

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Fusione di paraffine in schiume metalliche in alluminio

Laureando:
Alberto Pellizzari
Matricola 1111201

Relatore:
Prof.ssa Luisa Rossetto
Correlatore:
Ing. Andrea Diani

Sommario

Uno dei temi principali degli ultimi anni riguarda il cambiamento climatico del pianeta. Molti studiosi hanno confermato che questi mutamenti sono causati principalmente dall'uomo: non si può affermare con certezza che tale problema sia di origine solo antropica, in quanto, nel corso delle ere geologiche, i cambiamenti atmosferici si sono sempre verificati. Dopo decenni di sfruttamento sconsiderato del pianeta, il genere umano ha compreso che bisogna cercare di ridurre il problema del riscaldamento globale: per quanto riguarda il consumo energetico, molti scenari individuano nell'efficienza energetica e nelle energie rinnovabili i mezzi per raggiungere questo obiettivo. Una delle soluzioni collegate all'efficienza energetica riguarda lo stoccaggio di energia termica: lo scopo di questa tesi è proprio quello di approfondire la ricerca sui materiali a cambiamento di fase ("*phase change materials*", *PCM*), ovvero materiali in cui si può sfruttare il calore latente per accumulare una grande quantità di energia senza variazioni importanti di temperatura. In particolare, questo lavoro si focalizza su una possibile applicazione di questa tecnologia: la dissipazione passiva del calore prodotto dai componenti elettronici. Per questa applicazione sono state esaminate delle paraffine come *PCM* e, poiché tali materiali a cambiamento di fase sono caratterizzati da una bassa conduttività termica, si è indagato su come migliorare le performance termiche delle paraffine introducendo delle schiume metalliche.

Nel *Capitolo 1*, oltre a trattare la classificazione dei *PCM*, si citano alcuni metodi per incrementarne le proprietà termiche e si riportano alcune applicazioni.

Nel *Capitolo 2* si descrive l'apparato sperimentale realizzato in laboratorio: all'inizio sono stati analizzati due esperimenti presenti in letteratura, successivamente viene delineato l'apparato costruito per le prove sperimentali di questa tesi.

Nel *Capitolo 3* si riportano i risultati delle prove sperimentali: in un primo momento, si descrivono i comportamenti dei moduli di prova realizzati; successivamente si riportano i confronti fra moduli, paraffine e potenze termiche testate.

Infine, nel *Capitolo 4*, quello conclusivo, si delineano le varie considerazioni relative all'utilizzo di materiali a cambiamento di fase per il raffreddamento passivo di componenti elettronici.

INDICE

Sommario	i
Indice	ii
Introduzione	v
1 CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE DEI <i>PCM</i>	1
1.1 Metodi di accumulo dell'energia termica	1
1.2 Classificazione dei materiali a cambiamento di fase	2
1.2.1 <i>PCM</i> organici	4
1.2.2 <i>PCM</i> inorganici	6
1.2.3 <i>PCM</i> eutettici	6
1.3 Incremento delle prestazioni dei materiali a cambiamento di fase	6
1.3.1 Alette metalliche	8
1.3.2 L'incapsulamento del <i>PCM</i>	8
1.3.3 Schiume metalliche o di carbonio	10
1.3.4 Utilizzo di nanomateriali	14
1.3.5 Tubi di calore	15
1.4 Applicazioni	18
1.4.1 <i>PCM</i> ed energia solare	18
1.4.2 <i>PCM</i> utilizzati negli edifici	19
1.4.3 Dissipatori di calore passivi per componenti elettronici	22
2 APPARATO SPERIMENTALE	27

2.1	Esempi di apparati sperimentali presenti in letteratura	27
2.2	Definizione dell'apparato sperimentale	29
2.2.1	Materiali a cambiamento di fase utilizzati	29
2.2.2	Potenze termiche considerate	31
2.2.3	Schiume metalliche utilizzate	31
2.2.4	Strumentazione di laboratorio	32
2.2.5	Taratura delle termocoppie inguainate in inox	33
2.2.6	Modulo di prova	36
2.2.7	Installazione delle termocoppie inguainate in inox	38
2.2.8	Dimensionamento del riscaldatore	39
2.2.9	Il contenitore in Teflon	41
2.2.10	Il sistema di acquisizione dati	42
3	PROVE SPERIMENTALI	45
3.1	Gestione delle prove sperimentali ed elaborazione dei dati	45
3.2	Descrizione delle prove sperimentali	47
3.2.1	Prove sperimentali solamente con paraffina	48
3.2.2	Prove sperimentali con schiume metalliche	53
3.3	Confronti fra i moduli di prova	112
3.3.1	Confronti fra le potenze termiche a parità di modulo di prova e paraffina	112
3.3.2	Confronti fra le paraffine a parità di modulo di prova e potenza termica	119
3.3.3	Confronti fra i moduli di prova a parità di potenza termica e paraffina	126
4	CONCLUSIONI	133
A	Disegni tecnici	137
	Bibliografia	142

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la sensibilità dell'uomo nei confronti dell'ambiente è aumentata: dagli anni novanta la maggior parte delle nazioni del mondo ha firmato un trattato ambientale internazionale denominato *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici* ("*United Nations Framework Convention on Climate Change*", *UNFCCC*) in cui si impegnano a ridurre le emissioni di gas serra, identificando nel surriscaldamento globale un problema serio avente origine anche antropica. Le numerose conferenze sui cambiamenti climatici (*Conferenze delle Parti, COP*) sono diventate più importanti e incisive nel corso degli anni: molti stati hanno seriamente preso in considerazione il problema del riscaldamento climatico firmando degli impegni che hanno modificato i piani energetici nazionali. Per la prima volta nella storia dell'umanità si sta cercando di mettere da parte gli interessi economici per risolvere un problema intergenerazionale, che riguarda tutti gli esseri viventi del pianeta. Una delle cause principali del surriscaldamento globale è il problema delle emissioni emanate durante la produzione di energia elettrica e termica: nel corso dei secoli l'uomo ha manipolato l'ambiente circostante per raggiungere delle condizioni di comfort sempre migliori, non pensando alle conseguenze di uno sfruttamento insostenibile del pianeta. Finalmente, oggi sembrerebbe che le cose stiano cambiando: il fatto di aver compreso che i cambiamenti climatici riguardano tutti, indipendentemente dal luogo in cui viene emessa una certa quantità di anidride carbonica (inquinante che incide a livello globale, non locale), è un enorme passo avanti. L'accresciuta coscienza ambientalista degli ultimi anni ha sensibilizzato l'opinione pubblica e i governi hanno iniziato ad utilizzare più consapevolmente le fonti di energia, includendo nelle valutazioni economiche i cosiddetti costi esterni, cioè i costi associati ai danni ambientali. Per questo motivo, quando si parla di sostenibilità, bisogna considerare tre aspetti: la sostenibilità sociale, quella economica e quella ambientale. La svolta nel modo di produrre energia è ben visibile in diversi paesi: gli investimenti nelle energie rinnovabili e nei sistemi di

stoccaggio dell'energia sono una caratteristica fondamentale per poter essere parte di questo cambiamento.

A tal proposito, lo scopo di questa tesi è quello di studiare il comportamento dei materiali a cambiamento di fase ("*phase change materials*", *PCM*), una tecnologia che avrà un ruolo importante in futuro per quanto riguarda lo stoccaggio di energia termica. I *PCM* sono materiali accumulatori di calore latente: sfruttano il fenomeno della transizione di fase per assorbire i flussi energetici entranti, immagazzinando una grande quantità di energia e mantenendo costante la propria temperatura. Generalmente, a temperatura ambiente questi materiali sono solidi, ma superando la temperatura di fusione caratteristica del materiale, fondono accumulando calore che viene sottratto al sistema; al contrario, quando la temperatura esterna scende, il materiale si solidifica e cede calore. Inizialmente i *PCM* vennero sviluppati dalla *NASA* ("*National Aeronautics and Space Administration*"), ma attualmente le applicazioni relative a questa tecnologia possono essere molteplici: dalla dissipazione passiva del calore prodotto dai componenti elettronici, al risparmio energetico conseguito dall'utilizzo dei *PCM* nell'architettura ecosostenibile. Purtroppo, come tutte le tecnologie, questi materiali hanno anche degli aspetti negativi: ci sono diversi tipi di *PCM* e per ogni applicazione bisogna valutare la tipologia più opportuna in base ai pregi e difetti che caratterizzano il materiale a cambiamento di fase. In particolare, la caratteristica che comporta la maggior parte dei problemi è la bassa conduttività termica: per cercare di risolvere questo problema, in questa tesi si è valutato il comportamento di tre paraffine come *PCM*, accoppiate con tre diverse schiume metalliche in alluminio il cui scopo è quello di aumentare la conduttività termica del sistema.

CAPITOLO

1

CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE DEI *PCM*

1.1 Metodi di accumulo dell'energia termica

L'accumulo di energia termica risulta utile quando si ha uno sfasamento tra produzione e domanda energetica: in questo caso si parla di "*Thermal energy storage*" (*TES*). Principalmente, l'accumulo di calore in un corpo può avvenire attraverso tre modi: accumulo di calore sensibile (*SHS*), accumulo di calore latente (*LHS*) e accumulo attraverso reazioni chimiche. Durante l'accumulo di calore sensibile (*SHS*) si nota un incremento della temperatura del materiale; in particolare, l'energia termica Q espressa in [J] è direttamente proporzionale alla massa del materiale m [kg], al calore specifico c_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] e alla differenza di temperatura dT [K] secondo la formula seguente:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m c_p dT = m c_p (T_1 - T_2) \quad (1.1)$$

Indicando con T_1 e T_2 la temperatura iniziale e quella finale espresse in [K]. Al contrario, l'accumulo di calore latente (*LHS*) si verifica con uno stoccaggio di energia termica durante il cambiamento di fase del materiale. Anche in questo caso si può notare una variazione di temperatura, in quanto, considerando il processo di fusione (ovvero il

processo da stato solido a liquido), bisogna raggiungere la temperatura di fusione T_m del materiale. In tal caso, l'energia termica Q si ottiene dalla formula:

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} m c_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_2} m c_p dT \quad (1.2)$$

Indicando con a_m la frazione fusa e con Δh_m il calore latente di fusione per unità di massa espresso in $[\text{J kg}^{-1}]$. Il vantaggio nell'utilizzare un *LHS* risiede nel fatto che la variazione di temperatura è controllata e la quantità di energia immagazzinata è elevata: in *Figura 1.1* si riporta un grafico rappresentante un confronto fra queste due tipologie di scambio termico. La *Figura 1.1(a)* rappresenta il *SHS*, quindi l'accumulo di energia termica si traduce in una variazione di temperatura; mentre la *Figura 1.1(b)* rappresenta il *LHS* in cui si può notare che, raggiunta la temperatura di fusione, il materiale accumula energia termica senza variare la propria temperatura: il fatto di poter accumulare energia senza grandi variazioni di temperatura è un enorme vantaggio. In particolare, il cambiamento di fase di maggiore interesse è la fusione, in quanto comporta una modesta variazione di volume nel passaggio da solido a liquido: a tal proposito, questa tesi si focalizza sui *PCM* ovvero i materiali a cambiamento di fase che sfruttano la transizione di fase solido-liquido per l'accumulo e il rilascio di energia termica.

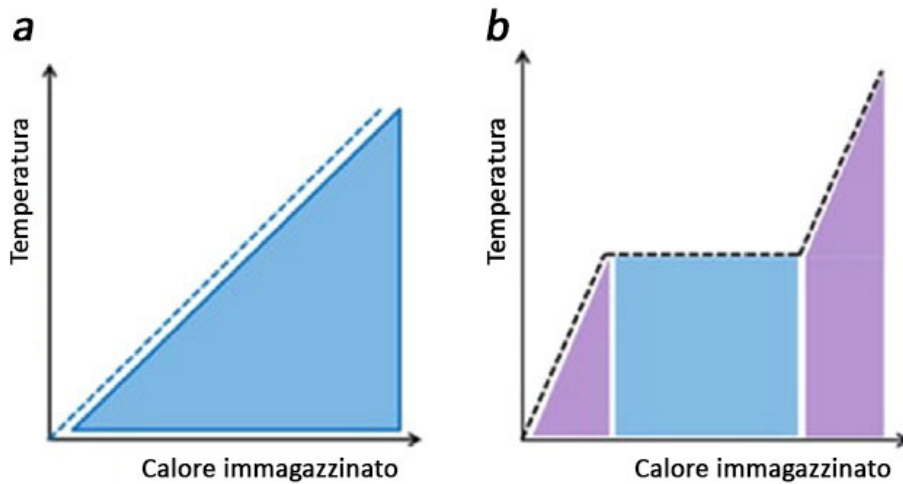


Figura 1.1: Accumulo termico sensibile SHS (a) e latente LHS (b)

1.2 Classificazione dei materiali a cambiamento di fase

Quando si fa riferimento al cambiamento di fase si possono considerare quattro transizioni: da solido a solido (con diversa struttura cristallina), da solido a liquido, da gas a solido

e da gas a liquido. In questo caso, la transizione più adeguata in termini di energia immagazzinata e di variazione di volume è la fusione, ovvero il passaggio da solido a liquido. Come accennato precedentemente, la scelta del materiale a cambiamento di fase (*PCM*) è influenzata dall'utilizzo che si intende fare di questa tecnologia: per esempio, la temperatura di fusione caratteristica del *PCM* dovrà essere adeguata al range operativo dell'applicazione considerata. In realtà, la temperatura di fusione non è l'unico parametro da considerare, infatti, in base all'applicazione, bisogna tenere conto di molte altre caratteristiche: in certi casi bisogna considerare anche la variazione di volume, la tossicità e l'infiammabilità del *PCM*. Le caratteristiche relative all'impatto sulla salute non sono da trascurare, basti pensare che i *PCM* possono venire utilizzati in applicazioni molto comuni come i dissipatori di calore dei componenti elettronici. Come riportato in *Figura 1.2*, esistono diverse tipologie di materiali a cambiamento di fase: ogni tipologia è caratterizzata da determinati pregi e difetti che possono essere sfruttati in base all'applicazione considerata. I *PCM* si possono dividere in tre gruppi: materiali a cambiamento di fase organici, inorganici ed eutettici. Nei paragrafi successivi verranno analizzate le diverse tipologie e in *Tabella 1.1* vengono riportati la temperatura di fusione e il calore latente di alcuni *PCM* per ogni gruppo. I materiali riportati in tabella sono adatti ad un'applicazione specifica: il risparmio energetico negli edifici grazie al livellamento del carico termico. Tali valori provengono da un articolo scritto da Akeiber et al. [1]: come si può notare, i *PCM* riportati sono caratterizzati da una temperatura di fusione bassa, compresa tra i 15 e i 30 °C.

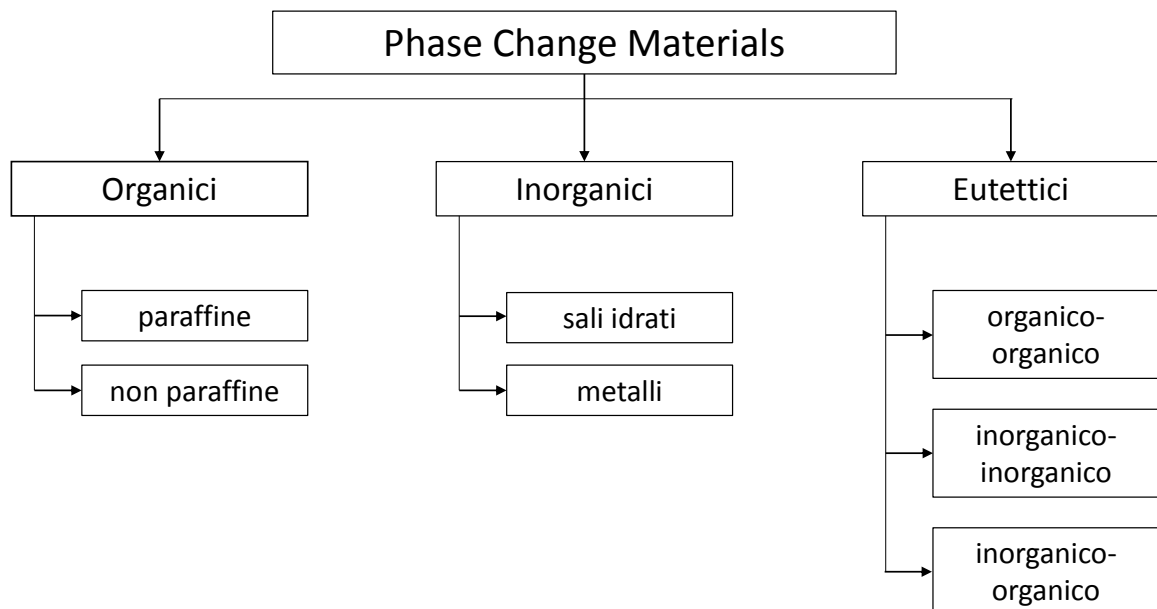


Figura 1.2: Tipologie di *PCM*

Si può fare un'ulteriore classificazione dei *PCM* considerando la temperatura di fusione:

Tabella 1.1: Caratteristiche di alcuni *PCM* suggeriti da Akeiber et al. [1]

Materiali a cambiamento di fase (<i>PCM</i>)		
Materiale	Temperatura di fusione T_{fus} [°C]	Calore latente h [kJ kg ⁻¹]
<i>PCM organici</i>		
Glicerina	17,9	198,7
Paraffina C16	18,2	238
Ottadecano C ₁₈ H ₃₈	27	243,5
<i>PCM inorganici – Sali idrati</i>		
KF 4H ₂ O	18,5	231
LiBO ₂ 8H ₂ O	25,7	289
CaCl ₂ 12H ₂ O	29,8	174
<i>PCM eutettici</i>		
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	24	147,7
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	27	163
CaCl ₂ + NaCl + KCl + H ₂ O	26÷28	188

PCM caratterizzati da bassa temperatura di fusione ($T_f < 200$ °C) e alta temperatura di fusione ($T_f > 200$ °C). I *PCM* con bassa temperatura di fusione vengono utilizzati principalmente nei sistemi di recupero termico dei rifiuti e negli edifici, mentre quelli caratterizzati da alta T_f possono essere utilizzati negli impianti solari di potenza e in altre applicazioni a temperatura elevata.

1.2.1 *PCM* organici

I materiali a cambiamento di fase organici ricoprono un intervallo piuttosto ampio, ma considerando i materiali adeguati per lo stoccaggio di calore latente, si considerano principalmente le catene di n-alcane, gli acidi grassi e gli esteri. Questa tipologia di *PCM* è molto gettonata grazie al calore latente e alla temperatura di transizione di fase adeguati per molte applicazioni a bassa temperatura; inoltre sono ben considerati per la loro stabilità fisica e chimica. Infatti una caratteristica da non sottovalutare è la cristallizzazione con un basso sottoraffreddamento: la sopraffusione o sottoraffreddamento è il processo di raffreddamento di un liquido al di sotto della sua temperatura di solidificazione, senza che avvenga effettivamente la solidificazione stessa (*Figura 1.3*). Il fatto che un *PCM* sia caratterizzato da basso sottoraffreddamento implica che la temperatura di fusione si mantiene pressoché costante. Oltre ad essere caratterizzati da una fusione uniforme, i *PCM* organici hanno il vantaggio di non presentare caratteristiche

corrosive: queste qualità sono molto importanti in quanto questi materiali si adattano bene ai sistemi che devono sottostare a molti cicli di fusione/solidificazione.

Purtroppo i *PCM* organici hanno anche dei difetti: sono caratterizzati da una bassa conduttività termica k (di solito inferiore a $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), variazione di volume non trascurabile e perdite di liquido durante i cambiamenti di fase. I *PCM* organici possono essere classificati ulteriormente in paraffine e non paraffine. Le paraffine sono composte da una miscela di catene di n-alcane del tipo $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3)$ e, incrementando la lunghezza della catena, aumentano il calore latente e la temperatura di fusione. Il gruppo delle paraffine è caratterizzato da un ampio intervallo di temperature di fusione e di calori latenti: si va da $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ a $71 \text{ }^\circ\text{C}$ e da 128 kJ kg^{-1} ad oltre 250 kJ kg^{-1} . Le caratteristiche peculiari delle paraffine dipendono dal fatto che non sono corrosive e non sono caratterizzate da sottoraffreddamento, inoltre sono sicure per la salute, affidabili, economiche e possiedono un alto calore latente. Dal punto di vista chimico, le paraffine sono materiali stabili e inerti a temperature inferiori ai $500 \text{ }^\circ\text{C}$ e la variazione di volume durante il cambiamento di fase è abbastanza contenuta. Gli aspetti negativi risiedono nel fatto che sono infiammabili, non sono compatibili con la plastica e soprattutto hanno una bassa conduttività termica k (tra $0,21$ e $0,24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Il secondo gruppo di *PCM* organici è rappresentato dalle cosiddette non paraffine: anche in questo caso il gruppo è caratterizzato da intervalli di parametri piuttosto ampi, quindi proprietà diverse. La categoria delle non paraffine è considerata quella più adatta alle applicazioni di stoccaggio di energia termica e i materiali più conosciuti sono gli alcool, gli esteri, i glicoli e gli acidi grassi. In questo caso, i materiali che potrebbero avere maggiore successo sono gli acidi grassi, soprattutto in applicazioni inerenti al raffrescamento degli edifici: sono caratterizzati da calore latente elevato, basso sottoraffreddamento, non sono caratterizzati da segregazione di fase e hanno temperature di fusione diverse, perciò possono essere utilizzati in diverse condizioni climatiche. Nonostante questo, anche le non paraffine possiedono delle caratteristiche negative come l'infiammabilità e, a differenza delle paraffine, sono costose e possono essere corrosive.



Figura 1.3: Sopraffusione o sottoraffreddamento

1.2.2 *PCM* inorganici

Confrontando i materiali a cambiamento di fase organici e inorganici, in generale si può affermare che i *PCM* inorganici sono caratterizzati da un calore latente di fusione per unità di massa maggiore, mentre i costi e l'inflammabilità sono minori. Purtroppo però sono caratterizzati da un sottoraffreddamento e una segregazione di fase più marcati e non sono stabili dal punto di vista termico: si decompongono e sono corrosivi. Questa categoria include le soluzioni saline e i metalli, ma il gruppo ritenuto più interessante e quindi più studiato è quello dei sali idrati. Il motivo di questo, soprattutto nelle applicazioni inerenti al risparmio energetico degli edifici, risiede nel fatto che i sali idrati sono caratterizzati da un interessante calore latente per unità di volume (circa 350 MJ m^{-3}), buona conduttività termica k ($0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e prezzo contenuto. Altri *PCM* inorganici sono i materiali metallici che sono caratterizzati da un basso calore latente per unità di peso compensato da un elevato calore latente per unità di volume: a tal proposito, l'aspetto negativo dei metalli è rappresentato proprio dal fatto che comportano un peso elevato paragonandoli con le altre soluzioni.

1.2.3 *PCM* eutettici

Questa categoria consiste nella combinazione di almeno due materiali a cambiamento di fase: durante il processo di solidificazione si forma un unico cristallo in cui si miscelano i vari componenti. La miscelazione può avvenire tra due *PCM* inorganici, tra due organici oppure tra un *PCM* inorganico e uno organico. La separazione dei componenti è molto improbabile perché non c'è segregazione di fase e durante la fusione tutti i componenti fondono simultaneamente.

1.3 Incremento delle prestazioni dei materiali a cambiamento di fase

Nel *Paragrafo* 1.2 è stato sottolineato il fatto che ogni *PCM* ha caratteristiche diverse: ha pregi e difetti, perciò ogni materiale può adeguarsi o meno ad una data applicazione. Per questo motivo, vengono utilizzati *PCM* diversi in base all'applicazione: bisogna considerare tutti i parametri che caratterizzano il materiale, dalle proprietà termiche (temperatura di fusione e calore latente), alle proprietà chimiche (comportamento durante la transizione di fase), senza dimenticare gli effetti sulla salute e l'aspetto economico. Uno degli aspetti che penalizza fortemente i *PCM* è la bassa conduttività termica k , aspetto che accomuna le varie tipologie. Poiché la conducibilità termica è bassa, la trasmissione

Tabella 1.2: Conduttività termica di alcuni materiali

Conduttività termiche	
Materiale	Conduttività termica k [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Acciaio 1020	51,9
Acciaio inossidabile 304	16,2
Alluminio 1100	222
Bachelite	0,2
Calcestruzzo	1,25 ÷ 1,75
Grafite	130 ÷ 190
Politetrafluoroetilene (PTFE)	0,25
Rame C11000	388
Vetro	1,4 ÷ 1,7

del calore nel mezzo è molto lenta e soprattutto compaiono dei gradienti di temperatura elevati. In tal caso, considerando per esempio un *PCM* avente la funzione di dissipare il calore prodotto da un componente elettrico, bisogna assolutamente tener conto di questo aspetto critico: la bassa conduttività termica impedisce al dissipatore passivo un adeguato raffreddamento del componente riscaldante, manifestando la presenza di un elevato gradiente di temperatura tra la superficie del *PCM* a contatto con il componente da raffreddare (più calda) e la superficie più lontana (a temperatura più bassa). Per questo motivo, nel corso degli anni, gli studi sui materiali a cambiamento di fase si sono focalizzati prevalentemente sull'incremento della conduttività termica. A tal proposito, le soluzioni a questo problema sono molteplici: dall'introduzione di alette metalliche, all'incapsulamento; dall'utilizzo di matrici metalliche o di grafite, ai tubi di calore. In Tabella 1.2 vengono riportate le conduttività termiche di alcuni materiali che verranno citati in questa tesi: tali valori sono suggeriti da Callister e Rethwisch [4] nel loro libro intitolato “*Materials science and engineering*”. Bisogna considerare che la conduttività termica varia in funzione della temperatura in quanto cresce con l'aumentare della temperatura nei gas e nei materiali isolanti, mentre per i metalli molto puri diminuisce. Riferendosi ai materiali riportati in tabella, l'acciaio, l'alluminio, il rame e la grafite vengono utilizzati per incrementare le proprietà termiche dei materiali a cambiamento di fase, mentre il vetro e il politetrafluoroetilene (PTFE, comunemente chiamato Teflon) si comportano da materiali isolanti. Il valore del calcestruzzo è stato riportato in quanto al *Paragrafo* 1.4.2 verrà considerato l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase negli edifici: come verrà spiegato successivamente, incapsulando il *PCM* all'interno delle pareti dell'edificio si può traslare la richiesta energetica per il raffrescamento in ore del giorno in cui il costo dell'energia elettrica è minore.

1.3.1 Alette metalliche

Con l'utilizzo di una superficie alettata si ha una migliore asportazione del calore dal componente riscaldante e, aumentando la superficie di contatto con il *PCM*, aumenta il flusso di calore trasferito. Il vantaggio risiede nel fatto che le prestazioni del *PCM* vengono incrementate grazie all'elevata conduttività termica del componente metallico o della grafite: introducendo un mezzo metallico o la grafite, la conduttività termica dell'intero sistema risulta notevolmente migliorata, velocizzando quindi il processo di fusione nella fase di trasferimento conduttivo del calore. Bisogna considerare però che, a causa della presenza delle alette, il trasferimento di calore per convezione viene compromesso. Di seguito si fa riferimento ad una ricerca pubblicata sul sito di *BINE Information Service* (<http://www.bine.info/en/topics/>), un ente sostenuto dal *Ministero Federale Tedesco dell'Economia e della Tecnologia* che promuove la collaborazione fra istituzioni e imprese in ambiti riguardanti l'efficienza energetica e le fonti rinnovabili. In particolare si accenna ad un prototipo per la realizzazione di calcestruzzo aerato: l'articolo di Hirn e Meyer [7] fa riferimento ad uno scambiatore di calore costituito da tubi e alette di grafite. Questa configurazione è definita a "sandwich" ed è composta da lastre di grafite con una miscela eutettica come *PCM*: in *Figura 1.4* è riportata una rappresentazione schematica. Lo scopo è produrre vapore saturo a circa 3 bar (temperatura di ebollizione 133 °C), sfruttando la temperatura di fusione del materiale a cambiamento di fase che si aggira intorno ai 142 °C. In questo caso, il tipo di grafite utilizzato è caratterizzato da una conduttività termica molto elevata (si arriva fino a $150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e questo permette di utilizzare alette molto sottili. In *Figura 1.5* si può notare come lo spessore e il materiale con cui sono state costruite le alette incidano sul tempo necessario per l'accumulo termico di calore latente da parte del *PCM*. In particolare, si può notare che per ridurre il tempo di fusione, in questo caso, è molto conveniente l'utilizzo di grafite al posto dell'acciaio in quanto occorrono spessori delle alette notevolmente inferiori.

1.3.2 L'incapsulamento del *PCM*

L'incapsulamento è uno dei sistemi di contenimento utilizzati per i *PCM*: questa soluzione viene adottata per limitare i problemi del sottoraffreddamento e della fusione incongruente. Inoltre con l'incapsulamento si cerca di contenere il materiale durante il cambiamento di fase e si prevengono cambiamenti nella composizione chimica del *PCM* evitando interazioni con l'ambiente. Infatti, oltre alle caratteristiche del *PCM*, bisogna considerare anche la geometria del contenitore e i suoi parametri termici. Nelle applicazioni pratiche, i *PCM* necessitano quindi di essere incapsulati all'interno di un contenitore che può essere di materiale plastico o metallico. La stabilità del sistema

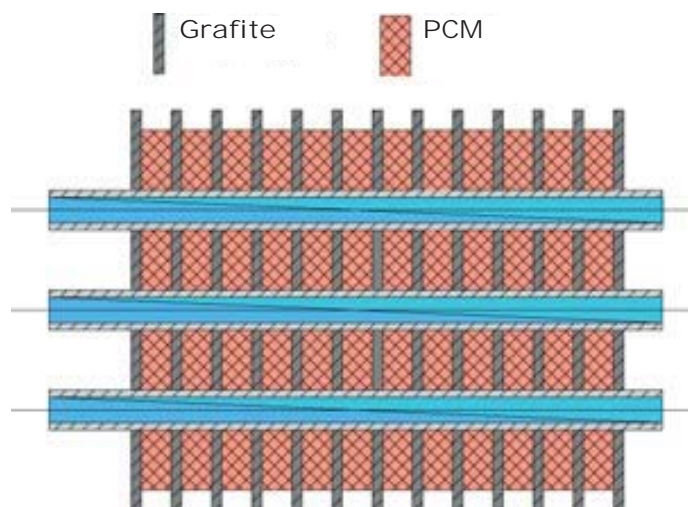


Figura 1.4: Rappresentazione schematica della configurazione analizzata

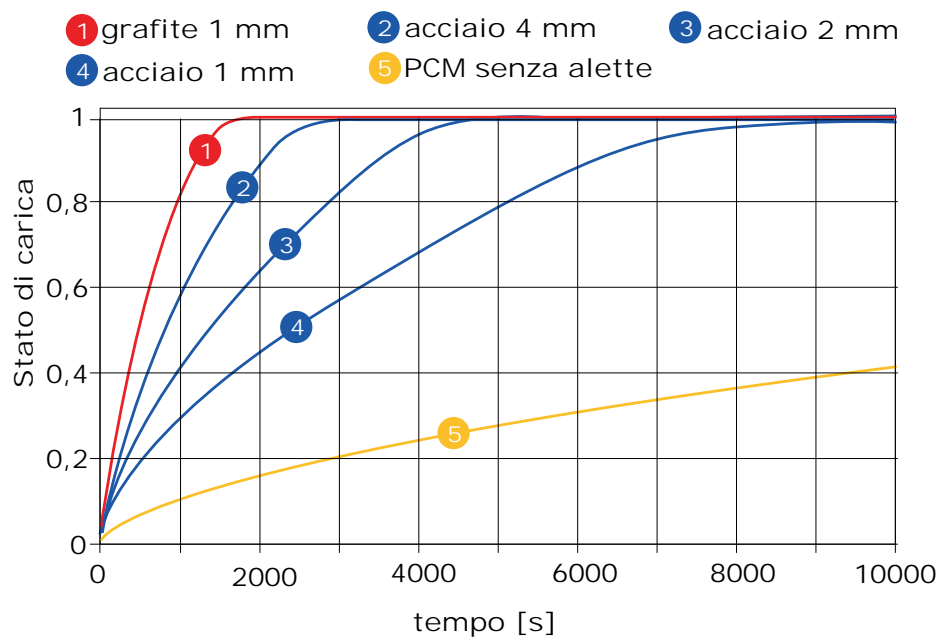


Figura 1.5: Stato di carica per le diverse configurazioni analizzate

PCM-contenitore è molto importante, perciò bisogna analizzare le prestazioni di vari cicli di carica-scarica per capire se si verificano peggioramenti delle prestazioni. In realtà, ci sono due tipi di incapsulamento: il macroincapsulamento e il microincapsulamento. Con macroincapsulamento si intende l'inclusione del *PCM* in contenitori come tubi, sfere o pannelli che possono fungere direttamente da scambiatori di calore o possono venire inglobati in altri elementi: questa tipologia di incapsulamento è quella più utilizzata e viene adottata in contenitori di dimensioni maggiori di 10 mm. Il microincapsulamento invece consiste nell'utilizzare delle particelle sferiche racchiuse in un film polimerico fino e con elevato peso molecolare: in questo caso le particelle rivestite hanno diametro minore di 1 mm. Al momento, il microincapsulamento è applicato ai *PCM* idrofobi, ovvero ai materiali che non assorbono o trattengono acqua sulla superficie: bisogna affermare che questa tecnologia è meno matura della precedente, ma sembra essere promettente in quanto consente di migliorare la stabilità del ciclo fusione-solidificazione del *PCM*.

