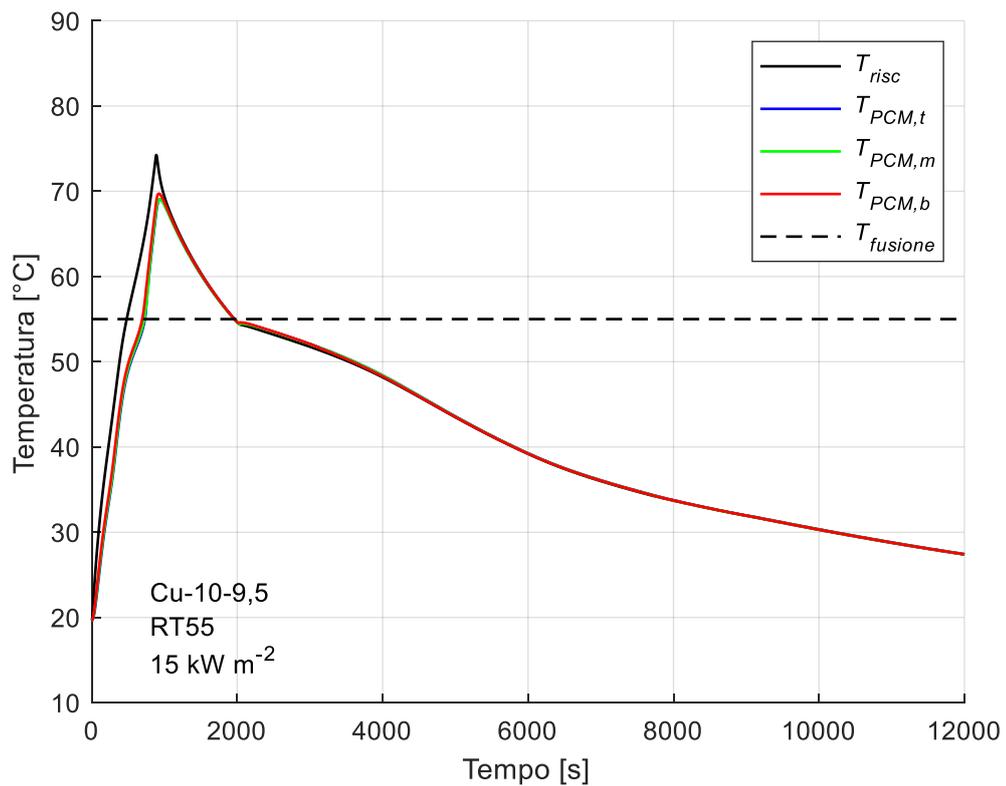


Figura 3.47: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT55 e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.48:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.49:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.50:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

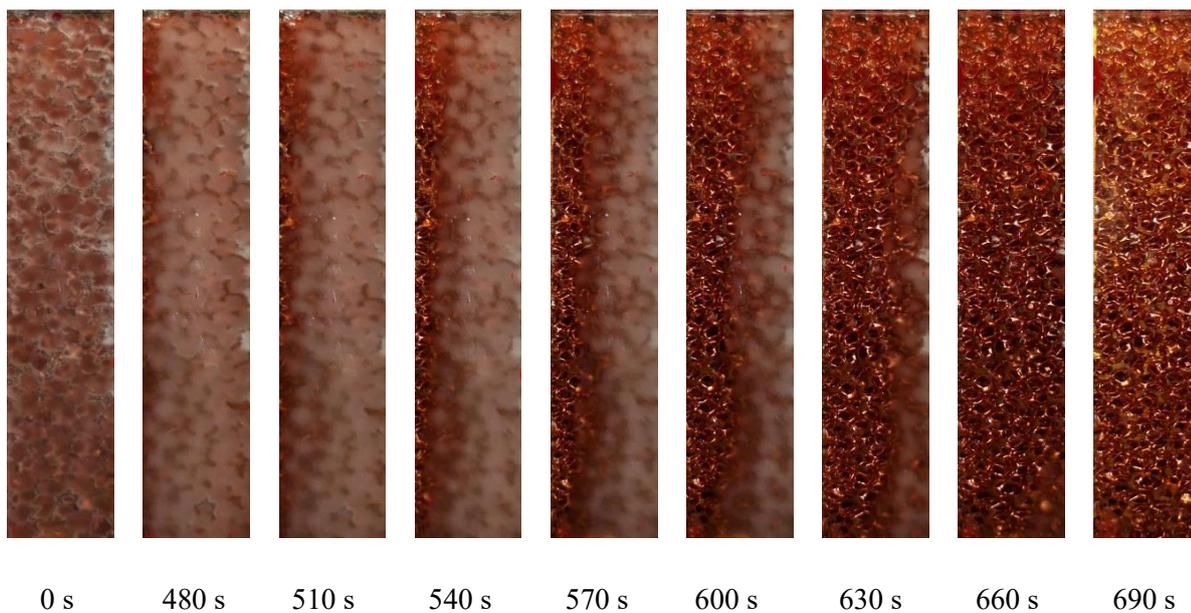


Figura 3.48: Fronte di fusione della paraffina RT55 inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

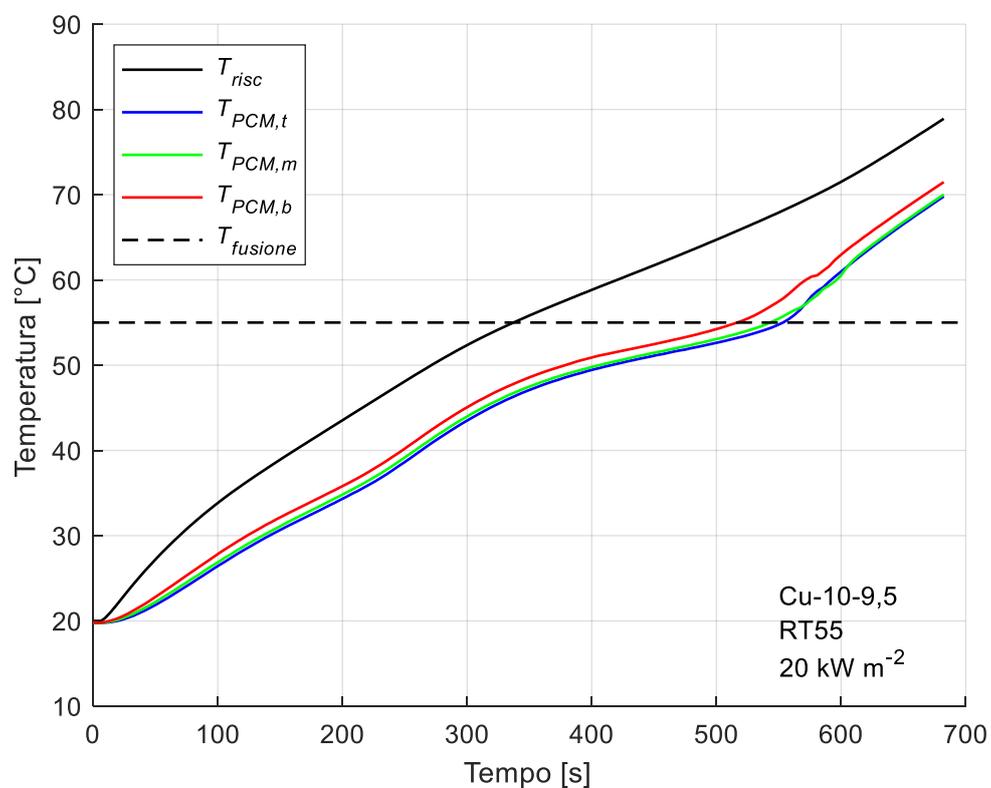


Figura 3.49: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

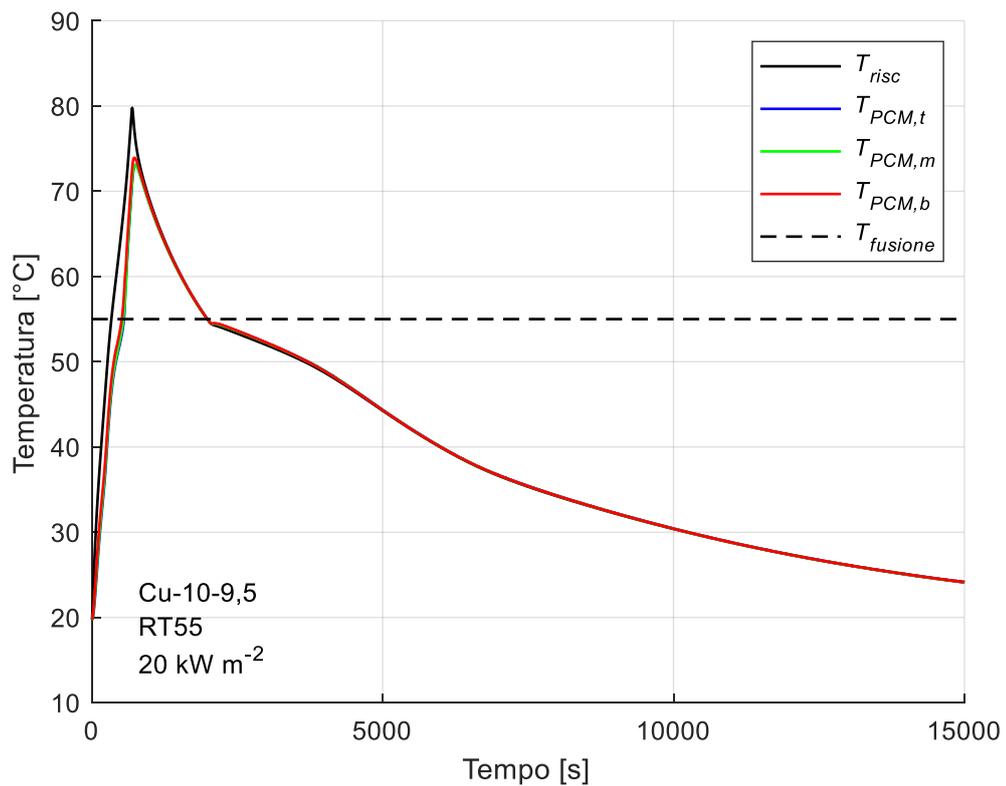


Figura 3.50: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.51:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.52:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.53:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

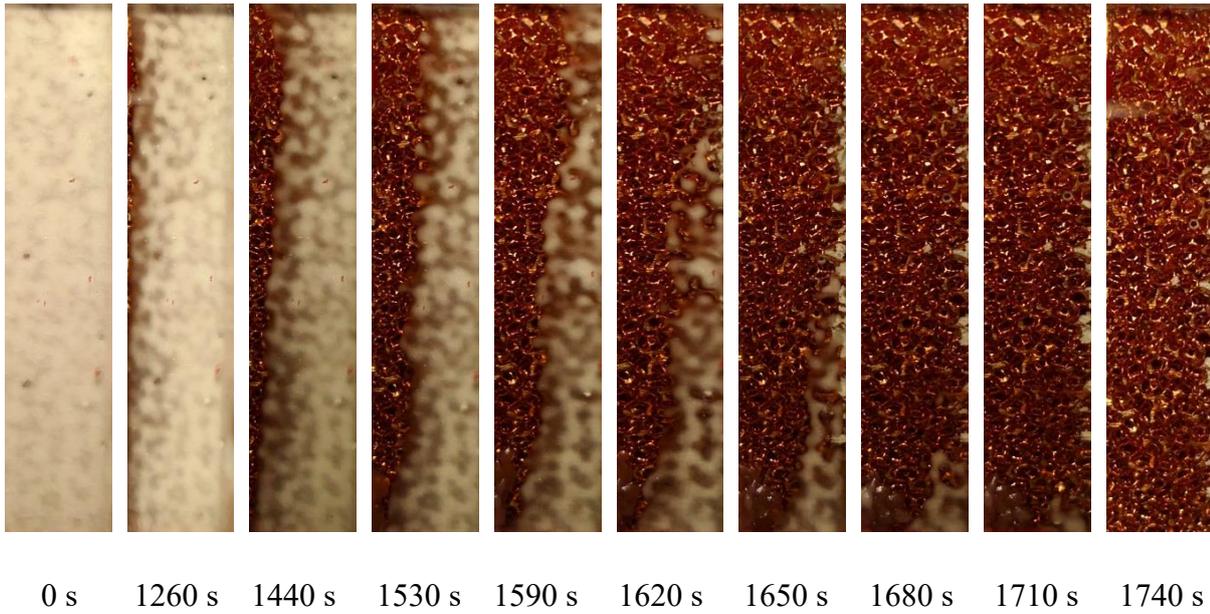


Figura 3.51: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

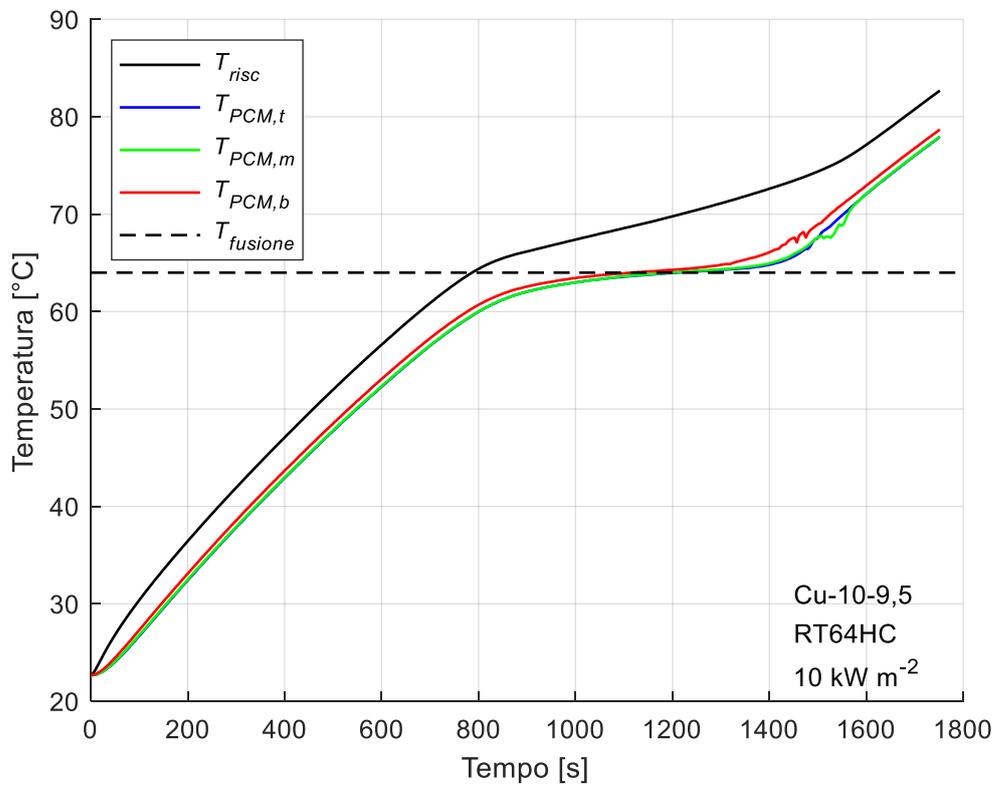


Figura 3.52: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

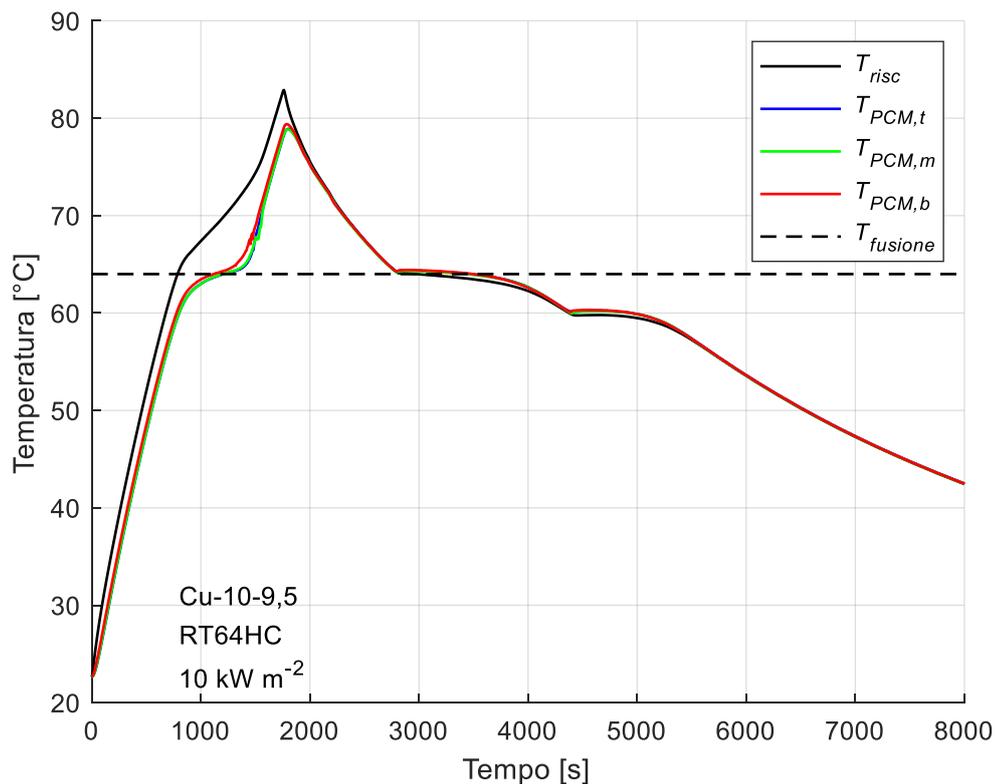


Figura 3.53: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.54:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.55:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.56:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