1.3.3 Schiume metalliche o di carbonio

Uno dei mezzi più ricercati per incrementare le prestazioni dei materiali a cambiamento di fase è l'utilizzo di schiume metalliche o di carbonio: una schiuma è una struttura cellulare costituita da un elemento solido (di solito rame, alluminio o carbonio) cui buona parte del volume è costituita da pori d'aria. Le schiume metalliche o di carbonio sono caratterizzate da: bassa densità, elevata resistenza specifica, resilienza (protezione contro gli urti), assorbimento acustico e soprattutto hanno interessanti proprietà di scambio termico. A tal proposito, si distingue tra schiume a celle chiuse e a celle aperte: come è possibile notare in *Figura 1.6*, nelle prime i pori sono chiusi, mentre nelle seconde i pori sono aperti e la schiuma forma una rete interconnessa. Le dimensioni delle celle

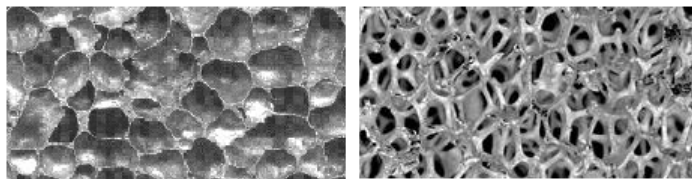


Figura 1.6: Schiume a celle chiuse (sinistra) e a celle aperte (destra)

delle schiume metalliche a celle chiuse variano da 1 a 8 mm. Queste schiume sono utilizzate principalmente come materiali impatto-assorbenti: in modo simile alle schiume polimeriche dei caschi, queste schiume sono utilizzate per impatti più violenti, ma a differenza delle prime, le schiume metalliche rimangono deformate dopo l'impatto, perciò possono essere utilizzate una sola volta. Come tutte le schiume metalliche, quelle a celle chiuse mantengono la resistenza al fuoco e la riciclabilità, ma in più hanno la capacità di galleggiare sull'acqua. Per quanto riguarda le applicazioni considerate in

questa tesi, l'accoppiamento fra *PCM* e schiuma metallica a celle chiuse sarebbe troppo complicato: infatti non sarebbe possibile inserire facilmente il materiale a cambiamento di fase nella schiuma. Per questo motivo, generalmente si utilizzano le schiume a celle aperte: queste possono essere usate come scambiatori di calore (elettronica di raffreddamento, cisterne criogeniche, materiali a cambiamento di fase) o nell'assorbimento di energia, nella diffusione dei fluidi e nell'ottica leggera. Inoltre le schiume a celle aperte di dimensioni piccolissime (tanto da non essere visibili a occhio nudo) vengono utilizzate come filtri nell'industria chimica ad alte temperature.

Costanza e Tata [6] hanno individuato tre tecniche principali per realizzare le schiume metalliche: il metodo delle polveri compattate, il "*sintering and dissolution process*" (*SDP*) e il "*replication process*" (*RP*). Il metodo di produzione delle polveri compattate viene utilizzato per la produzione delle schiume a porosità chiusa e consiste nel mescolare polveri metalliche con un materiale in grado di liberare gas (per esempio polveri di alluminio e idruro di titanio), pressare la miscela per ottenere un precursore compatto ed infine scaldare il tutto portando a fusione il metallo. L'agente soffiante viene scelto in modo che si decomponga ad una temperatura inferiore alla temperatura di fusione del metallo, così che il gas rilasciato possa poi far espandere il fuso producendo la schiuma. La tecnica *SDP* permette invece di produrre le schiume di porosità aperta e consiste nel mescolare la polvere del metallo base o della lega che si intende schiumare con un riempitivo (ad esempio urea o NaCl) che potrà essere successivamente rimosso facilmente per esempio mediante lavaggio in acqua lasciando al suo posto la porosità della morfologia e delle dimensioni del riempitivo utilizzato. Infine la tecnica *RP* è una soluzione ancora più semplice ed economica che non si basa sull'utilizzo di polveri, bensì impiega granuli o direttamente metallo fuso.

In letteratura sono molti gli articoli che trattano dell'utilizzo di schiume metalliche o di carbonio a celle aperte per incrementare le performance dei materiali a cambiamento di fase. Molti esempi fanno riferimento all'utilizzo dei sistemi costituiti da schiume e *PCM* per il raffreddamento dei componenti elettronici: le fibre della schiuma hanno elevata conduttività termica, perciò permettono di asportare un flusso di calore maggiore dalla sorgente di calore rispetto al caso con solo *PCM*. In questo modo, oltre a ridurre la temperatura del componente elettronico, si migliora il comportamento del materiale a cambiamento di fase accelerando i processi di fusione e solidificazione: grazie all'incremento generale della conduttività termica del sistema, la temperatura del *PCM* è più uniforme in tutte le sue parti e non vi sono elevati gradienti che si presenterebbero invece nel caso in cui si utilizzi il *PCM* senza schiuma. Un altro vantaggio associato alle schiume è legato al fatto che esiste una grande varietà di metalli e leghe, perciò si può scegliere il materiale più opportuno in base all'applicazione. Non bisogna dimenticare inoltre che la presenza di una schiuma riduce in parte il problema delle perdite di materiale a

cambiamento di fase durante la fusione: il problema non si elimina completamente in quanto le dimensioni dei pori della schiuma non sono piccole abbastanza da generare tensioni superficiali adeguate. Nonostante questi enormi vantaggi, bisogna considerare che quando il *PCM* è in fase liquida, la schiuma impedisce parzialmente lo scambio di calore per convezione: tale effetto dipende dal caso considerato, perciò bisogna considerare l'effetto positivo dovuto all'incremento della conduzione termica e l'effetto negativo associato alla riduzione di convezione allo stato liquido.

Il comportamento del *PCM*, oltre ad essere influenzato dalle caratteristiche termiche del materiale usato per realizzare la schiuma, dipende anche dalle caratteristiche geometriche della schiuma stessa: due parametri fondamentali sono la porosità ε e la densità dei pori ω . La porosità ε corrisponde al rapporto tra volume vuoto (dei pori) V_p e volume totale V_m :

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_m} \quad (1.3)$$

Generalmente le schiume hanno valori elevati di porosità (0,8÷0,95) e si può definire di conseguenza la densità relativa della schiuma ρ come il complementare a 1 della porosità ε .

L'altro parametro importante è la densità di pori ω che si misura in numero di pori per pollice (PPI): in *Figura 1.7* si riporta un confronto fra due schiume metalliche aventi diverso valore di PPI.

Un'altra caratteristica geometrica che influisce sullo scambio termico tra schiuma e *PCM* è il rapporto fra superficie e volume della schiuma a_{sv} : in tal caso, per migliorare le performance termiche è necessario un rapporto elevato. Considerando la porosità

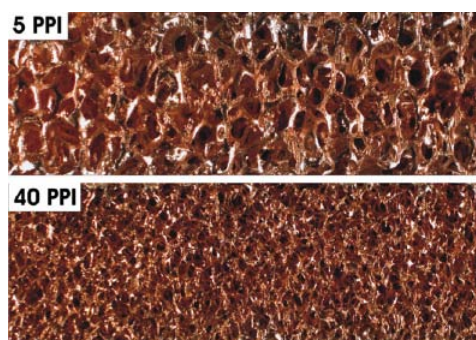


Figura 1.7: Densità di pori

e la densità di pori, si può affermare che la conduttività termica del sistema *PCM*-schiuma risulta maggiore utilizzando una schiuma con porosità bassa, mentre aumenta la probabilità di instaurare moti convettivi nel *PCM* se la schiuma è caratterizzata da una bassa densità di pori. Tali comportamenti possono essere spiegati in questo modo:

- Per ω costante, al diminuire di ε diminuisce la quantità di *PCM* nel sistema. Poiché il materiale a cambiamento di fase è caratterizzato da bassa conduttività, la conduttività del sistema *PCM*-schiuma aumenta grazie alle proprietà della schiuma metallica o di carbonio. Allo stesso modo però diminuendo la porosità, aumenta la quantità di materiale con cui è fatta la schiuma (metallo o carbonio) comportando un aumento in termini di peso del sistema;
- Per ε costante, al crescere di ω diminuisce il diametro dei pori. In questo modo è più difficile che si instaurino dei moti convettivi nel *PCM*, perciò lo scambio termico è meno efficiente.

Ricapitolando quindi, la paraffina in sé si comporta come un isolante, ma il sistema schiuma-*PCM* permette di aumentare la conduttività termica media secondo la relazione di Bhattacharya [3]:

$$k_{medio} = k_{schiuma} (1 - \varepsilon_{schiuma}) + k_{PCM} \varepsilon_{schiuma} \quad (1.4)$$

Per sottolineare l'effetto della porosità, si riporta in *Figura 1.8* un grafico tratto da un articolo scritto da Nada e Alshaer [10] in cui hanno eseguito uno studio riguardante tutti i parametri che entrano in gioco accoppiando un *PCM* con una schiuma di carbonio. Questo grafico rappresenta il comportamento di un *PCM* che fonde a 65 °C accoppiato con delle schiume di carbonio aventi porosità diverse. Nel grafico si riporta la temperatura superficiale della base del modulo composto da *PCM* e schiuma: all'inizio ($t < 100$ s) la temperatura cresce molto rapidamente, mentre successivamente l'incremento di temperatura si riduce in modo sempre più marcato col passare del tempo. Questo è spiegato dal fatto che all'inizio la temperatura del modulo è inferiore alla temperatura di fusione del *PCM*, perciò la fusione non è ancora iniziata e si verifica uno scambio di calore sensibile che fa variare molto la temperatura della base del sistema. Dopo circa 100 s il *PCM* inizia a fondere: si riduce la componente di calore sensibile e aumenta quella di calore latente. In particolare, si può notare l'effetto della porosità della schiuma: incrementando la porosità ε della schiuma di carbonio aumenta il tempo necessario al modulo per raggiungere una temperatura costante. Ciò può essere attribuito al fatto che incrementando la porosità, aumenta la quantità di *PCM* comportando una riduzione della conduttività dell'intero sistema. Concludendo si può affermare che, a parità di flusso termico, con una porosità ε maggiore lo scambio termico è meno efficiente perciò aumenta la differenza di temperatura fra l'inizio dell'esperimento e il momento in cui il modulo raggiunge una temperatura costante.

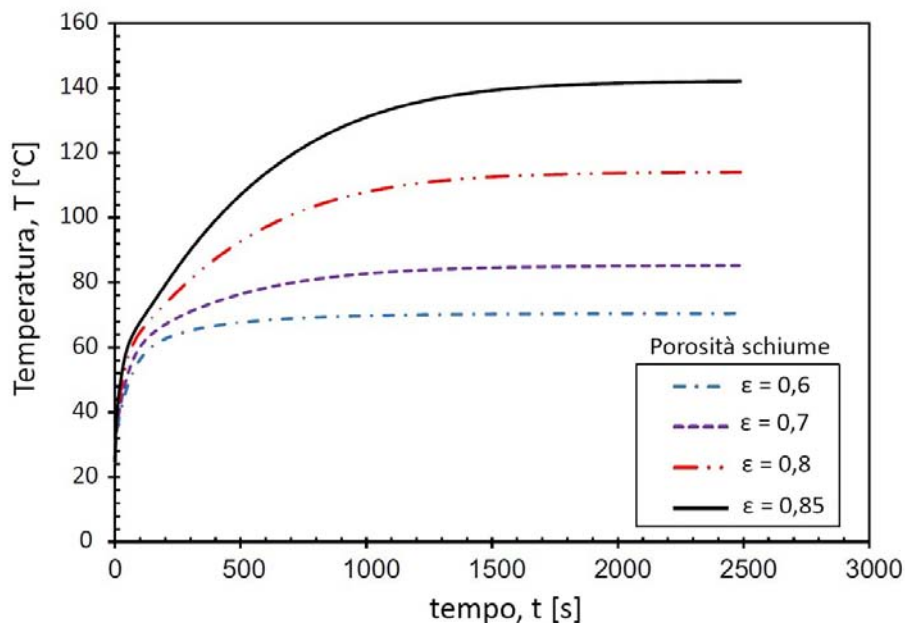


Figura 1.8: Temperatura alla base del sistema *PCM*-schiuma per diverse porosità

1.3.4 Utilizzo di nanomateriali

Recentemente sono stati affrontati diversi studi riguardanti l'incremento delle prestazioni dei materiali a cambiamento di fase utilizzando delle nanoparticelle per migliorare lo scambio termico. Ci sono diversi materiali che vengono utilizzati per questa tecnologia, come il carbonio, i metalli o gli ossidi ceramici: in questo paragrafo si citano i nanotubi di carbonio, poiché l'inserimento di questi componenti a contatto con il *PCM* comporta dei miglioramenti nella conduttività termica del sistema. In particolare Alshaer et al. [2] hanno condotto uno studio focalizzato sul raffreddamento di componenti elettrici. Lo scopo è quello di trovare la migliore fra tre soluzioni: dissipatore costituito solamente da una schiuma di carbonio (CF-20); dissipatore con schiuma e *PCM* (CF-20+RT65); dissipatore con schiuma, *PCM* e nanotubi di carbonio (CF-20+RT65/MWCNTs). Il materiale a cambiamento di fase considerato è una cera di paraffina (RT65), caratterizzata da una temperatura di fusione T_f pari a 65 °C: dai risultati si nota che con la presenza di una piccola quantità di nanotubi di carbonio (MWCNTs), le performance della paraffina migliorano notevolmente. In particolare, oltre ad un aumento della conduttività, la presenza dei nanotubi conferisce un aumento del calore latente accumulato linearmente proporzionale al numero di tubi utilizzati. I test sono stati condotti per tre diverse potenze: la *Figura 1.9* riporta il grafico che rappresenta l'andamento della temperatura massima delle tre soluzioni per la potenza massima considerata (30 W: l'andamento della temperatura per le altre potenze considerate è molto simile). Bisogna rammentare che lo scopo dello studio è quello di trovare la soluzione migliore come dissipatore di calore per componenti elettronici, perciò il grafico rappresenta indirettamente la variazione

di temperatura del componente da raffreddare. Per tutte le potenze si verifica che la soluzione costituita da schiuma metallica, *PCM* e nanotubi di carbonio permette di mantenere la temperatura considerata al livello minore possibile. Per essere precisi, si può affermare che incrementando la potenza, i vantaggi conseguiti dal sistema con i nanotubi si fanno sempre più evidenti: la riduzione di temperatura conseguita con i nanotubi è crescente man mano che incrementa la potenza. Questo fatto può ricollegarsi all'incremento della conduttività termica del sistema grazie all'utilizzo dei nanotubi di carbonio: in particolare, poiché i vantaggi sono più evidenti ad elevate potenze, si ritiene che il fattore rilevante sia l'incremento dello scambio termico conduttivo fra nanotubi e schiuma di carbonio.

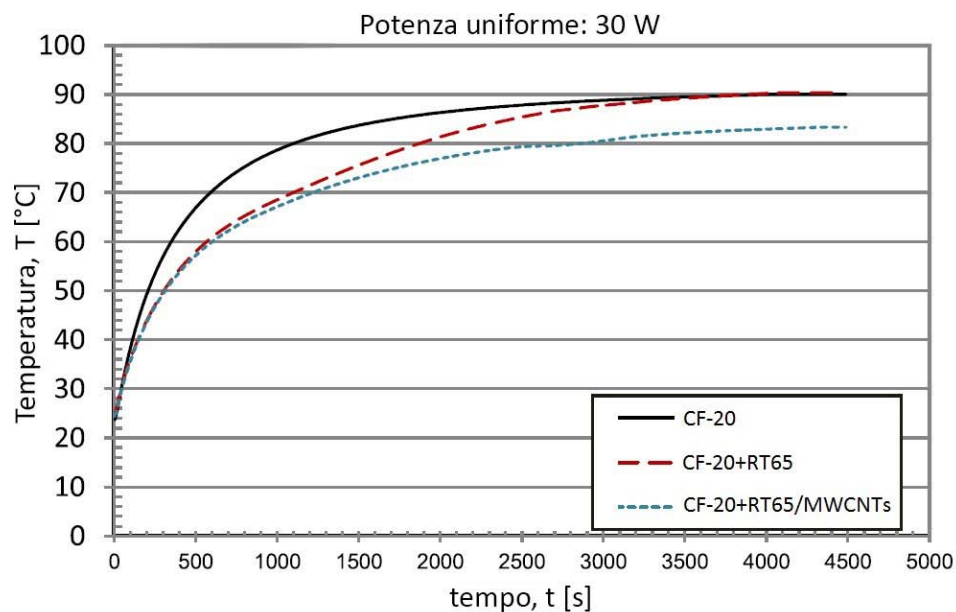


Figura 1.9: Andamento della temperatura della base del sistema per una potenza applicata di 30 W

1.3.5 Tubi di calore

Un altro metodo per incrementare le prestazioni dei materiali a cambiamento di fase è l'utilizzo dei tubi di calore: grazie a questi strumenti si può trasferire una gran quantità di calore con una differenza di temperatura molto piccola. Rispetto ad altri meccanismi studiati per risolvere i difetti dei *PCM*, gli studi condotti sull'incremento delle prestazioni con i tubi di calore non sono molti in letteratura: in questa tesi si riporta uno studio condotto da Motahar e Khodabandeh [9]. Nel loro articolo si confronta il comportamento di un *PCM* organico durante la fusione e la solidificazione con e senza tubo di calore. In particolare, hanno utilizzato come materiale a cambiamento di fase l'ottadecano, un idrocarburo saturo della serie del metano, $C_{18}H_{38}$, avente temperatura di fusione di 28

°C, mentre il tubo di calore è in rame e come fluido operativo utilizza acqua. Dai loro risultati si evince che il tubo di calore incrementa notevolmente il comportamento del *PCM* durante le fasi di carica e scarica. La *Figura 1.10* si riferisce alla fase di fusione: le temperature sono state ricavate ponendo delle termocoppie in diverse zone del *PCM*. Il grafico (*a*) rappresenta il sistema costituito dal solo *PCM*, mentre (*b*) fornisce i dati sul sistema *PCM*-tubo di calore: in entrambi i casi gli esperimenti sono stati condotti con una temperatura iniziale del *PCM* di 16 °C. Con *D* si indica la temperatura della sorgente termica posta a 35 °C, mentre *A*, *B* e *C* sono le termocoppie poste a distanze sempre maggiori dalla parete calda. Come è possibile notare confrontando i due grafici, l'andamento delle temperature raggiunte nel *PCM* è molto diverso. Facendo riferimento al sistema costituito dal solo *PCM* (*a*), all'inizio si trasmette calore per conduzione dalla parete calda, mentre, man mano che il materiale fonde, inizia a trasferirsi calore per convezione. Il processo però è molto lento a causa della bassa conduttività del *PCM* che provoca un gradiente di temperatura non trascurabile fra le diverse regioni del modulo: la temperatura di fusione viene raggiunta in momenti molto diversi in base alla distanza dalla parete calda. Infatti confrontando i dati ricavati dalla termocoppia *A*, vicino alla sorgente calda, e dalla termocoppia *C*, più lontana, si nota che la temperatura di fusione dell'ottadecano viene raggiunta con più di 100 minuti di differenza. Analizzando il grafico (*b*) invece, si nota che le temperature seguono circa lo stesso andamento, nonostante le termocoppie siano posizionate a distanze diverse dalla sorgente di calore. In particolare, sfruttando la parte che funge da condensatore del tubo di calore si riduce notevolmente il tempo di fusione del *PCM*: in questo caso anche la termocoppia *C* rileva il raggiungimento della temperatura di fusione dopo circa 30 minuti nonostante sia collocata più lontano dalla parete calda. Ragionamenti analoghi si possono fare durante la solidificazione: la

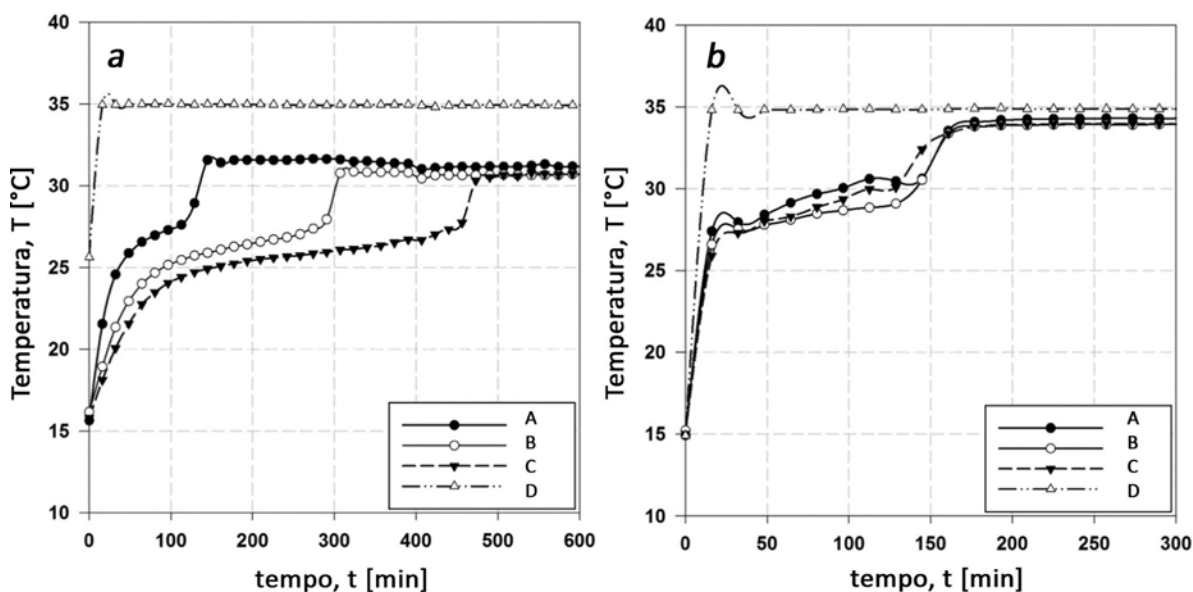


Figura 1.10: Temperature durante la fusione senza (*a*) e con (*b*) tubo di calore

Figura 1.11 rappresenta i profili della temperatura in diverse zone del *PCM* confrontando i casi con e senza tubo di calore. In questo caso con D si indica la temperatura della sorgente fredda, posta a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre con A , B e C si indicano i profili di temperatura forniti dalle termocoppie come nel caso precedente. In entrambi i sistemi il *PCM* ha una temperatura iniziale di $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analizzando il sistema senza tubo di calore (a), il *PCM* liquido subisce un calo di temperatura ben marcato e omogeneo in tutte le sue parti fino alla temperatura di solidificazione ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$), perciò si verifica un trasferimento sensibile di calore principalmente per convezione; una volta solidificata la regione della termocoppia A , inizia a trasferirsi il calore per conduzione, ma poiché la conduttività termica dell'ottadecano è bassa ($0,2\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$), si verifica un gradiente di temperatura come del caso della fusione. Per questo motivo la solidificazione completa delle altre zone del *PCM* è molto lenta e dal grafico si può notare che dopo 800 minuti le regioni dell'ottadecano hanno temperature ancora molto diverse. Analizzando invece il sistema con il tubo di calore, si possono notare i vantaggi conseguiti nel grafico (b): in questo caso la parte del tubo di calore immersa nel *PCM* è l'evaporatore che permette di asportare calore dall'ottadecano in modo più uniforme. I profili di temperatura delle diverse zone del *PCM* sono abbastanza simili e il tempo necessario alla solidificazione completa si riduce: bisogna ammettere però che il *PCM* a contatto con il tubo di calore si solidifica prima, perciò si passa da uno scambio termico convettivo nella zona liquida a uno conduttivo a bassa conducibilità termica nella regione solida. Per questa ragione è comunque presente un gradiente di temperatura che questa volta si presenta in direzione radiale. Nonostante questo, lo studio dimostra l'efficacia del tubo di calore nell'incremento delle prestazioni del *PCM*.

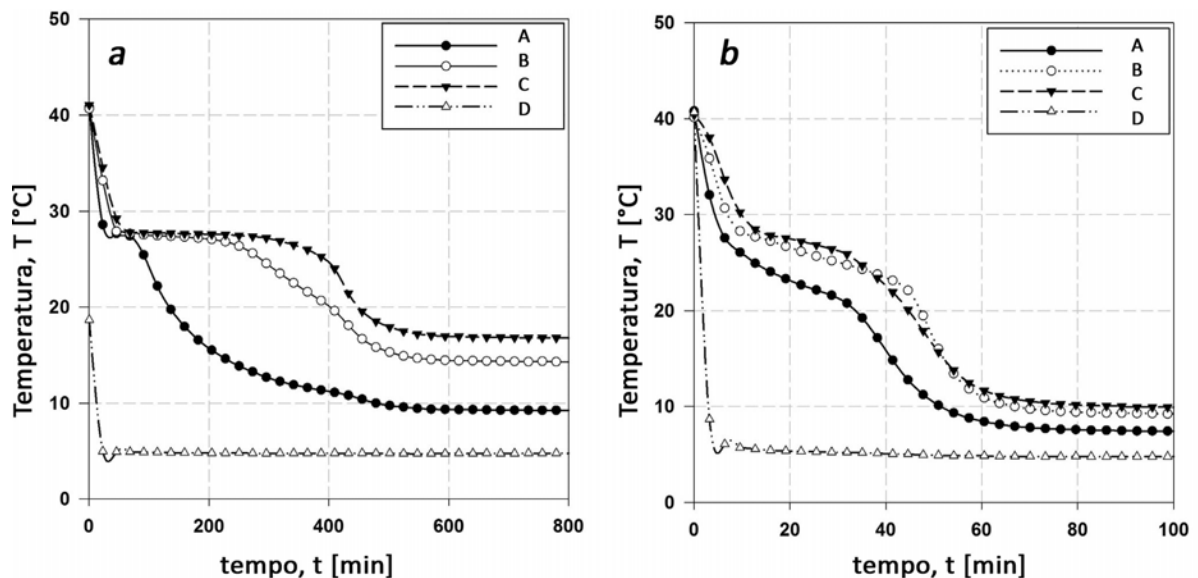


Figura 1.11: Temperature durante la solidificazione senza (a) e con (b) tubo di calore

1.4 Applicazioni

Inizialmente i materiali a cambiamento di fase vennero sviluppati dalla *NASA*, ma attualmente le applicazioni relative a questa tecnologia sono molteplici. Come accennato nei paragrafi precedenti i *PCM* possono venire utilizzati nella dissipazione passiva del calore prodotto dai componenti elettronici e si dimostrano utili nel risparmio energetico nell'architettura ecosostenibile. Bisogna ricordare che, in base all'applicazione, si deve optare per il *PCM* più opportuno, considerando le molteplici proprietà che caratterizzano il materiale a cambiamento di fase: dalla temperatura di fusione, alla variazione di volume durante il cambiamento di fase; dall'impatto sulla salute, all'aspetto economico.

1.4.1 *PCM* ed energia solare

Il sole rappresenta la fonte energetica principale per la vita di tutti gli esseri viventi: considerando le fonti energetiche utilizzate dall'uomo, ci si accorge che l'energia geotermica è l'unica fonte che non ha legami (diretti o indiretti) con il sole. Nel paragrafo introduttivo si fa riferimento all'importanza degli investimenti nel settore delle energie rinnovabili e nello stoccaggio dell'energia: i *PCM* risultano essere molto utili nello stoccaggio di energia termica derivata dal sole, in particolare quando la produzione e il consumo di energia termica non sono contemporanei. In questo paragrafo si citano due esempi riportati nella tesi di laurea magistrale del dott. Cazzoli [5]: i serbatoi di accumulo termico e i forni solari che sfruttano la tecnologia dei *PCM*. Il riscaldamento dell'acqua da parte del sole è sempre stato sfruttato, ma solamente negli ultimi decenni la tecnologia ha potuto garantire degli impianti che siano igienici e allo stesso tempo relativamente economici ed efficienti. Un serbatoio di accumulo termico per l'acqua viene utilizzato spesso sia in impianti di riscaldamento tradizionali dotati di caldaia, sia in impianti costituiti da collettori solari. Facendo riferimento agli impianti che sfruttano la radiazione solare per riscaldare l'acqua, bisogna considerare che durante le ore notturne la temperatura dell'acqua nell'accumulo va diminuendo in quanto il serbatoio non può essere perfettamente adiabatico. In questo caso i *PCM* hanno il ruolo di sistemi per lo stoccaggio di energia termica: il sole fornisce l'energia necessaria per la fusione del *PCM* durante le ore diurne, mentre nelle ore notturne il materiale riscalda l'acqua durante la fase di solidificazione. Ci sono diversi esempi del genere, ma la versione più efficiente sembra essere quella in cui il *PCM* viene inserito in molti tubi dal diametro sottile che a loro volta sono disposti verticalmente nel serbatoio di accumulo: in questo modo l'area di scambio con l'acqua è elevata. L'altro esempio riguarda i forni solari: in questo caso si utilizzano degli specchi che fungono da concentratori solari per catturare l'energia termica ed utilizzarla nella cottura dei cibi. Il *PCM* può essere posizionato sul fuoco degli specchi concentratori: durante il

giorno avviene la fase di fusione, mentre durante la notte si sfrutta il calore rilasciato dal materiale per cucinare. Per questa applicazione si è verificato sperimentalmente che è opportuno utilizzare come *PCM* i sali idrati caratterizzati da una temperatura di fusione pari a $105\div 110$ °C.

1.4.2 *PCM* utilizzati negli edifici

Gli edifici contribuiscono al 40% dei consumi energetici e delle emissioni di gas a effetto serra globali: per questo motivo hanno un ruolo rilevante nell'inquinamento atmosferico. I sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, ovvero gli "*Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems*", costituiscono il 60% della totale energia consumata negli edifici: questi dati confermano che questo settore avrà un ruolo fondamentale per quanto riguarda la riduzione e l'efficienza energetica che dovrà caratterizzare i piani energetici nazionali dei prossimi anni. A tal proposito, un sistema passivo di raffrescamento permetterebbe di ottenere dei risparmi importanti: anche in questo caso può tornare utile un materiale a cambiamento di fase che permetta di stoccare del calore latente in modo efficiente per incrementare l'inerzia termica dell'involucro degli edifici, al fine di ridurre le fluttuazioni di temperatura e migliorare il comfort termico degli abitanti. In realtà non sono molti gli esempi in letteratura in cui si tratta di questo argomento: di seguito si fa riferimento al già citato articolo scritto da Akeiber et al. [1] in cui si definisce lo stato dell'arte dell'utilizzo dei *PCM* nel raffrescamento degli edifici. Dal punto di vista fisico, i *PCM* adatti a questa applicazione dovrebbero avere una bassa temperatura di fusione, tra i 10 e i 30 °C: tale temperatura deve essere scelta in base alle condizioni climatiche (bisogna considerare soprattutto le variazioni di temperatura esterna). Dal punto di vista termodinamico invece, il *PCM* dovrebbe avere conduttività e calore latente per unità di volume elevati. Anche le proprietà chimiche sono importanti: è importante che il *PCM* sia stabile, che non vari molto di volume e che non sia caratterizzato da elevato sottoraffreddamento. In tal caso, un aspetto da non sottovalutare è la stabilità dopo diversi cicli di carica-scarica, infatti si parla di stabilità a lungo termine. Infine non bisogna dimenticare l'aspetto economico e la sicurezza: il *PCM* non deve essere particolarmente costoso, tossico o infiammabile. Ovviamente l'aspetto che penalizza maggiormente i *PCM* è la bassa conduttività termica, infatti anche per questa applicazione vengono adottate le tecnologie riportate al *Paragrafo* 1.3. Focalizzandosi ora sull'applicazione, bisogna considerare che l'involucro degli edifici ha una determinata massa termica che permette di stoccare dell'energia all'interno dei muri esterni anche senza la presenza di un materiale a cambiamento di fase: ciò consente di migliorare il comfort termico dell'ambiente interno. L'utilizzo di un *PCM* macroincapsulato all'interno dei muri esterni permette di incrementare questo effetto, perché aumenta la massa termica

della struttura: l'energia assorbita grazie allo sfruttamento del calore latente è più elevata di quella assorbita nel caso senza *PCM* dove si sfrutta solo il calore sensibile. A tal proposito, in *Figura 1.12* si riporta un grafico che confronta l'energia immagazzinata da diversi materiali utilizzati nell'edilizia tradizionale con quella immagazzinata da alcuni *PCM*: i valori rappresentano l'energia espressa in $[\text{kJ kg}^{-1}]$ con un ΔT di 10°C . In certe condizioni climatiche la risposta termica di un edificio dotato di *PCM* ad

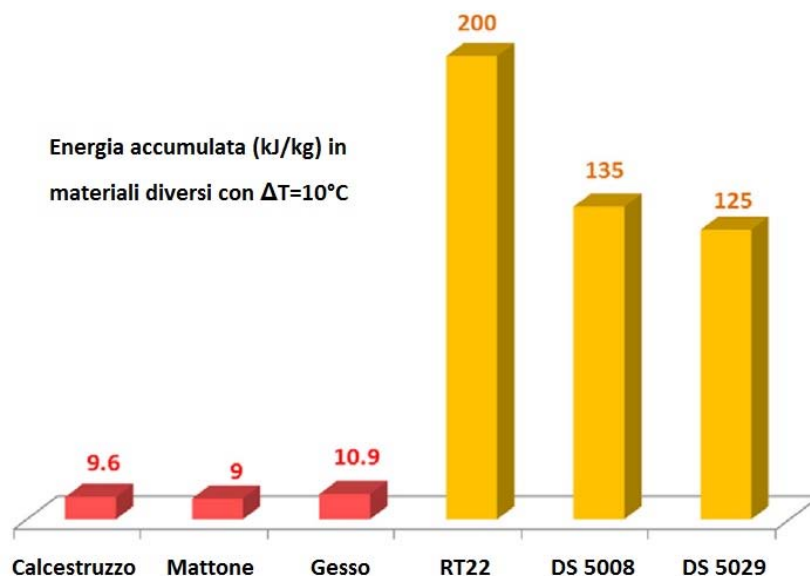


Figura 1.12: Confronto fra energie stoccate da materiali tradizionali e *PCM*

una sollecitazione esterna potrebbe addirittura rendere non necessaria la presenza dei sistemi *HVAC*: utilizzando un *PCM* caratterizzato da una opportuna temperatura di fusione, si può mantenere la temperatura interna dell'ambiente in un intervallo di comfort accettabile. In generale, l'utilizzo dei *PCM* per realizzare un sistema di raffrescamento passivo comporta due vantaggi: in primo luogo consente di eliminare le fluttuazioni della temperatura interna ottenendo delle condizioni di comfort stabili; in secondo luogo permette di ridurre e ritardare il picco della temperatura interna raggiunto durante le ore del giorno. Ovviamente per sfruttare il vantaggio del calore latente, si possono distinguere due fasi assunte dal *PCM*: la fase solida e quella liquida. Il cambiamento di fase può essere realizzato attraverso due strategie: con un sistema *HVAC* oppure attraverso il cosiddetto "free cooling", ovvero quando l'edificio viene raffrescato tramite sistemi passivi, senza utilizzare un impianto di raffrescamento. Nel primo caso, quando l'edificio è dotato di un sistema *HVAC*, l'aria interna viene raffrescata quando l'impianto di raffrescamento è in funzione e il *PCM* è completamente solidificato. Successivamente, quando il sistema di raffrescamento viene spento, la temperatura dell'aria interna aumenta e trasferisce la sua energia termica al *PCM* avviando la fase di fusione. Facendo riferimento alla *Figura 1.13*, il *PCM* permette di traslare la richiesta energetica per il raffrescamento in ore del giorno in cui il costo dell'energia elettrica è minore: il grafico rappresenta

il tipico andamento della temperatura all'interno di un edificio con il *PCM* (rosso) e senza (blu). Tale andamento è simile all'andamento della potenza richiesta dal sistema di raffrescamento, perciò questo procedimento si identifica con il termine "*peak shifting*": il sistema *HVAC* funziona durante il periodo in cui la richiesta energetica è minore (fuori dal picco) e viene spento nelle ore del giorno in cui la tariffa energetica è maggiore grazie alla presenza del *PCM*. Considerando quindi la potenza del sistema di raffrescamento in ordinata, l'area gialla rappresenta l'energia risparmiata: il materiale a cambiamento di fase può infatti fornire la richiesta energetica in raffrescamento durante le ore di picco, quando il sistema *HVAC* è spento. Dal punto di vista economico, l'edificio può beneficiare di una minore tariffa dell'energia elettrica durante il periodo fuori dal picco, quando è attivo il sistema *HVAC*. La seconda strategia invece si focalizza sul free cooling: tale

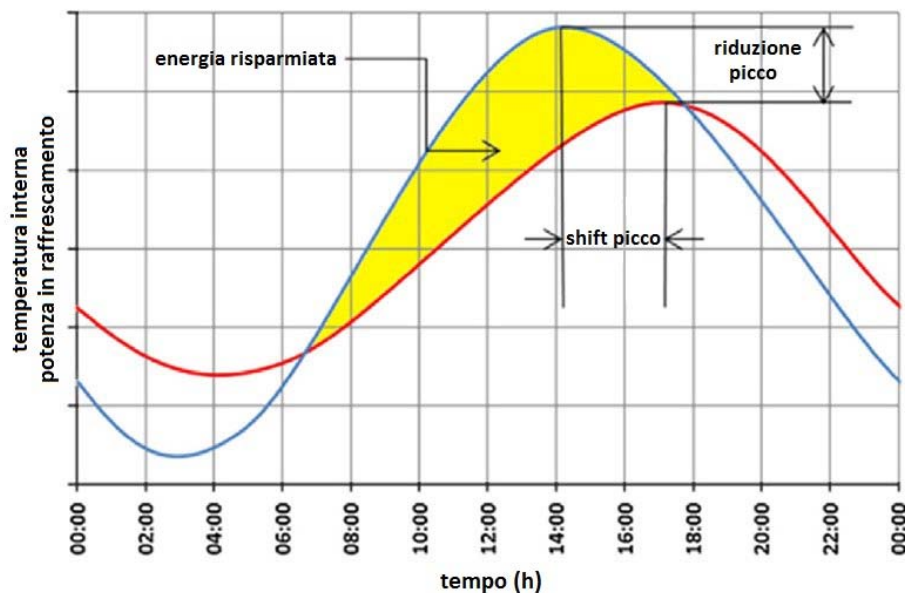


Figura 1.13: Peak shifting

argomento viene ampiamente discusso in un articolo scritto da Waqas e Din [12]. In tal caso si definiscono due processi:

- Processo di carica o solidificazione del *PCM*: durante la notte la temperatura esterna è minore di quella dell'ambiente interno. Sfruttando la temperatura dell'ambiente esterno, si avvia il processo di solidificazione del *PCM*: il materiale passa dalla fase liquida a quella solida mantenendo una temperatura costante. Durante la solidificazione, un ventilatore elettrico rimuove il calore dal *PCM*: il processo di carica continua finché la temperatura esterna è inferiore alla temperatura di fusione del *PCM*.
- Processo di scarica o fusione del *PCM*: durante il giorno, quando nell'edificio si supera la temperatura di comfort, si sfrutta il calore immagazzinabile nel *PCM*

per raffrescare l'ambiente interno. L'aria calda della stanza passa attraverso il *PCM* raffrescandosi, poiché il materiale passa dalla fase solida a quella liquida mantenendo una temperatura costante.

Per concludere, bisogna affermare che l'utilizzo dei *PCM* potrebbe tornare utile anche in inverno: se il materiale a cambiamento di fase venisse macroincapsulato nei muri esterni, durante i mesi freddi il *PCM* fungerebbe da isolante, riducendo il fabbisogno energetico legato al sistema di riscaldamento. I materiali a cambiamento di fase potrebbero prevenire quindi i problemi di surriscaldamento durante il giorno in estate e permetterebbero di conseguire dei risparmi in inverno.

1.4.3 Dissipatori di calore passivi per componenti elettronici

L'innovazione tecnologica degli ultimi decenni ha completamente rivoluzionato lo stile di vita delle persone: con l'invenzione di internet, il mondo sembra essere più piccolo in quanto si può contattare chiunque in qualsiasi momento con un prezzo esiguo. Al di là dei vantaggi e degli svantaggi che caratterizzano il mondo digitale, un problema pratico che caratterizza qualsiasi dispositivo elettronico è la dissipazione del calore prodotto. Al giorno d'oggi i dispositivi elettronici presentano dimensioni e pesi sempre più ridotti, ma contemporaneamente hanno una potenza di calcolo sempre maggiore: ciò implica un flusso termico per unità di superficie notevole. Questo calore deve essere dissipato per mantenere l'apparecchiatura al di sotto della temperatura operativa massima: tale temperatura varia in funzione del componente considerato, ma per un processore si aggira intorno ai $70\div 80$ °C. Riferendosi a un notebook, l'elemento che svolge questa funzione è la ventola: in questo caso il sistema di dissipazione del calore è attivo, infatti la ventola ruota ed invia aria al processore grazie alla corrente elettrica immagazzinata nella batteria del pc. Un sistema attivo di dissipazione del calore è quindi caratterizzato da svantaggi non trascurabili: consumo di energia elettrica e produzione di rumore. In questo caso i materiali a cambiamento di fase potrebbero tornare utili poiché permetterebbero di realizzare un sistema passivo di dissipazione del calore: da un lato si ridurrebbe il consumo energetico per lo smaltimento del calore, dall'altro si eliminerebbe il rumore generato dai sistemi attivi. Un altro aspetto che si deve considerare usando i *PCM* è legato all'intermittenza con cui il dispositivo elettronico produce calore: in questo caso bisogna considerare il tempo di carica e scarica del *PCM*. In particolare è opportuno che il materiale a cambiamento di fase completi la solidificazione in tempo per poter assorbire il calore prodotto dal dispositivo elettronico: se il *PCM* non si solidificasse completamente dopo l'ultimo ciclo di lavoro, all'avvio del ciclo successivo il materiale potrebbe assorbire un minore quantità di calore latente perciò c'è il rischio che non si riesca a mantenere l'apparecchiatura sotto la temperatura operativa massima.

In letteratura sono molti gli studi condotti sui *PCM* relativi a questa applicazione: in questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti di due articoli che fanno riferimento a flussi termici diversi. Bisogna precisare infatti, che il flusso termico da dissipare nei componenti elettronici varia in funzione dell'applicazione: per desktop computer molto performanti si raggiungono potenze specifiche elevate (un processore *Intel Core i7 di settima generazione* supera facilmente i 50 kW m^{-2}); mentre dispositivi portatili come tablet o smartphone utilizzano processori che generano potenze molto minori (inferiori a 5 kW m^{-2}).

Il primo articolo è quello di Mancin et al. [8]: in questo lavoro sono state considerate tre diverse potenze specifiche (6,25, 12,5 e $18,75 \text{ kW m}^{-2}$ che corrispondono ad una potenza di 10, 20 e 30 W sui moduli di prova utilizzati). Come dissipatore di calore sono state utilizzate tre paraffine con e senza schiuma metallica: in particolare sono state utilizzate tre schiume di rame aventi diversi valori di densità di pori ω (5, 20 e 40 PPI), ma stessa porosità ε pari a 0,94. I risultati dimostrano che le schiume di rame sono molto utili per migliorare lo scambio termico all'interno delle paraffine e, di conseguenza, permettono di raffreddare meglio il componente riscaldante che funge da componente elettronico. Di seguito si riporta l'andamento delle temperature all'interno del modulo di prova costituito dalla schiuma di rame (40 PPI) e dalla paraffina Sasolwax 5203 avente temperatura di fusione T_f pari a 53 °C : la *Figura 1.14* si riferisce alla potenza specifica di $18,75 \text{ kW m}^{-2}$ (ovvero 30 W sul modulo di prova). Grazie ad alcune termocoppie posizionate a diverse distanze dal corpo scaldante (*Junction*), gli autori hanno dimostrato che per potenze applicate e densità di pori diverse, i profili delle temperature sono simili, ma i valori raggiunti e i tempi necessari alla fusione cambiano. Tali differenze sono dovute proprio ai differenti valori di densità di pori ω delle schiume e soprattutto alle diverse potenze applicate. In realtà infatti, le prove sperimentali hanno dimostrato che il valore della densità dei pori della schiuma non incide particolarmente sulle performance dei vari sistemi: nessuna schiuma permette di ottenere la temperatura minore del corpo scaldante per qualsiasi potenza applicata. Ciò è dovuto al fatto che gli esperimenti sono stati effettuati con schiume aventi tutte la stessa porosità ε , perciò le variazioni di temperatura non sono molto influenzate dalla densità di pori ω , ma principalmente dal diverso flusso termico.

Il secondo articolo fa riferimento invece a potenze specifiche minori, inerenti a dispositivi portatili come tablet o smartphone: per questa applicazione, Tomizawa et al. [11] si sono focalizzati sui materiali a cambiamento di fase microincapsulati. In questo caso, gli autori hanno optato per una paraffina microincapsulata per prevenire le perdite di liquido durante la fusione: la temperatura di fusione T_f della paraffina è 32 °C , mentre il calore latente varia da 140 a 160 kJ kg^{-1} . Gli autori hanno realizzato dei fogli di *PCM* a partire dalla paraffina microincapsulata utilizzando uno stampo metallico: sono stati realizzati

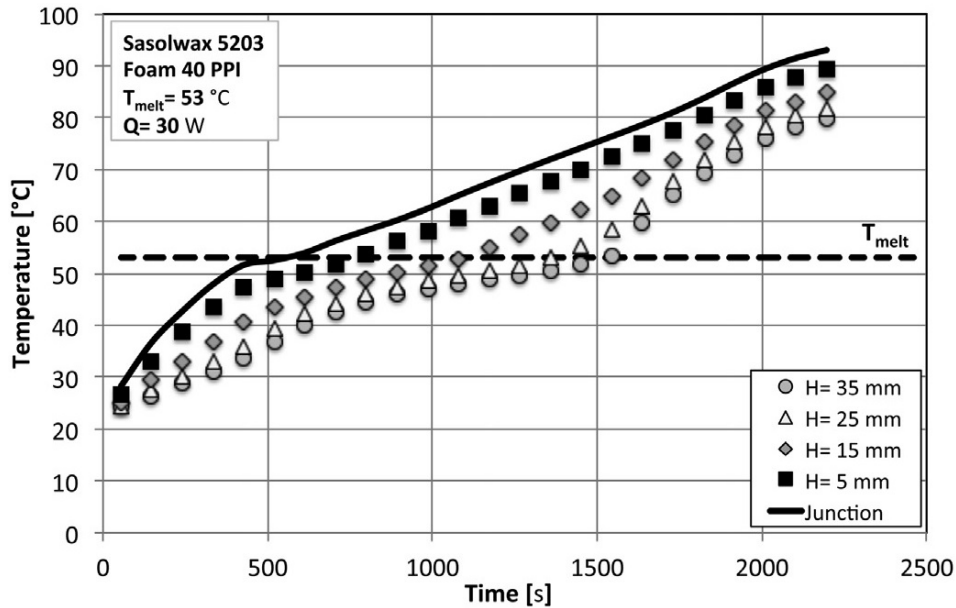


Figura 1.14: Temperatura del sistema *PCM*+schiuma (40 PPI) a 30 W (Mancin et al. [8])

tre fogli delle dimensioni di 100 x 50 mm e aventi tre diversi spessori (foglio *A* con spessore 1,60 mm; foglio *B* 2,10 mm e foglio *C* 2,45 mm). Lo scopo dell'esperienza è quello di analizzare il comportamento di un sistema di raffreddamento passivo in funzione della quantità di *PCM* che costituisce i fogli: il modulo di prova è rappresentato in *Figura* 1.15 ed è costituito da un blocco di isolante su cui vengono posizionati il riscaldatore e il foglio di *PCM*. Successivamente, questi ultimi due componenti vengono racchiusi da un case di policarbonato alto 10 mm: si viene quindi a creare un'intercapedine d'aria dallo spessore variabile in funzione del foglio di *PCM* utilizzato (*A*, *B* o *C*). Il riscaldatore fornisce una potenza di 2 W, perciò, considerando le sue dimensioni, la potenza specifica corrisponde a $0,4 \text{ kW m}^{-2}$: tale valore è notevolmente inferiore rispetto alla potenza generata da un desktop computer in cui si devono necessariamente adottare sistemi di raffreddamento attivi. Un confronto fra le prestazioni dei diversi fogli di *PCM* è fornito dalla *Figura* 1.16 in cui viene rappresentato l'incremento di temperatura del riscaldatore (*a*) e del case (*b*) nel tempo. Le misurazioni delle temperature sono state effettuate ogni minuto nell'arco di 90 minuti di riscaldamento. Per quanto riguarda il riscaldatore, la presenza dei fogli di *PCM* comporta un aumento dell'incremento di temperatura del riscaldatore inversamente proporzionale allo spessore del foglio di *PCM*. Al contrario, per quanto riguarda il case, la presenza del materiale a cambiamento di fase riduce l'incremento di temperatura e l'effetto è più marcato all'aumentare dello spessore del foglio di *PCM*. Questo è spiegato dal fatto che, a causa della presenza del *PCM* (caratterizzato da bassa conduttività termica), la resistenza termica fra riscaldatore e case è maggiore rispetto al caso senza materiale a cambiamento di fase: il foglio di *PCM* sopprime lo scambio termico per convezione all'interno dell'intercapedine d'aria, in quanto, riducendo

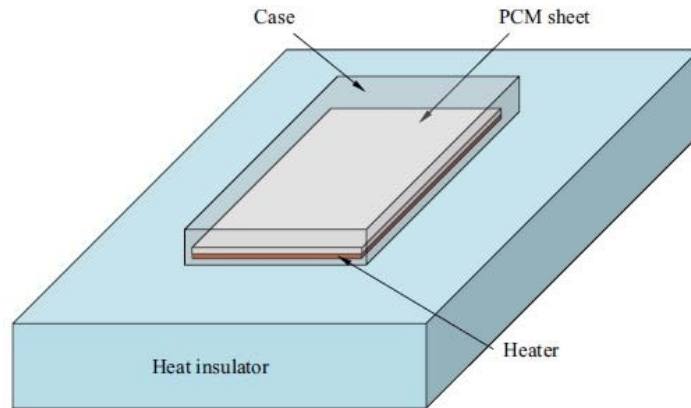


Figura 1.15: Modulo di prova dell'esperimento di Tomizawa et al. [11]

lo spessore d'aria, diminuisce le probabilità di instaurare moti convettivi. Per questo motivo, con la presenza del *PCM*, lo scambio termico nell'intercapedine d'aria è di origine solo conduttiva. D'altra parte, lo spessore del foglio di *PCM* influisce sullo scambio termico dell'intero sistema: lo spessore d'aria fra foglio e case si riduce all'aumentare dello spessore del foglio di *PCM*, di conseguenza diminuisce la resistenza termica conduttiva dell'intercapedine d'aria. Per queste ragioni il foglio di *PCM* con spessore maggiore (*C*) comporta un incremento di temperatura minore rispetto agli altri casi con *PCM* sia per quanto riguarda il riscaldatore, sia per quanto riguarda il case. In entrambi i grafici viene evidenziata la zona di flesso presente grazie ai fogli di *PCM*: questo comportamento rappresenta al meglio l'effetto ritardante desiderato grazie all'introduzione del materiale a cambiamento di fase. Nonostante queste prove non considerino gli altri componenti che, nel caso di smartphone e tablet, occupano il case, bisogna affermare che questo studio potrà tornare utile in futuro, quando le potenze termiche generate dai dispositivi portatili richiederanno per forza dei sistemi di raffreddamento.

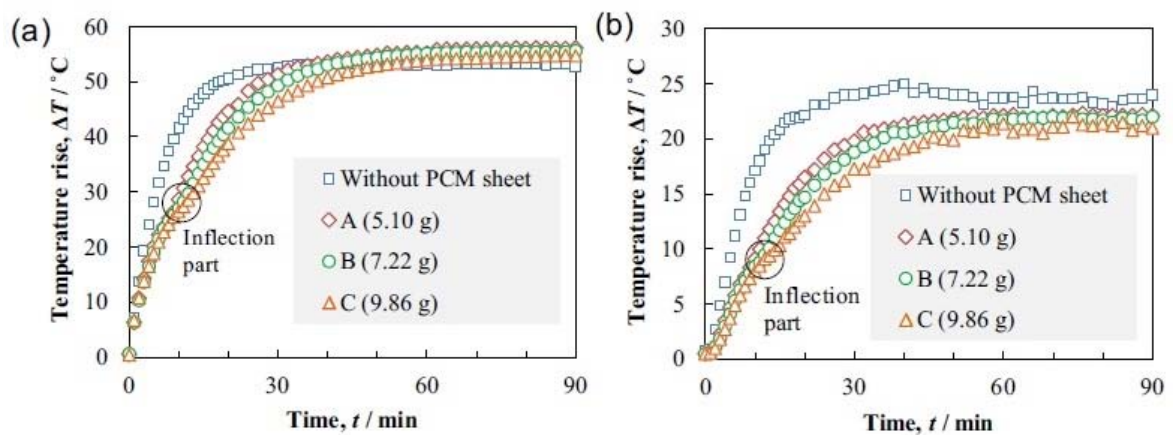


Figura 1.16: Incremento di temperatura del riscaldatore (a) e del case (b) nel tempo (articolo di Tomizawa et al. [11])

CAPITOLO

2

APPARATO SPERIMENTALE

2.1 Esempi di apparati sperimentali presenti in letteratura

Lo scopo di questa tesi è quello di indagare come potrebbe avvenire il raffreddamento di un componente elettronico con un sistema passivo costituito da un *PCM*. A tal proposito verranno utilizzate tre diverse paraffine: all'inizio verrà analizzato il comportamento del materiale a cambiamento di fase senza incrementarne le proprietà di scambio termico, perciò senza schiuma metallica, successivamente saranno invece introdotte tre schiume d'alluminio aventi proprietà diverse. Prima di realizzare l'apparato sperimentale, è stata effettuata una ricerca per analizzare gli esperimenti condotti in letteratura: sono stati considerati gli articoli in cui si studia il diverso comportamento di un *PCM*, preferibilmente una paraffina, con la presenza o meno di una schiuma metallica.

Si cita quindi l'apparato sperimentale realizzato da Zhao et al. [13]: il loro esperimento consiste nell'analizzare il comportamento di una paraffina come *PCM*. In particolare viene messo in evidenza il comportamento della paraffina con e senza schiume metalliche di diversa densità e diverse dimensioni dei pori (PPI): gli esperimenti dimostrano che la presenza delle schiume metalliche migliora le prestazioni del sistema sia durante la fusione, che durante la solidificazione. In *Figura 2.1* viene riportato lo schema dell'apparato sperimentale durante la fase di fusione del *PCM*, mentre in *Figura 2.2* è rappresentata la

fase di solidificazione. Le schiume metalliche utilizzate hanno dimensioni di 200 x 120 x 25 mm e sono di rame, avente una conduttività termica di $350 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La paraffina RT58 è caratterizzata da una temperatura di fusione di $58 \text{ }^\circ\text{C}$, conduttività termica di $0,21 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e capacità di accumulo termico di 181 kJ kg^{-1} . Le schiume metalliche sono saldobrasate ad un piatto di rame a cui sono collegate tre termocoppie: durante la fusione (*Figura 2.1*) il sistema è riscaldato elettricamente sulla faccia inferiore del provino con un flusso termico costante. La potenza termica di input viene controllata e misurata da un analizzatore di potenza elettrica (Hameg HM8115-2) avente accuratezza di $\pm 0,5\%$. All'interno del *PCM* vengono posizionate nove termocoppie a distanze diverse dalla sorgente di calore per monitorarne la variazione di temperatura nel tempo e nello spazio. La superficie della sorgente termica non a contatto con la schiuma metallica viene isolata con Armaflex, mentre le restanti superfici del provino schiuma-*PCM* sono ricoperte da fogli acrilici che sono trasparenti e permettono quindi di visualizzare il processo di fusione. Infine, tutti i dati forniti dalle termocoppie e la potenza di input del sistema vengono memorizzati automaticamente in un sistema di acquisizione dati. La fase di solidificazione del *PCM* (*Figura 2.2*) viene realizzata tramite tre diverse condizioni di raffreddamento: con isolamento termico come durante la fase di fusione, con convezione naturale e con convezione forzata. Per quanto riguarda la convezione forzata, il piatto di rame alla base del sistema schiuma-*PCM* viene messo in contatto con un tunnel del vento in cui viene fatta scorrere aria a 8 m s^{-1} .

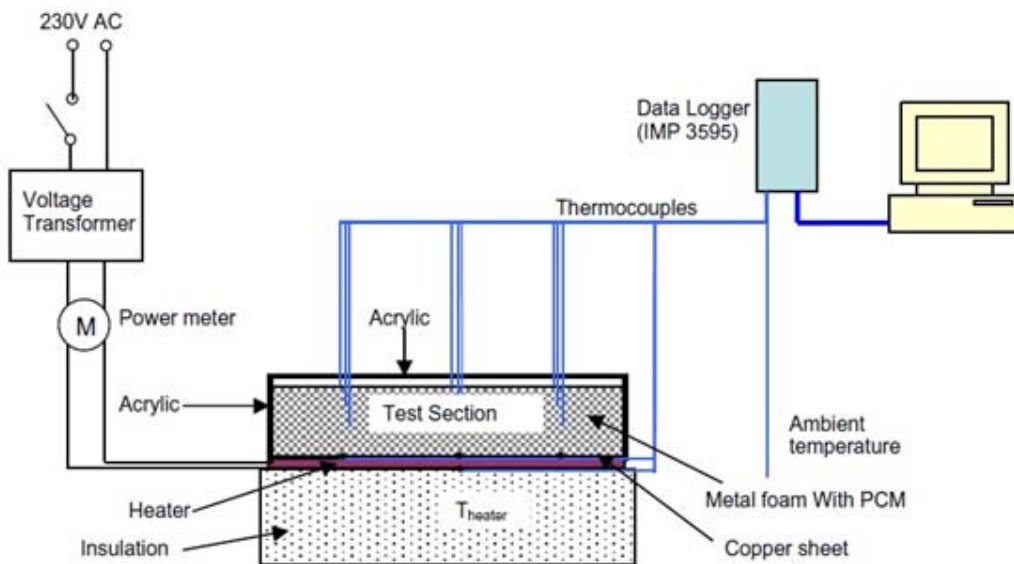


Figura 2.1: Apparato sperimentale di Zhao et al. [13] per la fusione del *PCM*

Un altro apparato sperimentale che ha notevolmente contribuito alla realizzazione di quello adottato in questa tesi è quello di Mancin et al. [8] già citato nel *Paragrafo 1.4.3*: in questo articolo si confrontano tre diverse paraffine con schiume aventi densità di

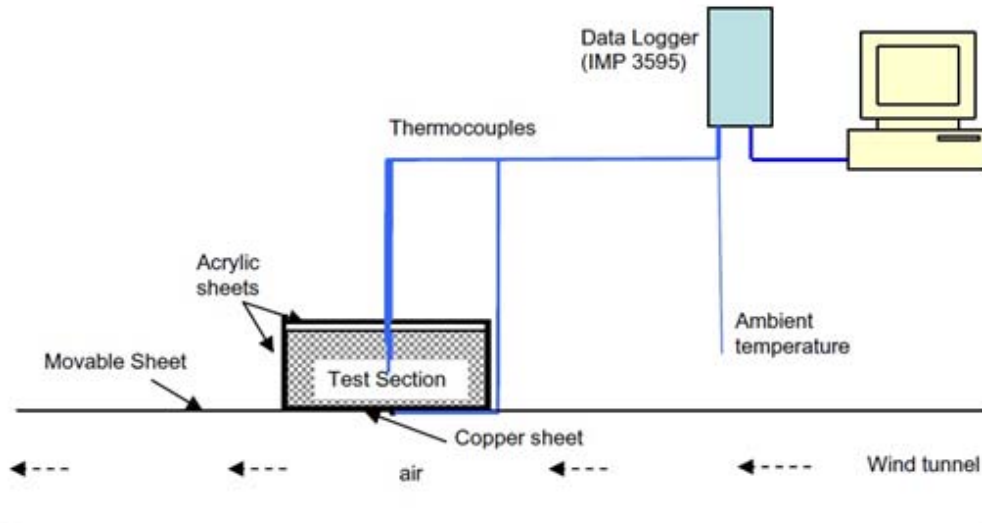


Figura 2.2: Apparato sperimentale di Zhao et al. [13] per la solidificazione del *PCM*

pori ω variabile ma stessa porosità ε . Tale apparato sperimentale è costituito da tre componenti: il modulo sperimentale in cui viene alloggiato il sistema paraffina-schiuma, il sistema che fornisce la potenza termica e il sistema di acquisizione dati. Il modulo sperimentale viene rappresentato in *Figura 2.3 (a)*: è stato progettato in modo tale da poter vedere il processo di cambiamento di fase attraverso un vetro. Un piatto di rame a forma di parallelepipedo delle dimensioni di 40 x 40 x 10 mm viene utilizzato per trasmettere il calore al sistema paraffina-schiuma, mentre il vetro e le restanti pareti che sono realizzate in bachelite, un materiale isolante, hanno spessore di 10 mm. Quattro termocoppie vengono utilizzate per monitorare la temperatura all'interno del sistema paraffina-schiuma, mentre una quinta termocoppia viene collegata al centro del piatto di rame per rilevarne la temperatura (*Junction*): il corpo scaldante è costituito da un altro piatto di rame delle dimensioni 40 x 40 x 5 mm in cui viene posizionata una resistenza elettrica in Ni-Cr. Questo sistema viene quindi inserito in una struttura in Teflon (*Figura 2.3 (b)*) al fine di avere delle condizioni al contorno simili, permettendo quindi di fare dei confronti fra le tre diverse paraffine e le schiume utilizzate: la temperatura della superficie di quest'ultima struttura in Teflon viene infatti monitorata da altre cinque termocoppie.

2.2 Definizione dell'apparato sperimentale

2.2.1 Materiali a cambiamento di fase utilizzati

In questa tesi sono stati utilizzati *PCM* organici, in particolare si tratta di tre diverse paraffine: come riportato al *Paragrafo 1.2.1*, le paraffine sono composte da una miscela

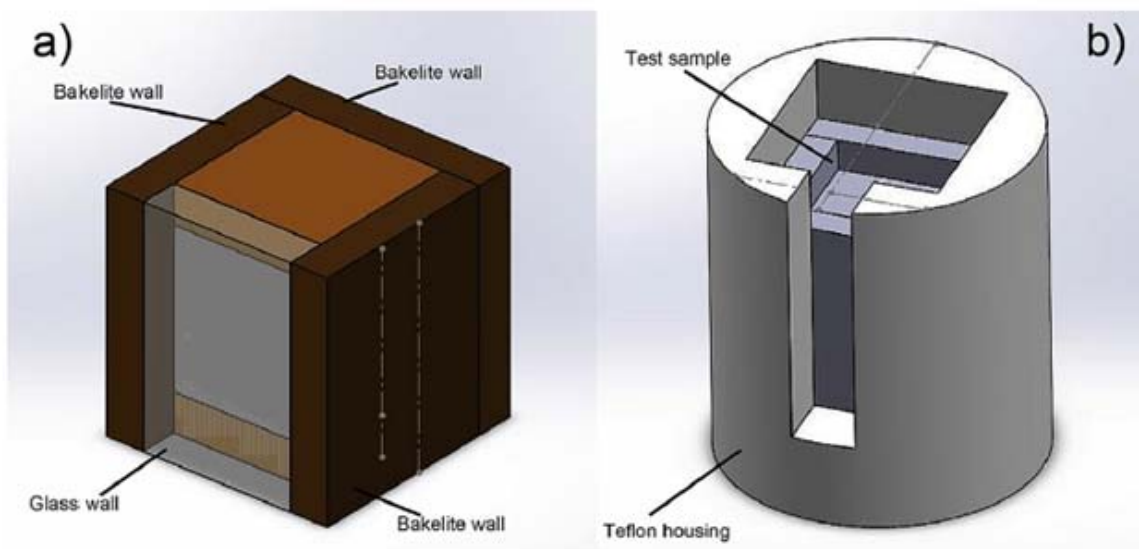


Figura 2.3: Apparato sperimentale di Mancin et al. [8]

Tabella 2.1: Caratteristiche delle paraffine

Modello paraffina	RT42	RT55	RT64HC
Temperatura di fusione T_{fus} [°C]	38÷43	51÷57	63÷65
Temperatura di solidificazione T_{sol} [°C]	43÷37	56÷57	64÷61
Calore latente $\pm 7,5\% h$ [kJ kg ⁻¹]	165	170	250
Calore specifico c_p [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	2	2	2
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 [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,2	0,2	0,2
Variatione di volume percentuale [%]	12,5	14	11
Massima temperatura operativa T_{max} [°C]	72	90	95
Punto di infiammabilità T_{flash} [°C]	186	>200	>190

di catene di n-alcane del tipo (CH₃-(CH₂)-CH₃) e incrementando la lunghezza della catena, aumentano il calore latente e la temperatura di fusione. Sono stati scelti questi materiali a cambiamento di fase per le loro caratteristiche opportune soprattutto ai fini della sicurezza: le paraffine non sono corrosive, sono sicure per la salute dell'uomo e sono affidabili. Dal punto di vista termico, si è optato per questi materiali perché possiedono un alto calore latente, non sono caratterizzati da sottoraffreddamento e la variazione di volume durante il cambiamento di fase è contenuta. Purtroppo anche le paraffine sono caratterizzate da una bassa conducibilità termica (generalmente compresa tra 0,21 e 0,24 W m⁻¹ K⁻¹). Le tre paraffine utilizzate in questa tesi sono state comprate dall'azienda tedesca *Rubitherm*: in *Tabella 2.1* vengono riportate le caratteristiche principali.