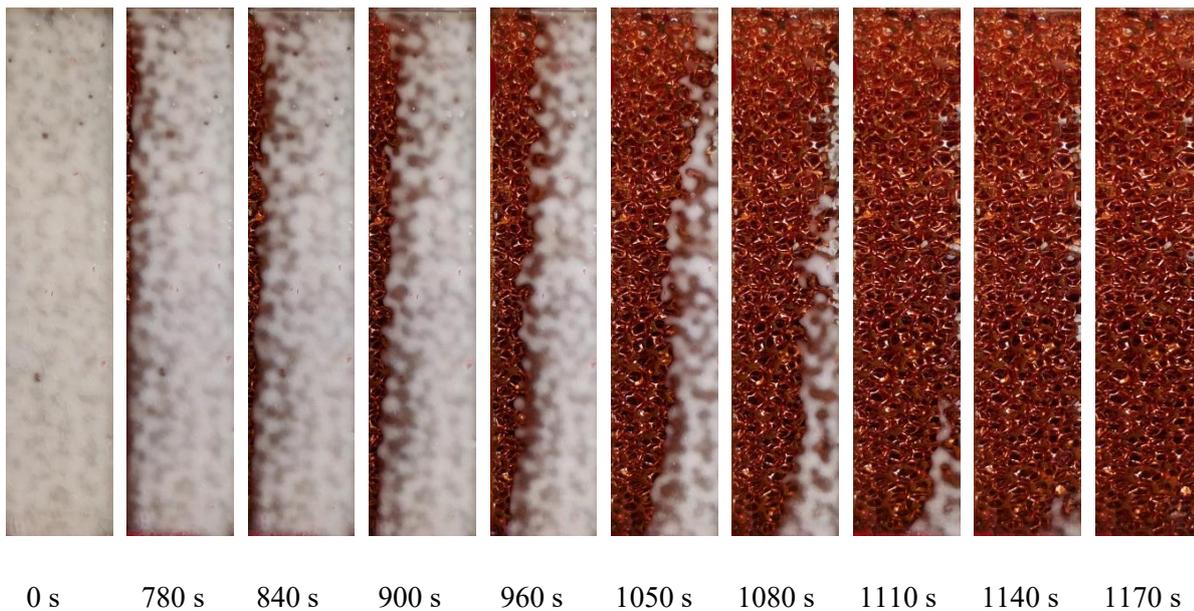


Figura 3.54: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

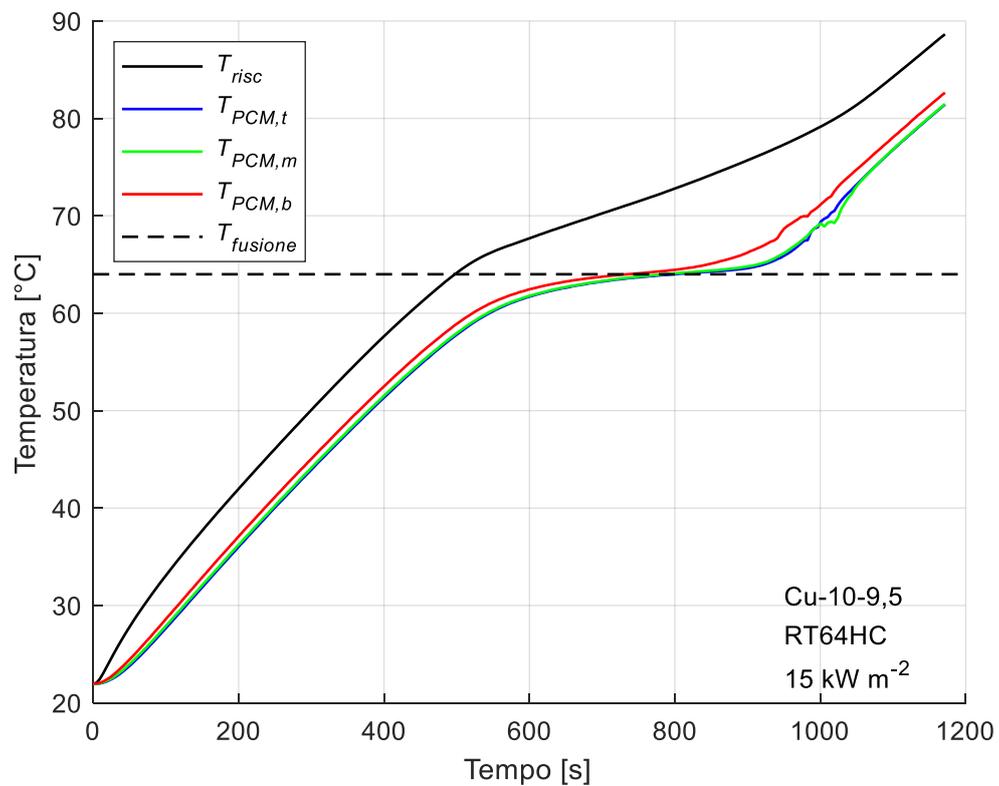


Figura 3.55: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

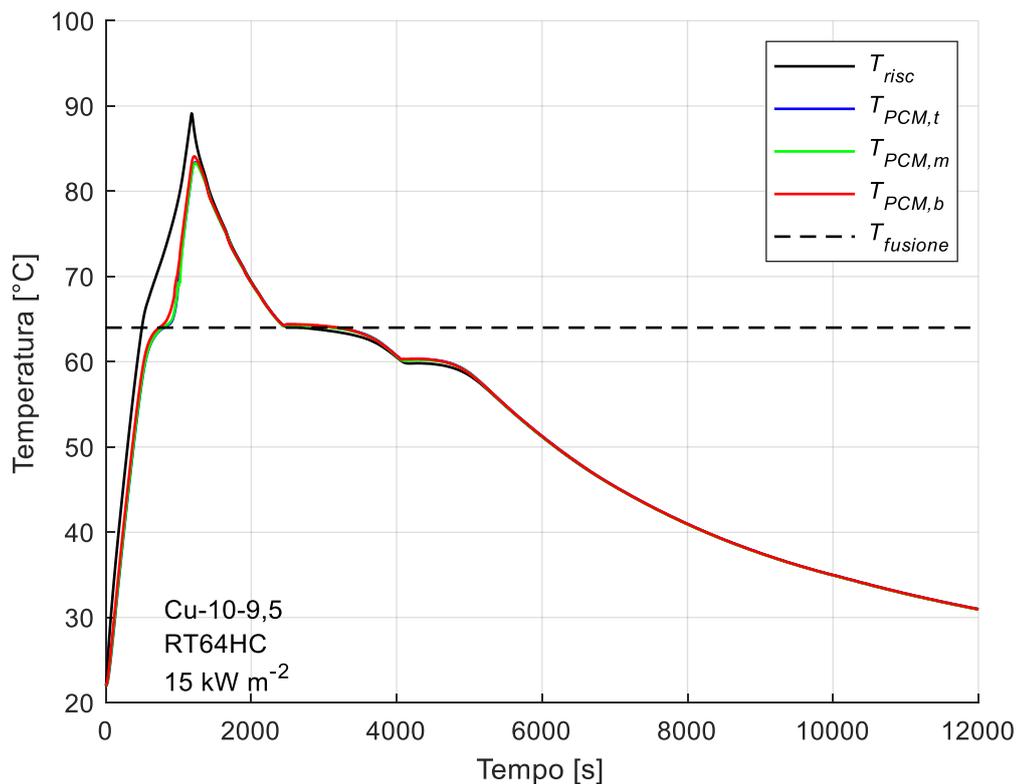


Figura 3.56: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 150 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W

I risultati di questa prova sono rappresentati nelle seguenti figure:

- *Figura 3.57:* fotogrammi scattati durante la fusione della paraffina;
- *Figura 3.58:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante il processo di fusione;
- *Figura 3.59:* andamento della temperatura media del lato riscaldato e delle termocoppie inguainate in inox poste all'interno del PCM durante l'intero periodo di acquisizione dati.

Per le considerazioni relative a questa prova si veda il *Paragrafo 3.2.1*. Il grafico relativo alle termocoppie poste sul lato riscaldato non è stato riportato per ragioni di spazio, tuttavia in tutti i casi è stato verificato che le temperature e il riscaldamento fossero uniformi.

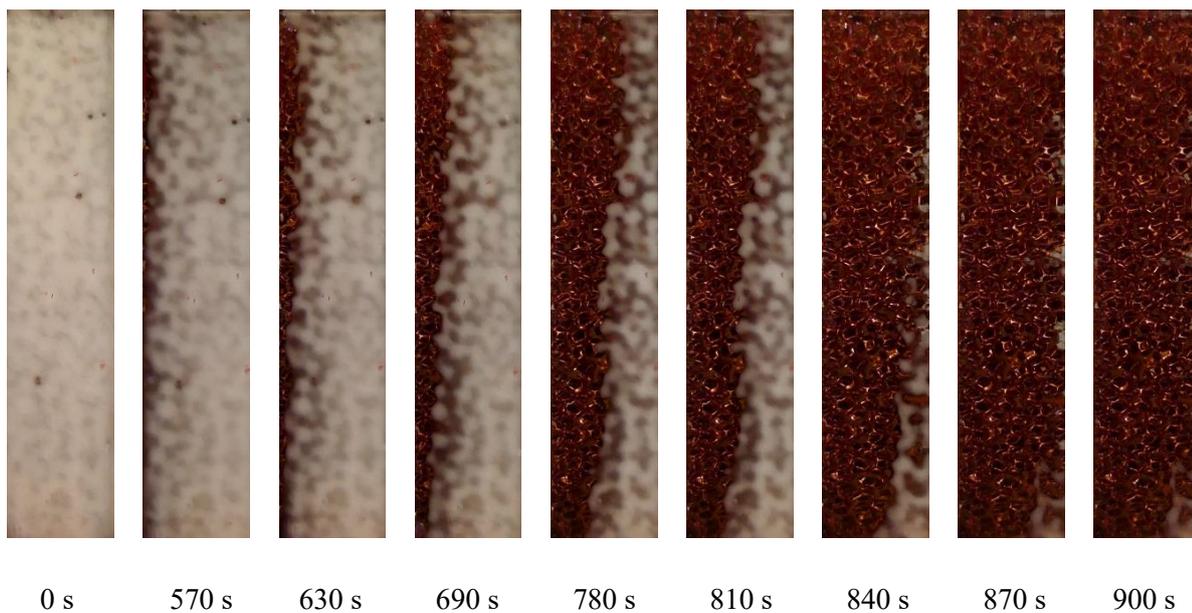


Figura 3.57: Fronte di fusione della paraffina RT64HC inserita in una schiuma metallica Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

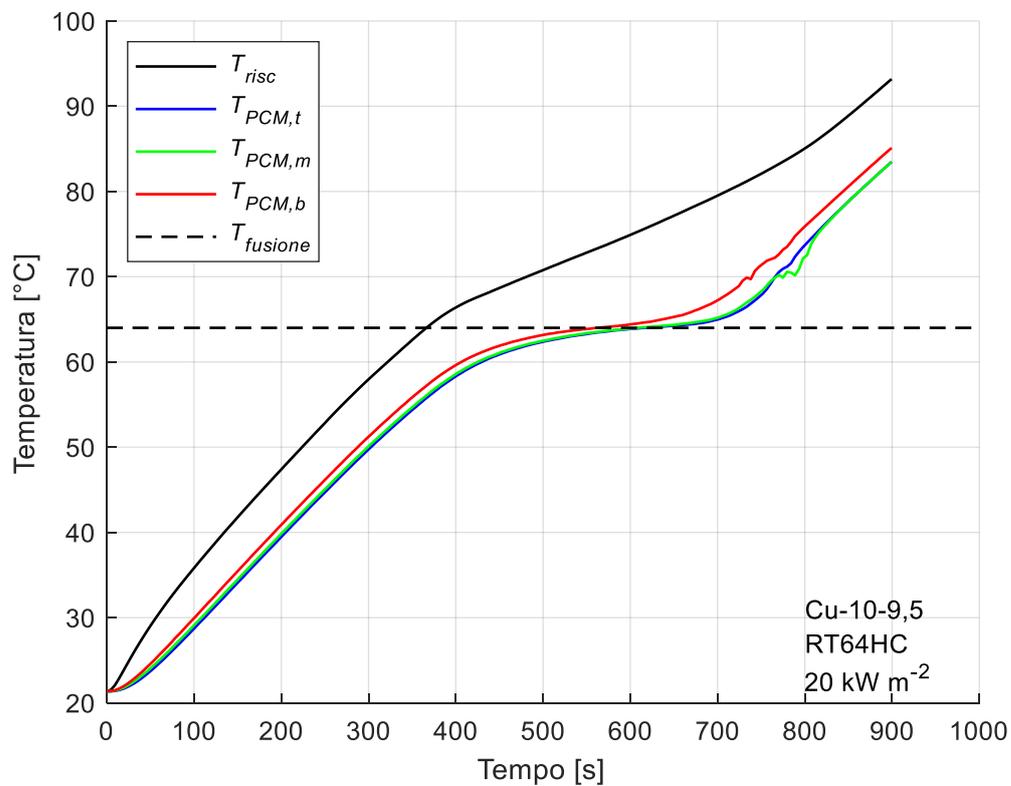


Figura 3.58: Andamento delle temperature durante la fase fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

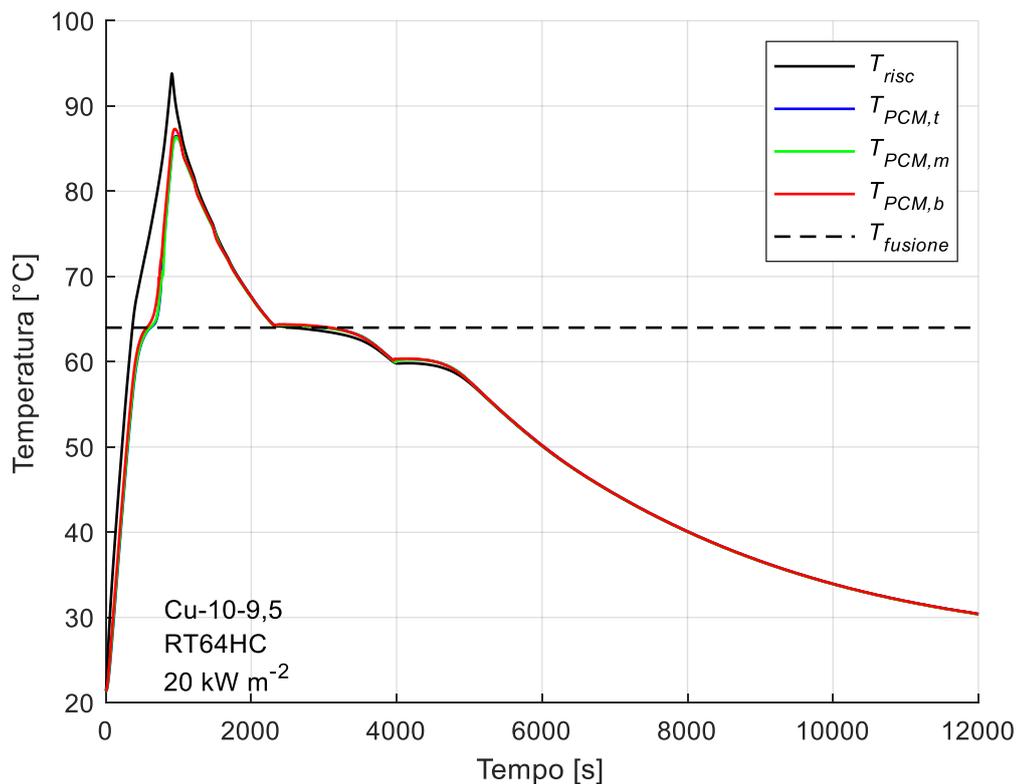


Figura 3.59: Andamento delle temperature durante tutta la prova per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 200 W.

3.3 Confronto fra i risultati ottenuti

In questo paragrafo sono riportati i confronti fra le varie prove sperimentali eseguite. In un primo momento sono state analizzate le schiume in rame che presentano lo stesso numero di pori per pollice e diversa densità relativa (*Paragrafo 3.3.1*). Successivamente nel *Paragrafo 3.3.2* si è studiato l'effetto della paraffina e nel *Paragrafo 3.3.3* si è analizzato il comportamento del modulo al variare flusso termico. Inoltre, questi moduli sono stati comparati con quelli in alluminio precedentemente testati nella tesi di Pellizzari [36] (*Paragrafo 3.3.4*). Nel *Paragrafo 3.3.5* sono stato confrontati i dati ottenuti con la correlazione proposta da Diani e Campanale [17]. In tutti i casi ci si è focalizzati sul comportamento del lato riscaldato, infatti la superficie a contatto con il riscaldatore rappresenta il componente che deve essere mantenuto a bassa temperatura. Quindi, siccome questa tesi è incentrata sul raffreddamento dell'elettronica, si è andato a vedere in quali casi la temperatura del lato riscaldato fosse più bassa. Per potere confrontare le varie prove si è deciso di prendere come riferimento la differenza fra la

temperatura del lato riscaldato e la temperatura ambiente (ovvero la temperatura media del lato riscaldato all'istante iniziale $t = 0$ s).

3.3.1 Confronto fra i moduli con diversa densità, a parità di paraffina e potenza termica

In questo paragrafo sono stati comparati due moduli in rame che presentano stesso numero di pori per pollice e differente densità relativa (6,7% e 9,5%). I risultati ottenuti sono molto simili ed è quindi possibile riassumere in maniera generale il fenomeno. Osservando l'andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato e quella dell'ambiente, si nota che non ci sono evidenti differenze. In tutti i casi si ha che la temperatura del lato riscaldato rispetto a quella ambiente è leggermente minore per la schiuma con densità maggiore. Inoltre, si ha che la fusione completa viene raggiunta qualche istante dopo nel caso in cui la densità della schiuma sia minore. Per spiegare questo fenomeno occorre considerare che nel caso in cui la densità relativa della schiuma aumenta, a parità di spessore e di PPI, si ha che lo spessore della fibra aumenta. Di conseguenza la quantità di rame presente all'interno del sistema schiuma più paraffina aumenta e diminuisce la massa di paraffina presente. Per questo motivo, essendo variata la massa della paraffina, si ha che è necessario fondere una minore quantità di materiale e quindi la fusione avviene in tempi minori. Inoltre, essendo aumentato lo spessore della fibra, si ha che il calore può distribuirsi più velocemente all'interno della schiuma e la conduttività termica del sistema aumenta, facendo sì che la temperatura raggiunta dal lato riscaldato sia leggermente minore.

È possibile trovare delle differenze tra le due schiume rappresentando l'andamento della differenza fra la temperatura del lato riscaldato e del lato adiabatico. Osservando una singola curva si nota che inizialmente la differenza di temperatura aumenta, infatti la paraffina essendo isolante fa in modo che il calore arrivi lentamente al lato adiabatico. Dopo un certo intervallo di tempo, la pendenza della curva diminuisce e si ha una zona in cui la curva è praticamente piatta. Questo è dovuto al fatto che il calore si è trasferito dal lato riscaldato a quello adiabatico e la temperatura cresce in ugual modo da entrambe le parti. Successivamente la pendenza della curva aumenta, indicando che la temperatura del lato riscaldato cresce più velocemente di quella del lato adiabatico. Dalle foto scattate nei vari intervalli di tempo, si nota che questo fenomeno appena descritto si verifica quando inizia il processo di fusione nel primo strato di paraffina a ridosso del lato riscaldato. La presenza di un sottile film di liquido fa sì che la temperatura del

lato riscaldato aumenti. In seguito, si nota che, qualche istante prima del raggiungimento della fusione completa, la differenza $T_{risc} - T_{adiab}$ diminuisce ovvero la temperatura del lato adiabatico cresce più velocemente del lato riscaldato. Osservando le foto scattate, si nota che in questo istante di tempo ci sono dei punti in cui si inizia ad avere paraffina liquida dalla parte del lato adiabatico, con il conseguente aumento della temperatura del lato adiabatico.

Rappresentando le curve appena descritte per entrambi i moduli con diversa densità si può vedere l'effetto di questo parametro. In tutti i casi si ha che la curva del modulo a densità maggiore sta sempre sotto alla curva dell'altro modulo e quindi all'aumentare della densità diminuisce la differenza di temperatura tra il lato riscaldato e quello adiabatico. Questo fenomeno può essere spiegato considerando che al crescere della densità, diminuisce la quantità di paraffina presente all'interno della schiuma e aumenta la massa di rame effettiva. Di conseguenza la conduttività termica del sistema complessivo aumenta e il passaggio di calore attraverso la schiuma è più rapido.

Schiume Cu-10-6,7 e Cu-10-9,5 con paraffina RT42

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.60:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.61:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.62:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.63:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.64:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.65:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.1*.

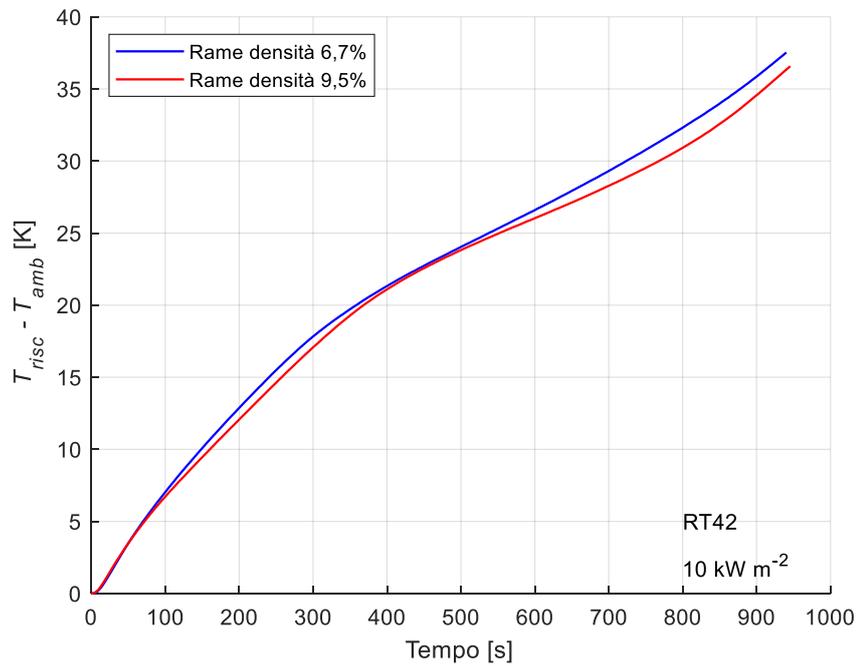


Figura 3.60: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

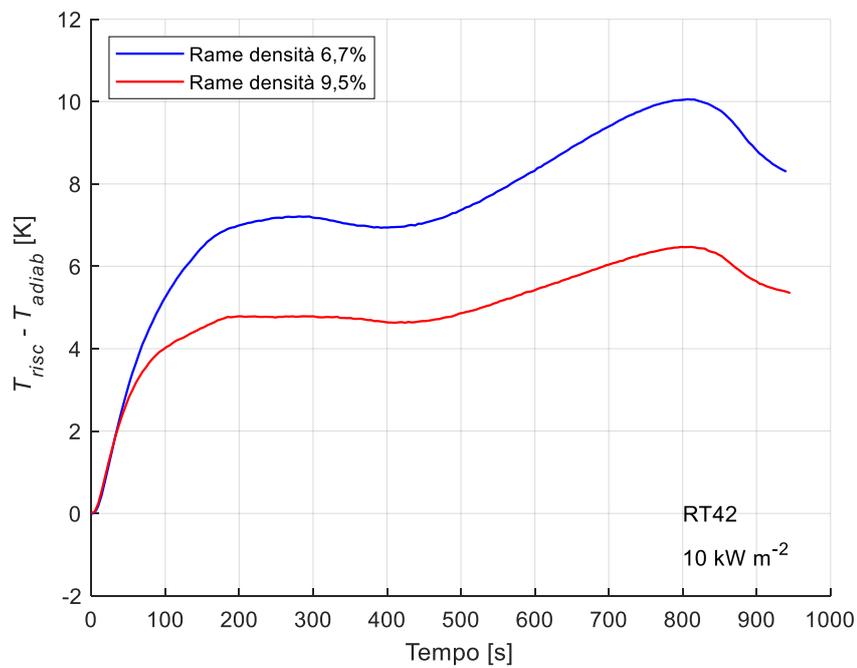


Figura 3.61: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

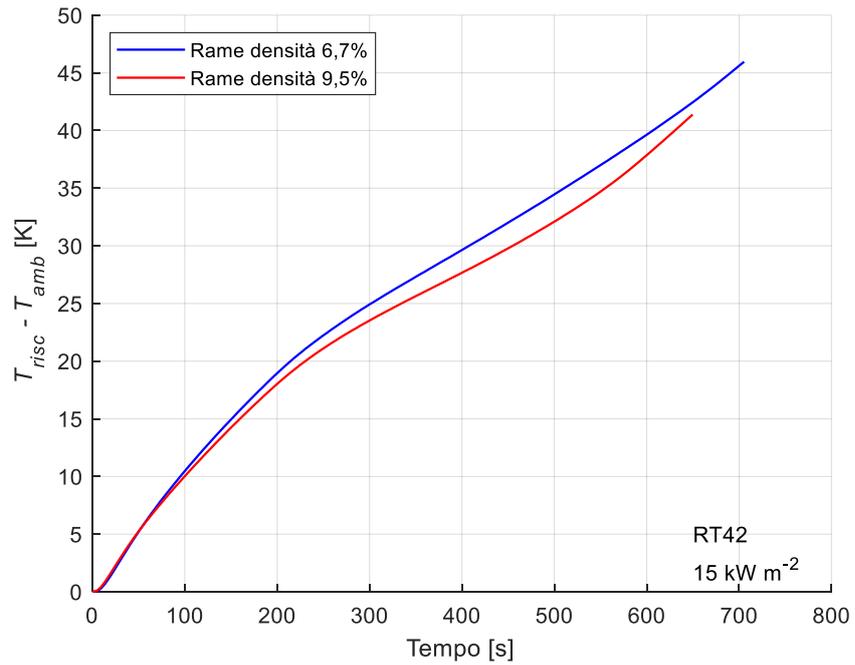


Figura 3.62: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 150 W.

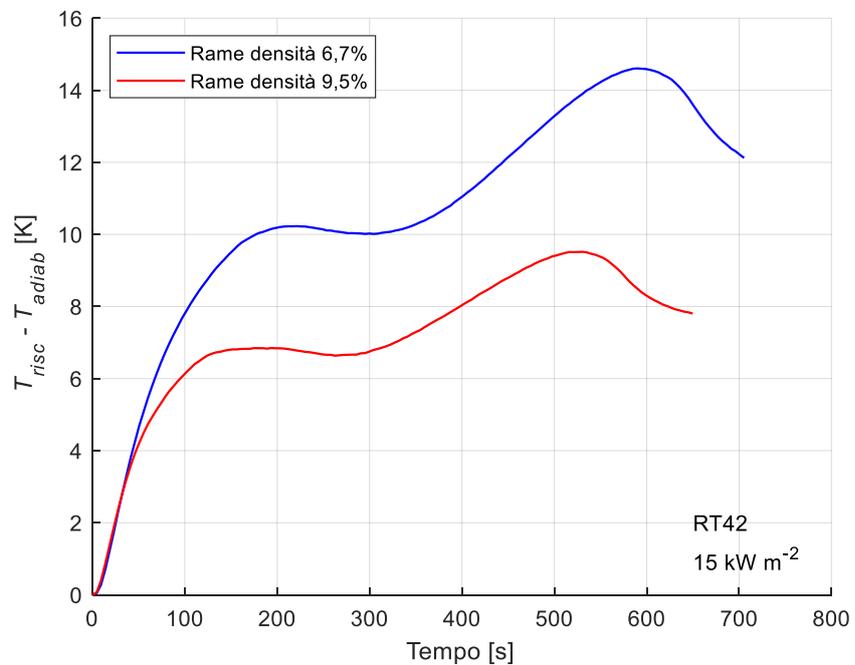


Figura 3.63: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 150 W.

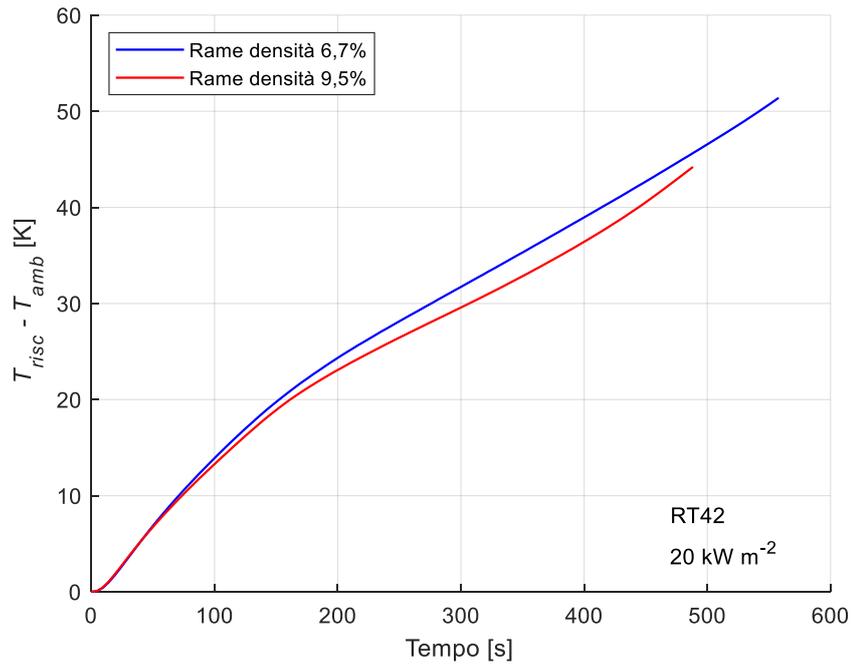


Figura 3.64: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 200 W.

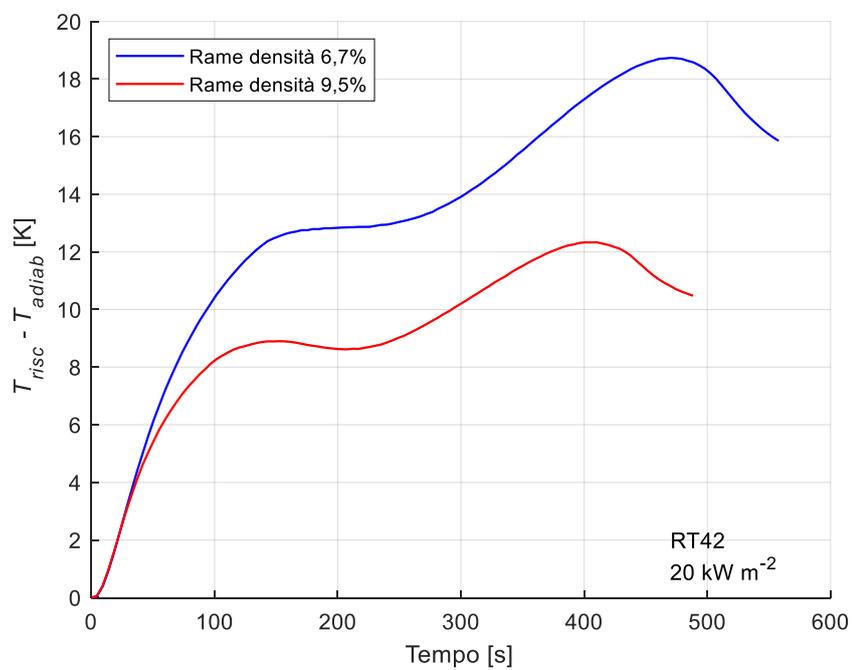


Figura 3.65: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 200 W.

Schiume Cu-10-6,7 e Cu-10-9,5 con paraffina RT55

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.66:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.67:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.68:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.69:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.70:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.71:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.1.*

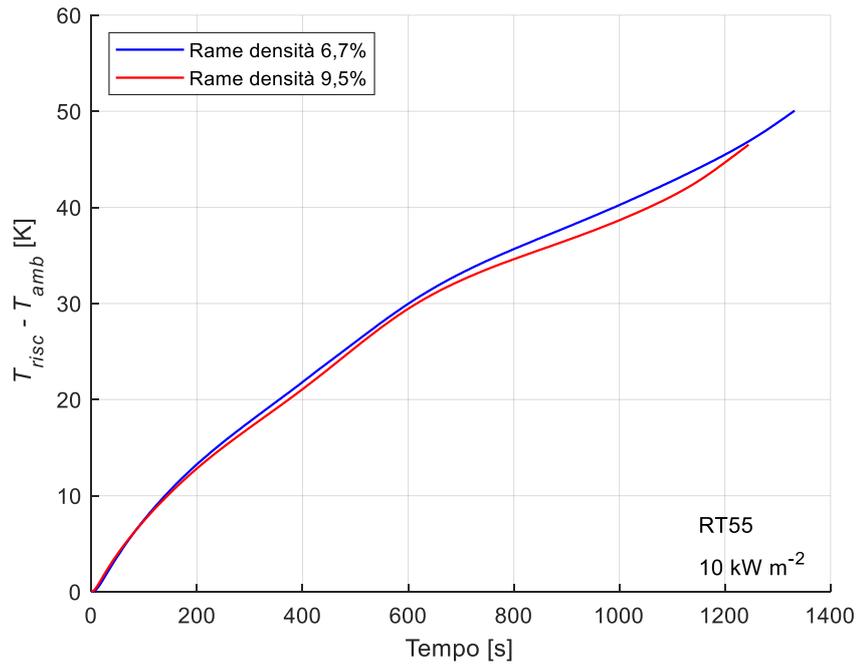


Figura 3.66: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 100 W.

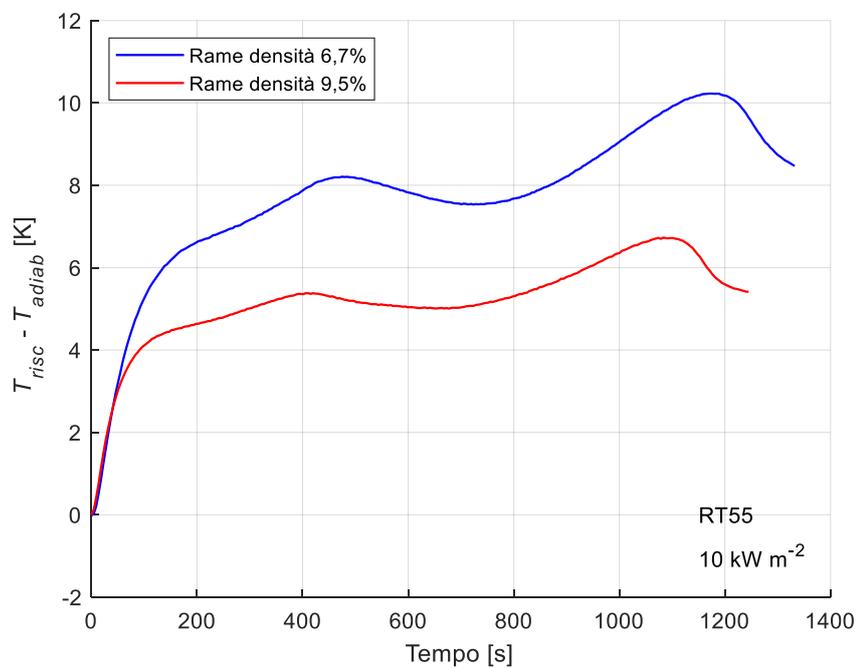


Figura 3.67: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 100 W.

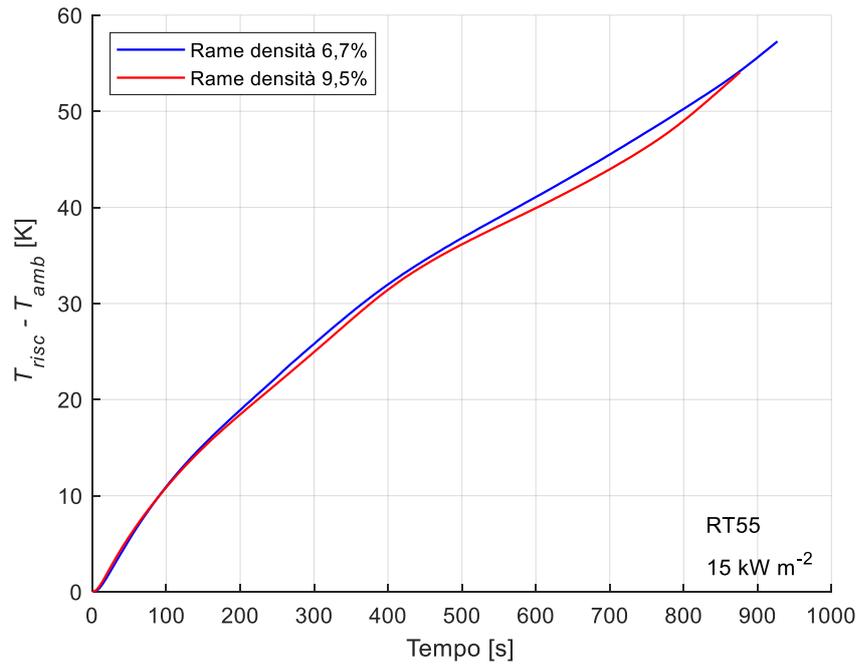


Figura 3.68: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 150 W.

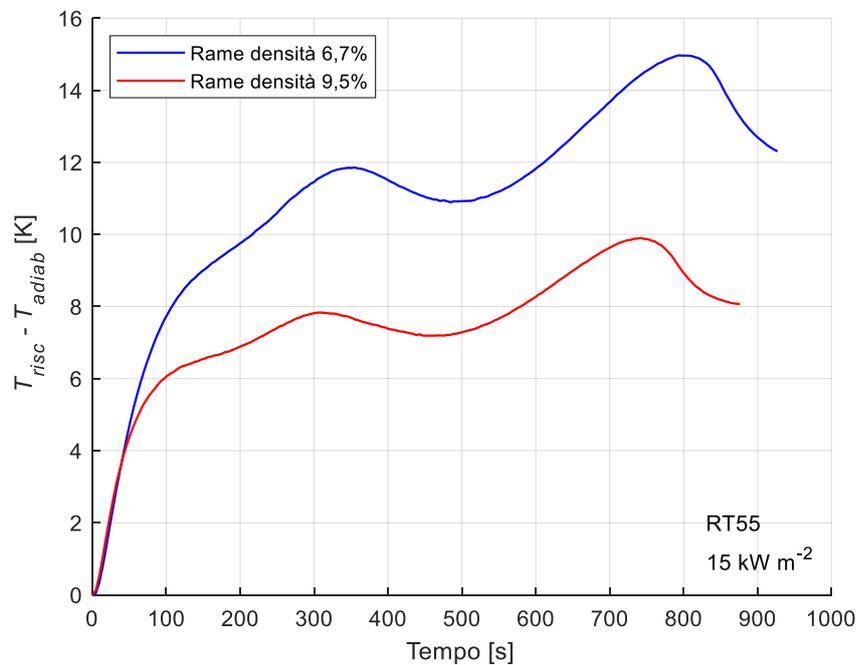


Figura 3.69: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 150 W.

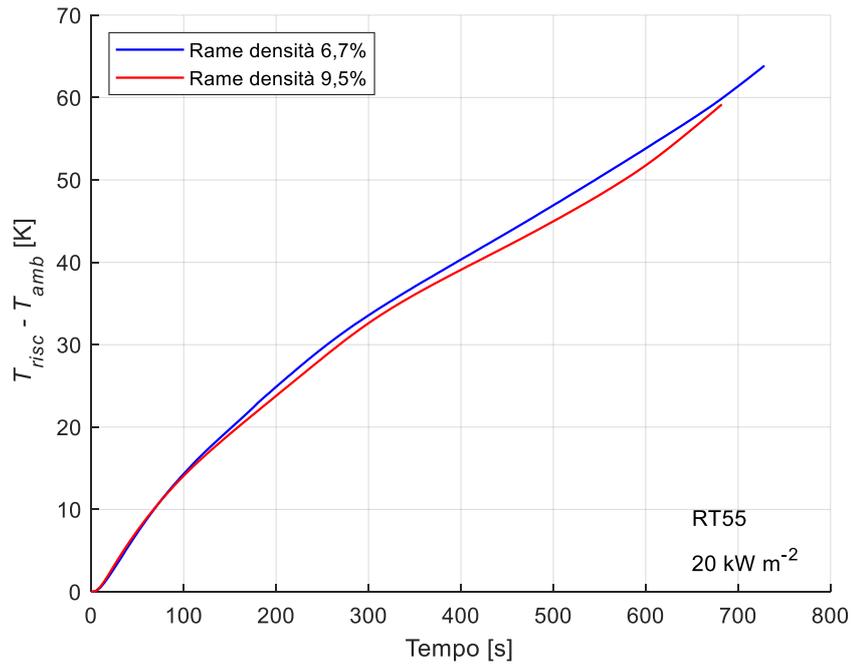


Figura 3.70: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 200 W.

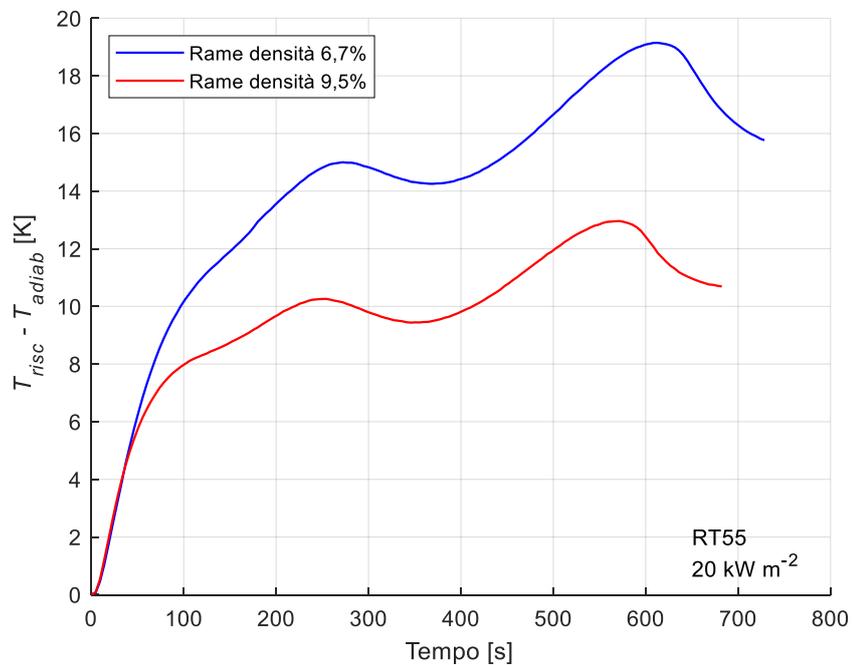


Figura 3.71: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 200 W.

Schiume Cu-10-6,7 e Cu-10-9,5 con paraffina RT64HC

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.72:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.73:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.74:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.75:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.76:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.77:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.1.*

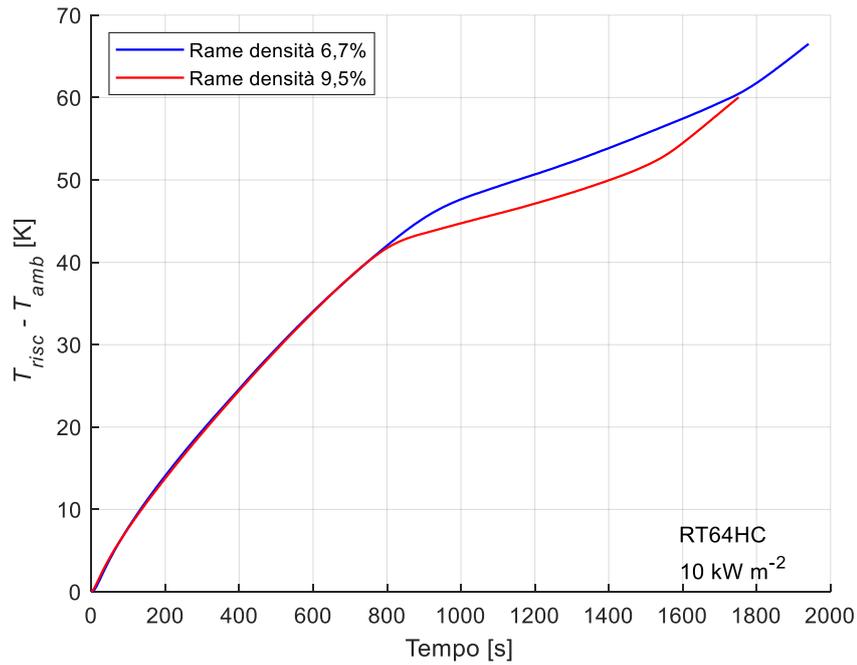


Figura 3.72: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W.

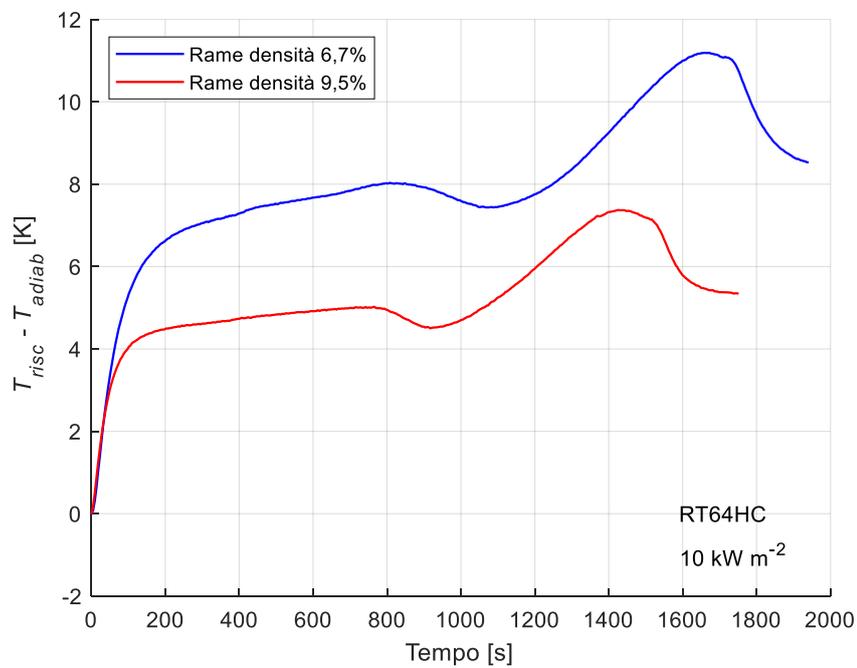


Figura 3.73: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W.