Tabella 2.2: Flussi termici a cui le paraffine saranno soggette

Potenza specifica [kW m ⁻²]	Dimensione riscaldatore [m ²]	Flusso termico Q [W]
10	0,01	100
15	0,01	150
20	0,01	200

2.2.2 Potenze termiche considerate

Come verrà descritto al *Paragrafo 2.2.8*, il riscaldatore che provvede a fornire la potenza termica è stato dimensionato considerando una potenza specifica massima di 20 kW m⁻². In realtà, come citato al *Paragrafo 1.4.3*, il flusso termico da dissipare nei componenti elettronici varia in funzione dell'applicazione: per desktop computer molto performanti si raggiungono potenze specifiche maggiori di 20 kW m⁻², mentre dispositivi portatili come tablet o smatphone sviluppano potenze minori (inferiori ai 5 kW m⁻²). Considerando invece applicazioni diverse dall'elettronica, il flusso termico prodotto da hotspots aeronautici è di circa 10 kW m⁻². In questo lavoro di tesi sono state considerate tre diverse potenze termiche specifiche: 10, 15 e 20 kW m⁻². Considerando quindi tali potenze specifiche e la dimensione della superficie del riscaldatore, sono stati ricavati i flussi termici che il riscaldatore dovrà fornire: tali valori sono riportati in *Tabella 2.2*. Grazie al generatore di corrente continua, ogni paraffina sarà testata con tre diversi flussi termici: 100, 150 e 200 W.

2.2.3 Schiume metalliche utilizzate

Per incrementare la conduttività termica delle paraffine e quindi fare in modo che il calore si propaghi all'interno del *PCM* più velocemente, sono state utilizzate tre schiume metalliche in alluminio aventi dimensioni 100 x 40 x 100 mm. Queste schiume, oltre ad avere densità dei pori ω differenti, hanno anche porosità ε leggermente diverse: a parità di volume, cambiando la porosità ε della schiuma metallica, cambia la quantità di *PCM* e di conseguenza si modifica la conduttività termica del sistema (tale principio è stato discusso alla fine del *Paragrafo 1.3.3*). In *Tabella 2.3* si riportano le caratteristiche delle schiume d'alluminio utilizzate, mentre in *Figura 2.4* si riporta la foto della schiuma metallica Al-5-8,0 20 mm. Tutte le schiume utilizzate sono dotate di due piastre di alluminio alle estremità che fungeranno da pareti di contenimento laterali per il modulo di prova (*Paragrafo 2.2.6*): poiché ogni basetta è larga 10 mm, la larghezza effettiva delle schiume è 20 mm. Inserite nelle piastre sono presenti delle termocoppie che saranno utili per misurare la temperatura: ci sono sei termocoppie su ogni piastra. Per il modulo di prova

Tabella 2.3: Caratteristiche delle schiume d'alluminio

schiuma metallica	Al-5-8,0 20 mm	Al-10-7,4 20 mm	Al-40-7,0 20 mm
PPI [pori pollice ⁻¹]	5	10	40
porosità ε [-]	0,92	0,926	0,93
densità relativa ρ [%]	8,0	7,4	7
altezza H [mm]	20	20	20
diametro medio pori [mm]	5,08	2,54	0.635
spessore fibra t [mm]	0,490	0,553	0.324
lunghezza fibra l [mm]	1,758	1,950	1.072
a_{sv} [m ² m ⁻³]	342	736	1679

senza schiuma metallica (*Paragrafo 2.2.6*) verranno utilizzate due pareti in alluminio aventi le stesse dimensioni delle piastre delle schiume metalliche: anche in questo caso saranno applicate sei termocoppie su ogni parete (in *Appendice* viene riportato il disegno tecnico che rappresenta la posizione e le dimensioni dei fori per tali termocoppie).

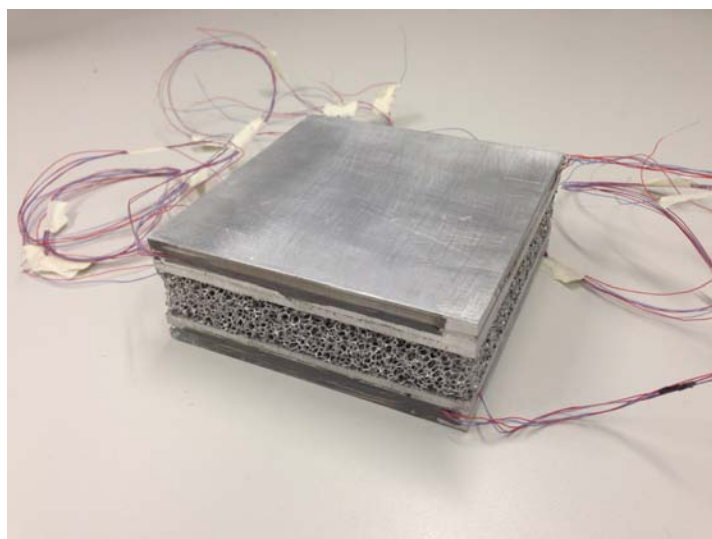


Figura 2.4: Foto di una schiuma metallica in alluminio in cui si possono notare i fili delle termocoppie

2.2.4 Strumentazione di laboratorio

Di seguito si riportano gli strumenti utilizzati in laboratorio durante le prove sperimentali:

- Termocoppie tipo T in rame-costantana inguainate in inox: tali termocoppie hanno diametro 1 mm e sono caratterizzate da un'incertezza di $\pm 0,2$ °C. Si è optato per queste termocoppie inguainate in inox poiché devono essere rigide in quanto devono essere inserite nel sistema schiuma-paraffina.

- Termoresistenza Pt100: questo termometro a resistenza al platino è caratterizzato da un'incertezza di $\pm 0,025$ °C ed opera nel range $-180 \div 420$ °C.
- Kaye K170: è lo strumento che fornisce la temperatura di riferimento al giunto freddo per le termocoppie, ossia 0 °C (*"Ice Point Reference"*).
- Agilent 34970A: è il sistema di acquisizione dati che converte i segnali analogici di tensione in segnali digitali per permettere la memorizzazione dei dati su pc. È dotato di tre schede con 20 canali ciascuna.
- Techne RB-12A: è un bagno termostatico in cui, grazie alla presenza di una console digitale, di alcune resistenze e un refrigeratore, si può regolare la temperatura di una determinata quantità di acqua.
- Generatore di corrente continua CEA: tale generatore fornisce una tensione massima di 30 V e una corrente massima di 30 A.

2.2.5 Taratura delle termocoppie inguainate in inox

Prima di utilizzare le termocoppie in rame-costantana nelle prove con le paraffine, si è provveduto a tararle al fine di determinare la curva di taratura. È stata quindi utilizzata la termoresistenza Pt100 che ha un'incertezza notevolmente minore rispetto a quella delle termocoppie: per questo motivo, la temperatura fornita dalla Pt100 può essere ritenuta corretta e verrà indicata con T_C . Le termocoppie utilizzate nelle prove sperimentali non sono state tarate tutte lo stesso giorno: tale scelta è stata determinata dall'impossibilità di inserire contemporaneamente tutte le termocoppie nel bagno termostatico e dalla necessità di dover prestare attenzione a non creare interferenze o contatti errati fra i sensori delle stesse. La procedura di taratura si può riassumere nei seguenti passaggi:

1. Le termocoppie vengono collegate al Kaye K170 attraverso le porte 41÷46 e di conseguenza al sistema di acquisizione dati Agilent 34970A per poter memorizzare le loro differenze di tensione in [μ V] nel pc;
2. La termoresistenza Pt100 è collegata al sistema di acquisizione dati il quale fornisce la temperatura in [°C] con sensibilità del centesimo di grado;
3. Si inseriscono i sensori delle termocoppie e della Pt100 all'interno del bagno termostatico. Bisogna prestare attenzione che i sensori siano tutti alla stessa altezza e che non ci siano contatti che potrebbero creare interferenze;
4. Si fissa la temperatura del bagno termostatico a 20 °C e si attende finché non ha raggiunto la condizione di regime;

5. Si procede con la misurazione, quindi con il programma *LabVIEW* si memorizzano in un pc le tensioni delle termocoppie nell'arco di un minuto prestando attenzione che la temperatura indicata dalla Pt100 non vari significativamente;
6. Con la console digitale del bagno termostatico si aumenta la temperatura dell'acqua di 5 °C e si attende finché il bagno ha raggiunto la temperatura di regime;
7. Si ripetono i due passaggi precedenti fino ad una temperatura di 65 °C. Raggiungere temperature maggiori risulta difficile perchè, purtroppo, il bagno termostatico non è in grado di mantenere un valore costante alle alte temperature a causa degli effetti del tempo. Per risolvere questo problema bisognerebbe utilizzare olio diatermico.

Con il programma *Excel* di *Office* sono stati confrontati i valori forniti dalle termocoppie e si sono realizzate le curve di taratura. Per prima cosa, per ogni temperatura considerata del bagno termostatico, si è calcolato il valore medio delle misurazioni ottenute per ogni singola termocoppia. Successivamente, per convertire il valore delle termocoppie acquisito in [μ V] al corrispondente valore in [°C] è stato utilizzato il seguente polinomio:

$$T = a + bV + cV^2 + dV^3 + eV^4 \quad (2.1)$$

Indicando con T la temperatura della termocoppia in [°C], V la differenza di tensione della termocoppia in [mV], mentre a , b , c , d , e sono quattro costanti i cui valori sono:

$$a = 0,01334110023$$

$$b = 25,96625448$$

$$c = -0,6625435429$$

$$d = -0,03685919268$$

$$e = 0,01678956801$$

Indicando questi valori di temperatura in [°C] con T_{TC} e considerando i corrispettivi valori di temperatura forniti dalla Pt100 indicati con T_C , viene determinata la differenza di temperatura dT secondo la formula:

$$dT = T_{TC} - T_C \quad (2.2)$$

Il valore di dT corrisponde quindi allo scarto fra la temperatura misurata dalla termocoppia e la temperatura reale misurata dalla termoresistenza. Considerando quindi questi scarti e il corrispondente valore del bagno termostatico fornito dalla Pt100, sono state realizzate le curve di taratura: per ragioni di spazio non si riportano tutte queste curve, ma si può affermare che gli andamenti di tali curve sono molto simili, soltanto una termocoppia è stata scartata perchè caratterizzata da un andamento molto diverso

dalle altre. Per verificare che le curve di taratura delle termocoppie non scartate non si discostano molto l'una dall'altra, la *Figura 2.5* rappresenta la differenza degli scarti dT per le diverse termocoppie in funzione della corrispondente temperatura del bagno termostatico misurata dalla Pt100. Si può osservare che all'aumentare della temperatura

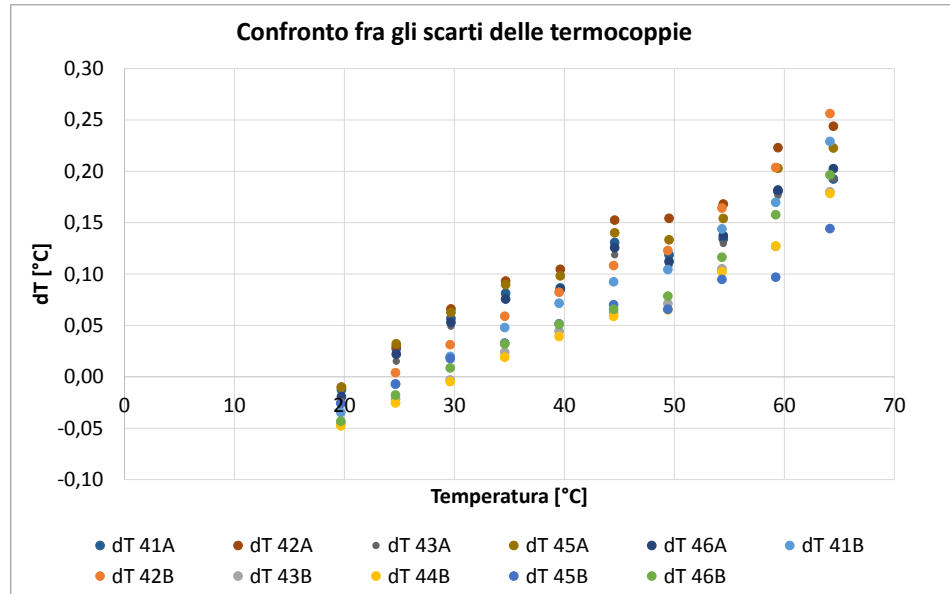


Figura 2.5: dT delle termocoppie non scartate in funzione della temperatura del bagno termostatico

del bagno termostatico, le differenze fra gli scarti dT delle termocoppie crescono: in corrispondenza della misurazione alla temperatura più elevata, c'è una differenza fra il dT_{max} (ovvero relativo alla termocoppia che si allontana maggiormente dalla temperatura reale) e il dT_{min} (relativo alla termocoppia che si avvicina maggiormente alla temperatura reale) corrispondente a $0,112 \text{ }^\circ\text{C}$. Poiché tali differenze sono paragonabili con l'incertezza caratteristica delle termocoppie, in *Figura 2.6* si considera una curva di taratura che rappresenta l'andamento medio di tutte le undici termocoppie. Nello stesso grafico viene riportata la curva di tendenza rappresentante un polinomio di quinto grado: grazie a questa equazione si può determinare lo scarto medio delle termocoppie in funzione di un qualsiasi valore di temperatura in ingresso. In particolare, la temperatura corretta T_C si otterrà dalla formula:

$$T_C = T_{TC} - dT \quad (2.3)$$

Dopo aver definito questa curva di taratura media, si considera lo scarto dT (differenza fra temperatura misurata dalle termocoppie in $^\circ\text{C}$ e la temperatura corretta della Pt100) rapportato con la misurazione delle termocoppie in $[\mu\text{V}]$: per fare questo è stato considerato un valore medio delle misure fornite dalle termocoppie per ogni prova effettuata con il bagno termostatico. L'andamento medio degli scarti in funzione dei valori misurati dalle termocoppie in $[\mu\text{V}]$ è rappresentato in *Figura 2.7*: l'equazione della linea di tendenza è indicata nel grafico. Dopo aver valutato tale curva di taratura, è

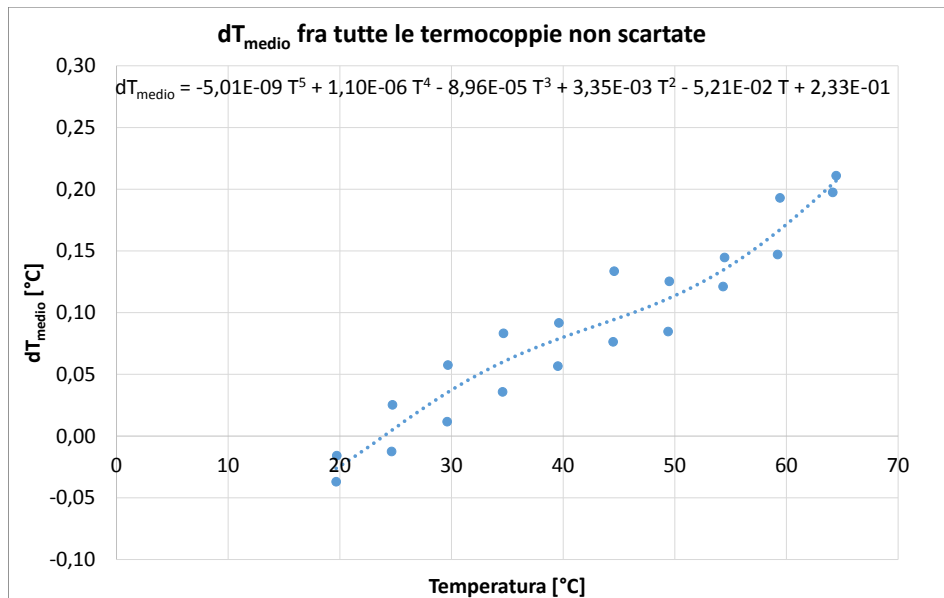


Figura 2.6: Curva di taratura rappresentante l'andamento medio di tutte le termocoppie

stato deciso di non considerare questa correzione durante le prove sperimentali con le paraffine: la curva di taratura indica che fino ai 65 °C (temperatura massima raggiungibile dal bagno termostatico) la correzione è paragonabile all'incertezza caratteristica delle termocoppie.

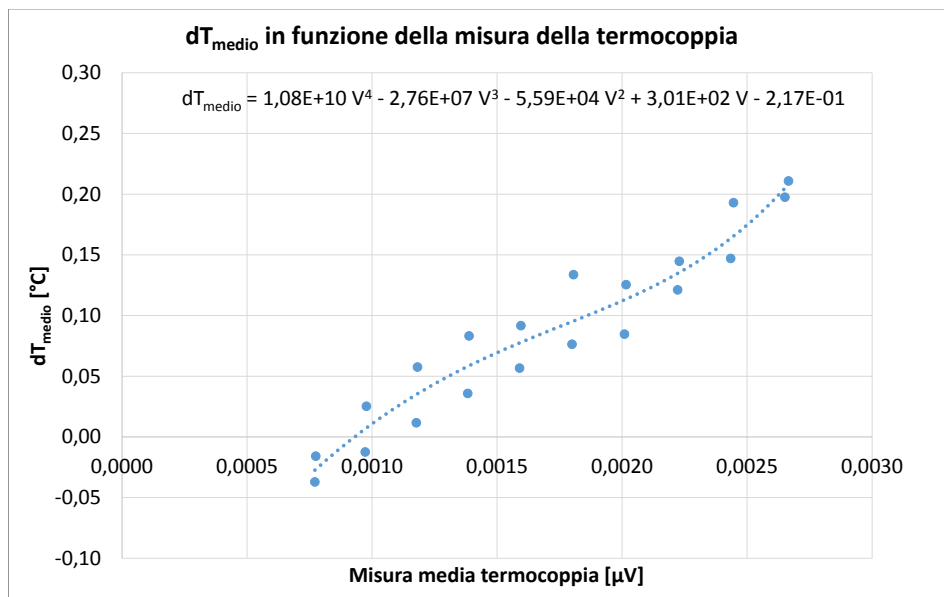


Figura 2.7: Andamento medio degli scarti in funzione dei valori misurati in [μ V]

2.2.6 Modulo di prova

Il modulo di prova è stato realizzato tenendo conto di altri apparati sperimentali presenti in letteratura: in particolare sono stati considerati i moduli di prova che permettono

di visualizzare facilmente il processo di fusione e solidificazione della paraffina. Per questo motivo, il modulo adottato in questa tesi è dotato di un vetro che permette la visualizzazione del cambiamento di stato. Le restanti pareti del contenitore sono state realizzate in bachelite, un isolante termoelettrico, che permette quindi di ridurre le dispersioni di calore. Per collegare i vari componenti del modulo sono state considerate due sostanze diverse: inizialmente si è optato per una resina epossidica (Pattex Marmo&Ferro), successivamente è stato invece utilizzato del silicone sigillante ad alta temperatura (Saratoga). Sono stati considerati questi due prodotti proprio per determinare quale fosse il più opportuno per la realizzazione del modulo: alla fine è stato deciso di utilizzare il silicone. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che il silicone permette di assemblare i vari pezzi con il minimo ingombro, assicurando al tempo stesso una tenuta molto soddisfacente. In ogni caso, le superfici di bachelite sono state rese più ruvide con della carta vetrata in modo tale che il silicone sia a contatto con una superficie scabrosa che migliori quindi il fissaggio. Per quanto riguarda i moduli di prova per i sistemi schiume-PCM, i pezzi di bachelite sono stati incollati con le piastre delle schiume metalliche: le piastre sono state ripulite prestando attenzione a non danneggiare i fili delle termocoppie presenti. Per il modulo contenente solo paraffina invece, i pezzi di bachelite sono stati incollati su due pareti di alluminio aventi le stesse dimensioni delle piastre delle schiume metalliche (100 x 10 x 100 mm). Per ogni test condotto con una particolare paraffina o schiuma, è stato adottato uno specifico modulo di prova. Al contrario, sono stati realizzati un unico riscaldatore (*Paragrafo 2.2.8*), per fornire la potenza termica, e un unico contenitore in Teflon (*Paragrafo 2.2.9*), per fornire un adeguato isolamento termico.

Il disegno del modulo di prova costituito solamente dalla paraffina, senza schiuma metallica, è riportato in *Figura 2.8 (a)*: tale rappresentazione è stata realizzata con il software *CAD SolidWorks*. Un vetro posizionato frontalmente permette di visualizzare il fronte di fusione della paraffina; il retro e la base del modulo sono costituiti da due pareti di bachelite, mentre le superfici laterali sono realizzate in alluminio e permettono quindi di propagare uniformemente il calore. È stato scelto l'alluminio proprio per poter paragonare i moduli senza schiuma con quelli dotati di schiume in alluminio: la conduttività termica di questo materiale è elevata (*Tabella 1.2*) e questo permette di trasferire bene il calore generato dal riscaldatore, ottenendo quindi temperature uniformi sulle superfici laterali del modulo. In ogni parete di alluminio sono state collocate sei termocoppie: in *Appendice* si riporta il disegno tecnico realizzato in *SolidWorks* rappresentante la posizione e le dimensioni dei fori in cui sono alloggiare le termocoppie. I componenti che costituiscono questo modulo di prova sono:

- Vetro avente dimensioni 100 x 40 x 4 mm;
- Due pareti di bachelite aventi dimensioni 15 x 40 x 120 mm (base) e 100 x 40 x 15

mm (retro);

- Due piastre di alluminio aventi dimensioni 100 x 100 x 10 mm per le pareti laterali.

Per quanto riguarda invece il sistema costituito da schiuma e *PCM*, in *Figura 2.8 (b)* si riporta una rappresentazione realizzata con il software *CAD SolidWorks*: per questi moduli si sfruttano le piastre collegate alla schiuma metallica come superfici laterali, mentre si adottano il vetro e la bachelite per ricreare le restanti superfici. I componenti utilizzati per i moduli adottati con le schiume metalliche sono:

- Vetro avente dimensioni 100 x 40 x 4 mm;
- Due pareti di bachelite aventi dimensioni 15 x 40 x 120 mm (base) e 100 x 40 x 15 mm (retro);
- Schiuma in alluminio avente dimensioni 100 x 40 x 100 mm (considerando nella larghezza anche lo spessore delle piastre).

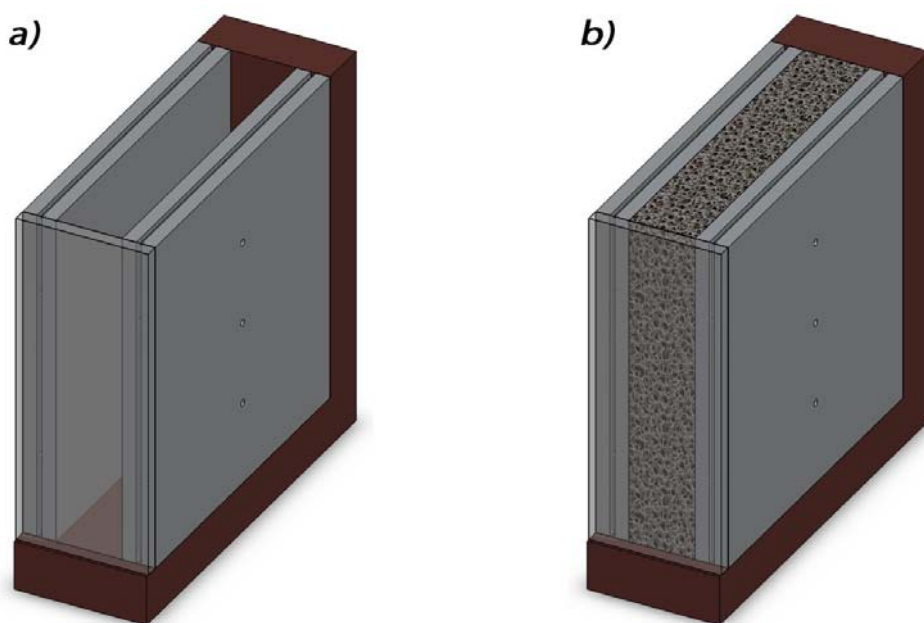


Figura 2.8: Moduli di prova: *a)* modulo senza schiuma; *b)* modulo con schiuma metallica;

2.2.7 Installazione delle termocoppie inguainate in inox

Per monitorare la temperatura della paraffina durante il cambiamento di fase sono state inserite alcune termocoppie inguainate in inox in una delle pareti laterali del modulo di prova. Queste termocoppie sono state tarate (*Paragrafo 2.2.5*) per poter garantire l'uniformità e la correttezza della misura per tutti i moduli, con e senza schiuma metallica. Inizialmente si è optato per l'inserimento di cinque termocoppie disposte su tre livelli rispetto la base della schiuma: una termocoppia posta a 75 mm, tre al centro e l'ultima

a 25 mm. Dopo aver effettuato le prove sperimentali, si è notato che gli andamenti delle temperature registrate da queste termocoppie sono simili: in particolare si è visto che le tre termocoppie collocate nella zona centrale sono ridondanti, ovvero, in corrispondenza di un piano verticale (perpendicolare al terreno), la temperatura ad una determinata distanza dalla base del modulo varia di 0,2 °C. Per questo motivo, nei rimanenti moduli di prova sono state inserite solo tre termocoppie: in *Figura 2.9* si riporta la foto del modulo con la schiuma metallica Al-10-7,4 20 mm. Come si può osservare le termocoppie sono posizionate sui tre livelli sopra descritti, ma al centro è presente solo una termocoppia. Per i moduli dotati di schiuma metallica, queste termocoppie sono state inserite all'interno di fori larghi 2 mm e profondi 20 mm: come si può notare dalla foto, del silicone è stato utilizzato per fare tenuta. Anche per i moduli senza schiuma metallica è stato adottato lo stesso sistema: come riportato al *Paragrafo 2.2.6*, in *Appendice* si riporta il disegno tecnico rappresentante le pareti laterali in alluminio del modulo. Riferendosi alla parete destra del modulo si possono notare le dimensioni e la posizione dei fori per le termocoppie inguainate in inox. Come per i moduli dotati di schiuma, anche le termocoppie in inox del modulo contenente solo paraffina misurano la temperatura in corrispondenza del centro del modulo.

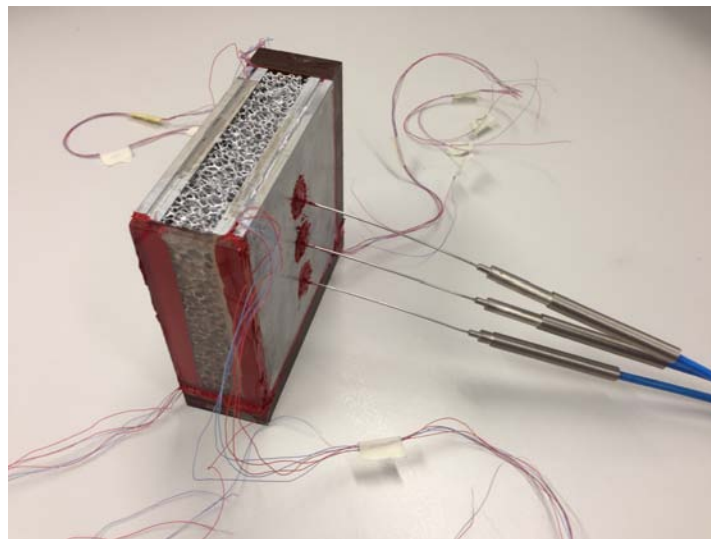


Figura 2.9: Foto di un modulo di prova con schiuma metallica e termocoppie in inox inserite

2.2.8 Dimensionamento del riscaldatore

Per dimensionare il riscaldatore è stata considerata una potenza specifica massima di 20 kW m⁻². Negli esperimenti condotti in laboratorio, per simulare il calore generato dal dispositivo elettronico, il flusso termico è stato realizzato tramite un generatore di corrente continua: cambiando il valore della corrente e della tensione, sono state

considerate altre potenze specifiche inferiori a 20 kW m^{-2} . Il riscaldatore che provvede a fornire tale flusso termico al modulo di prova è costituito da:

- Cavo di resistenza in lega al nichel-cromo 80/20 avente diametro 0,559 mm e resistenza $4,4006 \text{ } \Omega/\text{m}$;
- Cavo di resistenza di rame;
- Guaina termorestringente isolante;
- Pasta termoconduttiva;
- Piastra di rame avente dimensioni $100 \times 5 \times 100 \text{ mm}$ in cui è stato scavato un percorso a serpentina avente larghezza e profondità di 2 mm;
- Piastra di rame identica alla precedente, ma senza percorso a serpentina.

Le estremità della resistenza di nichel-cromo sono state stagnate ad un cavo di rame in quanto quest'ultimo componente si surriscalda meno del cavo in nichel-cromo: il cavo che viene inserito nel percorso a serpentina della piastra di rame, essendo in nichel-cromo, si scalda maggiormente, traferendo calore alla piastra; mentre le estremità della resistenza, essendo in rame, disperdono meno calore. Prima di collocare la resistenza nel percorso a serpentina, si inserisce il cavo nella guaina termorestringente per evitare che si crei cortocircuito con la piastra di rame. La resistenza viene quindi inserita nel percorso a serpentina e le due piastre di rame vengono assemblate tra loro con quattro viti: per migliorare il contatto termico è stata utilizzata della pasta termoconduttiva fra le due piastre di rame. Per quanto riguarda tali piastre, è stato scelto il rame per l'elevata conduttività termica (*Tabella 1.2*) che permette di propagare al meglio il flusso termico: il calore generato dalla resistenza si diffonde uniformemente attraverso il riscaldatore e, di conseguenza, attraverso il modulo contenente il *PCM*. In *Figura 2.10* si riporta la rappresentazione realizzata con *SolidWorks* della piastra di rame in cui è stato inciso il percorso a serpentina, mentre in *Appendice* si riporta il disegno tecnico realizzato per costruire il pezzo. Per dimensionare il percorso a serpentina è stato considerato il flusso termico specifico massimo di 20 kW m^{-2} : poiché la superficie della piastra di rame in cui è presente tale serpentino è un quadrato di lato 100 mm, il flusso termico massimo generato corrisponde a 200 W. Il generatore è a corrente continua perciò valgono le seguenti formule:

$$P = VI \quad (2.4)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.5)$$

Considerando quindi la disposizione delle cave riportata in *Figura 2.10*, le proprietà della resistenza e la potenza che deve essere fornita, si è ottenuto il dimensionamento del

Tabella 2.4: Parametri caratteristici del riscaldatore

Dimensionamento riscaldatore	
numero cave	9
lunghezza filo [m]	0,884
resistenza R [Ω]	3,890
tensione V [V]	27,893
corrente I [A]	7,170
potenza P [W]	200

percorso a serpentina: in *Tabella 2.4* si riportano i valori dei parametri che entrano in gioco per realizzare tale potenza.

**Figura 2.10:** Piastra del riscaldatore su cui è inciso il percorso a serpentina

2.2.9 Il contenitore in Teflon

Per assicurare delle condizioni al contorno simili fra i moduli di prova, che permettano di fare dei confronti veritieri, è necessario isolare termicamente il modulo durante l'esperimento: per questo motivo è stato realizzato un contenitore in Teflon. Tale materiale ha una conduttività termica simile a quella della paraffina, perciò può essere considerato un materiale isolante: in *Tabella 1.2* è riportata la conduttività termica del politetrafluoroetilene (PTFE), la cui denominazione commerciale è Teflon. La rappresentazione realizzata con il software *CAD SolidWorks* di questo contenitore è riportata in *Figura 2.11*: è costituito da quattro pareti smontabili che si adattano al modulo di prova. In una delle pareti laterali è stata realizzata una cava avente dimensioni 102 x 10 x 102

mm in cui è stato alloggiato il riscaldatore, mentre nell'altra parete laterale sono stati realizzati dei fori aventi diametro 10 mm per far passare le termocoppie inguainate in inox che misurano la temperatura della paraffina (*Paragrafo 2.2.7*).

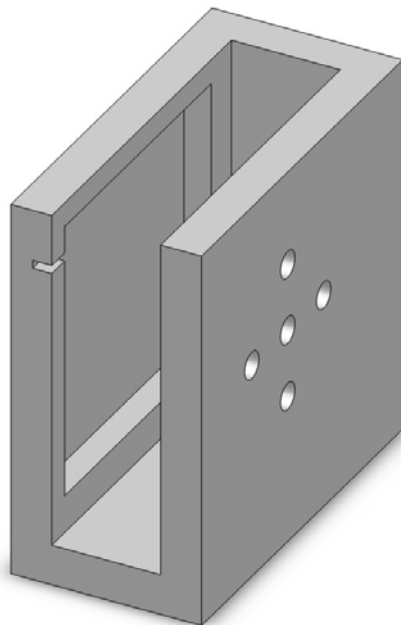


Figura 2.11: Contenitore in Teflon

2.2.10 Il sistema di acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati denominato Agilent 34970A converte i segnali analogici di tensione in segnali digitali che vengono memorizzati su pc. È dotato di tre schede di acquisizione con 20 canali ciascuna. In base al modulo di prova sono stati utilizzati diversi canali: il motivo risiede nel fatto che alcune termocoppie inserite nelle piastre delle schiume in alluminio non sono funzionanti. Generalmente però, la suddivisione dei canali è la seguente:

- Sei canali dedicati alle termocoppie del lato riscaldatore;
- Cinque canali dedicati alle termocoppie del lato adiabatico;
- Tre canali dedicati alle termocoppie inguainate in inox inserite nel *PCM*;
- Un canale fornisce la tensione presente ai capi del cavo elettrico del riscaldatore;
- Un canale per determinare la corrente che scorre nel cavo elettrico del riscaldatore.

Per quanto riguarda l'ultimo canale che fornisce il valore di corrente, bisogna precisare che il sistema di acquisizione legge comunque un segnale di tensione: una resistenza calibrata (shunt) è posta in serie al riscaldatore, in questo modo, misurando il valore della tensione

ai capi di quest'ultima, si ricava il valore della corrente secondo le formule riportate al *Paragrafo 2.2.8*. I valori di tensione e di corrente forniti dal sistema di acquisizione vengono quindi moltiplicati per determinare la potenza emessa dal riscaldatore al modulo di prova. L'Agilent 34970A è stato quindi collegato a pc tramite interfaccia GPIB/USB: con il software *LabView* della *National Instruments* sono stati memorizzati i dati delle prove sperimentali. L'interfaccia realizzata con *LabView* è riportata in *Figura 2.12*: si possono notare i contatori che visualizzano il tempo trascorso e la potenza fornita al modulo; inoltre si vedono i display che mostrano gli andamenti delle temperature, della tensione e della corrente.

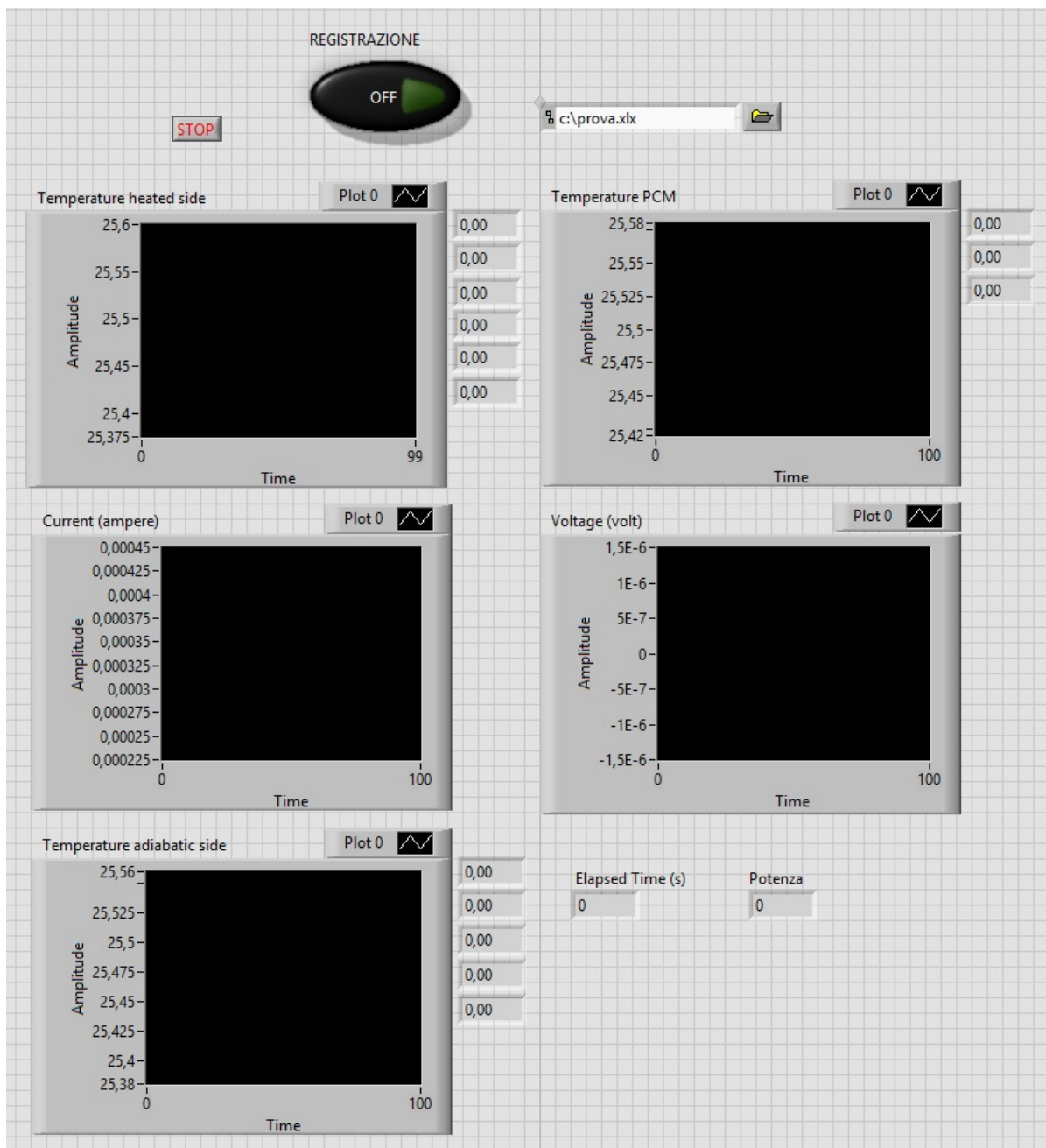


Figura 2.12: Interfaccia realizzata con *LabView*

CAPITOLO

3

PROVE SPERIMENTALI

3.1 Gestione delle prove sperimentali ed elaborazione dei dati

Le prove sperimentali sono divise in due fasi:

- Analisi dei fenomeni di fusione e solidificazione della paraffina RT42 (*Paragrafo 2.2.1*) nel modulo senza schiuma metallica;
- Analisi dell'incremento di prestazione dovuto all'utilizzo delle schiume metalliche in alluminio presentate al *Paragrafo 2.2.3*;

In entrambi i casi, le prove si sono svolte nel seguente modo:

- Accensione del Kaye 170 con relativa attesa per il raggiungimento delle condizioni di equilibrio;
- Accensione del sistema acquisizione dati e del pc con relativo avvio del software *LabView*;
- Accensione del generatore di corrente con regolazione della potenza e avvio dell'erogazione;

- Quando dal vetro del modulo di prova si osserva che il *PCM* è completamente liquido, termina la fase di fusione e si arresta quindi l'erogazione della potenza;
- Si prosegue con la raccolta dei dati per un tempo adeguato al fine di descrivere anche la fase di solidificazione.

Inoltre, durante le prove sperimentali, sono state scattate delle foto per descrivere al meglio i processi di fusione e solidificazione delle paraffine. Queste foto sono state realizzate secondo questi criteri:

- Una foto ogni 60 s durante la fase di fusione;
- Una foto ogni 300 s durante la fase di solidificazione.

Questi due intervalli sono diversi in quanto il cambiamento di stato della paraffina durante la fusione avviene in tempi più brevi rispetto alla solidificazione. Per una specifica paraffina, il passaggio da solido a liquido dipende principalmente dalla potenza termica erogata; al contrario, la fase di solidificazione dipende principalmente dalle condizioni dell'ambiente esterno (il sistema deve raggiungere l'equilibrio termodinamico con l'ambiente esterno).

L'elaborazione dei dati è stata realizzata tramite due software: *Excel* di *Office* e *Matlab*. In particolare, il file di testo in uscita da *LabView* contiene i dati relativi ai canali del sistema di acquisizione descritti al *Paragrafo 2.2.10*. Questo file di testo è organizzato in colonne secondo quest'ordine:

- Tempo t conteggiato in [s] a partire dall'inizio della prova sperimentale;
- Temperature delle termocoppie del lato del riscaldatore TC_{risc} espresse in [°C];
- Temperature delle termocoppie del lato adiabatico TC_{adb} espresse in [°C];
- Temperature delle termocoppie inguainate in inox del *PCM* TC_{pcm} espresse in [°C];
- Tensione V ai capi della resistenza del riscaldatore espressa in [V];
- Corrente I che scorre nella resistenza del riscaldatore espressa in [A];

Con il software *Excel* di *Office* è stato convertito il file di testo in un foglio elettronico e sono stati calcolati i seguenti parametri per ogni intervallo di tempo:

- Potenza P erogata dal riscaldatore espressa in [W] (*Formula 2.4*);
- Temperatura media del lato del riscaldatore T_{risc} (media delle TC_{risc});
- Differenza fra T_{risc} e la temperatura dell'ambiente esterno (valore di T_{risc} all'istante iniziale $t=0$ della prova). Questo parametro verrà indicato con ΔT_{amb} e verrà utilizzato nel *Paragrafo 3.3*;

Dal foglio di calcolo è stato identificato, per ogni prova sperimentale, l'istate di tempo in cui è stata fermata l'erogazione della potenza termica, ovvero quando termina la fase di fusione. Successivamente il foglio elettronico è stato utilizzato in uno *script* di *Matlab* per realizzare i grafici. Nel *Paragrafo* 3.2 si riportano i risultati delle prove sperimentali, in particolare per ogni prova sono stati realizzati i seguenti grafici:

- Andamento nel tempo delle temperature registrate dalle termocoppie del riscaldatore TC_{risc} durante la fusione;
- Andamento nel tempo della temperatura media del riscaldatore T_{risc} e delle temperature delle termocoppie inguainate in inox del *PCM* TC_{pcm} durante la fusione;
- Andamento nel tempo della temperatura media del riscaldatore T_{risc} e delle temperature delle termocoppie inguainate in inox del *PCM* TC_{pcm} durante l'intera prova.

Nel *Paragrafo* 3.3 si analizzano i confronti fra le paraffine, le potenze termiche e i moduli di prova utilizzati. In particolare, si riportano i seguenti grafici:

- Confronti fra le potenze termiche a parità di modulo di prova e paraffina (*Paragrafo* 3.3.1);
- Confronti fra le paraffine a parità di modulo di prova e potenza termica (*Paragrafo* 3.3.2);
- Confronti fra i moduli di prova a parità di potenza termica e paraffina (*Paragrafo* 3.3.3).

3.2 Descrizione delle prove sperimentali

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dalle prove sperimentali. Il *Paragrafo* 3.2.1 riporta i dati inerenti al modulo contenente solo paraffina, mentre il *Paragrafo* 3.2.2 riguarda i tre moduli con le schiume metalliche in alluminio. Per ogni modulo verrà riportato un grafico che descrive l'andamento delle temperature nel tempo del lato del riscaldatore (TC_{risc}): questo grafico è stato realizzato per verificare che il riscaldamento fosse effettivamente uniforme. Dopo aver constatato che le temperature del lato riscaldatore seguono andamenti pressoché identici, nei successivi grafici del modulo considerato verrà riportata la temperatura media di queste termocoppie (T_{risc}). Negli stessi grafici verrà riportata anche una retta orizzontale tratteggiata indicante la temperatura di fusione della paraffina considerata: in realtà, come riportato in *Tabella* 2.1, le paraffine sono caratterizzate da un range di temperatura per la fusione e la

solidificazione; nonostante questo, la retta tratteggiata indica la temperatura riportata nella nomenclatura della paraffina (per esempio: RT42 corrisponde a $T_{fus} = 42$ °C). Per quanto riguarda le temperature delle termocoppie inguainate in inox, si rammenta che queste sono disposte secondo quanto descritto al *Paragrafo 2.2.7*: la TC_{pcm1} corrisponde alla termocoppia in alto (75 mm dalla base della schiuma), la TC_{pcm2} corrisponde alla termocoppia centrale (50 mm dalla base della schiuma) e la TC_{pcm3} corrisponde alla termocoppia in basso (25 mm dalla base della schiuma). Infine, verranno riportate delle foto descrittive della fase di fusione. In particolare, verranno riportate le foto scattate negli intervalli in cui è ben visibile il cambiamento di fase: la prima foto corrisponde all'istante iniziale ($t = 0$), mentre le successive rappresentano il movimento del fronte di fusione dal momento in cui è ben visibile tale processo. Per quanto riguarda il processo di solidificazione, verrà riportata solo una sequenza temporale. Tale scelta deriva dal fatto che questo processo è molto uniforme: non si nota l'avanzamento di un fronte, bensì un cambio di tonalità uniforme da trasparente (fase liquida) a grigio opaco/bianco (fase solida).

3.2.1 Prove sperimentali solamente con paraffina

Di seguito vengono riportati i grafici relativi alle prove sperimentali senza schiuma metallica. Per una ragione di spazio, si riporta solo un grafico relativo alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione (*Figura 3.1*): come si può notare, le temperature indicate con TC_{risc} nella legenda sono molto simili, perciò il riscaldamento si può considerare uniforme. Per questo motivo, nei grafici successivi si riporta l'andamento della temperatura media del lato riscaldatore (T_{risc}). Come si nota da questa figura, le temperature raggiunte alla fine della fusione si aggirano attorno ai 120 °C: tale valore è molto elevato considerando che questa tesi si focalizza sul raffreddamento dei componenti elettronici. In questo caso, il componente da raffreddare è proprio la parete del modulo collegata al riscaldatore con la pasta termoconduttiva: raggiungere temperature così elevate, con la potenza più bassa erogata dal riscaldatore (100 W), non permette di salvaguardare il funzionamento di un eventuale componente elettronico. A tal proposito, si capisce fin da subito che non è conveniente utilizzare solo paraffina: bisogna incrementare la conduttività termica del sistema al fine di asportare più efficientemente il calore prodotto dal corpo riscaldante. Per questa ragione, dopo aver effettuato la prima prova con la paraffina RT42 e con una potenza erogata dal riscaldatore di 100 W, si è deciso di non testare i moduli per potenze maggiori (150 e 200 W) e con le altre paraffine (RT55 e RT64HC). Il fatto che si raggiungano temperature troppo elevate, oltre ad allontanarsi dallo scopo di questa tesi, comporta diversi problemi anche sui moduli di prova realizzati:

- temperature troppo elevate nel riscaldatore potrebbero danneggiare la guaina termorestringente che avvolge la resistenza, comportando quindi cortocircuito;
- l'incertezza associata alle termocoppie aumenta con l'aumentare del valore misurato. Le termocoppie in rame-costantina inserite nelle pareti laterali dei moduli sono state tarate fino a temperature prossime ai 120 °C, mentre le termocoppie inguainate in inox fino a circa 65 °C.

Paraffina RT42 con potenza termica 100 W

Le figure inerenti alla prova con paraffina RT42 e potenza termica 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.1* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.2* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.3* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.4* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione (una foto ogni 120 s in questo caso);

La *Figura 3.1* è già stata commentata al *Paragrafo 3.2.1*: nelle figure successive si riporta la temperatura media del lato del riscaldatore (T_{risc}). La *Figura 3.2* riporta invece il grafico relativo agli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox (TC_{pcm}) durante la fase di fusione: tali termocoppie misurano la temperatura al centro del modulo di prova secondo la disposizione descritta al *Paragrafo 2.2.7*. Da questo grafico si dimostra come la paraffina si comporti come un isolante: mentre la temperatura del lato riscaldatore inizia a crescere fin da subito molto rapidamente, le termocoppie del *PCM* impiegano molto più tempo per rilevare un incremento di temperatura apprezzabile. In particolare, si nota come l'incremento di temperatura misurato da ogni termocoppia si verifichi in istanti diversi: come è possibile osservare dalla sequenza di foto scattate durante la fusione (*Figura 3.4*), il fronte di fusione tende ad allontanarsi dalla parete calda, spostandosi in alto a destra. A tal proposito, bisogna considerare che questo modulo è caratterizzato dai seguenti aspetti:

- incremento di volume della paraffina associato alla fusione;

- manifestarsi di moti convettivi che incrementano lo scambio termico (nei moduli con la schiuma metallica tale comportamento è notevolmente ridotto dalla presenza delle fibre metalliche).

Per queste ragioni, all'inizio il fronte di fusione segue un andamento perfettamente verticale, ma poi la paraffina liquida sovrasta quella solida, comportando una fusione preferenziale nella zona in alto a destra del modulo: le termocoppie inguainate in inox rilevano gli incrementi di temperatura ritardati nel tempo passando dalla termocoppia posta in alto (TC_{pcm1}) fino a quella in basso (TC_{pcm3}). In tutti i grafici si nota come le curve assumano pendenze diverse in base alla legge di conservazione dell'energia:

$$\frac{q}{m c_p} = \frac{dT}{dt} \quad (3.1)$$

Indicando con q il flusso termico in [W] fornito al sistema, m la massa in [kg], c_p il calore specifico in [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$] e dT la variazione di temperatura in [K] della paraffina. Infine dt è l'intervallo di tempo in [s] nel quale si valuta dT . Il secondo termine dell'equazione corrisponde quindi al coefficiente angolare delle curve riportate nei grafici: poichè il flusso termico q è costante nel tempo e la massa m non varia, il cambio di pendenza è associato al valore del calore specifico c_p . Durante i processi di fusione e solidificazione si presenta una variazione di calore specifico: quando le curve sono molto pendenti significa che il valore di c_p è piccolo perciò le variazioni di temperatura nel tempo sono importanti; mentre quando il calore specifico aumenta, diminuisce la pendenza delle curve.

La fase di solidificazione viene descritta nella *Figura 3.3*. Anche in questo caso si riporta la temperatura media del lato riscaldatore (T_{risc}) e le temperature rilevate dalle termocoppie inguainate in inox (TC_{pcm}). La fase di solidificazione avviene dopo aver spento il generatore di corrente che fornisce la potenza termica: la temperatura del sistema non decresce istantaneamente, ma, a causa dell'inerzia del sistema, impiega qualche secondo prima di diminuire. Dopo questo breve intervallo di tempo in cui la temperatura aumenta leggermente, il resto del processo di solidificazione è caratterizzato da una pendenza negativa delle curve rappresentanti le temperature. Al contrario del processo di fusione che avviene in modo disuniforme poichè associato al riscaldamento laterale del modulo, il processo di solidificazione è uniforme: la paraffina da liquida ritorna solida raggiungendo l'equilibrio termodinamico con l'ambiente esterno. Questo processo richiede tempo, in funzione sia della temperatura esterna, ma anche del modulo di prova utilizzato: i moduli dotati di schiuma metallica (*Paragrafo 3.2.2*) impiegano meno tempo sia durante la fusione, che durante la solidificazione. Questo è associato sempre all'incremento di conduttività termica del sistema dovuto alla schiuma metallica.

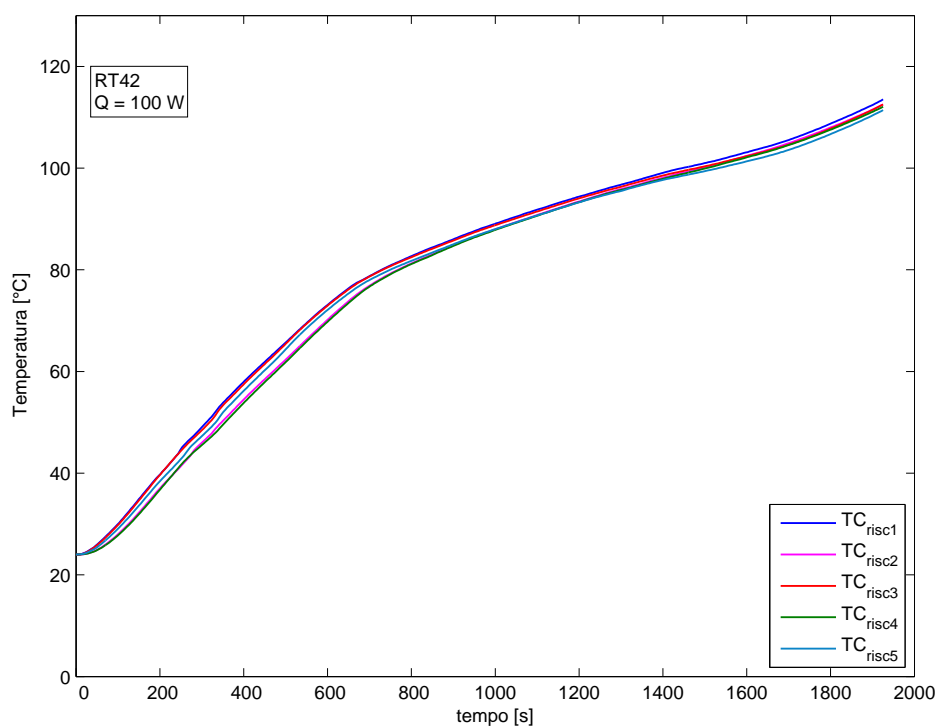


Figura 3.1: Andamento delle temperature lato riscaldatore nel tempo per la paraffina RT42 con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

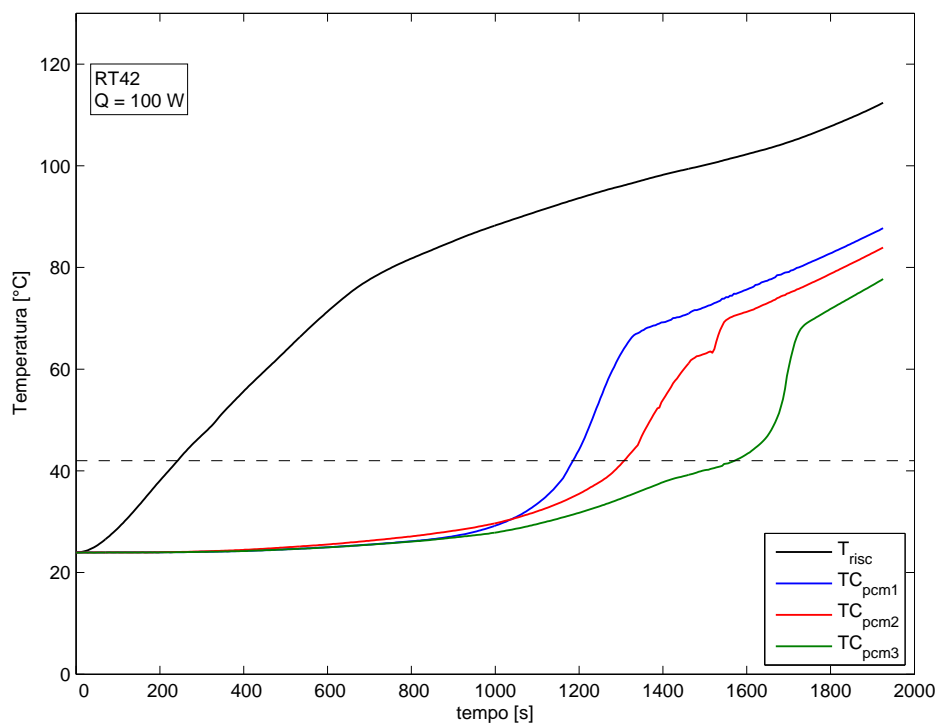


Figura 3.2: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

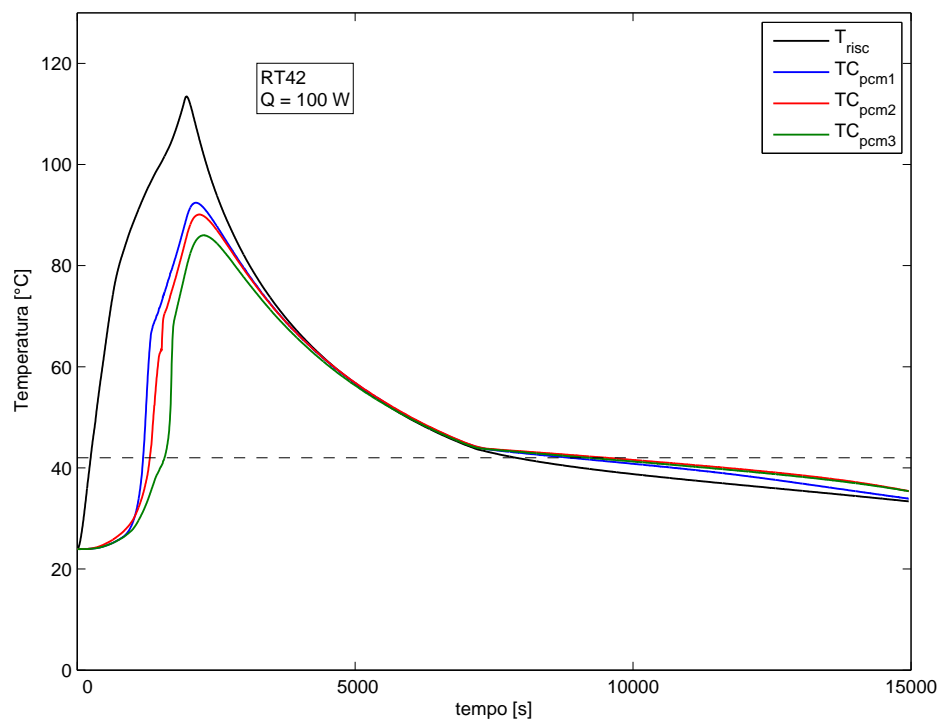


Figura 3.3: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

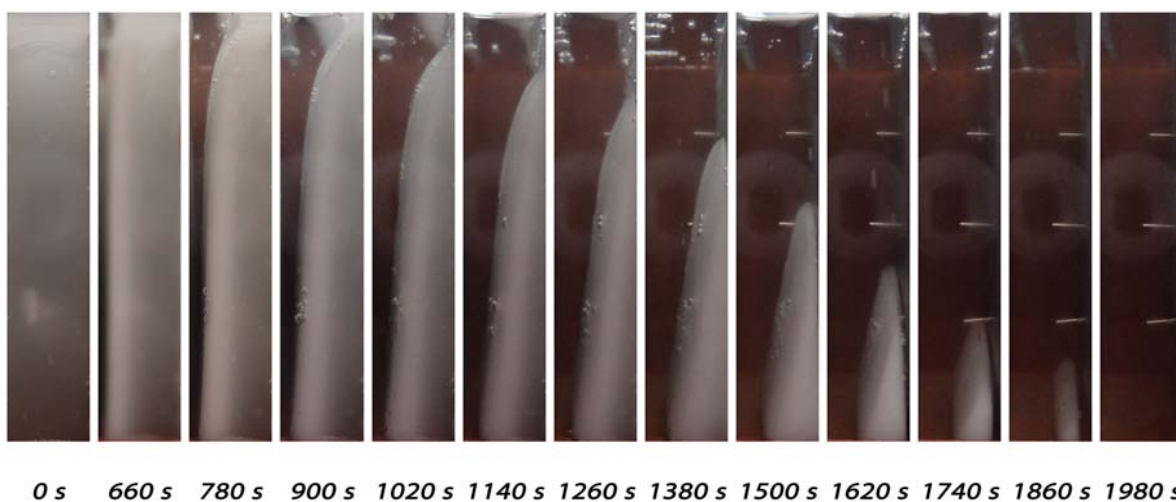


Figura 3.4: Sequenza durante la fusione per la paraffina RT42 e potenza erogata 100 W.

3.2.2 Prove sperimentali con schiume metalliche

Di seguito vengono riportati i grafici descrittivi il comportamento dei moduli con le schiume in alluminio: poichè gli andamenti delle curve sono simili, si può fare una trattazione generale. Anche in questo caso, per ogni schiuma, si riporta solo un grafico relativo alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione (*Figure 3.8, 3.37 e 3.65*): come si può notare, le temperature indicate con TC_{risc} nella legenda sono praticamente identiche, perciò il riscaldamento si può considerare uniforme. Per questo motivo, nei grafici successivi si riporta l'andamento della temperatura media del lato riscaldatore (T_{risc}). Analizzando gli andamenti delle temperature riportate nei seguenti grafici, si nota un cambiamento nella pendenza delle curve: nel primo tratto la pendenza è più ripida del secondo, ovvero la temperatura aumenta più rapidamente identificando quindi uno scambio di calore sensibile. Successivamente si raggiungono temperature prossime alla temperatura di fusione della paraffina utilizzata e la pendenza delle curve diminuisce, identificando quindi lo scambio di calore latente. Tale comportamento si nota meglio nei grafici in cui sono riportati gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox (TC_{pcm}) durante la fase di fusione. Analizzando questi andamenti, si nota in modo evidente il cambiamento di pendenza delle curve: nel primo tratto c'è uno scambio di calore sensibile fino al raggiungimento della temperatura di fusione; iniziata la fusione si riduce il coefficiente angolare della retta in quanto cambia il calore specifico della paraffina secondo la *Formula 3.1*; infine ricomincia lo scambio di calore sensibile quando la paraffina è completamente liquida. Come si può notare, tali valori di temperatura sono molto simili: questo indica che le isoterme sono verticali, almeno fino alla completa fusione della paraffina. Successivamente, raggiunta la fase liquida, le temperature variano leggermente: questo comportamento potrebbe derivare dalla vicinanza del sensore della termocoppia alla fibra di metallo. Infatti, quando la paraffina è completamente liquida, è possibile che le termocoppie inguainate in inox siano influenzate dalla temperatura delle fibre della schiuma metallica. La sequenza di foto rappresentanti la fase di fusione mostrano in modo particolare l'avanzamento del fronte di fusione che si propaga da sinistra (lato riscaldatore) verso destra (lato adiabatico). Nonostante il riscaldamento uniforme e la potenza erogata costante nel tempo, il fronte di fusione non è perfettamente verticale al terreno. Questo comportamento potrebbe essere causato da due fattori:

- l'adiabaticità non è uniforme. Il modulo di prova non è circondato in ogni sua parte dal teflon, infatti la parte superiore è esposta all'ambiente;
- la paraffina liquida che ha la possibilità di sovrastare quella ancora solida. Questo è dovuto alla possibile presenza di un sottile gap fra schiuma e vetro oppure anche a causa dell'incremento di volume associato alla fusione;

Si riportano anche i grafici generali in cui si riporta, oltre alla fase di fusione, quella

di solidificazione. In particolare, analizzando la solidificazione, all'inizio si verifica uno scambio di calore sensibile ben evidente grazie alla pendenza negativa della curva molto pronunciata. Facendo sempre riferimento alla *Formula 3.1*, la variazione di temperatura nel tempo è importante in questo primo tratto. Giunti in prossimità della temperatura di solidificazione, si nota un "ginocchio", ovvero un cambio di pendenza molto accentuato: la paraffina inizia a solidificare in modo uniforme, come si può notare nella sequenza di foto in *Figura 3.12*. Al contrario della fusione, in solidificazione il sistema raggiunge l'equilibrio termodinamico con l'ambiente esterno: per questo motivo, il processo è più lento e lo scambio di calore dipende dalle condizioni esterne. Per concludere, il vantaggio nell'utilizzare una schiuma metallica risiede nella riduzione del gradiente di temperatura all'interno del modulo: la schiuma permette al calore prodotto dal riscaldatore di distribuirsi uniformemente all'interno della paraffina, comportandosi come una matrice metallica. In altre parole, rispetto al caso con la sola paraffina, il calore asportato nell'unità di tempo dal lato riscaldatore è maggiore e quindi quest'ultimo si mantiene ad una temperatura inferiore. La paraffina in sé si comporta come un isolante, ma il sistema schiuma-PCM permette di aumentare la conduttività termica media secondo la relazione di Bhattacharya [3] (*Formula 1.4*). Una considerazione a parte va fatta per la paraffina RT64HC: la particolarità di questa paraffina è il calore latente molto elevato (*Tabella 2.1*). Tale calore latente supera di quasi il 50% quello delle altre due paraffine testate. Un confronto più dettagliato verrà proposto al *Paragrafo 3.3*, ma in questo contesto si sottolinea il diverso comportamento di questa paraffina durante la fase di solidificazione: nei grafici che verranno proposti di seguito si nota come l'andamento non sia caratterizzato solo da un "ginocchio" in corrispondenza della temperatura di solidificazione, ma si verifica un lieve incremento di temperatura a circa 60 °C. Tale andamento è caratteristico di questa paraffina e potrebbe risiedere nella struttura molecolare della stessa. Questo processo esotermico conferisce alla paraffina solida due colorazioni diverse in base alla temperatura: appena solidificata la paraffina RT64HC è di colore grigio opaco come le altre, ma, una volta raggiunta la temperatura ambiente, tale paraffina assume una colorazione bianca. Questo comportamento è associato alla distribuzione di entalpie specifiche in funzione della temperatura: le *Figure 3.5, 3.6 e 3.7* sono state fornite dall'azienda *Rubitherm* e dimostrano che durante la solidificazione l'entalpia specifica è variabile in base alla temperatura. Mentre nelle paraffine RT42 e RT55 l'entalpia specifica in solidificazione decresce partendo dalla temperatura di fusione e andando verso temperature minori, nel caso della paraffina RT64HC l'entalpia specifica non decresce in modo costante, ma aumenta e diminuisce senza un ordine preciso. Nell'intervallo tra i 60 e i 61 °C l'entalpia specifica è molto elevata rispetto a quella associata all'intervallo 62÷63 °C: questo spiega l'incremento di temperatura visibile nei grafici relativi alle prove sperimentali riportati di seguito.