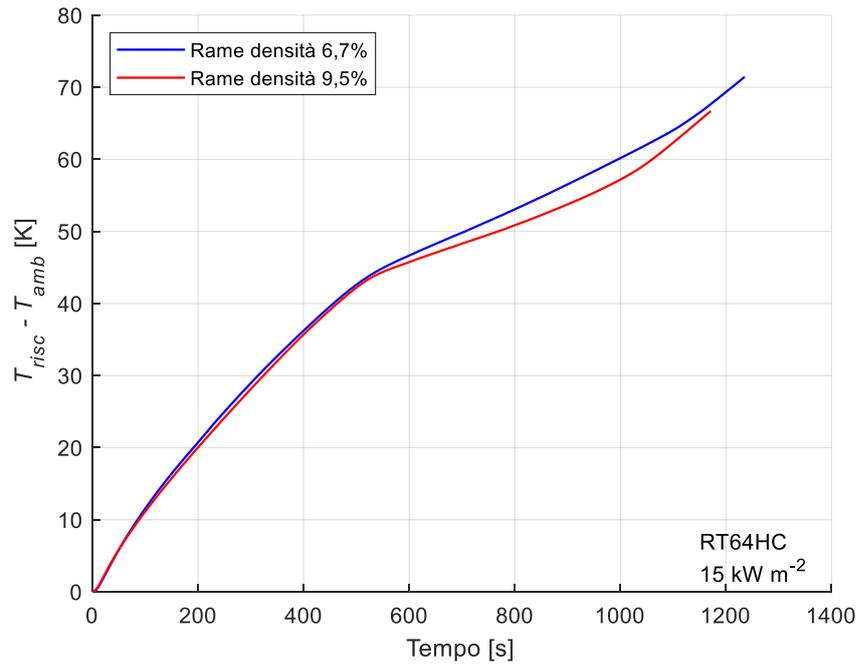


Figura 3.74: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W.

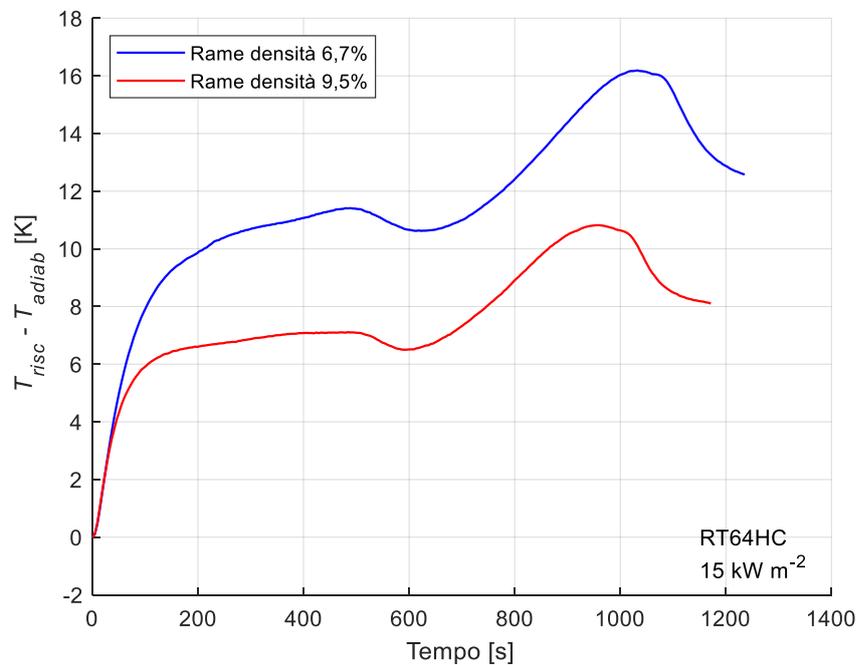


Figura 3.75: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W

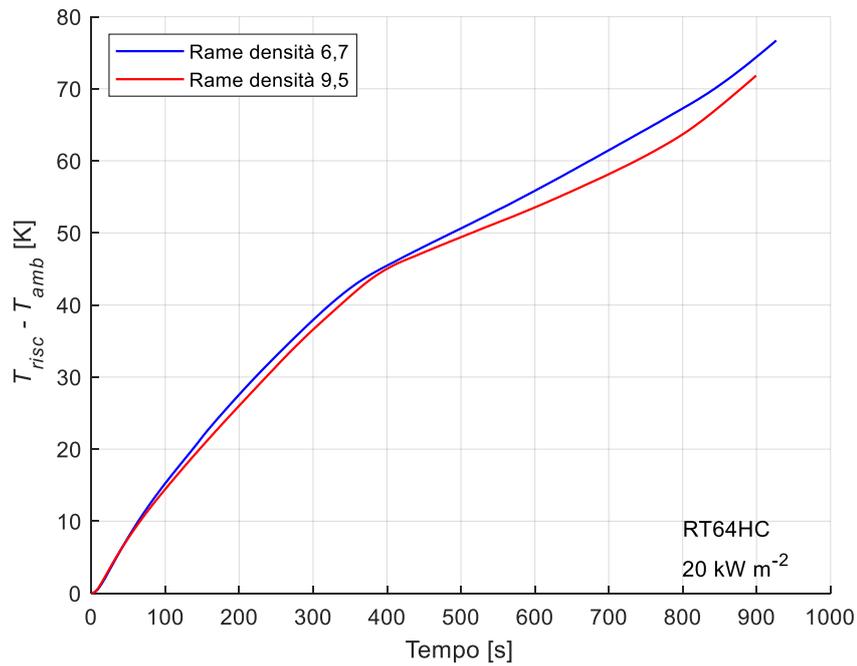


Figura 3.76: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W.

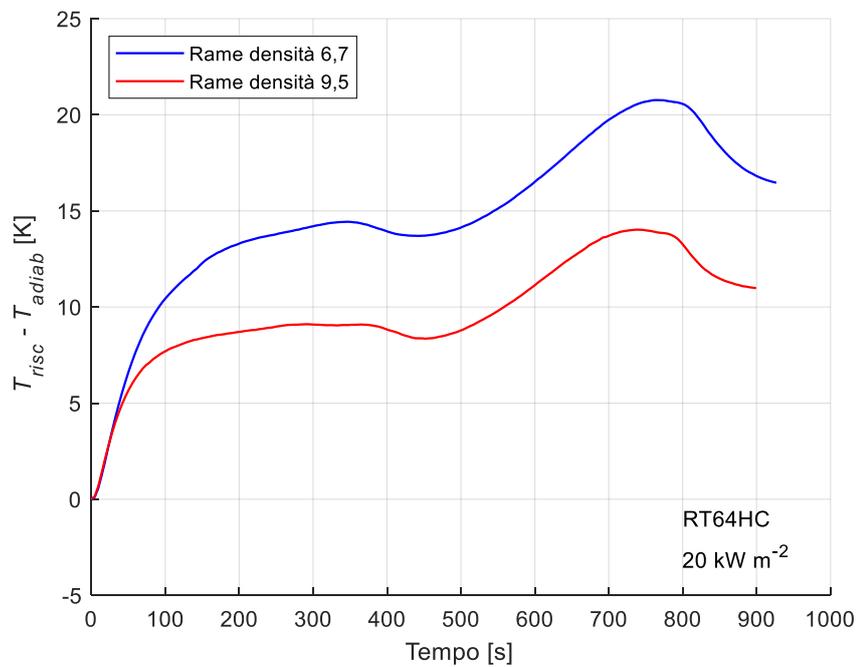


Figura 3.77: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W.

3.3.2 Confronto fra le paraffine

In questo paragrafo sono state confrontate le tre paraffine utilizzate a parità di schiuma utilizzata e di flusso termico imposto. Essendo gli andamenti molto simili è possibile fare una trattazione generale. Come già evidenziato, si ha che il cambiamento di fase comporta una diminuzione di pendenza della curva della temperatura. All'inizio del processo si ha che le tre paraffine presentano lo stesso gradiente, tuttavia, man mano che la temperatura aumenta, si ha che la paraffina RT42 inizia prima il processo di fusione. Di conseguenza la pendenza della curva diminuisce rispetto a quella delle altre due paraffine. In un secondo momento anche la paraffina RT55 e, successivamente la RT64HC, iniziano a fondere e la pendenza delle curve diminuisce. Si ha quindi che, se la temperatura di fusione aumenta, anche la temperatura raggiunta dal lato riscaldato aumenta. Inoltre, dai risultati ottenuti si nota che, se la temperatura di fusione è più bassa, la fusione completa avviene in un tempo minore. Quando la paraffina è completamente fusa, inizia a surriscaldarsi e si ha che la temperatura del lato riscaldato cresce con una pendenza maggiore. Considerando tutti questi aspetti, si ha che la scelta della paraffina è influenzata dall'intervallo di tempo in cui è necessario raffreddare il componente elettronico: se il sistema di raffreddamento deve lavorare per brevi periodi sarà opportuno utilizzare la paraffina RT42, se il sistema deve funzionare per un lungo periodo tempo sarà necessario usare una paraffina con più elevata temperatura di fusione, come la RT64HC. Per intervalli di tempo intermedi la paraffina RT55 è la scelta migliore.

Schiuma Cu-10-6,7 con potenza termica 100, 150 e 200 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.78*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.79*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.80*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.2*.

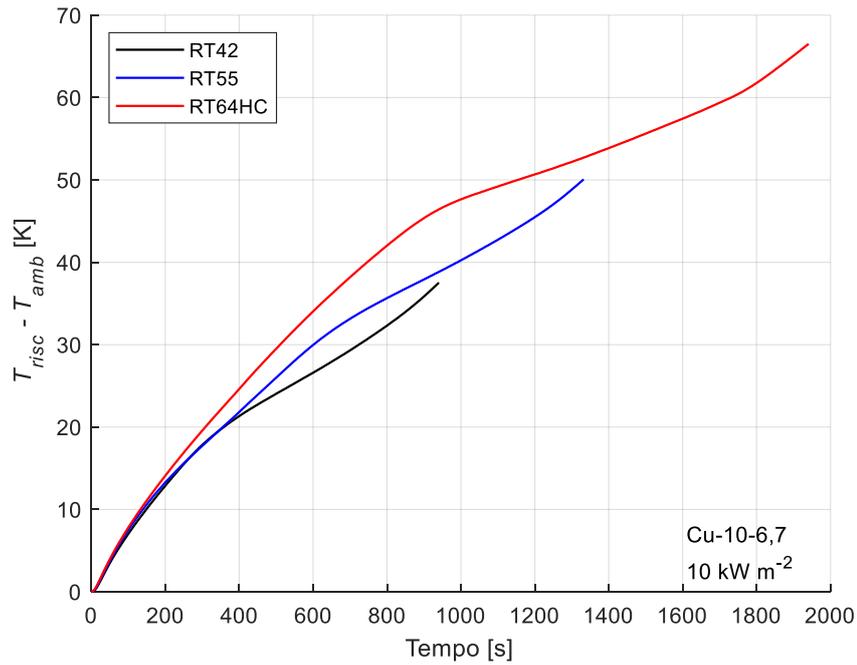


Figura 3.78: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-6,7; potenza termica 100 W.

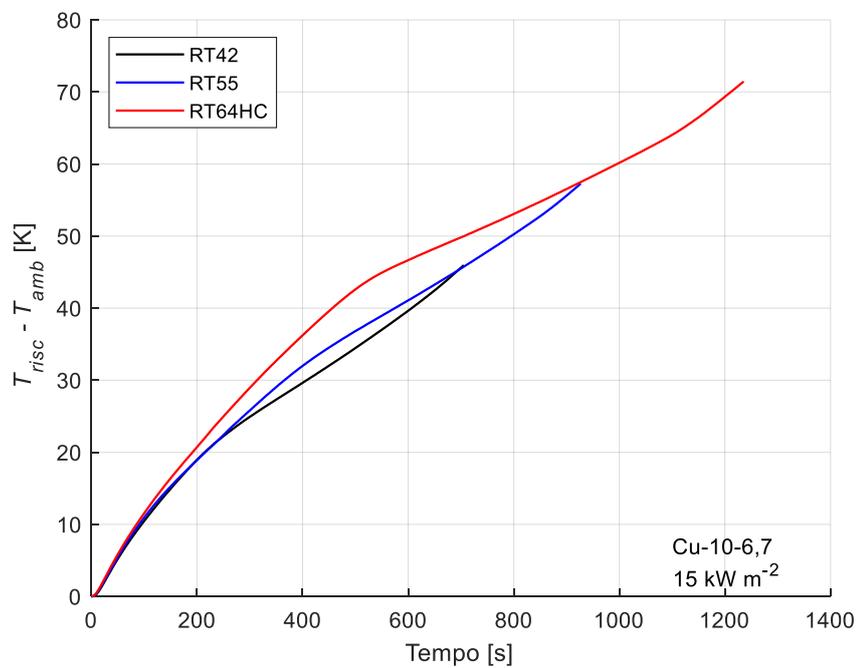


Figura 3.79: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-6,7; potenza termica 150 W.

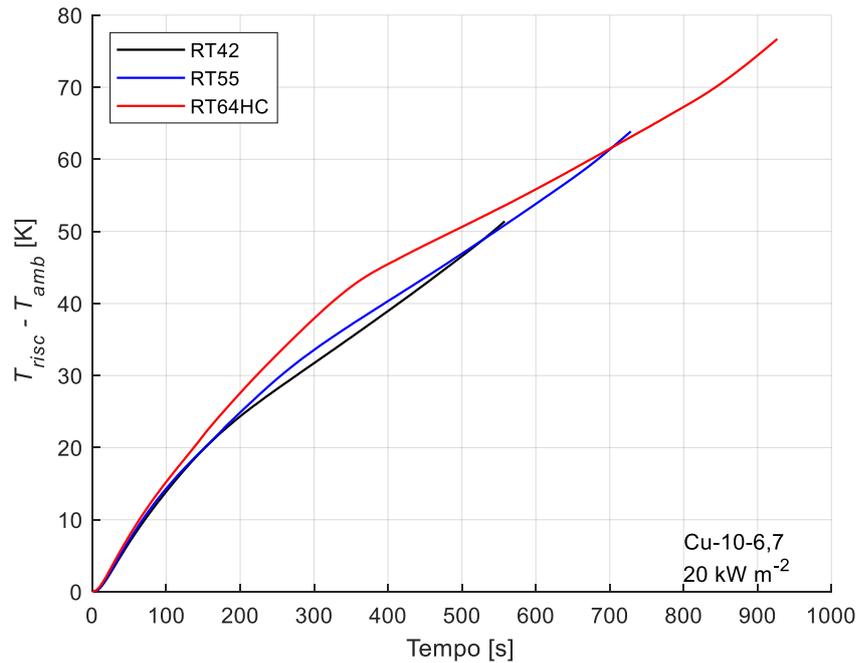


Figura 3.80: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-6,7; potenza termica 200 W.

Schiuma Cu-10-9,5 con potenza termica 100, 150 e 200 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.81:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.82:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.83:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.2*.

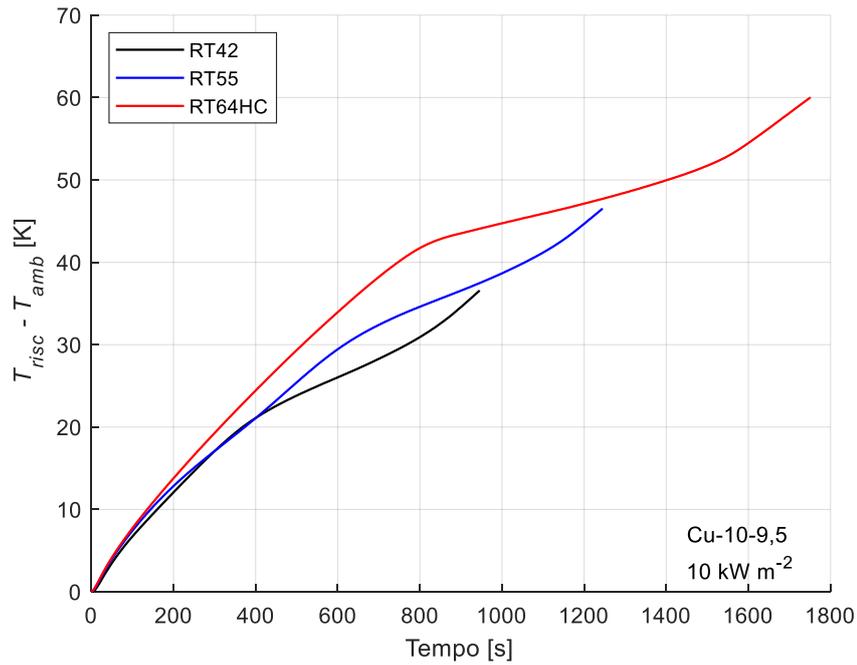


Figura 3.81: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-9,5; potenza termica 100 W.

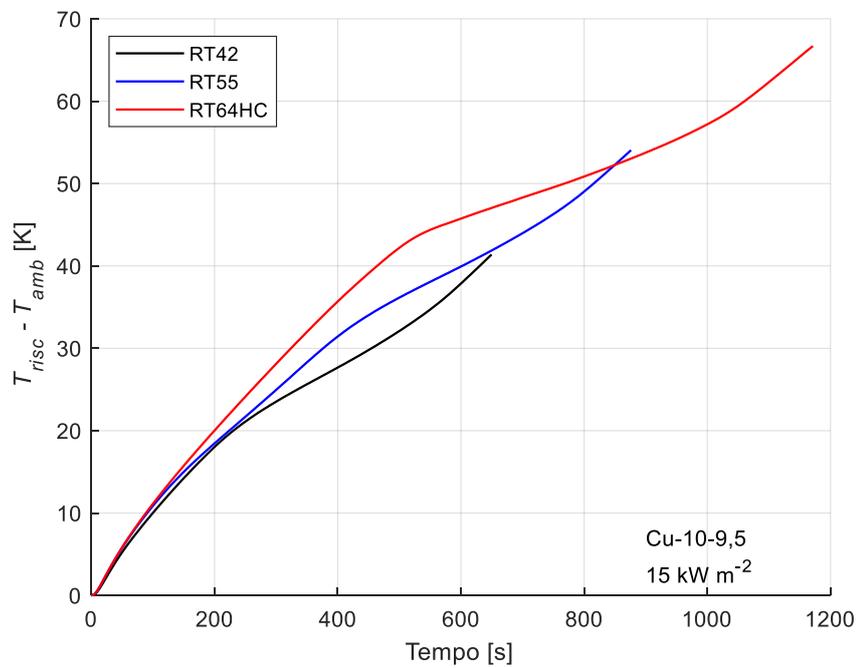


Figura 3.82: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-9,5; potenza termica 150 W.

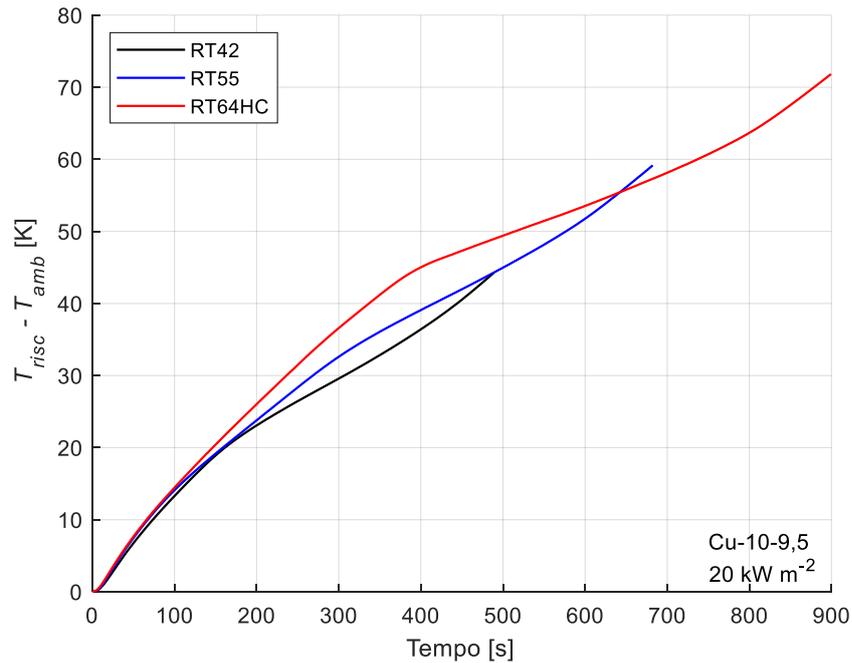


Figura 3.83: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per le tre paraffine inserite nella schiuma Cu-10-9,5; potenza termica 200 W.

3.3.3 Confronto fra le potenze termiche

In questo paragrafo sono riportati i confronti fra le potenze termiche nel caso in cui si consideri lo stesso modulo e la stessa paraffina. In tutte le prove si è visto che gli andamenti sono simili ed è quindi possibile riassumere i risultati ottenuti. Come nel paragrafo precedente, si è deciso di analizzare l'andamento della temperatura del lato riscaldato, che rappresenta il dispositivo elettronico da raffreddare. Dai grafici si nota che, aumentando il flusso termico, la pendenza della curva della temperatura aumenta, infatti la temperatura del lato riscaldato è direttamente proporzionale al flusso termico imposto. Inoltre, nel caso in cui la potenza termica sia maggiore il cambio di pendenza avviene prima e quindi anche la fase di fusione inizia e termina prima.

Schiuma Cu-10-6,7 con paraffine RT42, RT55 e RT64HC

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.84:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT42;

- *Figura 3.85*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT55;
- *Figura 3.86*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT64HC.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.3*.

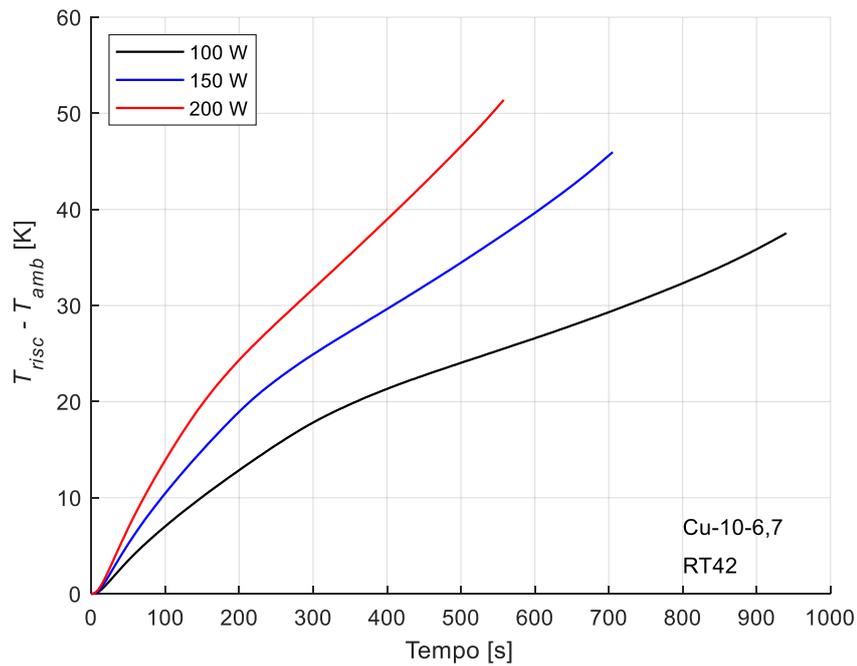


Figura 3.84: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 al variare della potenza termica.

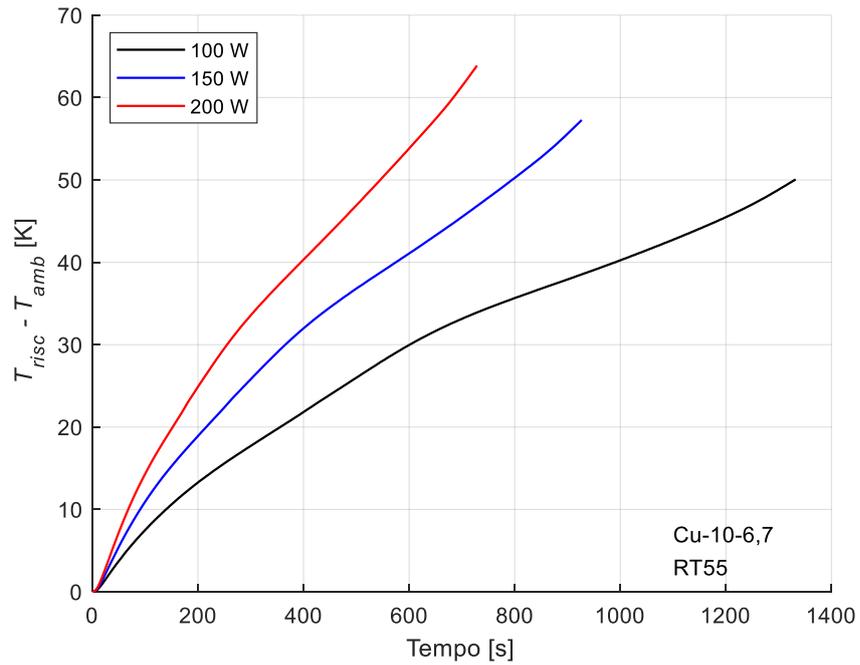


Figura 3.85: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-6,7 al variare della potenza termica.

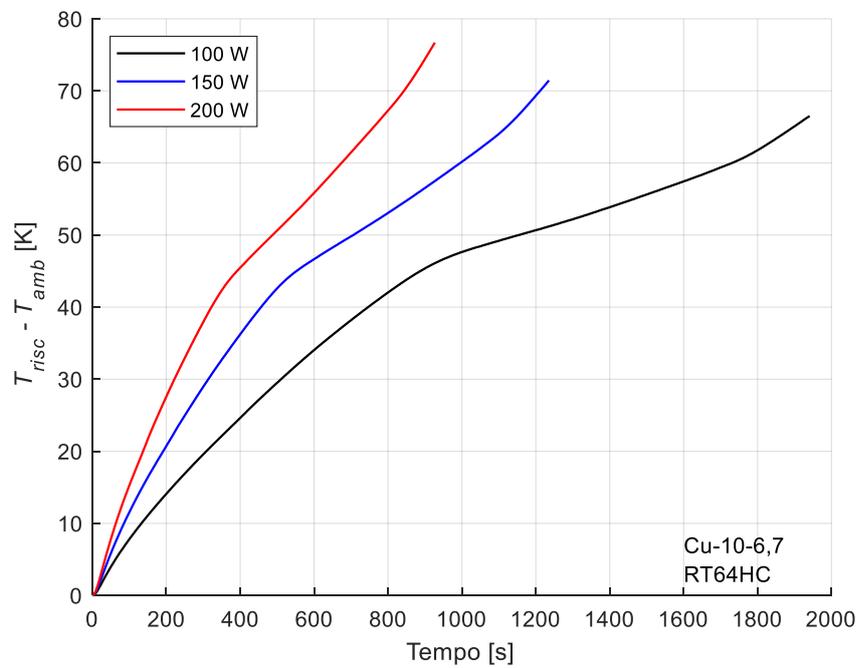


Figura 3.86: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-6,7 al variare della potenza termica.

Schiuma Cu-10-9,5 con paraffine RT42, RT55 e RT64HC

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.87*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT42;
- *Figura 3.88*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT55;
- *Figura 3.89*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con paraffina RT64HC.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.3*.

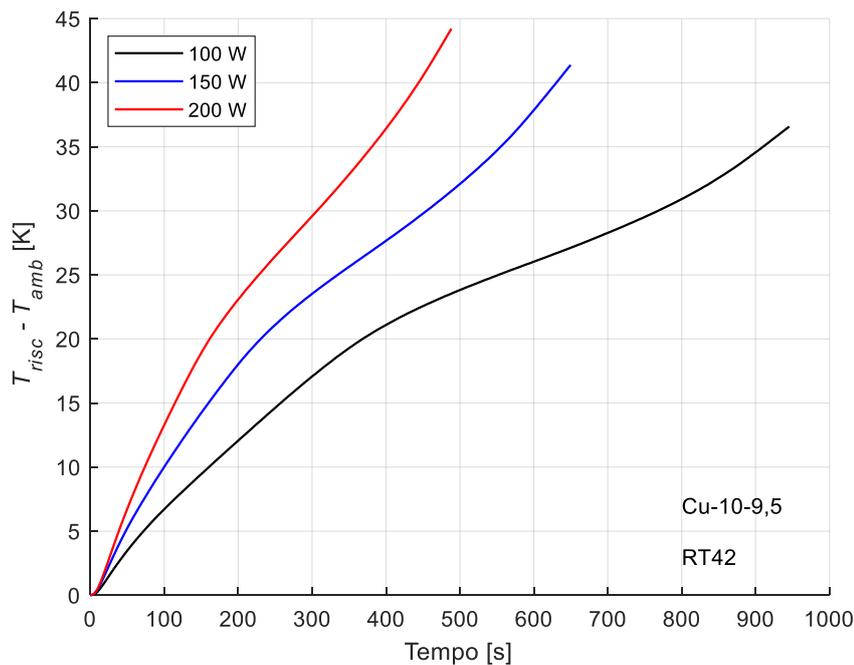


Figura 3.87: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 al variare della potenza termica.

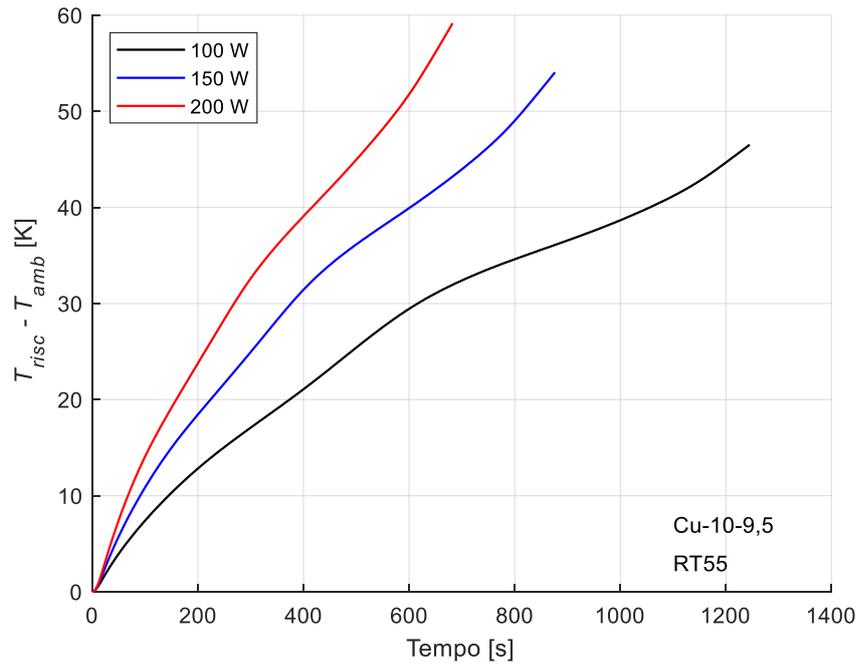


Figura 3.88: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Cu-10-9,5 al variare della potenza termica.

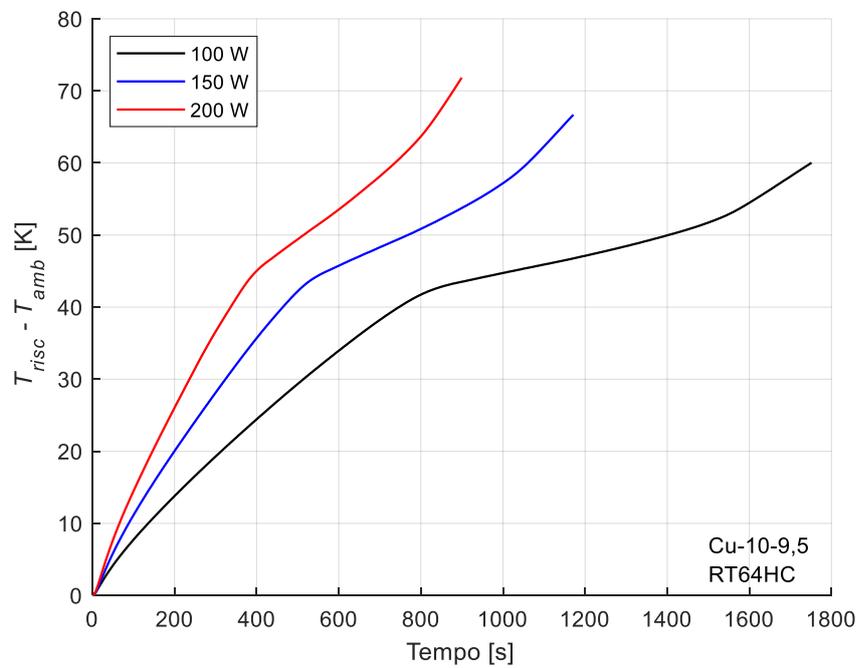


Figura 3.89: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Cu-10-9,5 al variare della potenza termica.

3.3.4 Confronto fra i moduli in rame e i moduli in alluminio

In questo paragrafo viene fatto un confronto fra il modulo in rame avente densità relativa 6,7% e una schiuma di alluminio con densità relativa pari a 7,4% che è stata precedentemente testata nella tesi di Pellizzari [36]. I due moduli presentano le stesse dimensioni e lo stesso numero di pori per pollice (in questo caso pari a dieci), infatti l'obiettivo di questo paragone è quello di vedere l'effetto del materiale, una volta che tutti gli altri parametri siano fissati. Come detto, la densità delle due schiume è leggermente diversa, infatti non è stato possibile reperire due moduli che avessero esattamente gli stessi parametri. Tuttavia, come già visto nel *Paragrafo 3.3.1*, la densità relativa ha un effetto molto limitato sulla temperatura del riscaldatore. Inoltre, la variazione di densità è molto piccola e quindi si può pensare che questa differenza non influisca sui dati ottenuti.

Osservando i risultati sperimentali si possono fare alcune considerazioni di ordine generale che valgono per tutti i casi studiati. Come fatto precedentemente, anche in questo caso è stato rappresentato l'andamento della differenza di temperatura tra il lato riscaldato e l'ambiente esterno, ovvero la temperatura del riscaldatore all'istante $t = 0$ s. In questo modo è stato infatti possibile confrontare le due schiume anche nel caso in cui i due moduli avessero diversa temperatura iniziale. Si è visto che la temperatura del riscaldatore nel modulo in rame è sempre minore rispetto all'alluminio. Questo è dovuto al fatto che il rame presenta una maggiore conducibilità termica rispetto all'alluminio, permettendo quindi un miglior trasferimento di calore dal lato riscaldato fino al lato adiabatico. Tuttavia, il tempo necessario per raggiungere la fusione completa della paraffina non è influenzato dal materiale: durante le prove si è visto che la paraffina raggiunge la fusione completa all'incirca dopo lo stesso intervallo di tempo. Inoltre, la fase di solidificazione non è molto influenzata dal tipo di materiale: in alcuni casi si ha che le due curve si sovrappongono mentre in altri si ha un piccolo distacco tra di esse. Questo è dovuto al fatto che la solidificazione dipende essenzialmente dalla temperatura dell'ambiente esterno che varia da prova a prova.

Nei grafici è stato rappresentato anche l'andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato e del lato adiabatico, come fatto nel confronto tra le schiume in rame nel *Paragrafo 3.3.1*. Anche in questo caso si nota un andamento simile a quello visto precedentemente nel caso del rame. Tuttavia, come nei casi precedenti, si ha che la curva dell'alluminio sta sempre sopra alla curva del rame. Questo è dovuto al fatto che l'alluminio presenta una minore conducibilità termica e l'aumento di densità è talmente piccolo da non poter compensare la grande differenza di conducibilità termica.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT42 e potenza termica 100 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.90*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.91*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.92*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

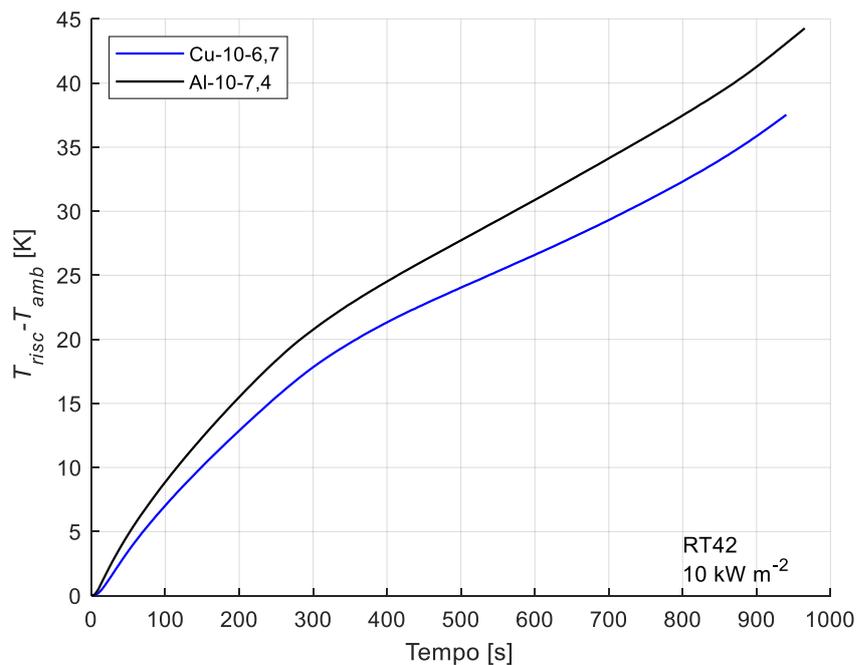


Figura 3.90: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

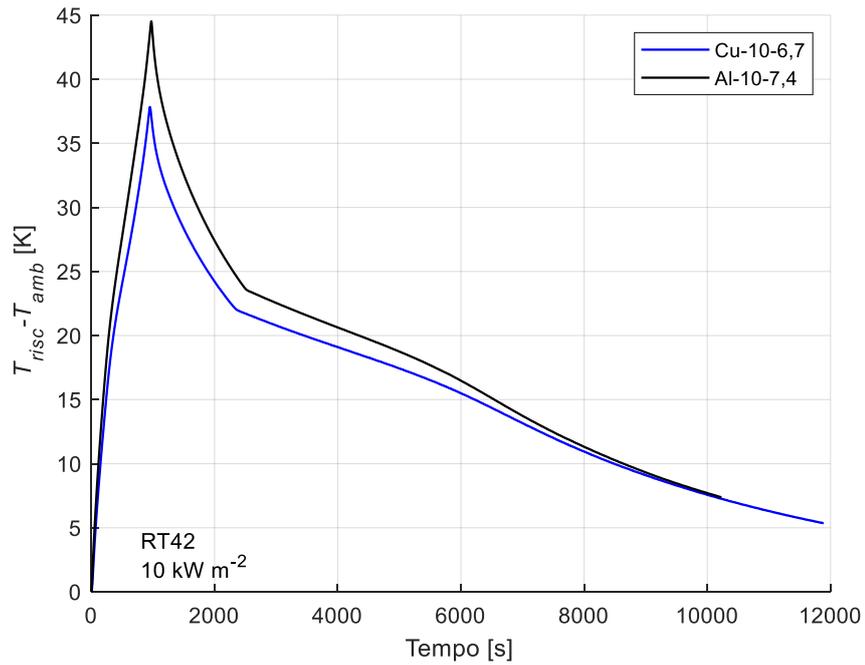


Figura 3.91: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

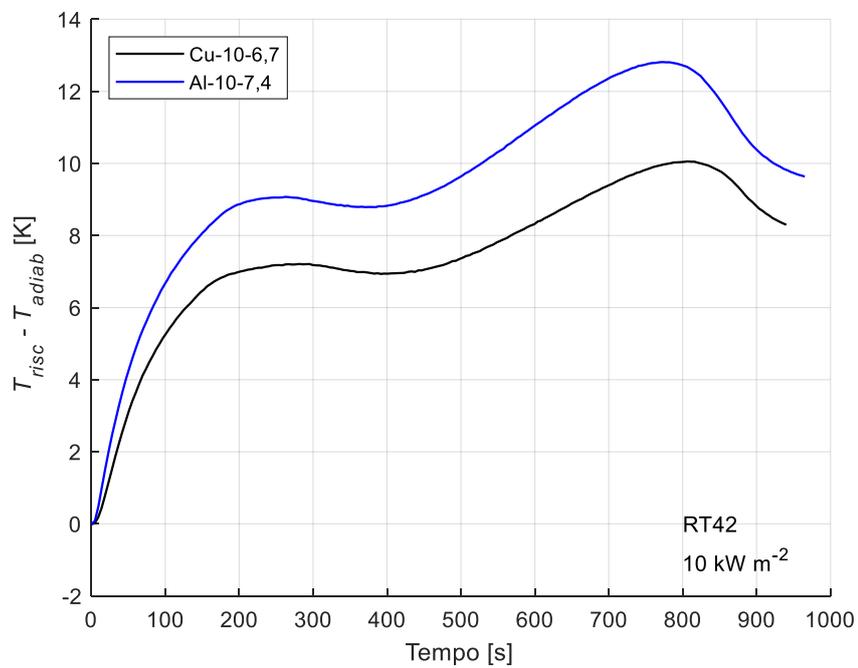


Figura 3.92: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT42 e potenza termica 150 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.93*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.94*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.95*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

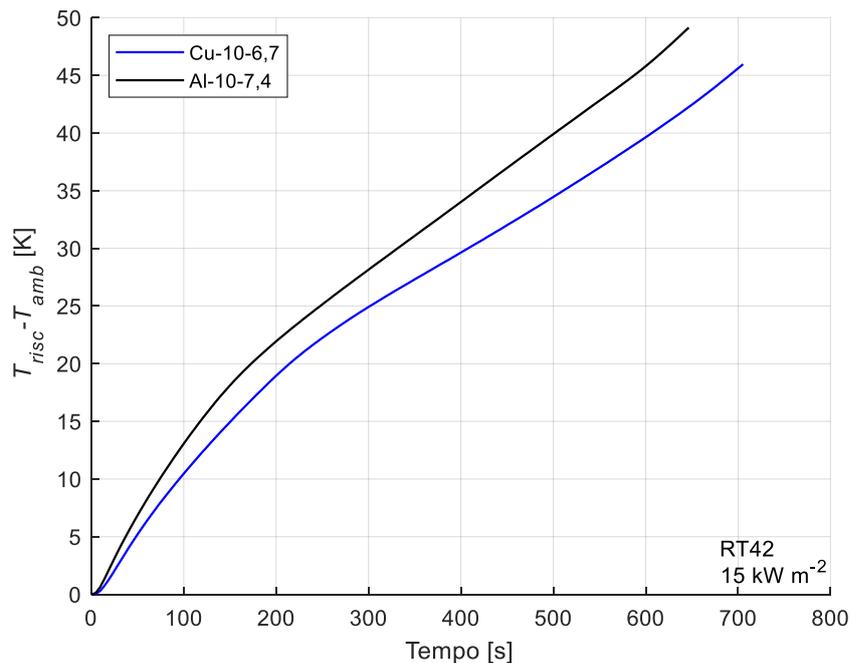


Figura 3.93: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 100 W.