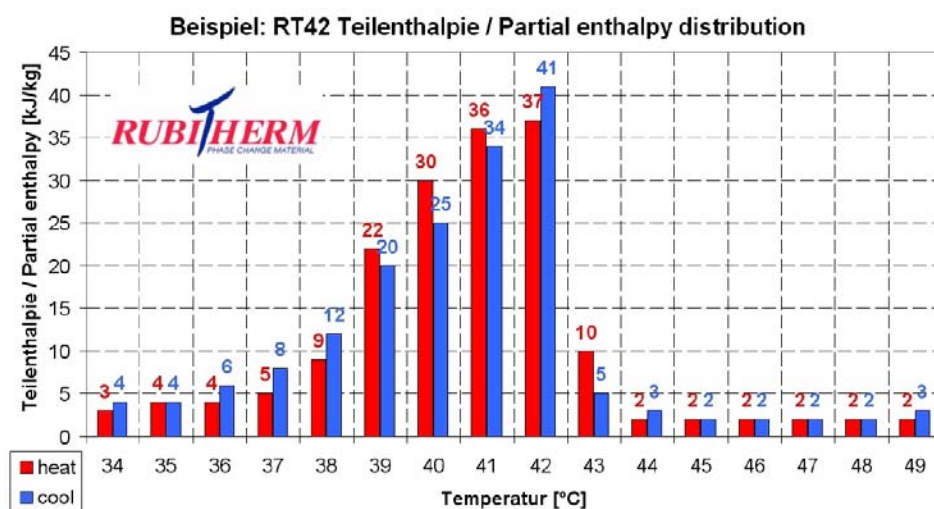


Figura 3.5: Entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT42 (specifiche tecniche fornite da *Rubitherm*)

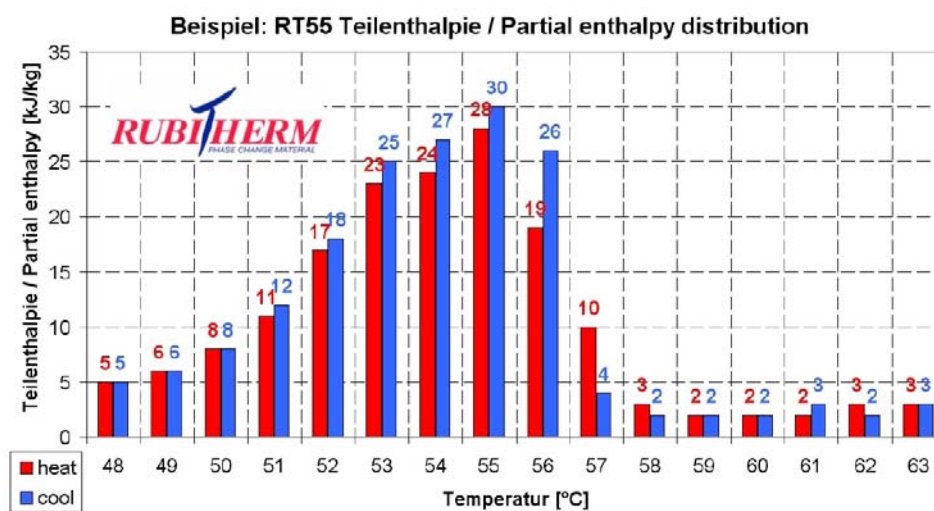


Figura 3.6: Entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT55 (specifiche tecniche fornite da *Rubitherm*)

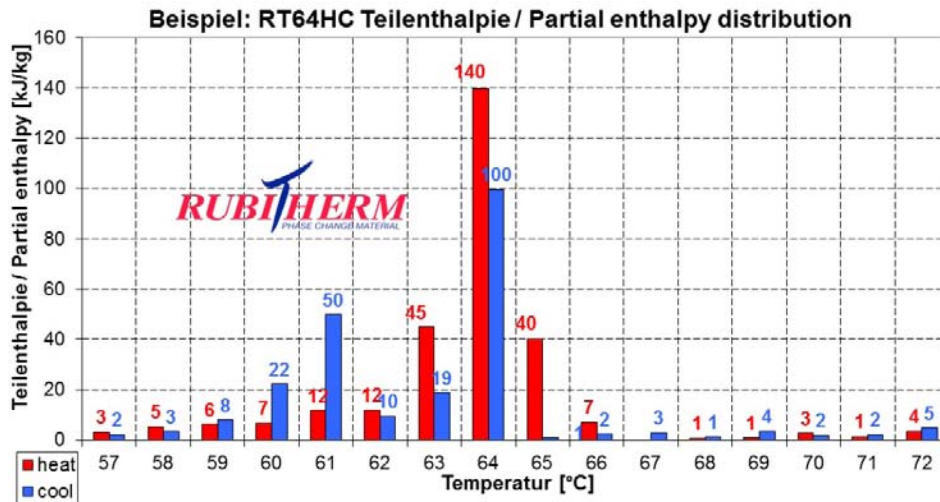


Figura 3.7: Entalpia specifica in funzione della temperatura per la paraffina RT64HC (specifiche tecniche fornite da *Rubitherm*)

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 100 W

Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.8* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.9* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.10* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.11* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;
- *Figura 3.12* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di solidificazione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*.

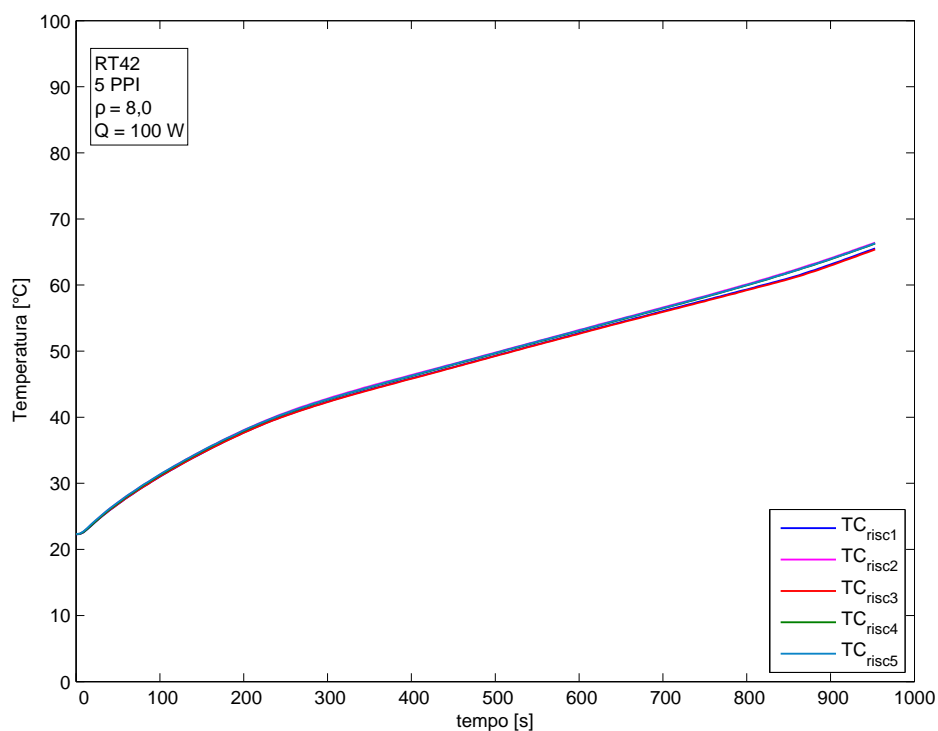


Figura 3.8: Andamento delle temperature lato riscaldatore nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

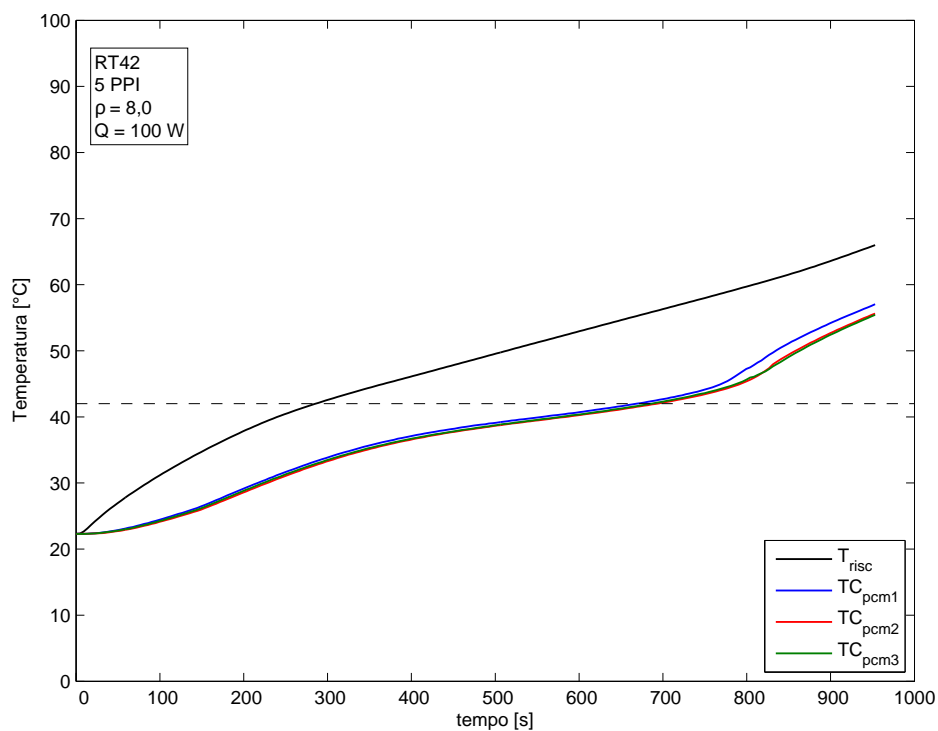


Figura 3.9: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

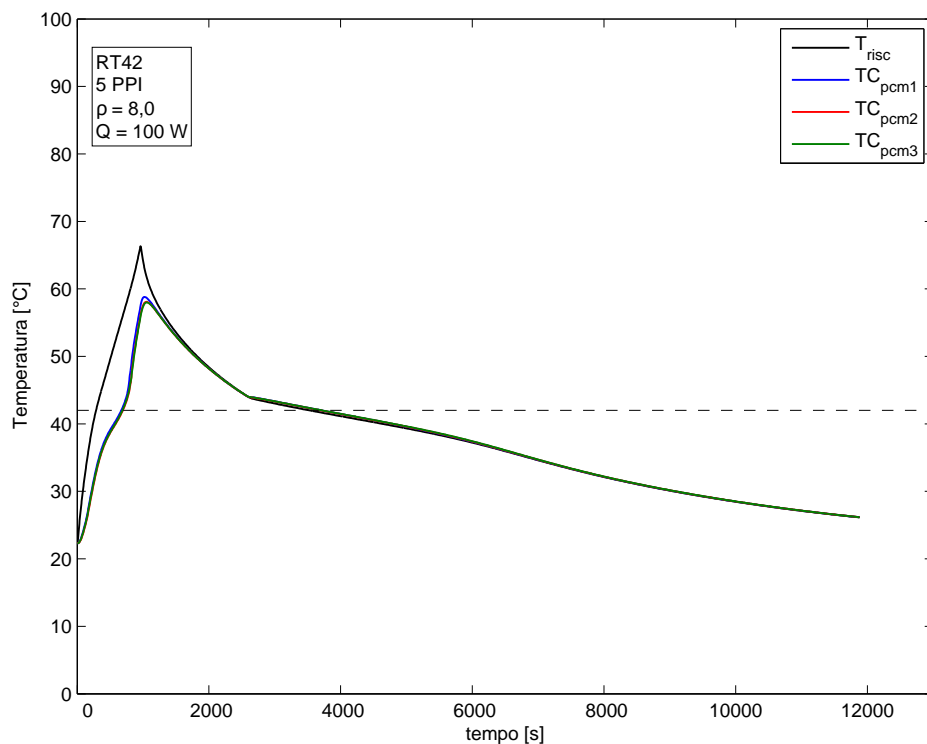


Figura 3.10: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

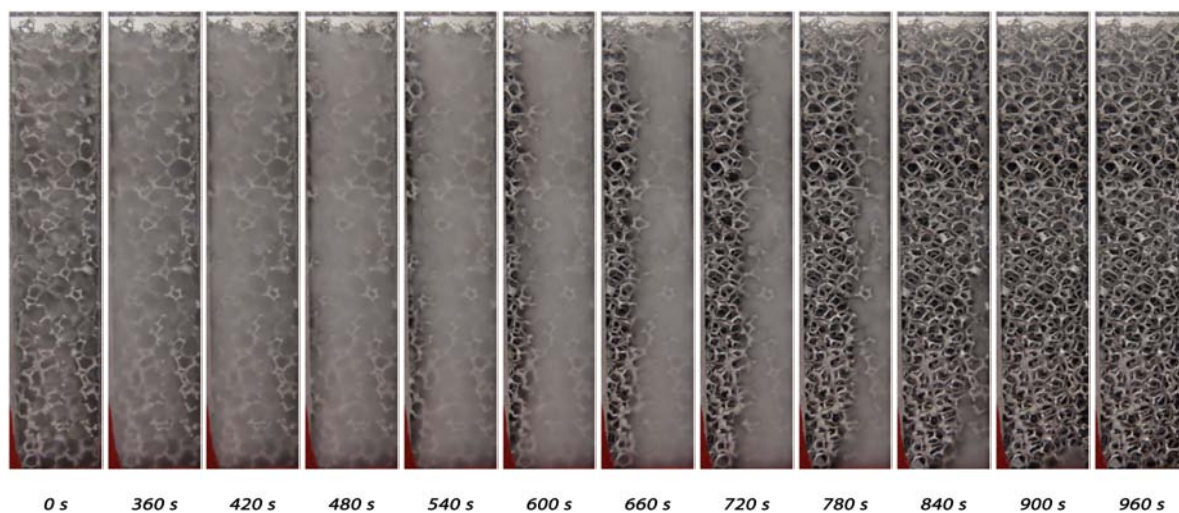


Figura 3.11: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 100 W

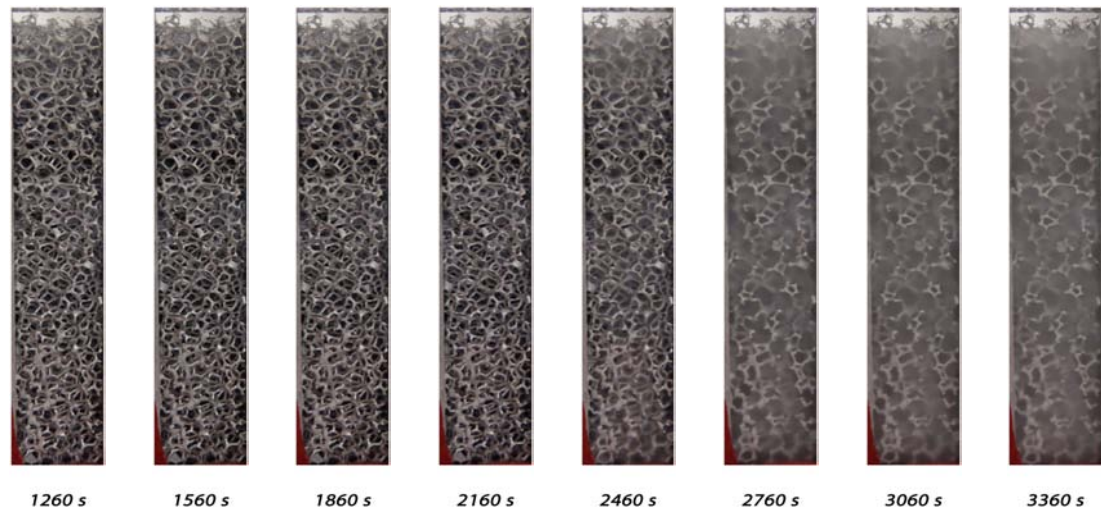


Figura 3.12: Sequenza durante la solidificazione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 100 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.13* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.14* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.15* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

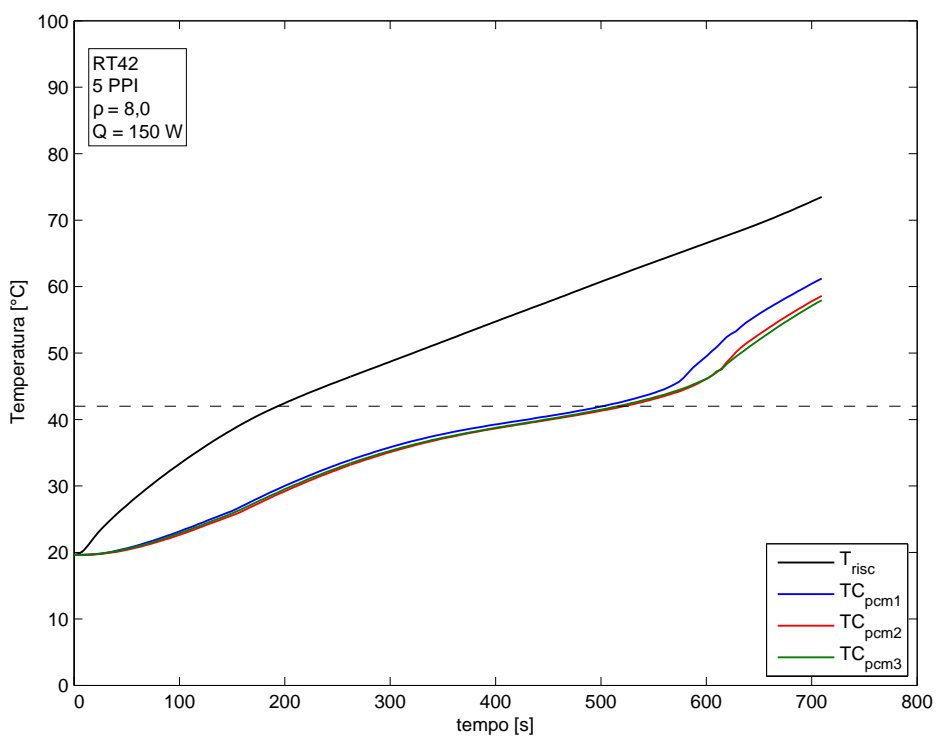


Figura 3.13: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

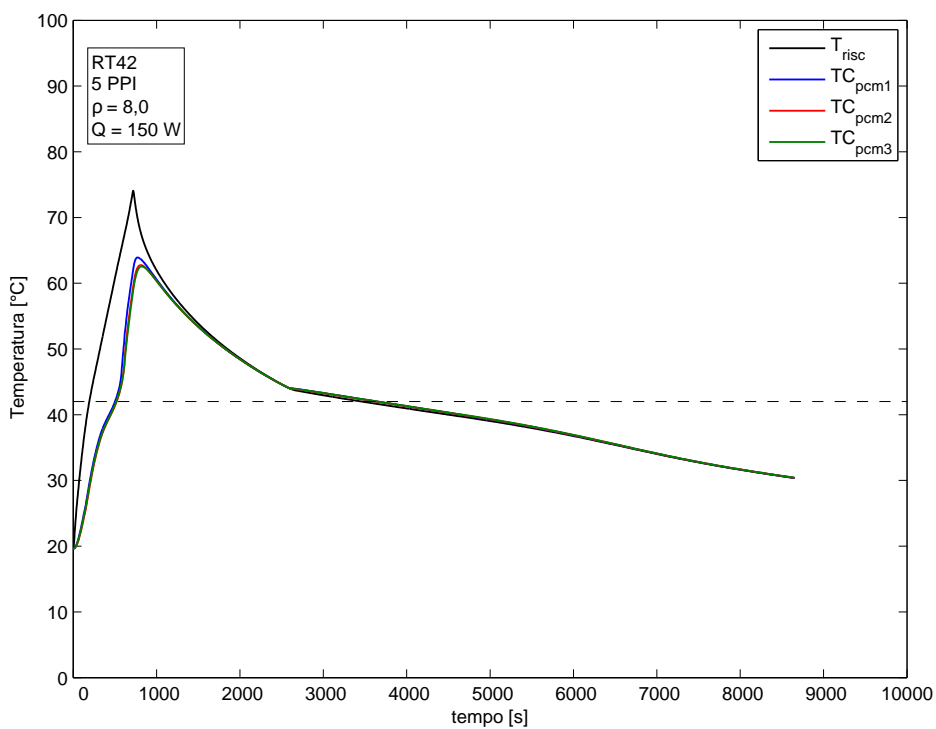


Figura 3.14: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

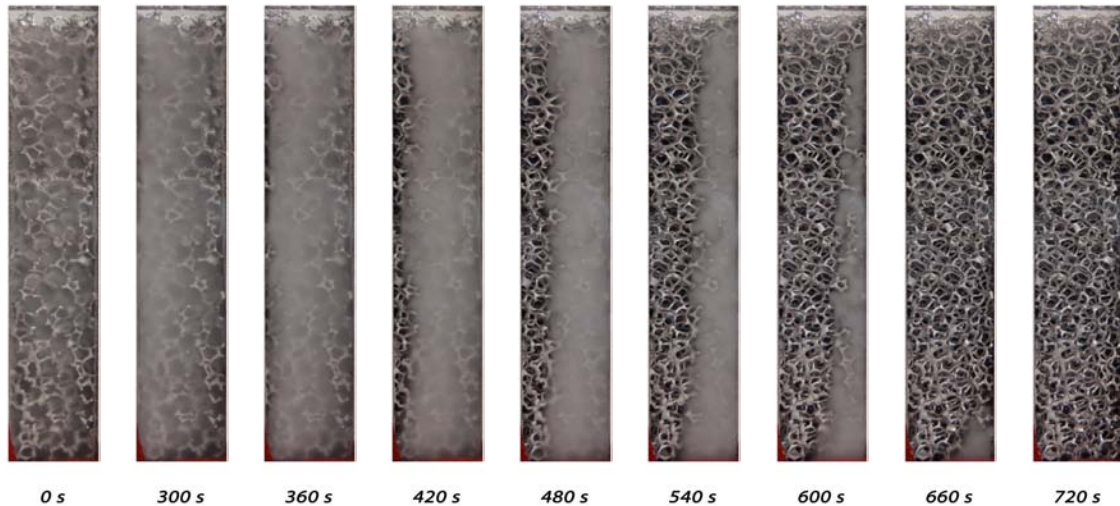


Figura 3.15: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 150 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.16* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.17* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.18* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

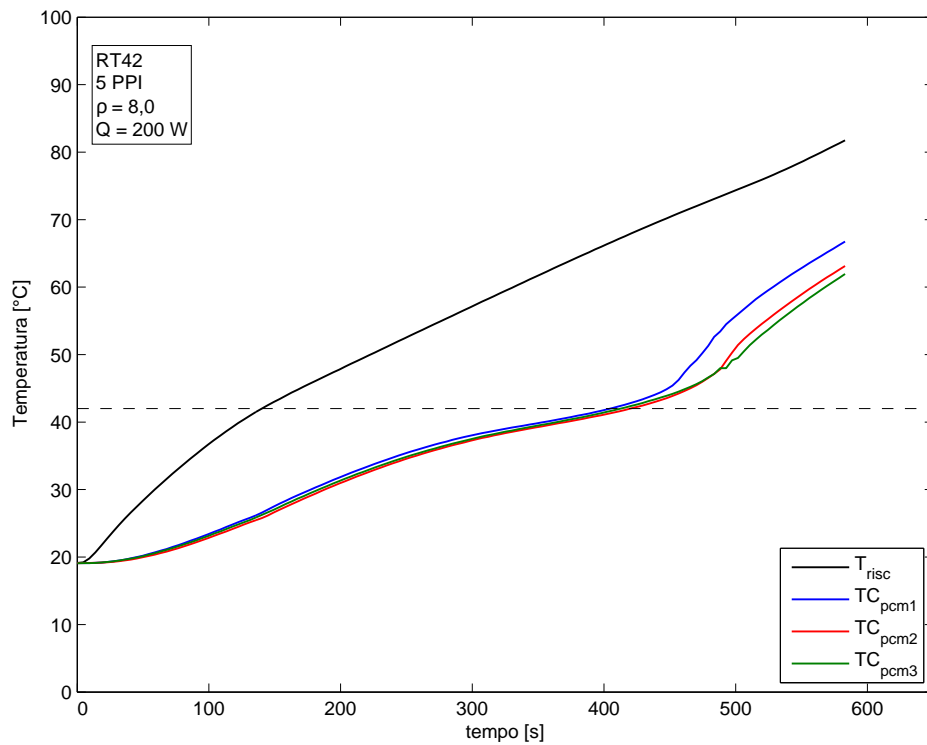


Figura 3.16: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

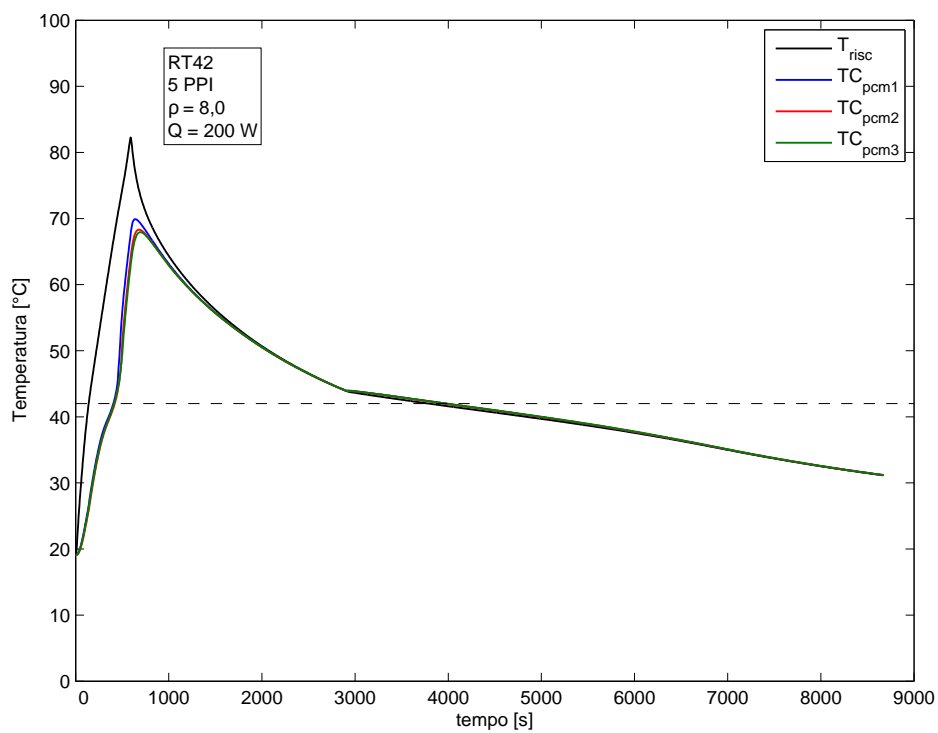


Figura 3.17: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

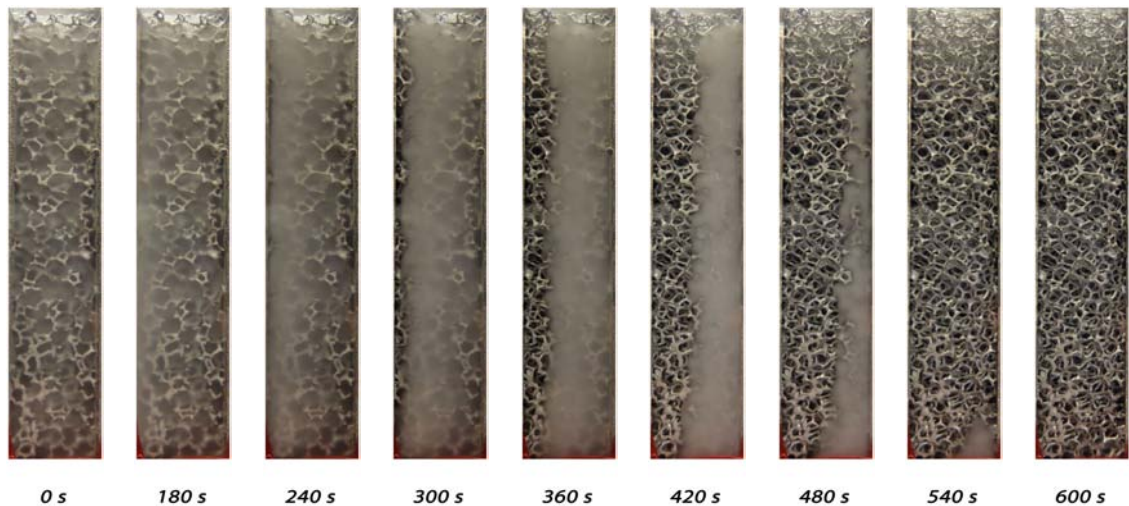


Figura 3.18: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 200 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT42, le prove sono state effettuate con la paraffina RT55. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.19* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.20* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.21* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

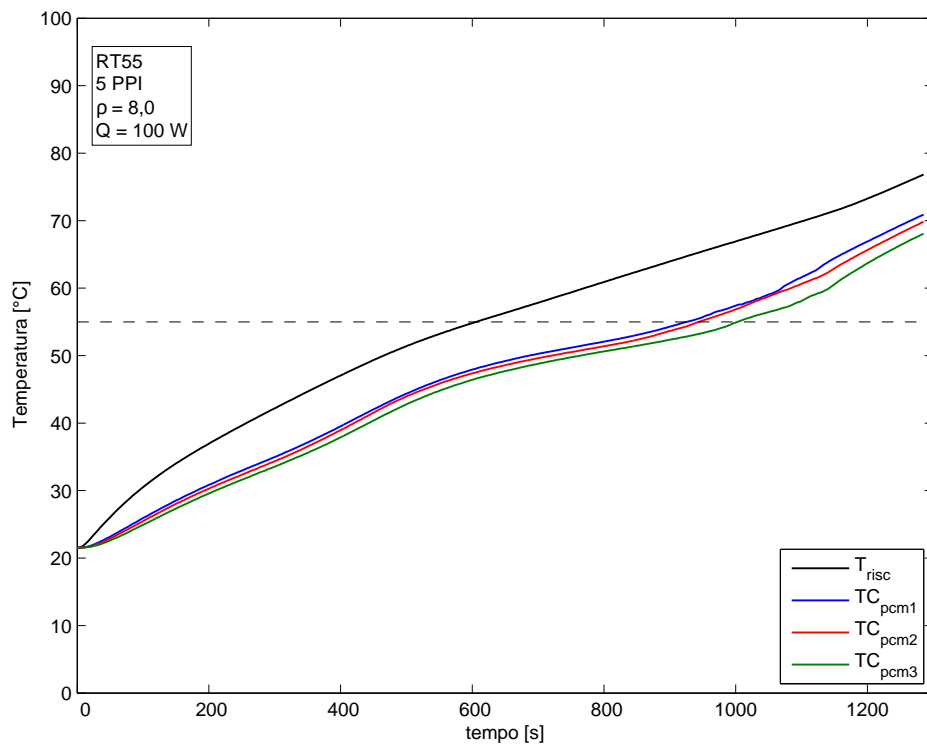


Figura 3.19: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

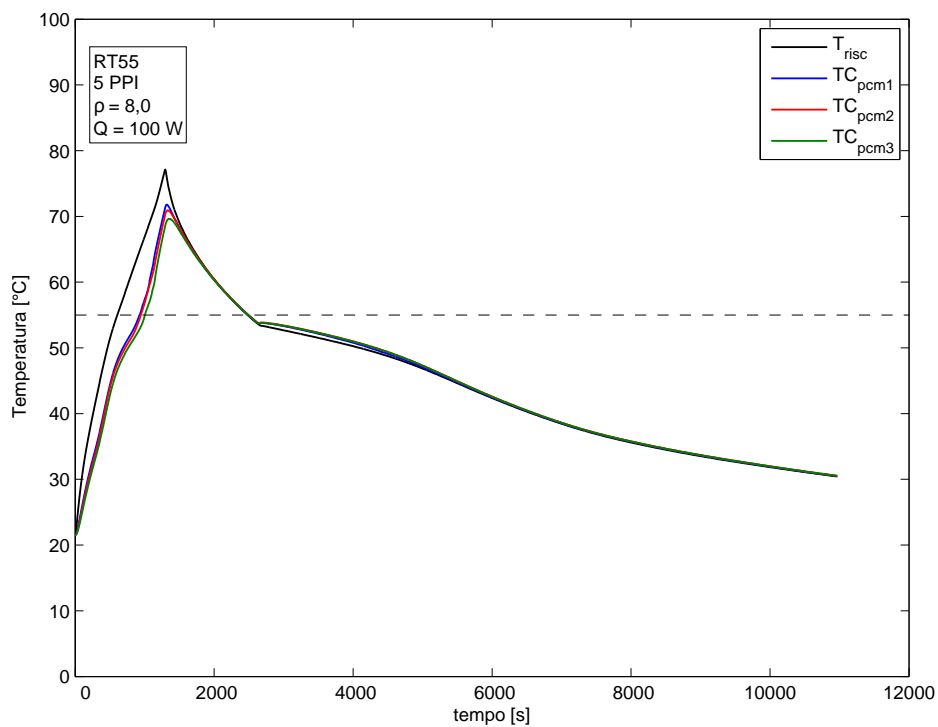


Figura 3.20: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

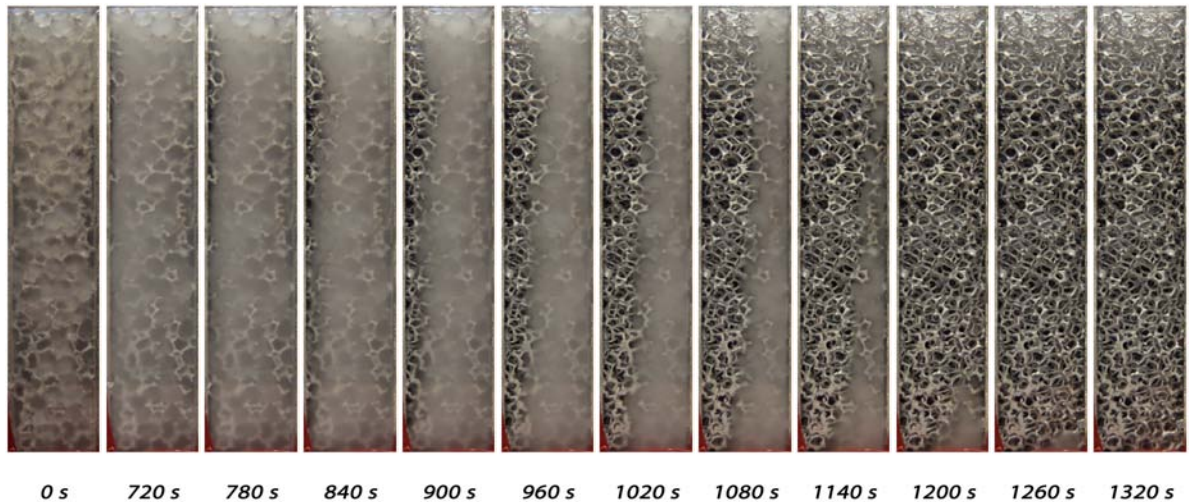


Figura 3.21: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 100 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.22* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.23* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.24* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