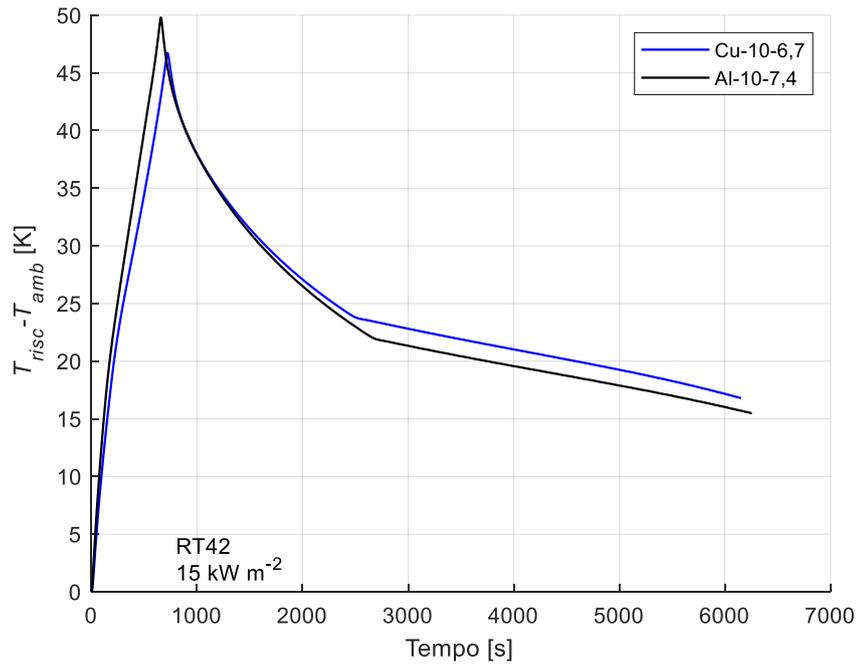


Figura 3.94: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 150 W.

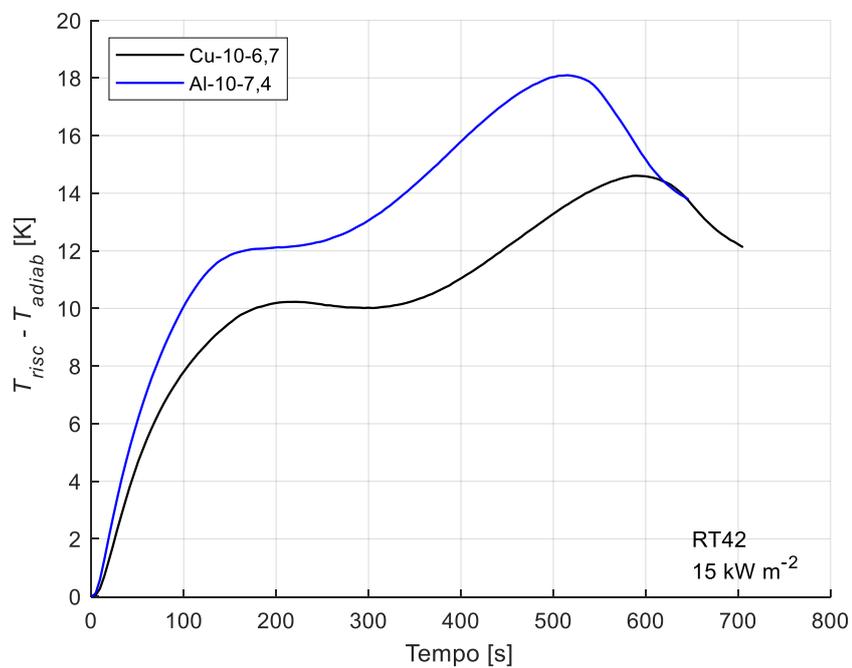


Figura 3.95: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 150 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT42 e potenza termica 200 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.96:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.97:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.98:* Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

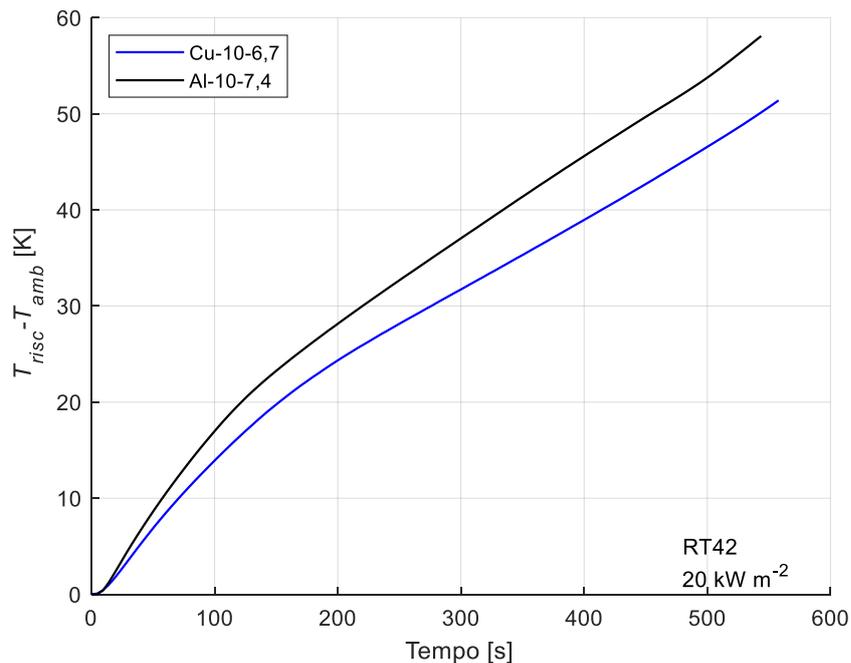


Figura 3.96: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 200 W.

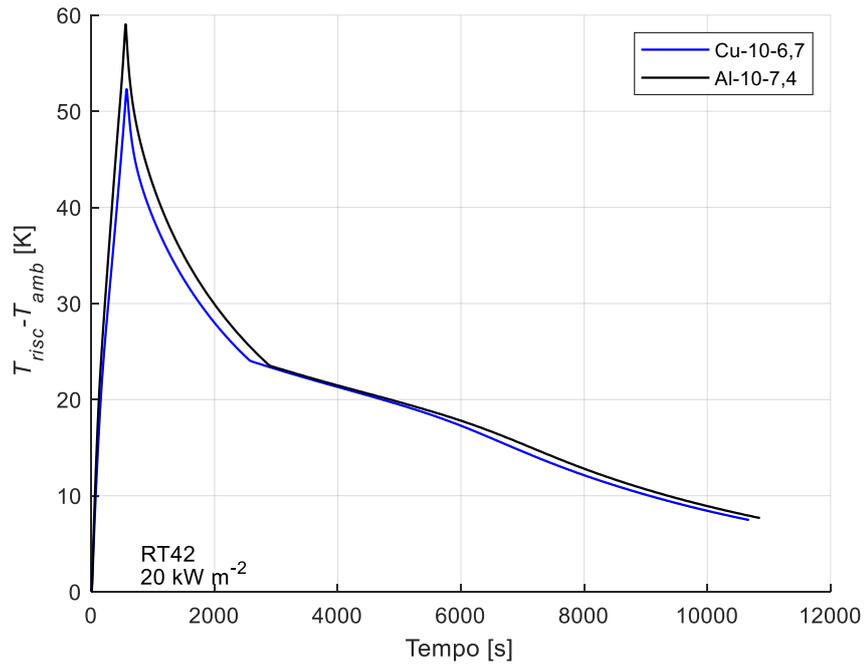


Figura 3.97: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 200 W.

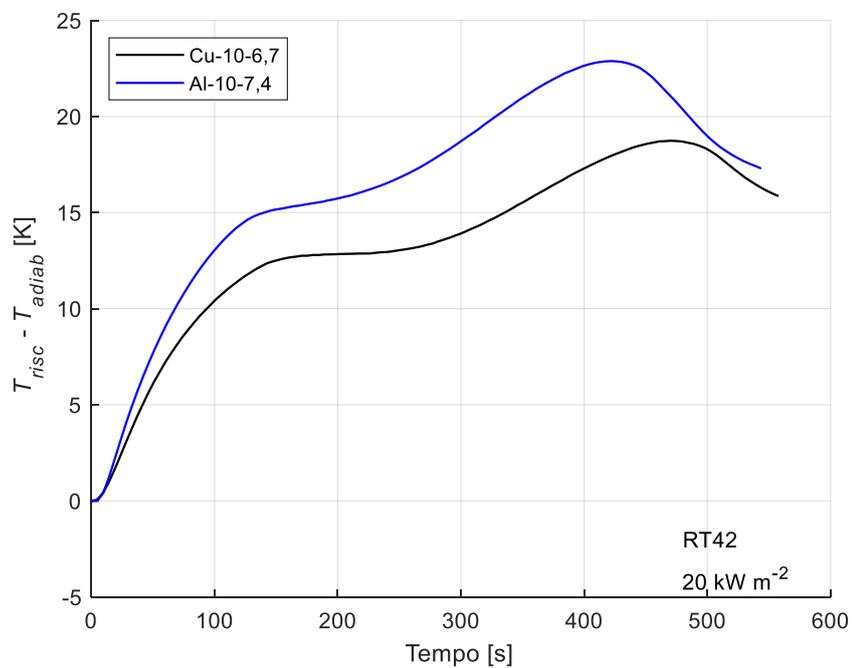


Figura 3.98: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT42 e potenza termica 200 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT55 e potenza termica 100 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.99*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.100*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.101*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

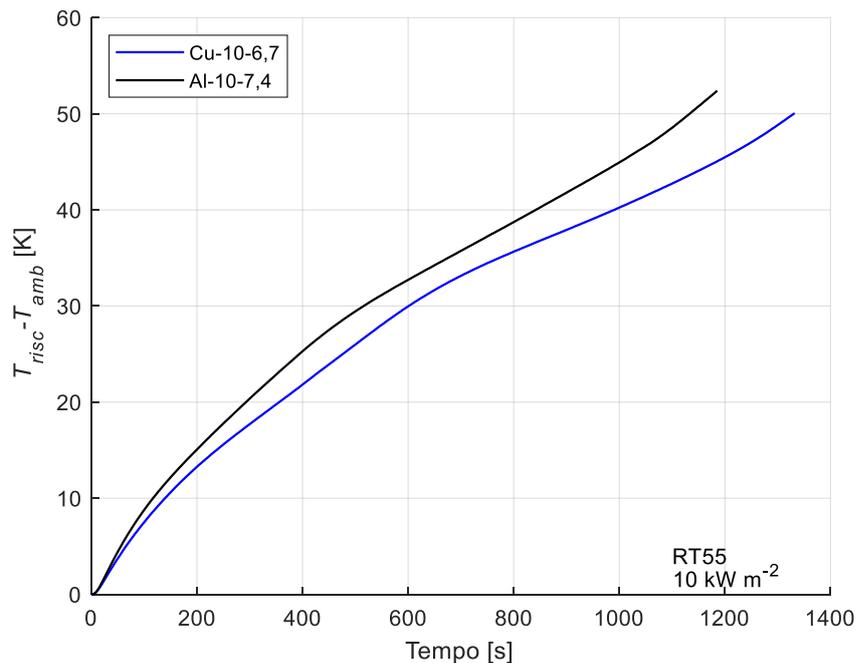


Figura 3.99; Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 100 W.

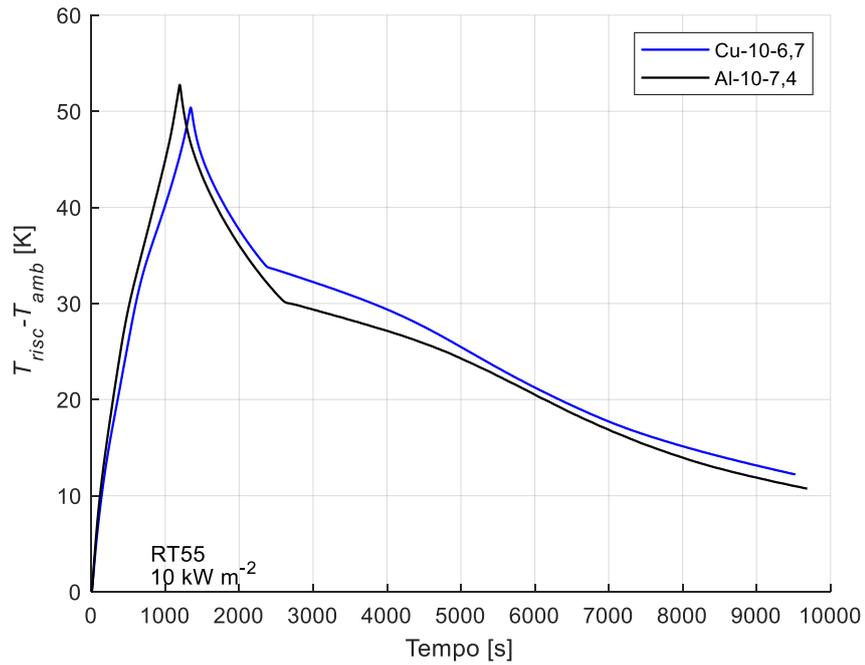


Figura 3.100: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 100 W.

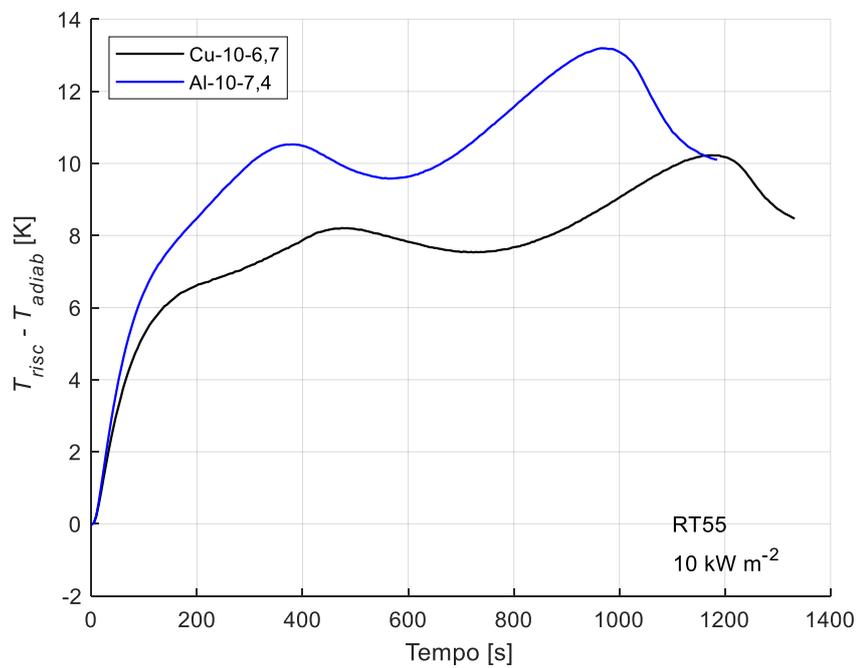


Figura 3.101: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 100 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT55 e potenza termica 150 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.102*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.103*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.104*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

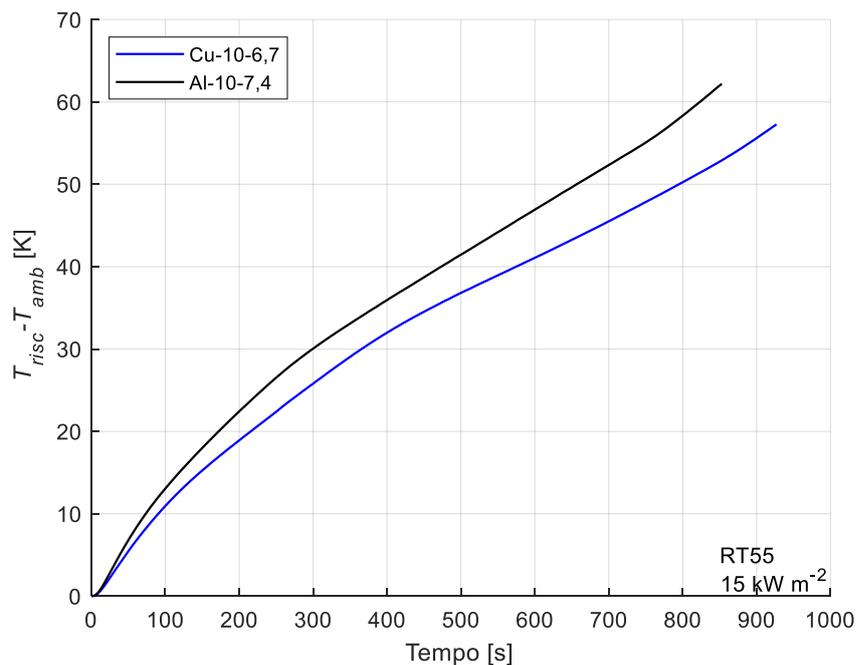


Figura 3.102: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 150 W.

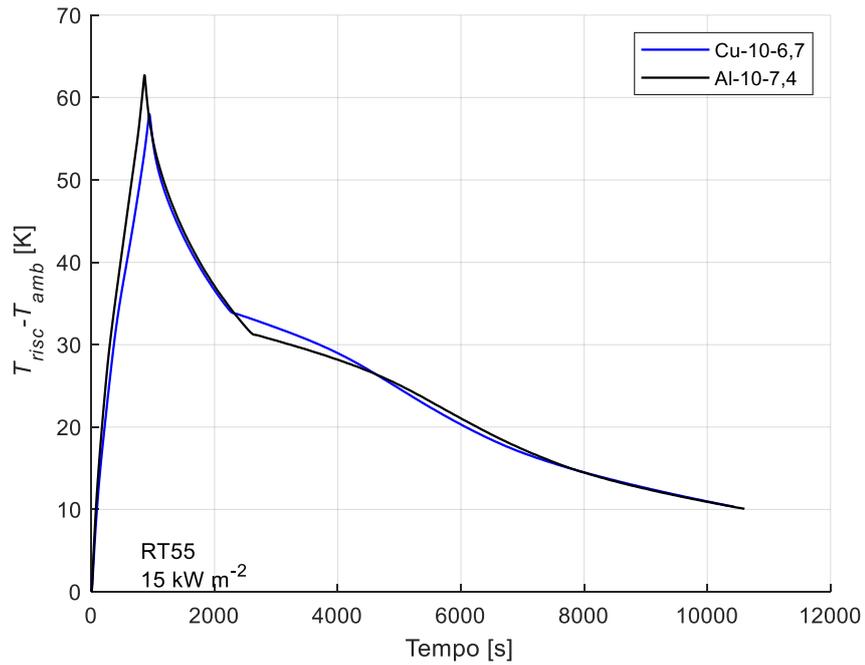


Figura 3.103: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 150 W.