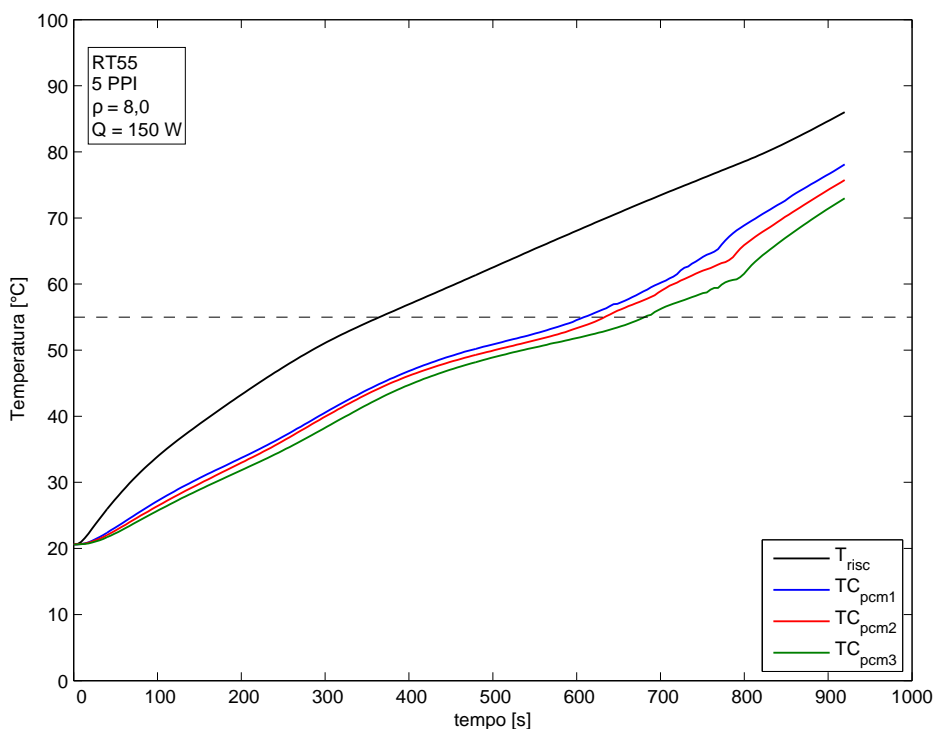


Figura 3.22: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

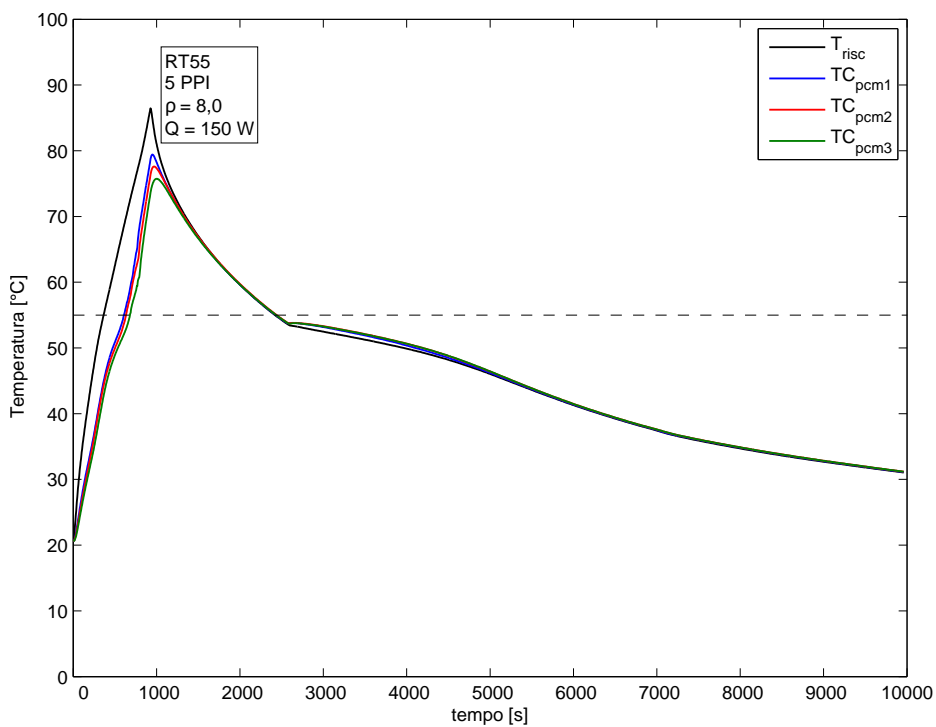


Figura 3.23: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

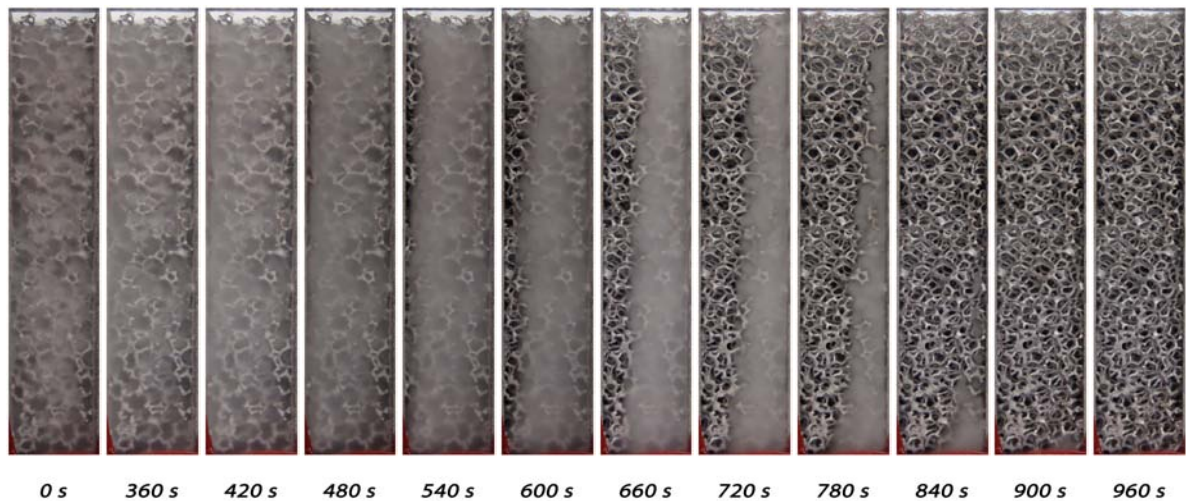


Figura 3.24: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 150 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.25* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.26* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.27* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

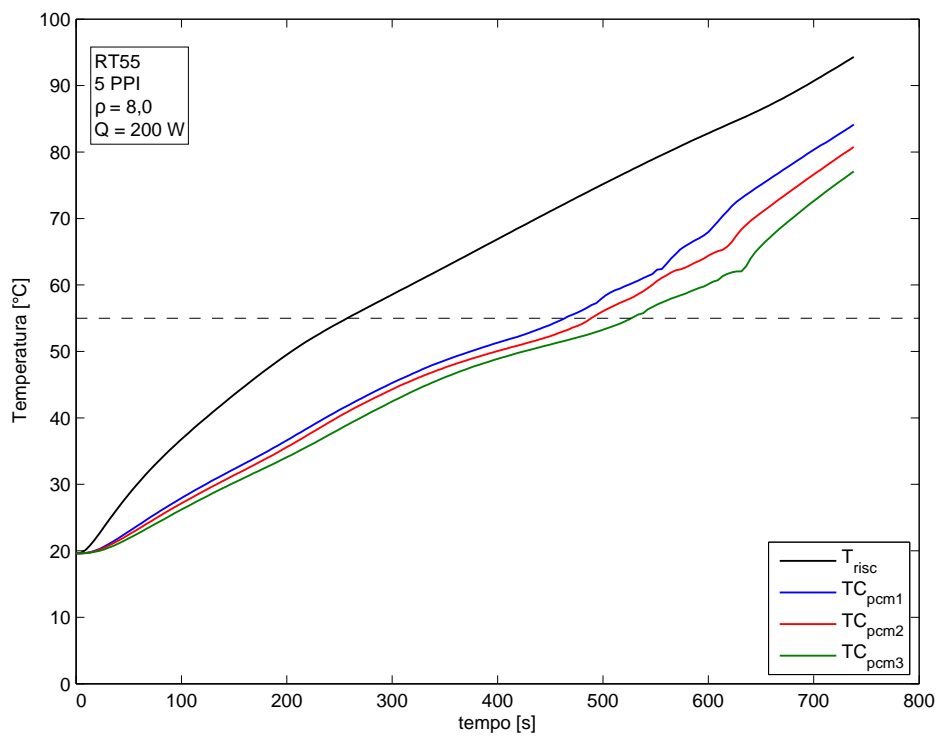


Figura 3.25: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

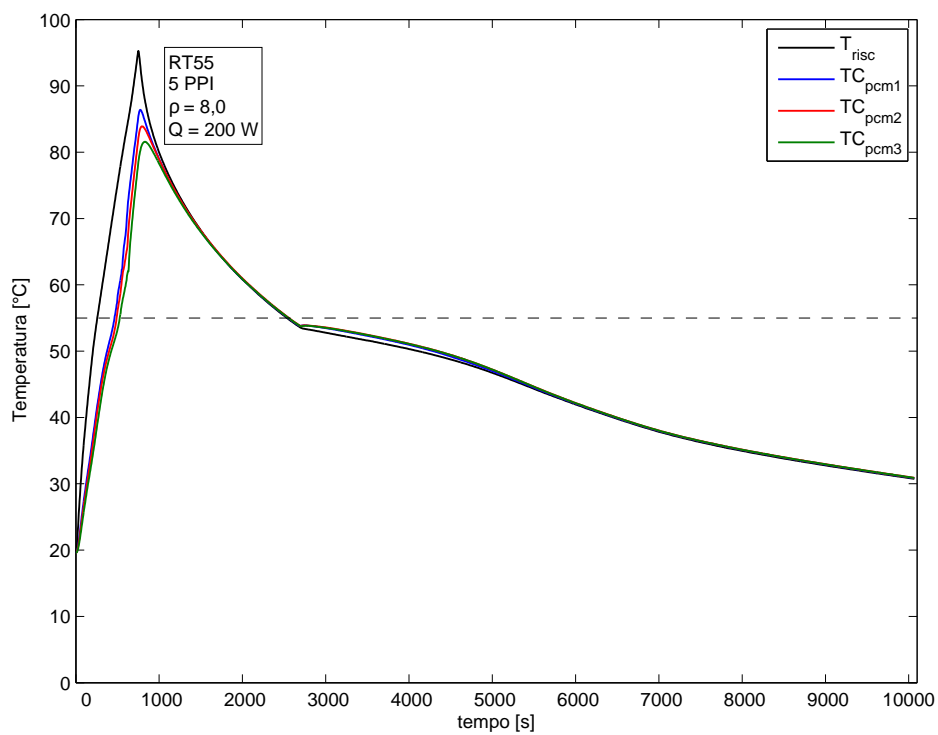


Figura 3.26: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

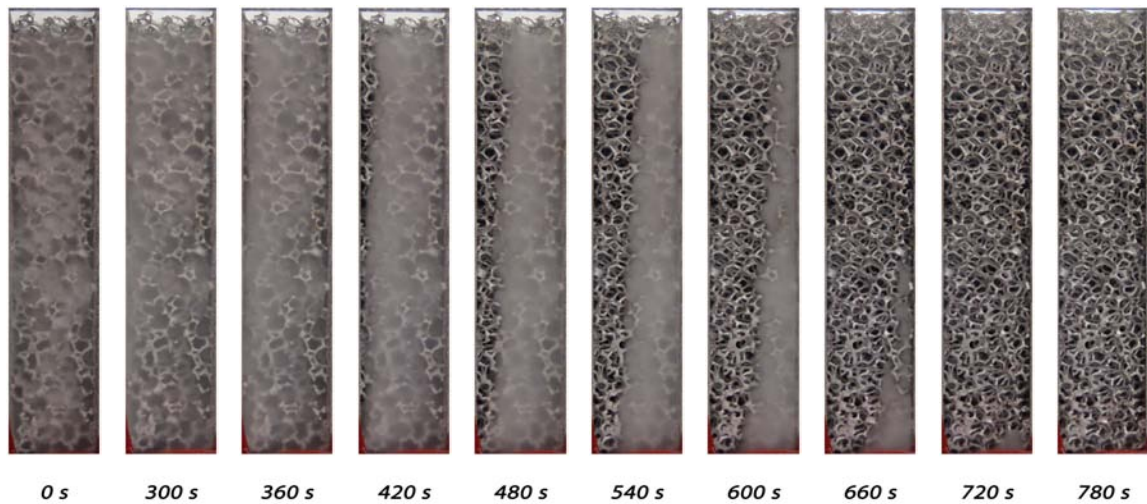


Figura 3.27: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 200 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT55, le prove sono state effettuate con la paraffina RT64HC. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.28* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.29* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.30* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione (ogni 120 s in questo caso);

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

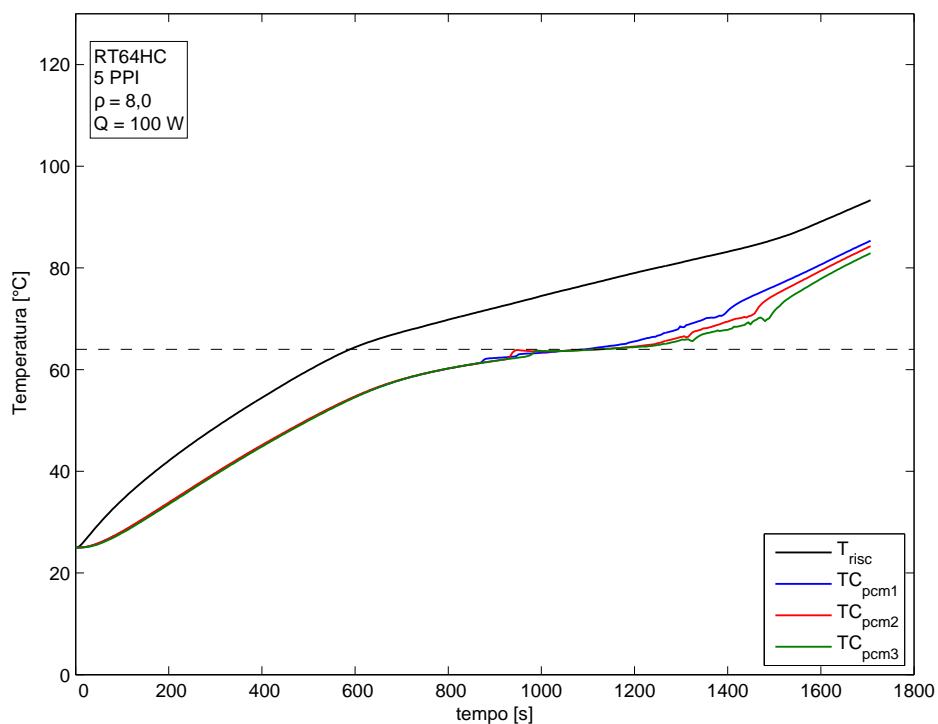


Figura 3.28: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

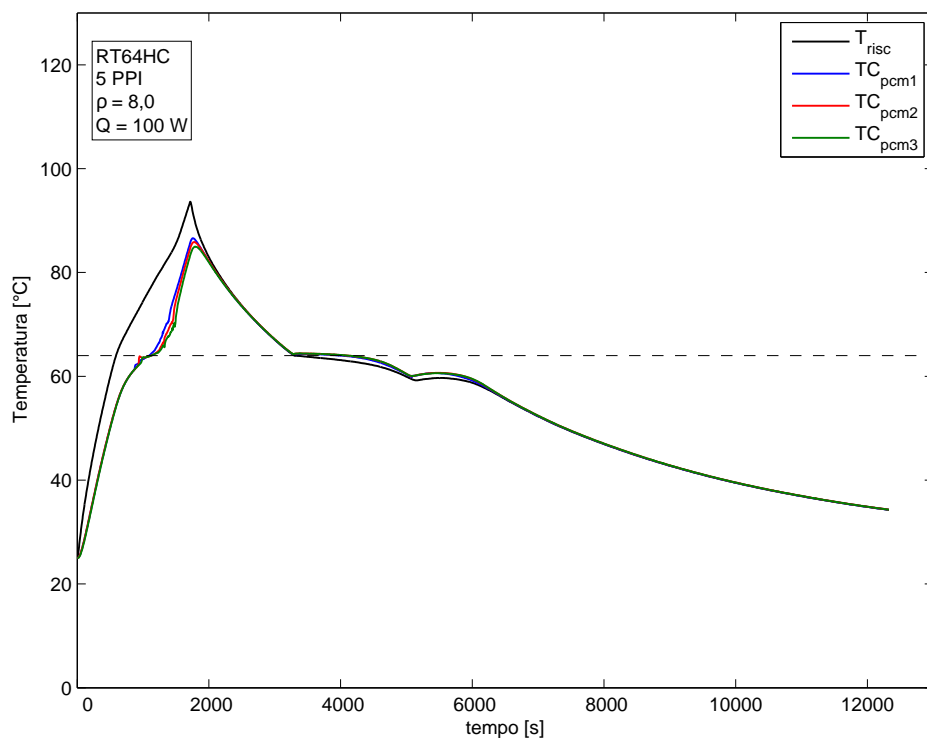


Figura 3.29: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

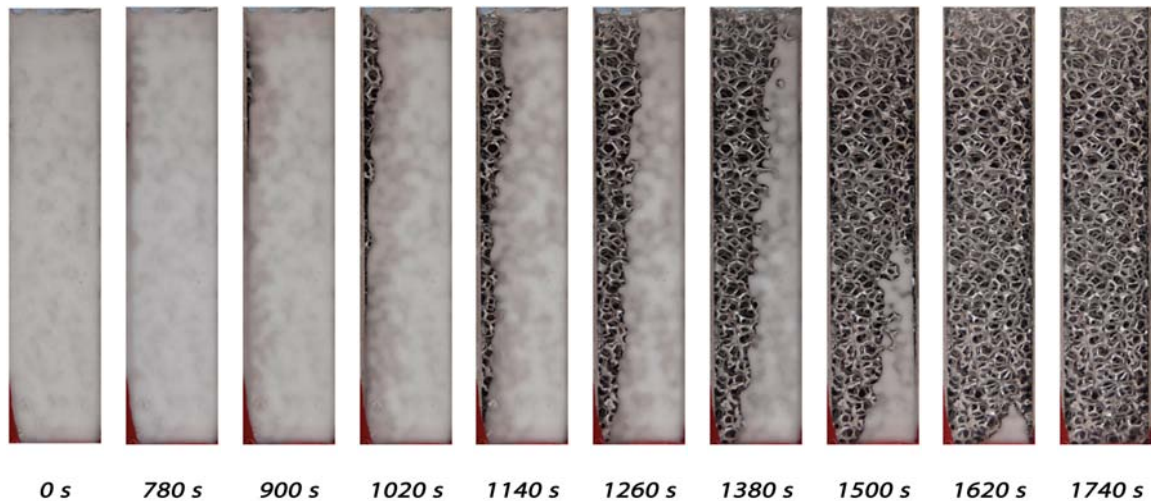


Figura 3.30: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 100 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.31* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.32* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.33* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

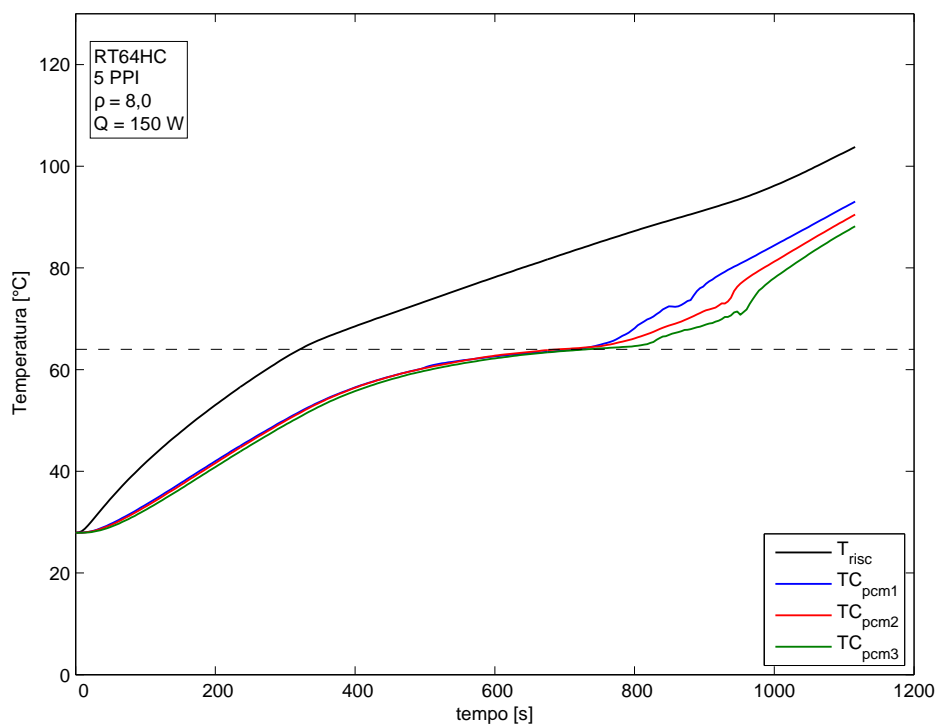


Figura 3.31: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

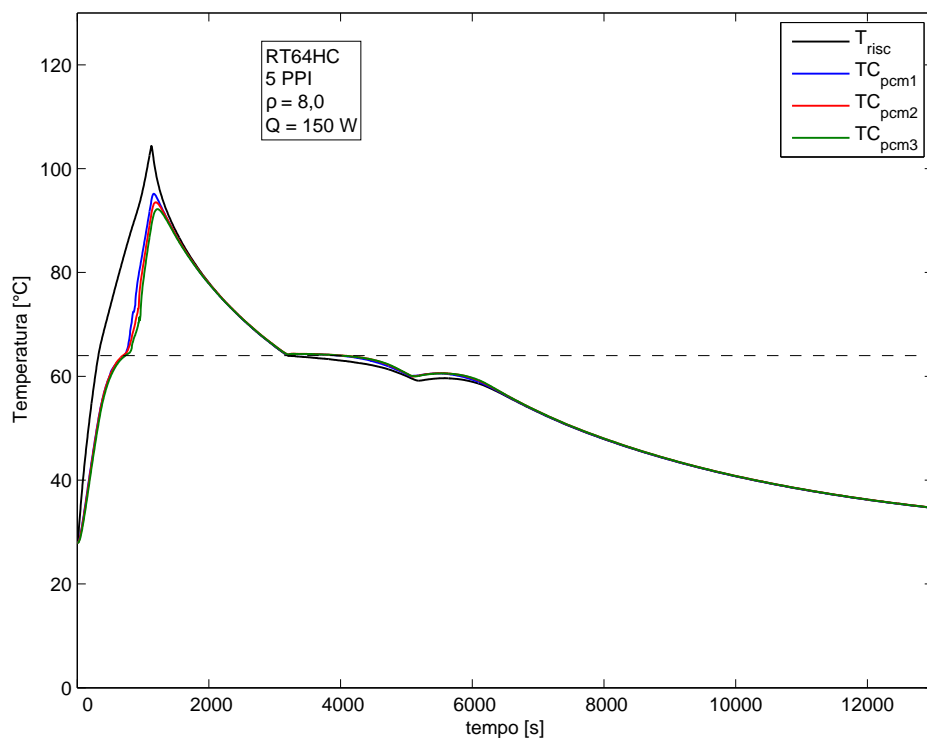


Figura 3.32: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

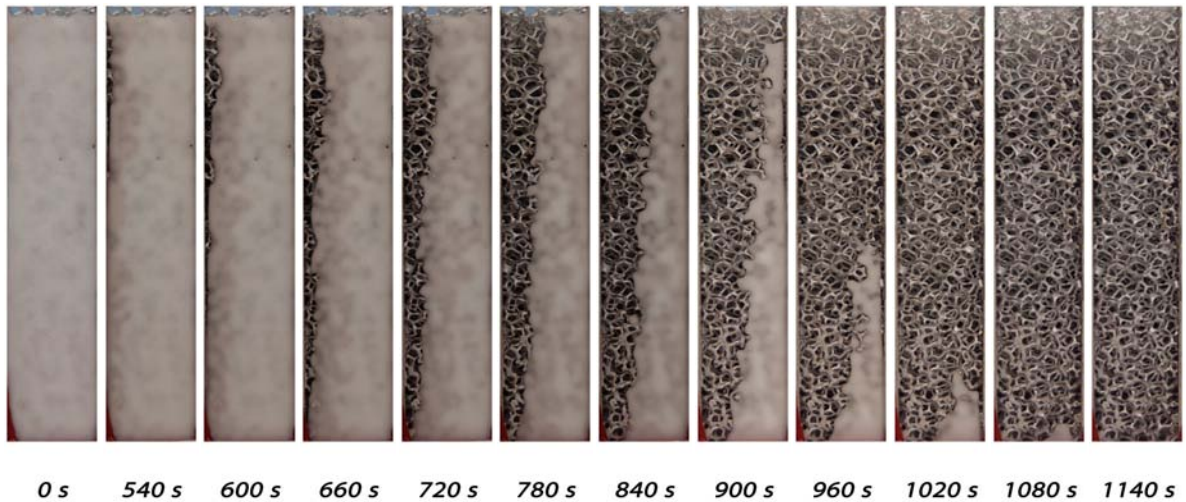


Figura 3.33: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 150 W.

Al-5-8,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.34* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.35* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.36* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

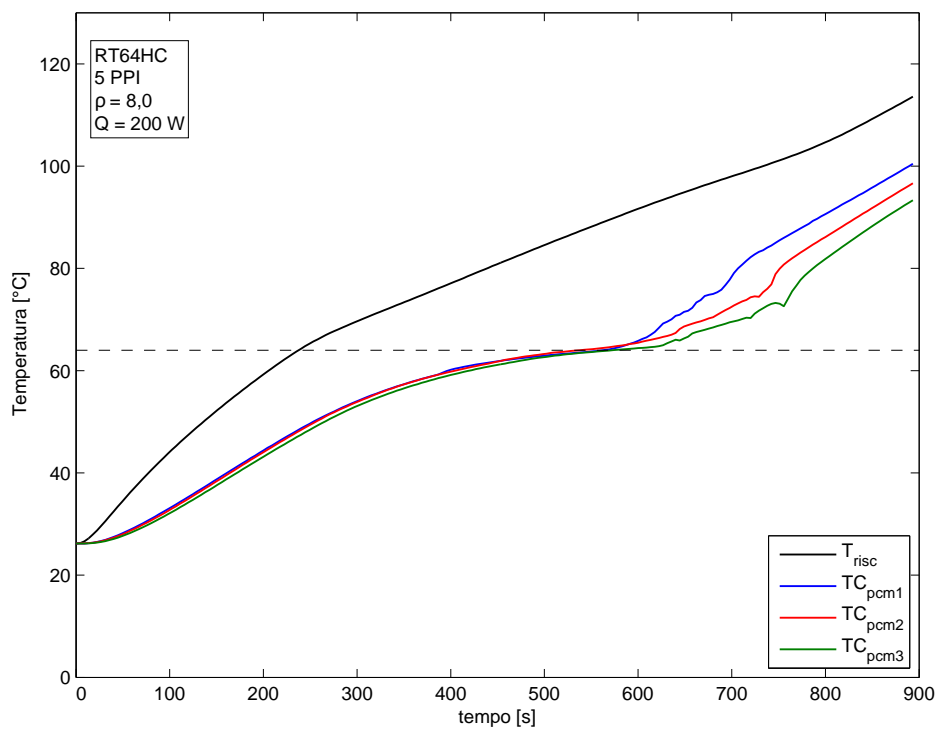


Figura 3.34: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

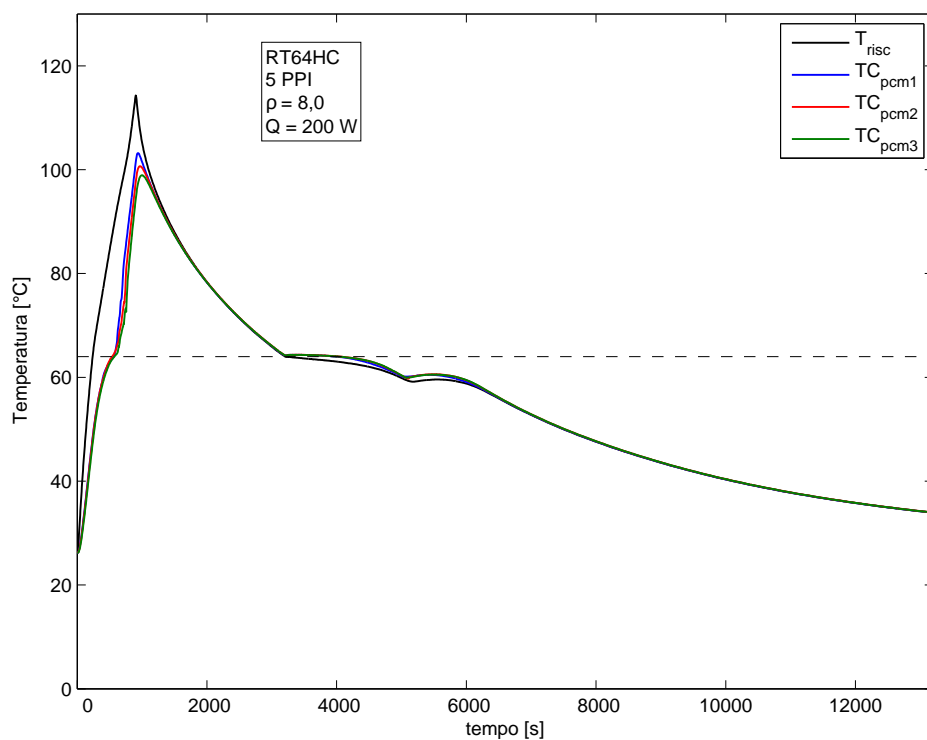


Figura 3.35: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

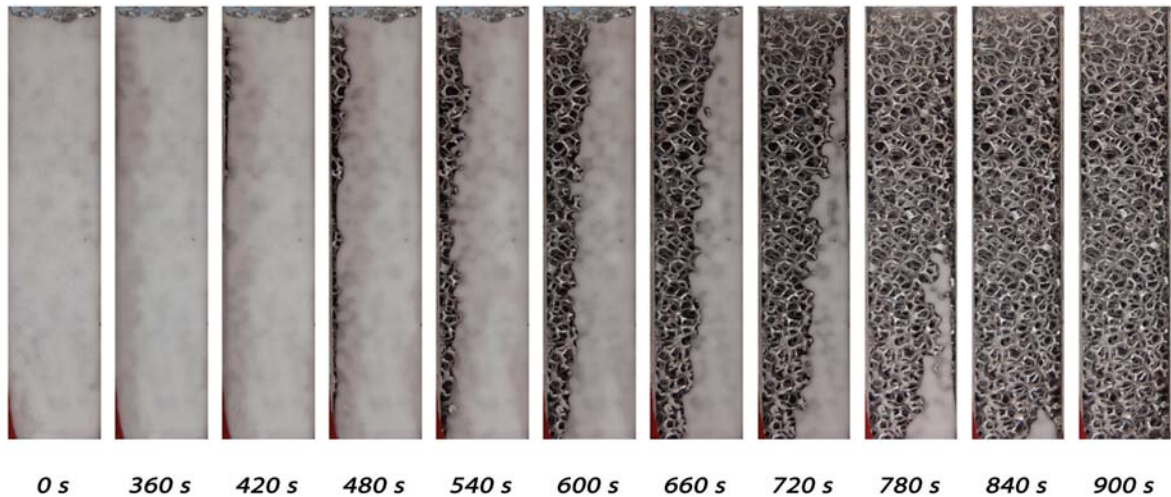


Figura 3.36: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-5-8,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 200 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 100 W

Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.37* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione;
- *Figura 3.38* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.39* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.40* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. La sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*. Nel *Paragrafo 3.3* verranno comunque analizzati i vari confronti fra potenze, paraffine e schiume metalliche.