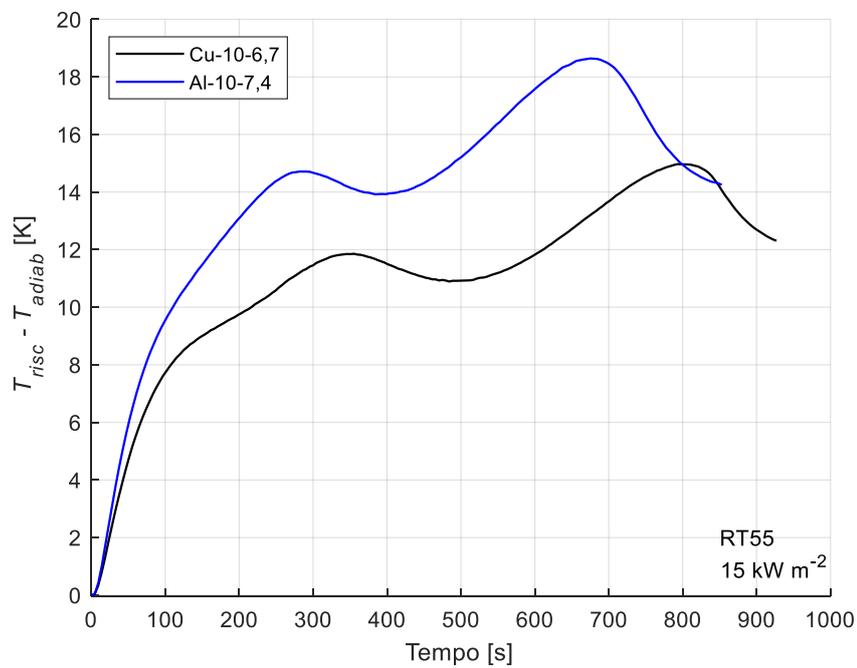


Figura 3.104: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 150 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT55 e potenza termica 200 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.105*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.106*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.107*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

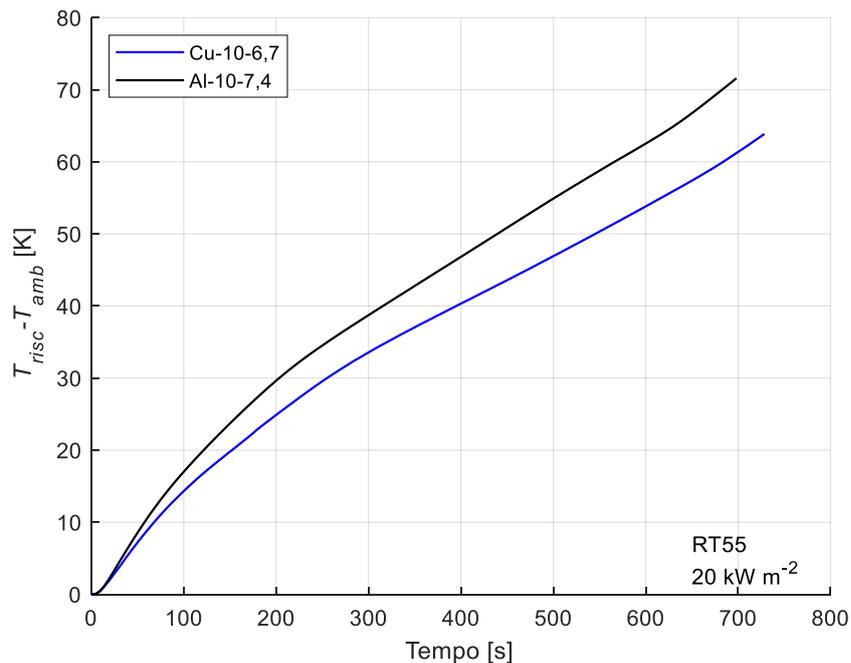


Figura 3.105: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 200 W.

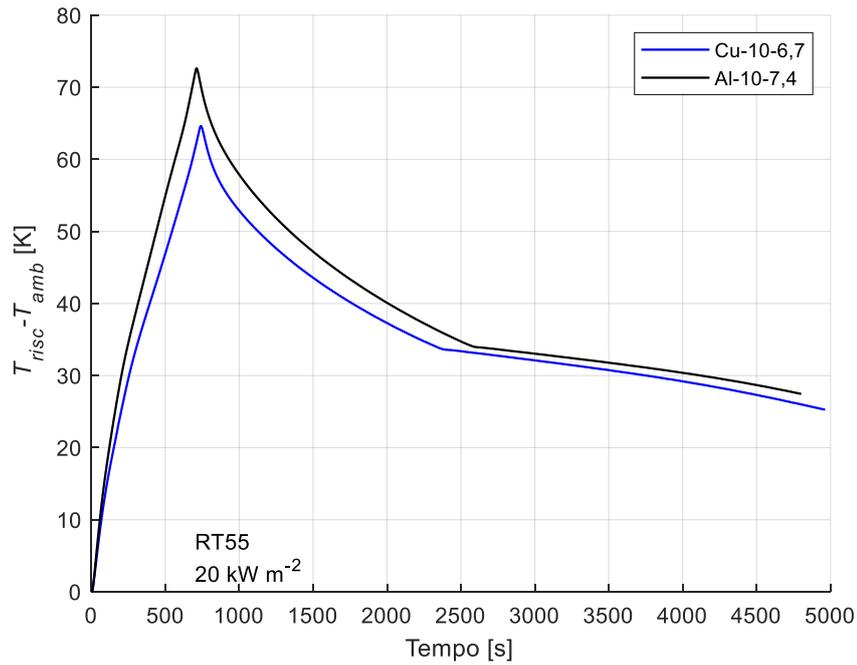


Figura 3.106: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 200 W.

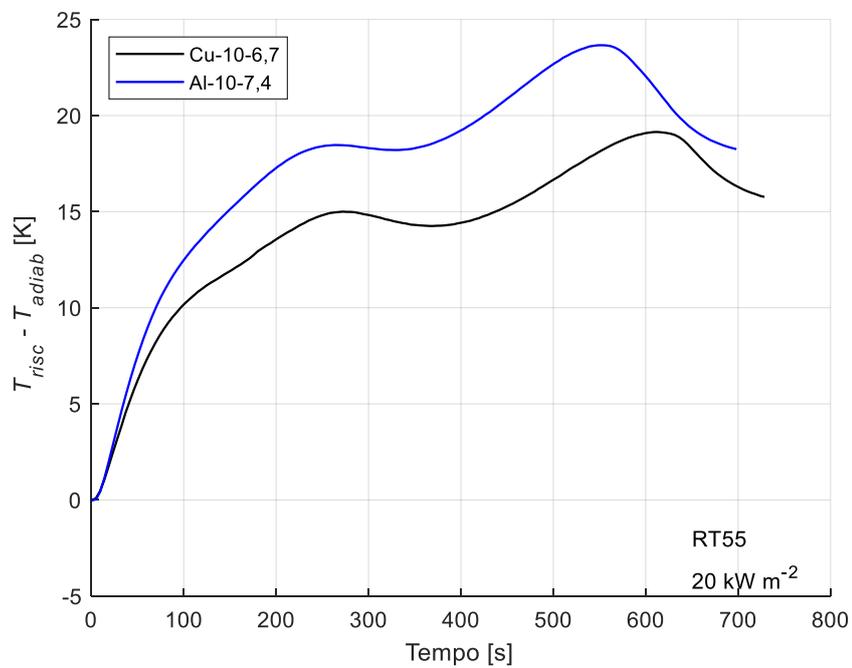


Figura 3.107: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT55 e potenza termica 200 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.108*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.109*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 100 W;
- *Figura 3.110*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 100 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*

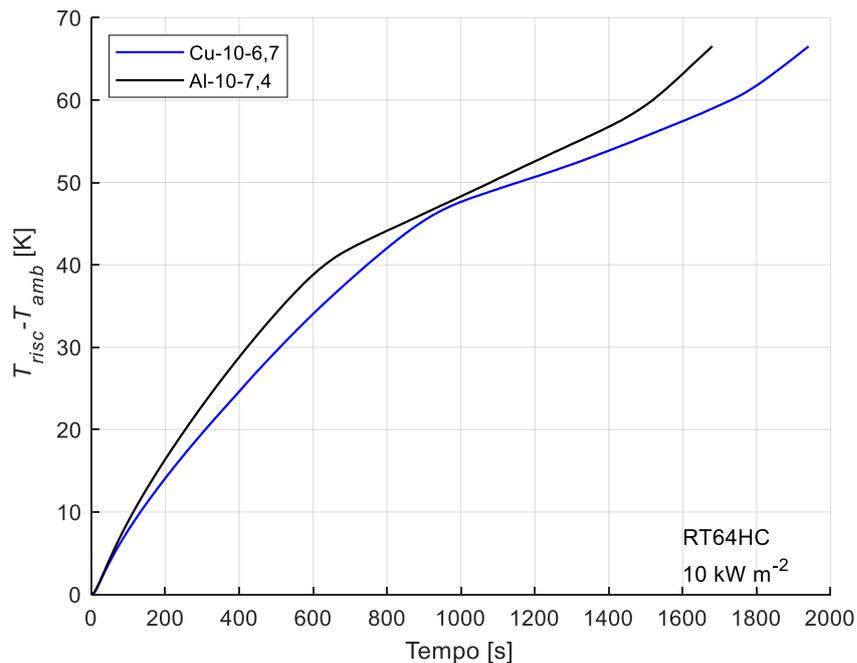


Figura 3.108: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W.

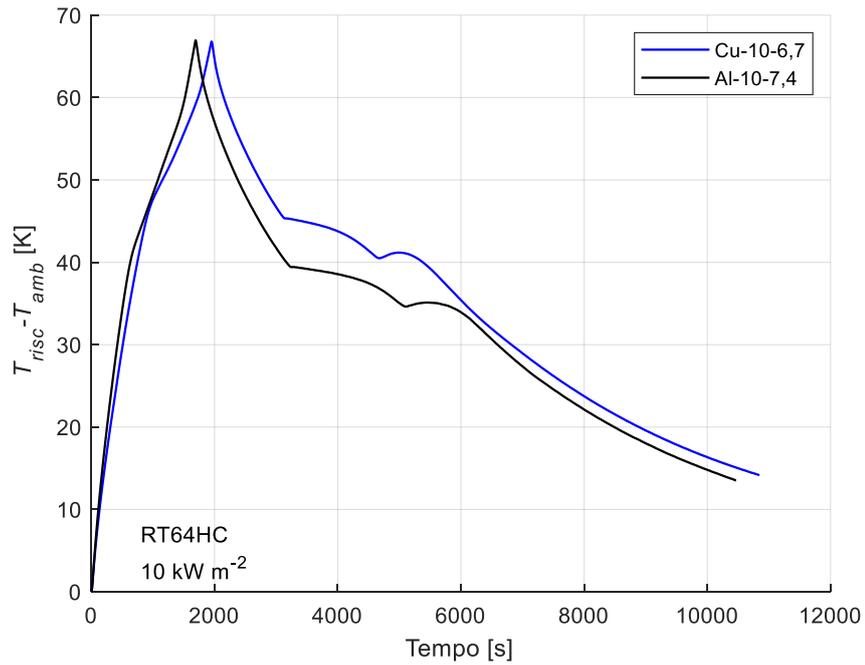


Figura 3.109: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W.

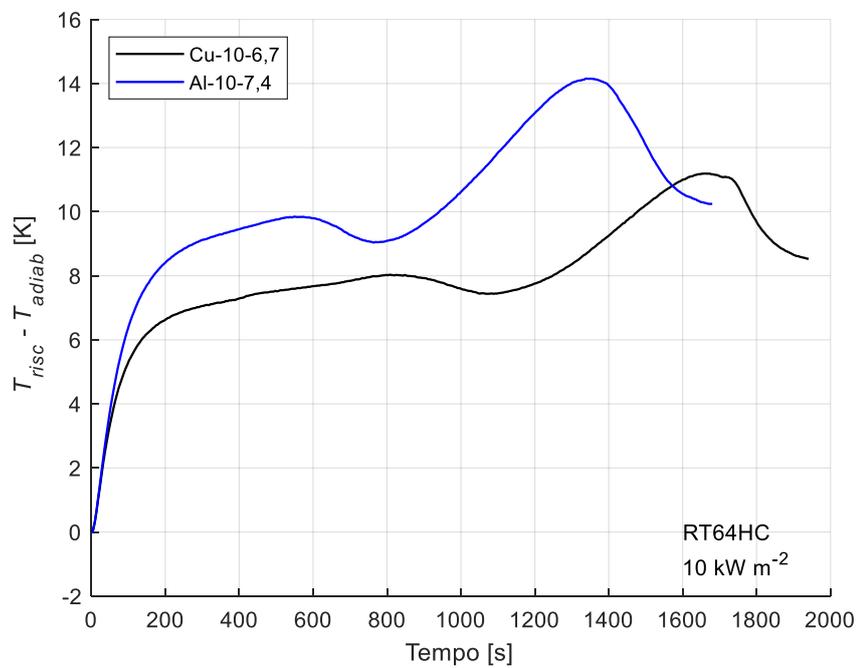


Figura 3.110: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 100 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.111*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.112*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 150 W;
- *Figura 3.113*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 150 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

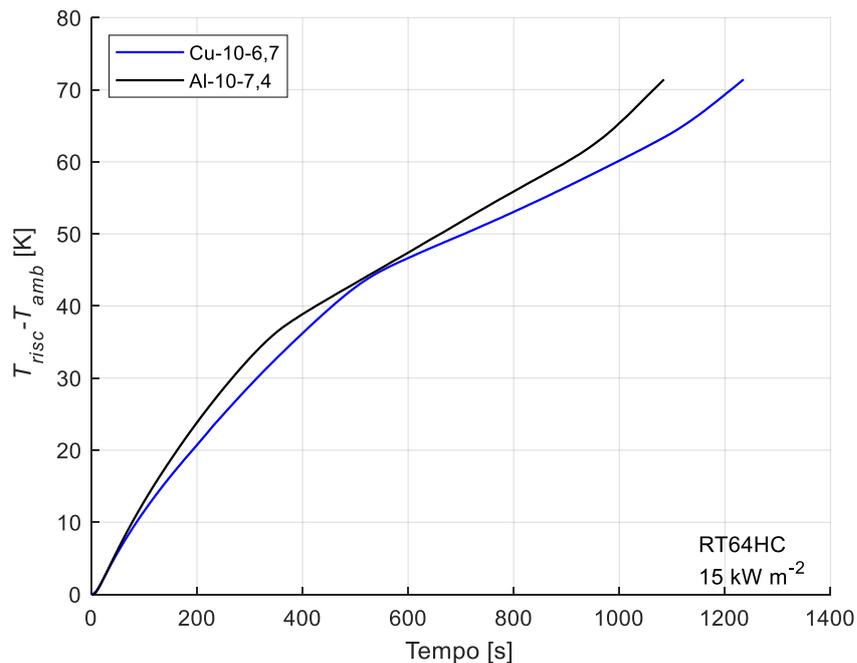


Figura 3.111: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W.

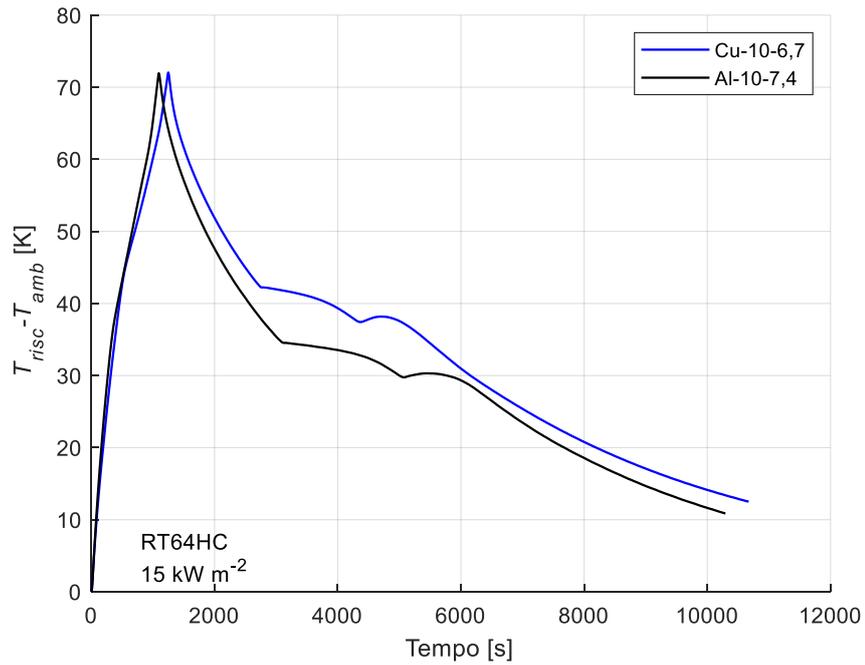


Figura 3.112: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W.

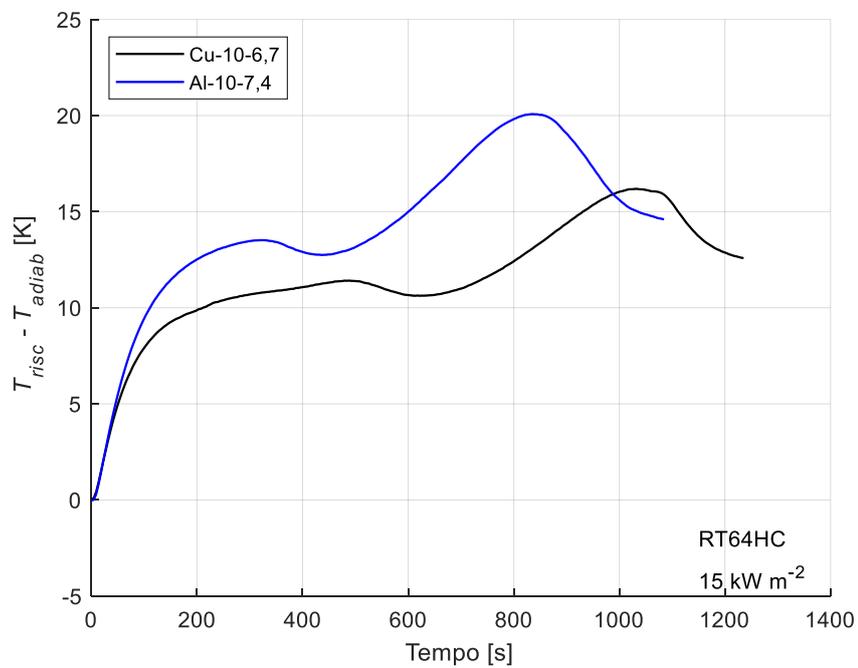


Figura 3.113: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 150 W.

Moduli Cu-10-6,7 e Al-10-7,4 con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W

Le figure relative a questo confronto sono le seguenti:

- *Figura 3.114*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.115*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura ambiente T_{amb} durante l'intera prova con potenza termica 200 W;
- *Figura 3.116*: Andamento della differenza tra la temperatura del lato riscaldato T_{risc} e la temperatura del lato adiabatico T_{adiab} durante la fase di fusione con potenza termica 200 W.

Per le considerazioni relative a questo confronto si veda il *Paragrafo 3.3.4*.

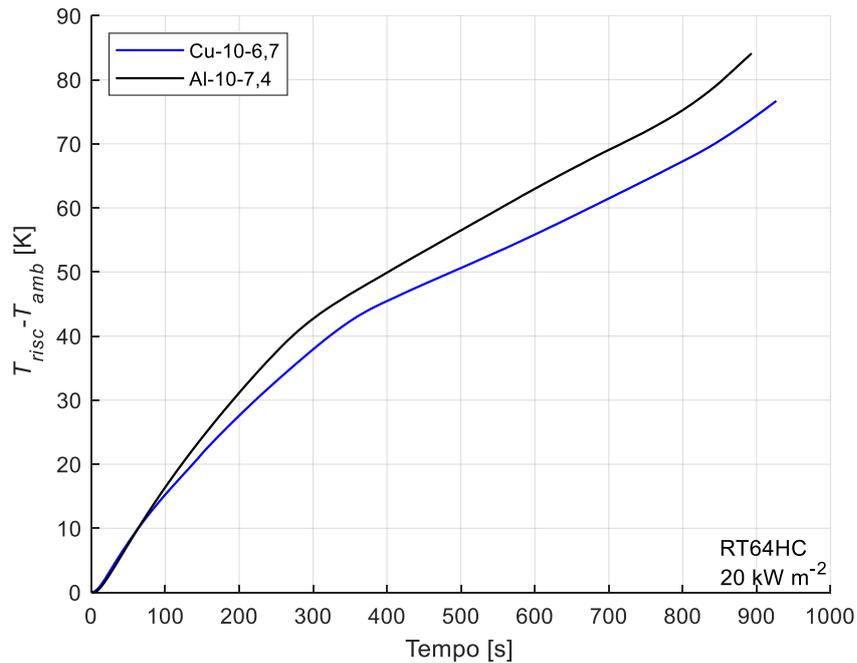


Figura 3.114: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W.

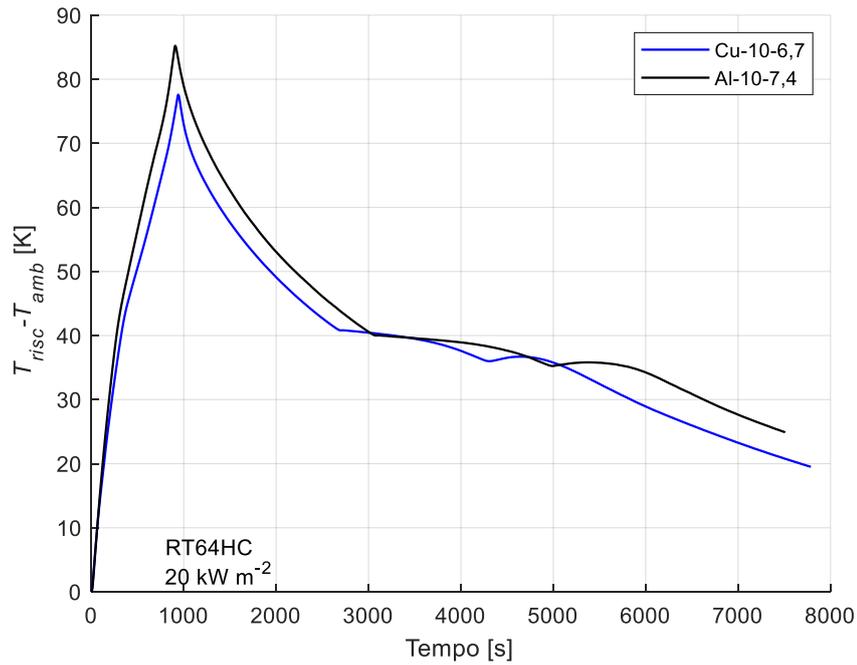


Figura 3.115: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura ambiente durante l'intera prova di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W.

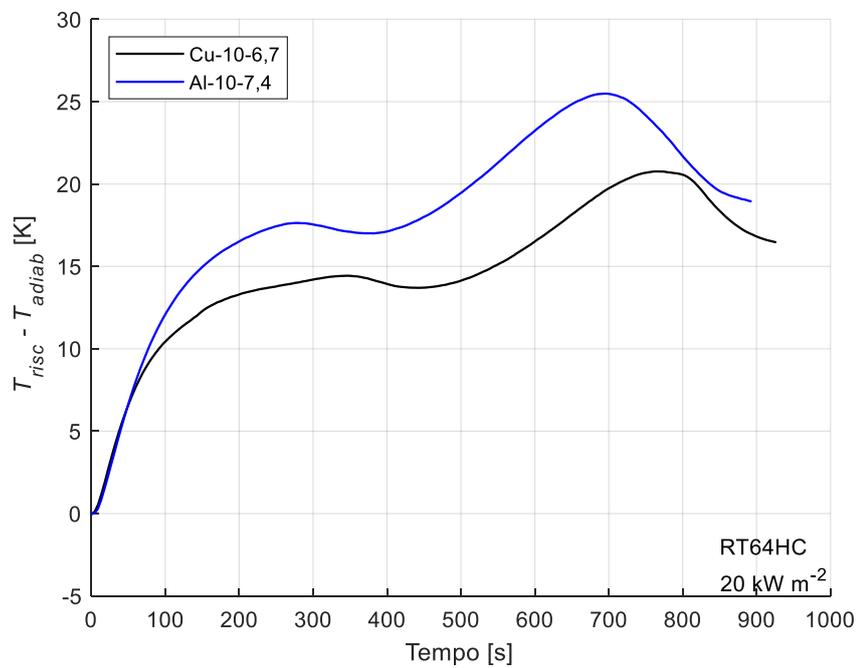


Figura 3.116: Differenza fra la temperatura del riscaldatore e la temperatura media del lato adiabatico durante la fase di fusione con paraffina RT64HC e potenza termica 200 W.

3.3.5 Confronto fra i dati acquisiti e le correlazioni presenti in letteratura

In questo paragrafo viene presentato un confronto fra i dati acquisiti e la correlazione sviluppata da Diani e Campanale [17]. Questa equazione è composta da una serie di numeri adimensionali che vengono messi in relazione tra loro. Il primo parametro è il numero di Fourier Fo , che rappresenta il rapporto tra il trasporto diffusivo e l'energia accumulata:

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

dove:

- t_{fus} è il tempo necessario per sciogliere l'intero blocco di paraffina;
- h è la distanza del fronte di fusione dal lato riscaldato, ovvero l'altezza del PCM rispetto al fronte di fusione (nelle schiume utilizzate $h = 0,02$ m);
- k_{eff} è la conducibilità termica effettiva che può essere calcolata come:

$$k_{eff} = 0,33 \cdot k_{solid} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (3.2)$$

dove k_{solid} è la conduttività termica del materiale che forma la schiuma (nel caso del rame vale che $k_{solid} = 390 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ed ε è la porosità;

- ρ_{eff} è la densità effettiva che tiene conto della presenza della schiuma e del PCM e può essere calcolata come:

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

dove suffisso "PCM" si riferisce alle caratteristiche del materiale a cambiamento di fase e "solid" rappresenta il materiale che compone la schiuma;

- $c_{p,eff}$ è il calore specifico effettivo e si calcola come:

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

Il secondo parametro adimensionale è il numero di Stefan (Ste), che è il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente:

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

dove

- T_{fus} è la temperatura di fusione della paraffina considerata;
- T_i è la temperatura iniziale;
- L_{eff} è il calore latente effettivo che si calcola come:

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

Il terzo e ultimo parametro è la temperatura adimensionale θ che è definita come:

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

dove T_f è la temperatura raggiunta dal lato riscaldato quando il processo di fusione termina.

A questo punto è possibile rappresentare in un grafico la temperatura adimensionale θ in funzione del prodotto tra il numero di Fourier e il numero di Stefan:

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

Elevati valori del prodotto $\text{Fo} \cdot \text{Ste}$ e bassi valori della temperatura adimensionale θ corrispondono a bassi flussi termici e quindi il tempo necessario per fondere completamente la

paraffina è maggiore e la temperatura raggiunta dal lato riscaldato è minore. Viceversa, piccoli valori del numero $Fo \cdot Ste$ e grandi valori di θ corrispondono ad elevati flussi termici.

La correlazione proposta da Diani e Campanale [17] si presenta nella forma:

$$\theta = 1,9073 \cdot (Fo \cdot Ste)^{-0,717} \quad (3.9)$$

Come si nota dalla *Figura 3.117* la correlazione permette di interpolare bene i dati acquisiti, vi è quindi accordo tra i dati misurati e la correlazione proposta.

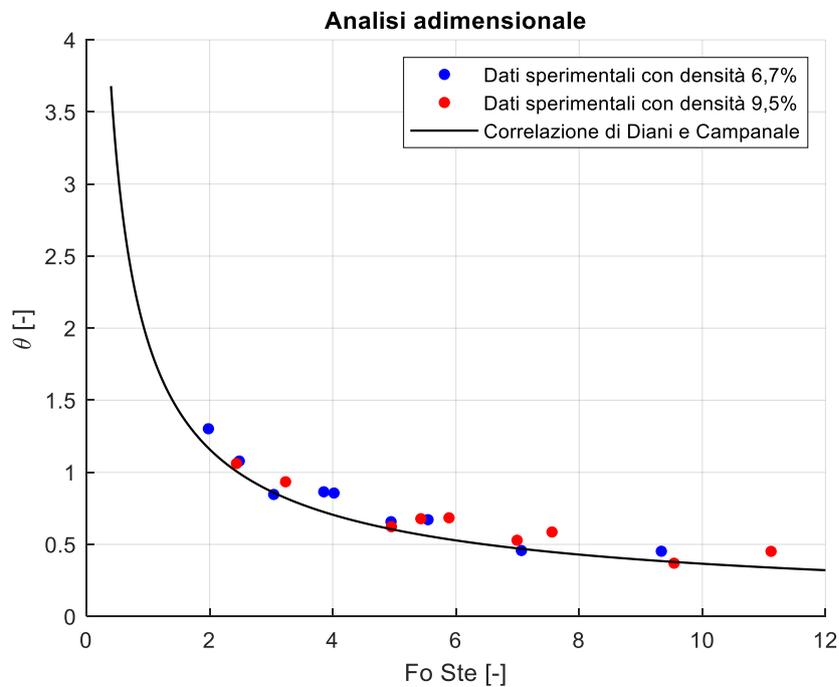


Figura 3.117: Temperatura adimensionale θ in funzione del prodotto $Fo \cdot Ste$. I dati sperimentali si riferiscono alle due schiume in rame che presentano densità relativa 6,7% e 9,5%.

A questo punto è possibile calcolare la deviazione relativa, secondo la seguente formula:

$$\text{Deviazione relativa} = \frac{\theta_{\text{calc}} - \theta}{\theta} \cdot 100 \quad (3.10)$$

dove θ_{calc} è stato ottenuto utilizzando l'equazione (3.9) e inserendo i valori di $F_o \cdot Ste$ precedentemente calcolati con l'equazione (3.8), mentre θ è il valore dato dall'equazione (3.7), calcolato per ogni prova sperimentale. Si ottengono in questo modo i valori riportati in *Tabella 4.1*. Facendo la media dei valori della deviazione relativa si può calcolare l'errore relativo medio, che risulta essere:

$$\text{Errore relativo medio} = -11,2\%.$$

Successivamente è possibile calcolare l'errore assoluto medio, facendo la media dei valori assoluti delle deviazioni standard precedentemente calcolate:

$$\text{Errore assoluto medio} = 11,9\%.$$

Infine, utilizzando il *software Excel* è possibile ottenere la deviazione standard:

$$\text{Deviazione standard} = 8,6\%.$$

Tabella 4.1: Valori di θ_{calc} , θ e della deviazione relativa ottenuti per tutte le prove sperimentali.

Schiuma	Paraffina	Flusso termico specifico	θ_{calc}	θ	Deviazione relativa
Cu-10-6,7	RT42	10 kW m ⁻²	0,859	0,846	1,4%
		15 kW m ⁻²	0,993	1,078	-7,8%
		20 kW m ⁻²	1,168	1,302	-10,3%
	RT55	10 kW m ⁻²	0,469	0,457	2,6%
		15 kW m ⁻²	0,606	0,657	-7,8%
		20 kW m ⁻²	0,724	0,864	-16,1%
	RT64HC	10 kW m ⁻²	0,384	0,452	-15,0%
		15 kW m ⁻²	0,558	0,671	-16,8%
		20 kW m ⁻²	0,703	0,856	-17,8%
Cu-10-9,5	RT42	10 kW m ⁻²	0,605	0,622	-2,7%
		15 kW m ⁻²	0,822	0,934	-12,0%
		20 kW m ⁻²	1,007	1,061	-5,0%
	RT55	10 kW m ⁻²	0,378	0,369	2,3%
		15 kW m ⁻²	0,472	0,528	-10,5%
		20 kW m ⁻²	0,566	0,678	-16,4%
	RT64HC	10 kW m ⁻²	0,339	0,451	-24,9%
		15 kW m ⁻²	0,447	0,586	-23,6%
		20 kW m ⁻²	0,535	0,684	-21,8%

Capitolo 4 – Conclusioni

Negli ultimi anni si stanno diffondendo sempre di più dispositivi elettronici come *computer*, *tablet* e *smartphone*. Questi sistemi hanno la necessità di dissipare il calore che viene prodotto dai *chip* presenti al loro interno. Attualmente l'elettronica viene raffreddata utilizzando delle ventole o sistemi idraulici che possono comportare una notevole spesa di energia elettrica. Tale problema può essere risolto con l'utilizzo dei PCM che permettono di assorbire grandi quantità di calore nel cambiamento di fase dallo stato solido allo stato liquido. Questi sistemi sono detti passivi perché non richiedono alcun *input* di energia e possono funzionare anche durante i guasti oppure durante la manutenzione dei sistemi attivi. La temperatura di fusione del materiale a cambiamento di fase deve essere scelta opportunamente in base all'applicazione considerata. Per questo motivo, in questa tesi, si è deciso di utilizzare le paraffine, che sono materiali che presentano un vasto *range* di temperature di fusione. Inoltre, questi PCM non sono tossici e sono infiammabili solo ad alte temperature, risultando così sicuri per la salute dell'uomo. Tuttavia, come già detto, la paraffina presenta una bassa conducibilità termica e questo rende difficile il trasferimento del calore. Considerando tali aspetti, si è deciso di utilizzare delle schiume metalliche in rame per aumentare la conducibilità termica del sistema. In particolare, sono stati testati due moduli che presentano lo stesso numero di pori per pollice e diversa densità relativa (*Paragrafo 3.3.1*). In entrambi i casi l'utilizzo della schiuma consente di aumentare la conducibilità termica del sistema facendo sì che la temperatura del lato riscaldato rimanga a valori accettabili. Si è visto che all'aumentare della densità relativa della schiuma la temperatura raggiunta dal lato riscaldato dopo lo stesso intervallo di tempo è minore. Inoltre, si ha che la fusione completa viene raggiunta qualche istante dopo nel caso in cui la densità della schiuma sia minore. Al crescere della densità relativa, a parità di PPI, si ha che lo spessore della fibra aumenta. Di conseguenza la massa di paraffina presente all'interno del sistema diminuisce. Per questo motivo si ha che è necessario fondere una più piccola quantità di materiale e quindi la fusione avviene in tempi minori. Inoltre, essendo aumentato lo spessore della fibra, si ha che il calore può distribuirsi più velocemente all'interno della schiuma e la conducibilità termica del sistema cresce, facendo sì che la temperatura raggiunta dal lato riscaldato sia leggermente minore.

I dispositivi elettronici possono avere dimensioni molto differenti e quindi anche il calore da smaltire può essere molto diverso. Per questo motivo si è deciso di testare i moduli utilizzando tre diversi flussi termici (*Paragrafo 3.3.3*). Si è visto che all'aumentare del flusso termico la temperatura del lato riscaldato cresce e la fase di fusione inizia prima.

Per vedere l'effetto della temperatura di fusione sono stati testate tre differenti paraffine (RT42, RT55 e RT64HC) che presentano tre diverse temperature di fusione. Si è visto che all'aumentare della temperatura di fusione, cresce la temperatura raggiunta dal lato riscaldato ed è necessario un tempo maggiore per fondere completamente il PCM. Considerando tali aspetti, la scelta della paraffina dipende dall'intervallo di tempo in cui è necessario raffreddare il componente elettronico. Se il sistema deve essere raffreddato per un breve periodo di tempo è opportuno utilizzare una paraffina che presenta una bassa temperatura di fusione, come la RT42, se invece il dispositivo deve funzionare per un lungo periodo di tempo sarà necessario usare una paraffina con più elevata temperatura di fusione, come la RT64HC. Per intervalli di tempo intermedi la paraffina RT55 è la scelta migliore.

I dati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti nella tesi di Pellizzari [36] per le schiume in alluminio (*Paragrafo 3.3.4*). I risultati hanno dimostrato che le schiume in rame, data la loro maggiore conducibilità termica, permettono di mantenere una minore temperatura del lato riscaldato, risultando quindi più efficienti nella dissipazione del calore. Inoltre, il tempo necessario per raggiungere la fusione completa non è molto diverso nei due casi e quindi questo parametro non è influenzato dal tipo di materiale e dipende essenzialmente dalla temperatura di fusione della paraffina.

Dai risultati ottenuti si può quindi affermare che l'utilizzo di superfici estese all'interno dei materiali a cambiamento di fase è un'ottima soluzione per il raffreddamento passivo dei sistemi elettronici. L'utilizzo delle schiume in rame permette di contenere l'aumento di temperatura nel lato riscaldato e quindi di raffreddare in maniera efficiente il sistema. Per concludere, si può dire che in futuro si potranno svolgere ulteriori ricerche variando le dimensioni delle celle elementari e la loro forma. Per questo motivo, sono state progettate delle strutture estese (*Paragrafo 2.2*) che presentano delle celle di dimensioni maggiori rispetto alle schiume, pari a 5 e 10 mm. In studi precedenti è stato osservato che con celle di dimensioni inferiori ai 5 mm non si hanno moti convettivi e di conseguenza il numero di pori per pollice non influisce sui risultati sperimentali. Utilizzando delle strutture con celle più grandi è quindi possibile vedere l'effetto di questo parametro e osservare la possibile formazione di moti convettivi. Infine, si è deciso di creare delle geometrie che presentassero elevata porosità e forme differenti rispetto a quelle delle schiume in rame. In futuro, testando queste strutture, sarà possibile vedere come la dimensione e la geometria della cella influenzino lo scambio termico.

Bibliografia

- [1] V. N. Stathopoulos e N. C. Elias , «A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage», *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 385-394, 2019.
- [2] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen e D. Buddhi, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [3] S. R. L. da Cunha e J. L. B. de Aguiar, «Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge», *Journal of Energy Storage*, vol. 27, pp. 101083-1-13, 2020.
- [4] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva e G. Fang, «Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2730-2742, 2018.
- [5] S. S. Narayanan, A. Kardam, V. Kumar, N. Bhardwaj, D. Madhwal, P. Shukla, A. Kumar, A. Verma e V. K. Jain, «Development of sunlight-driven eutectic phase change material nanocomposite for applications in solar water heating», *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, pp. 272-279, 2017.
- [6] W. Su, J. Darkwa e G. Kokogiannakis, «Development of microencapsulated phase change material for solar thermal energy storage», *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1205-1212, 2017.
- [7] A. J. N. Khalifa, K. H. Suffer e M. S. Mahmoud, «A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material», *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 174-181, 2013.
- [8] W. Zhao, D. M. France, W. Yu, T. Kim e D. Singh, «Phase change material with graphite foam for applications in high-temperature latent heat storage systems of concentrated solar power plants», *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 134-146, 2014.
- [9] N. P. Sharifi, A. A. N. Shaikh e A. R. Sakulich, «Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals», *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 455-467, 2017.

- [10] R. Ye, W. Lin, X. Fang e Z. Zhang, «Experimental and numerical investigations on the thermal performance of building plane containing $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ /expanded graphite composite phase change material», *Applied Energy*, vol. 193, pp. 325-335, 2017.
- [11] J. Krishna, P. S. Kishore e A. B. Solomon, «Heat pipe with nano enhanced-PCM for electronic cooling application», *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 81, pp. 84-92, 2017.
- [12] Y. Yusufoglu, T. Apaydin, S. Yilamz e H. O. Paksoy, «Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials», *International Journal of Refrigeration*, vol. 57, pp. 173-185, 57.
- [13] A. Shaid, L. Wang, S. Islam, J. Y. Cai e R. Padhye, «Preparation of aerogel-eicosane microparticles for thermoregulatory coating on textile», *Applied Thermal Engineerin*, vol. 107, pp. 602-611, 2016.
- [14] M. Itani, N. Ghaddar, K. Ghali, D. Ouahrani e W. Chakroun, «Cooling vest with optimized PCM arrangement targeting torso sensitive areas that trigger comfort when cooled for improving human comfort in hot conditions», *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 417-425, 2017.
- [15] M. Xia, Y. Yuan, X. Zhao, X. Cao e Z. Tang, «Cold storage condensation heat recovery system with a novel composite phase change material», *Applied Energy*, vol. 175, pp. 259-268, 2016.
- [16] A. Bertrand, R. Agguoune e F. Maréchal, «In-building waste water heat recovery: An urban-scale method for the characterisation of water streams and the assessment of energy savings and costs», *Applied Energy*, vol. 192, pp. 110-125, 2017.
- [17] A. Diani e M. Campanale, «Transient melting of paraffin waxes embedded in aluminum foams: Experimental results and modeling», *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 144, pp. 119-128, 2019.
- [18] R. Kandasamy, X.-Q. Wang e A. S. Mujumdar, «Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks», *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1047-1057, 2008.
- [19] S. C. Fok, W. Shen e F. L. Tan, «Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials infinned heat sinks», *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 109-117, 2010.

- [20] X. Xiao, P. Zhang e M. Li, «Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage», *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 81, pp. 94-105, 2014.
- [21] C. Y. Zhao, W. Lu e Y. Tian, «Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)», *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1402-1412, 2010.
- [22] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman e L. Rossetto, «Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams», *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 90, pp. 79-89, 2015.
- [23] A. Diani, K. K. Boldá, L. Rossetto e S. V. Garimella, «Numerical Analysis of Air Flow Through Metal Foams», *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 645-652, 2014.
- [24] W. G. Alshaer, S. A. Nada, M. A. Rady, E. P. Del Barrio e A. Sommer, «Thermal management of electronic devices using carbon foam and PCM/nano-composite», *International Journal of Thermal Science*, vol. 89, pp. 79-86, 2015.
- [25] Y. Zhong, Q. Guo, S. Li, J. Shi e L. Liu, «Heat transfer enhancement of paraffin wax using graphite foam for thermal energy storage», *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, pp. 1011-1014, 2010.
- [26] J. F. Li, W. Lu, Y. B. Zeng e Z. P. Luo, «Simultaneous enhancement of latent heat and thermal conductivity of docosane-based phase change material in the presence of spongy graphene», *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 128, pp. 48-51, 2018.
- [27] Y. B. Tao e Y.-L. He, «A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 245-259, 2018.
- [28] C. Veerakumar e A. Sreekumar, «Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review», *International Journal of Refrigeration*, vol. 67, pp. 271-289, 2016.
- [29] H. Nazir, M. Batool, F. J. B. Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. Xu, K. Vignarooban, P. Phelan, Inamuddin e A. M. Kannan, «Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 491-523, 2019.

- [30] Y. B. Tao, C. H. Lin e Y. L. He, «Preparation and thermal properties characterization of carbonate salt/carbon nanomaterial composite phase change material», *Energy Conversion and Management*, vol. 97, pp. 103-110, 2015.
- [31] A. Diani, *Experimental and numerical analysis of microstructured surfaces*, 2014.
- [32] Società ERG materials & aerospace, [Online]. Available: <http://ergaerospace.com/technical-data/the-basics-of-duocel-foam/>. [Consultato il giorno 20 01 2020].
- [33] S. Krishan, J. Y. Murthy e S. V. Garimella, «Direct Simulation of Transport in Open-Cell Metal Foams», *Journal of Heat Transfer*, vol. 128, pp. 793-799, 2006.
- [34] X. Hu e 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*, vol. 151, pp. 231-238, 2019.
- [35] Società Rubitherm, [Online]. Available: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. [Consultato il giorno 20 01 2020].
- [36] A. Pellizzari, *Fusione di paraffine in schiume metalliche in alluminio*, 2017.