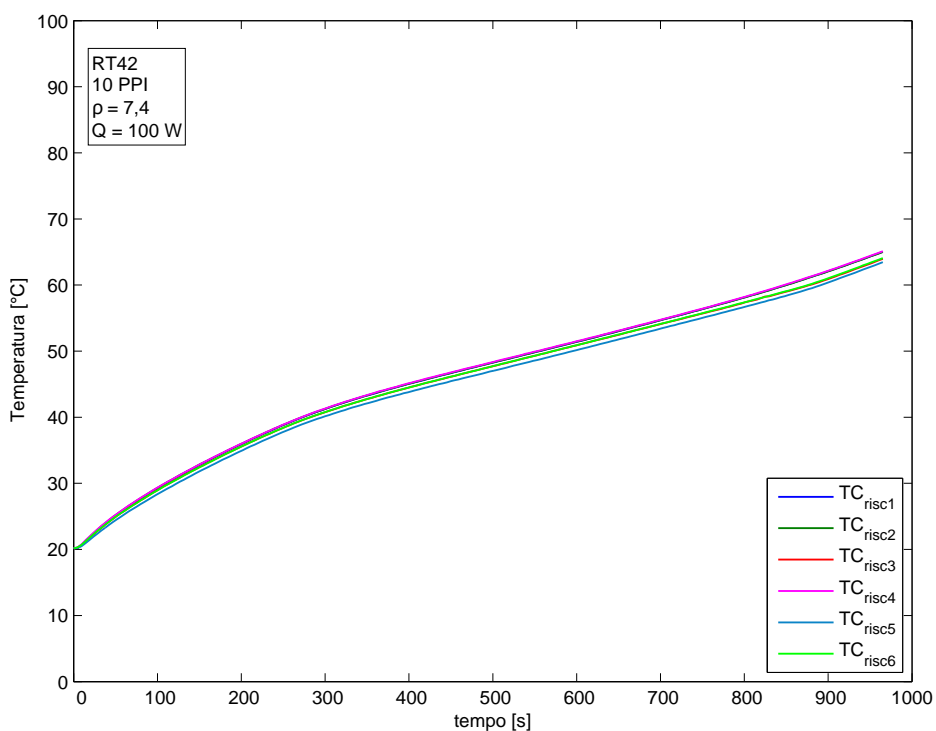


Figura 3.37: Andamento delle temperature lato riscaldatore nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

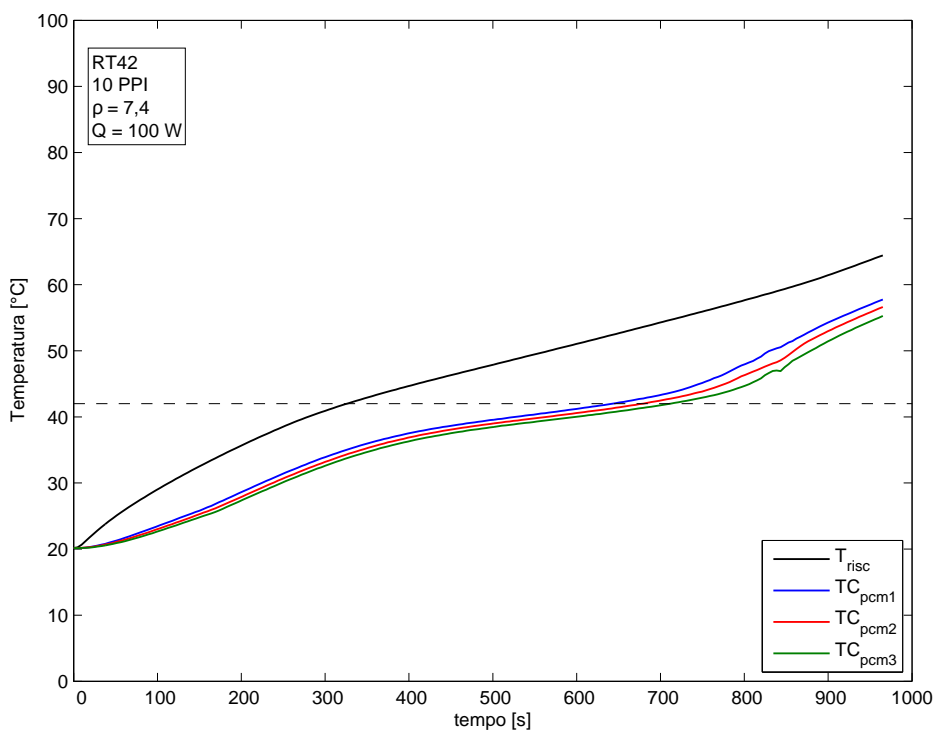


Figura 3.38: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

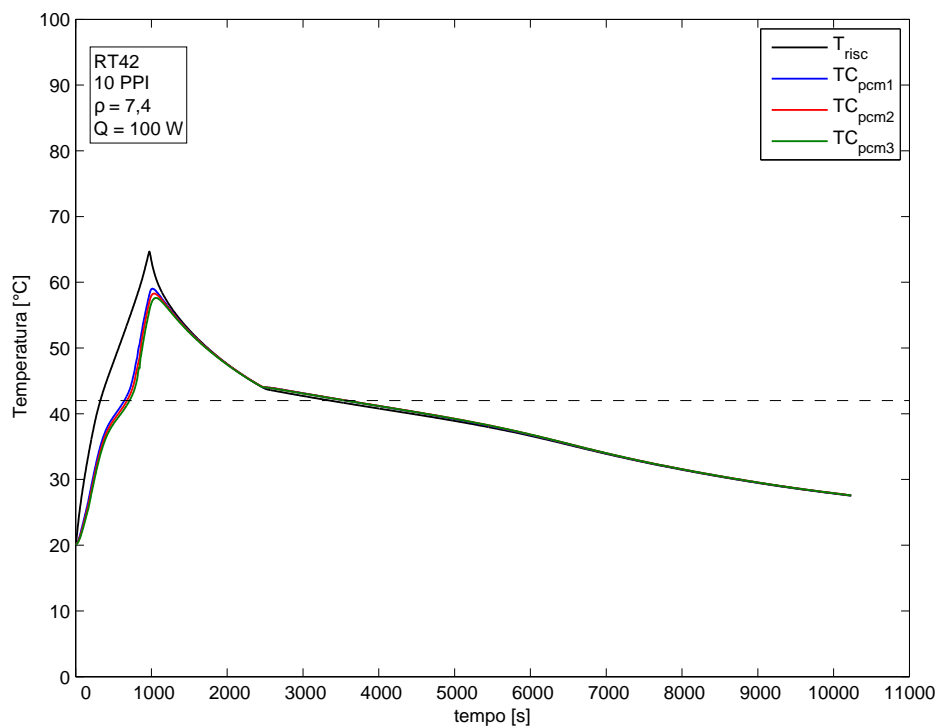


Figura 3.39: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

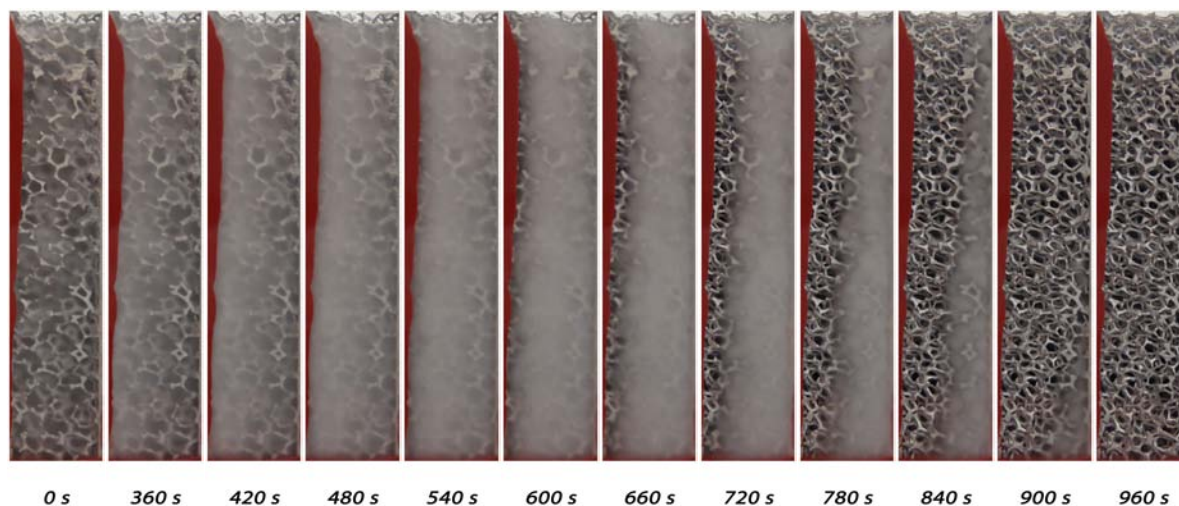


Figura 3.40: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 100 W

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.41* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.42* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.43* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

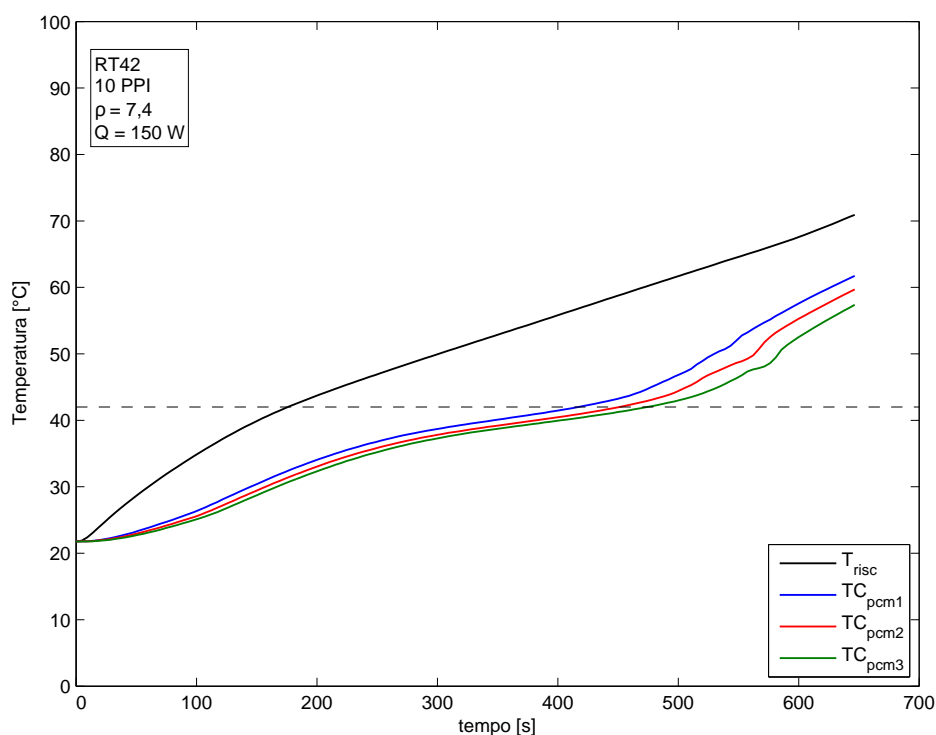


Figura 3.41: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

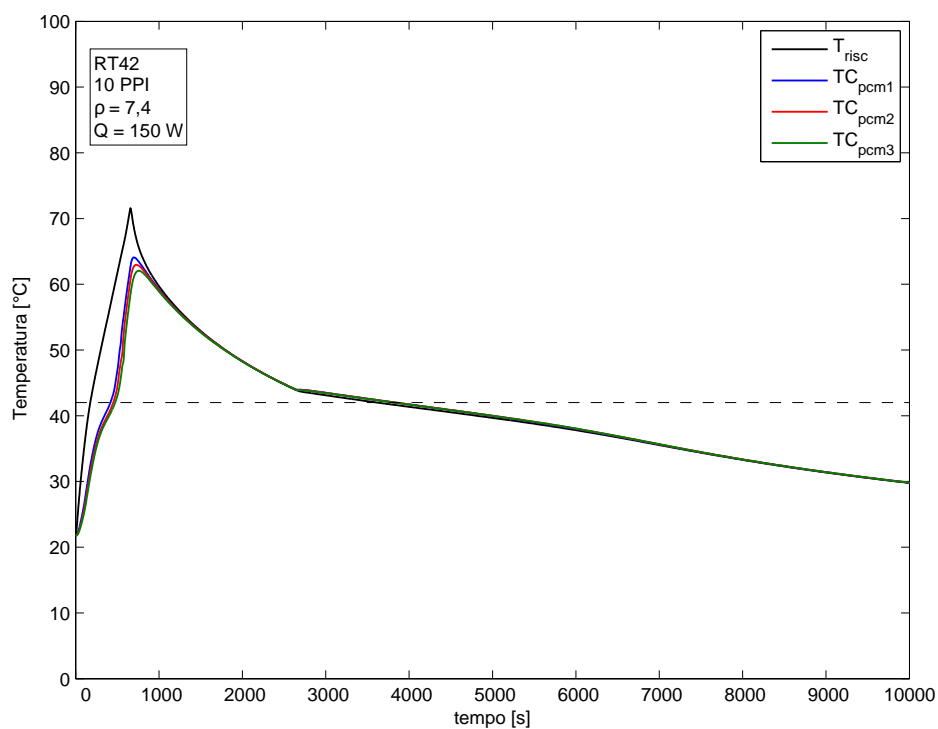


Figura 3.42: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

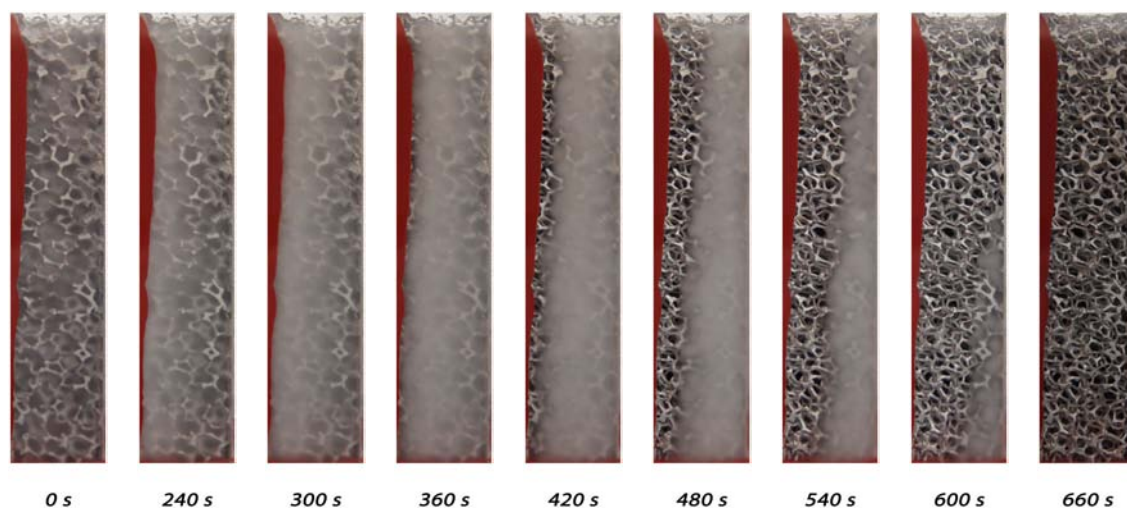


Figura 3.43: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 150 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.44* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.45* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.46* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

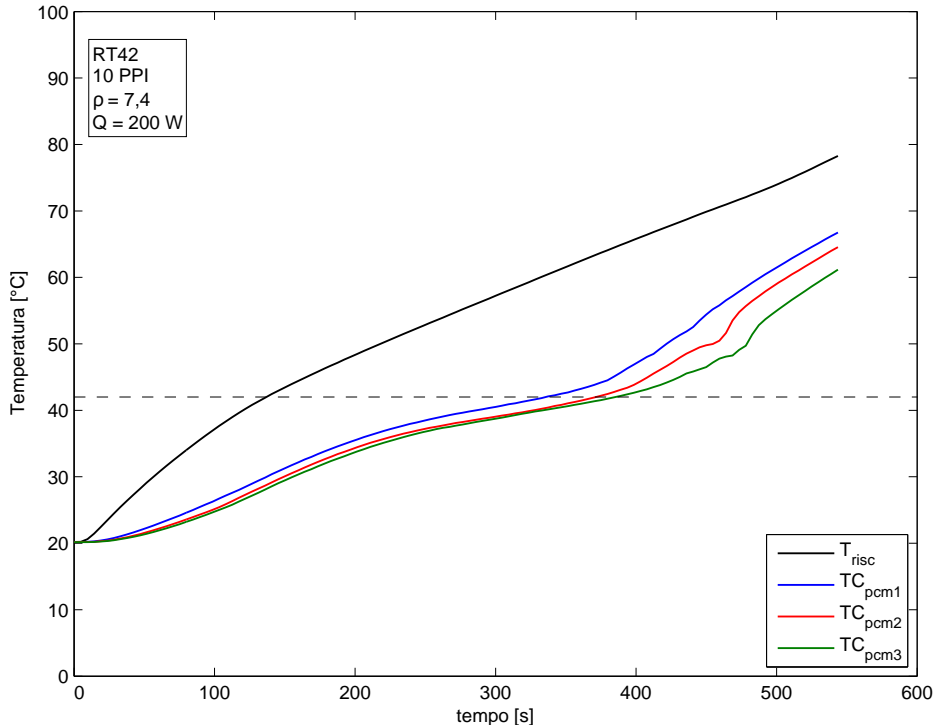


Figura 3.44: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

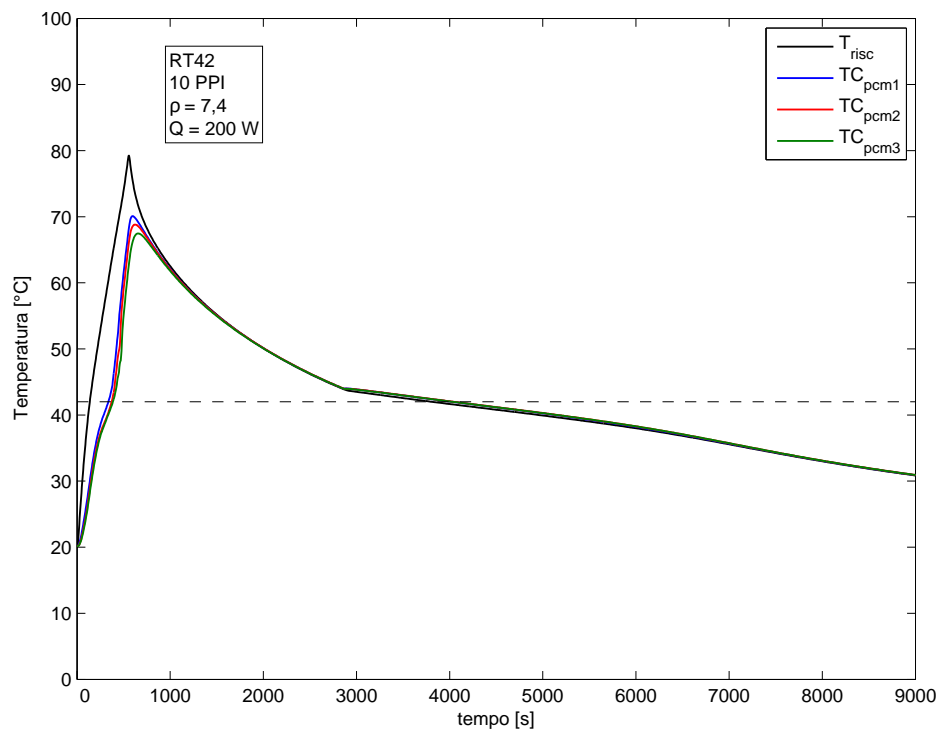


Figura 3.45: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

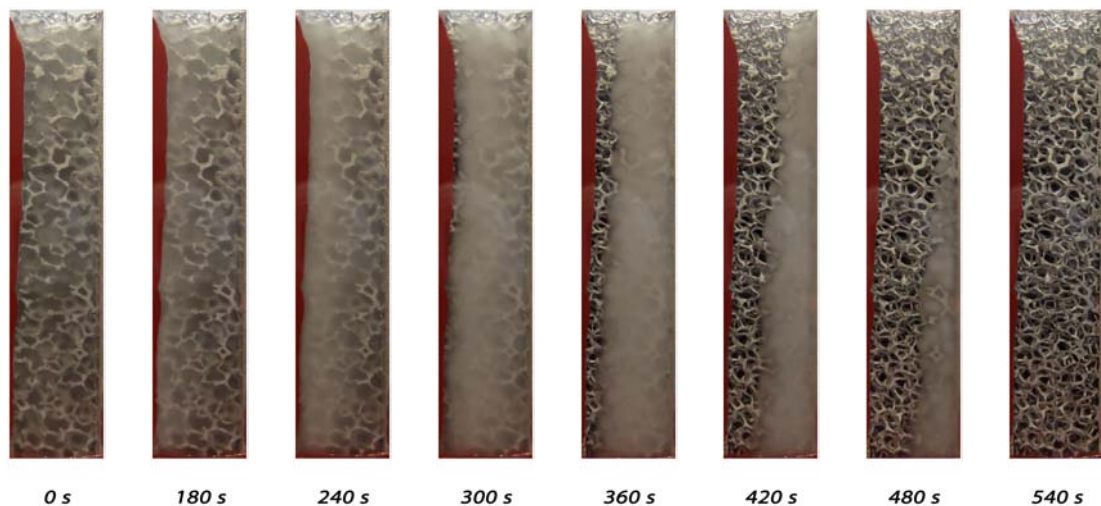


Figura 3.46: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 200 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT42, le prove sono state effettuate con la paraffina RT55. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.47* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.48* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.49* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

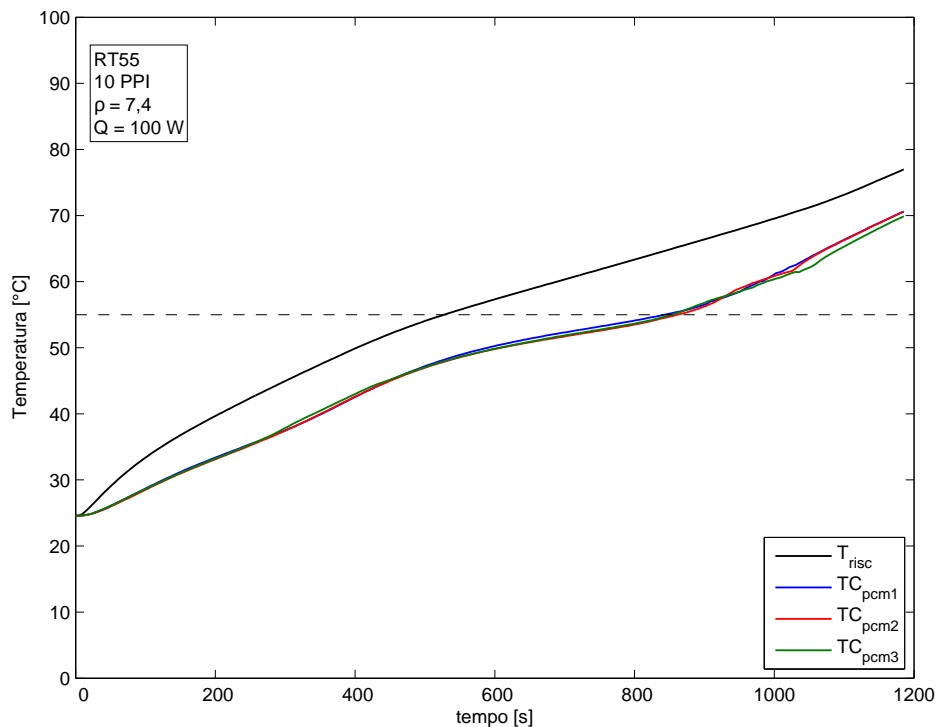


Figura 3.47: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

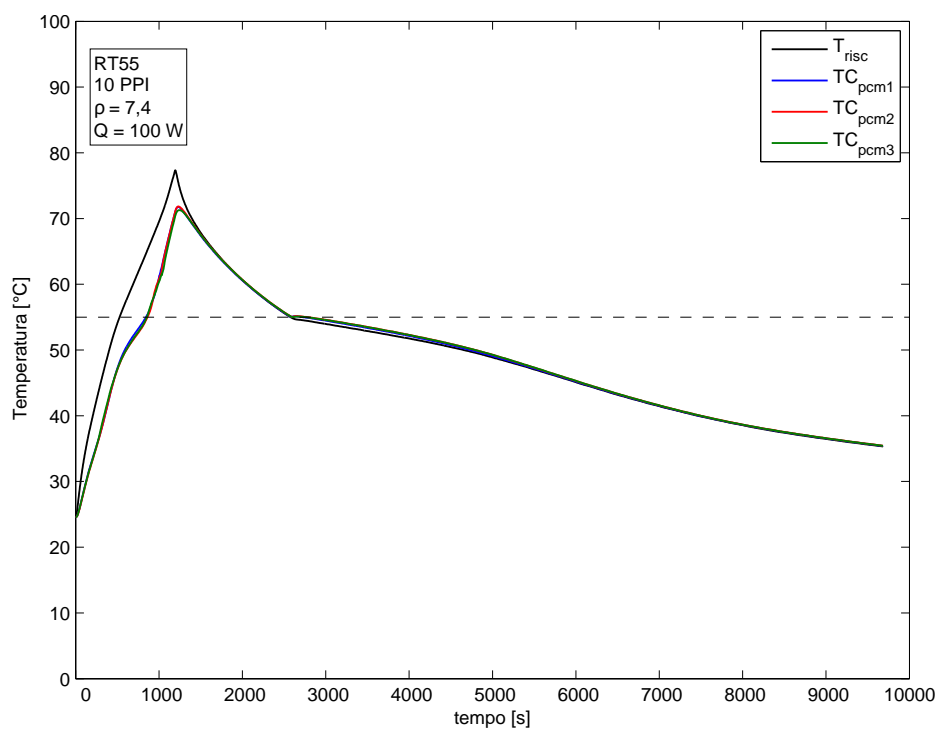


Figura 3.48: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

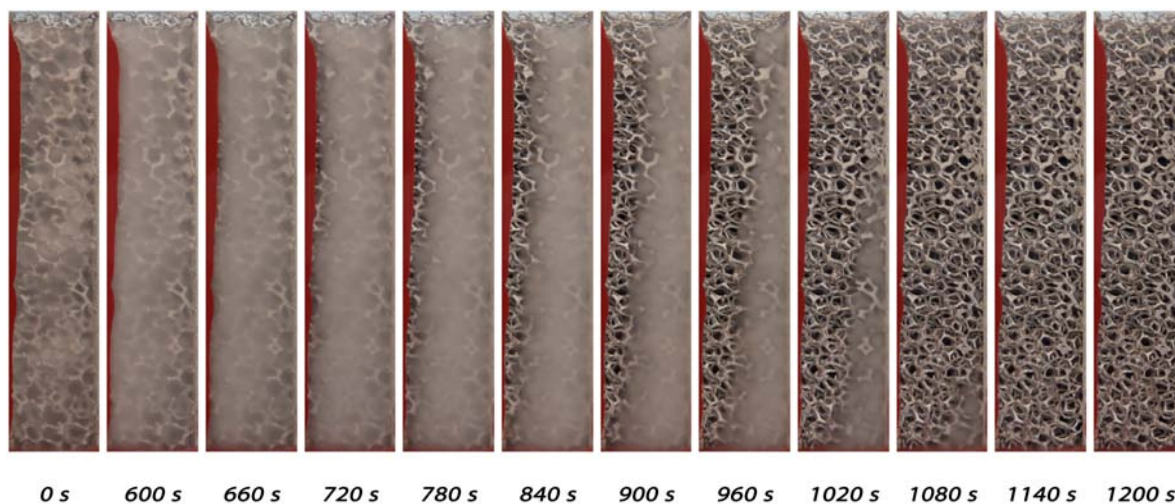


Figura 3.49: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 100 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.50* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.51* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.52* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

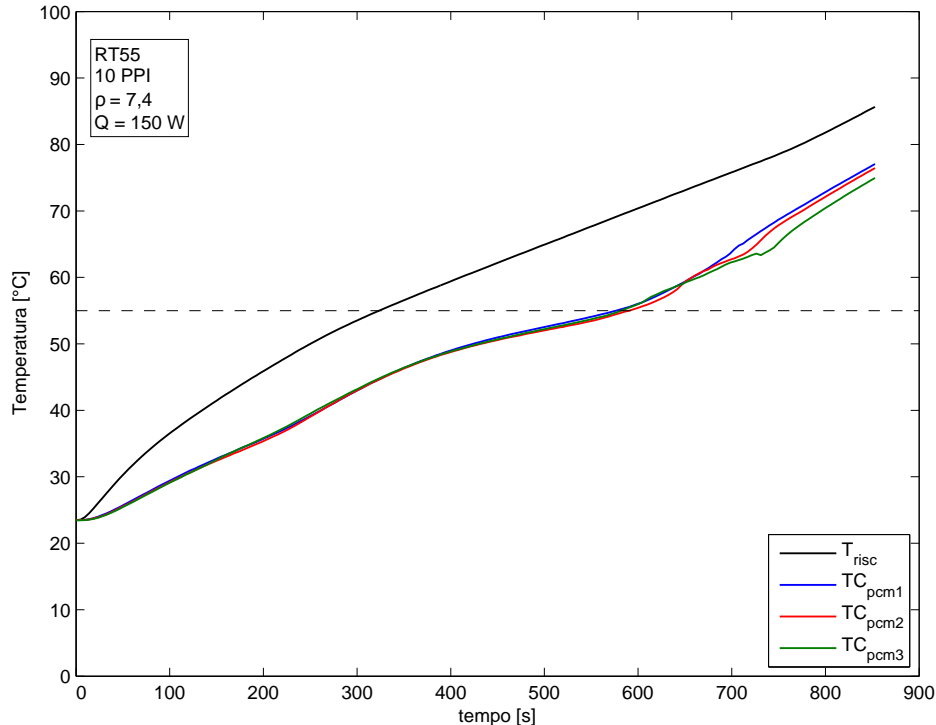


Figura 3.50: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

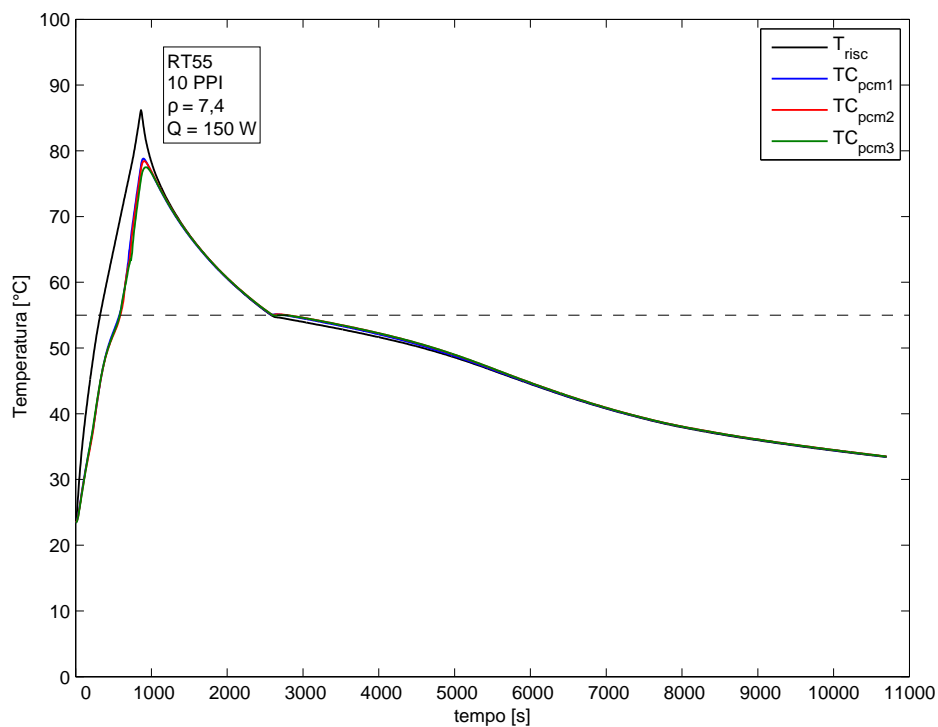


Figura 3.51: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

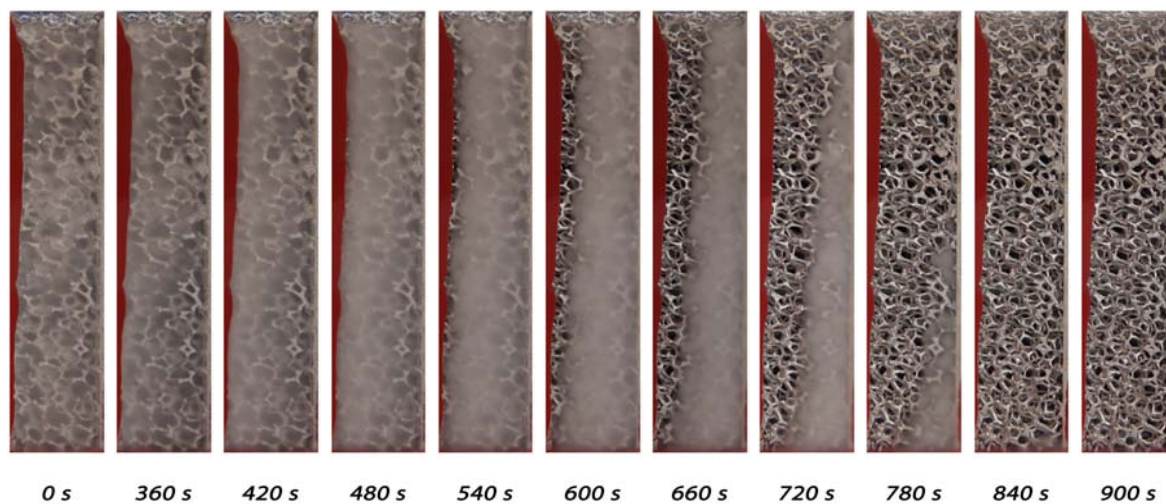


Figura 3.52: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 150 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.53* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.54* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.55* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

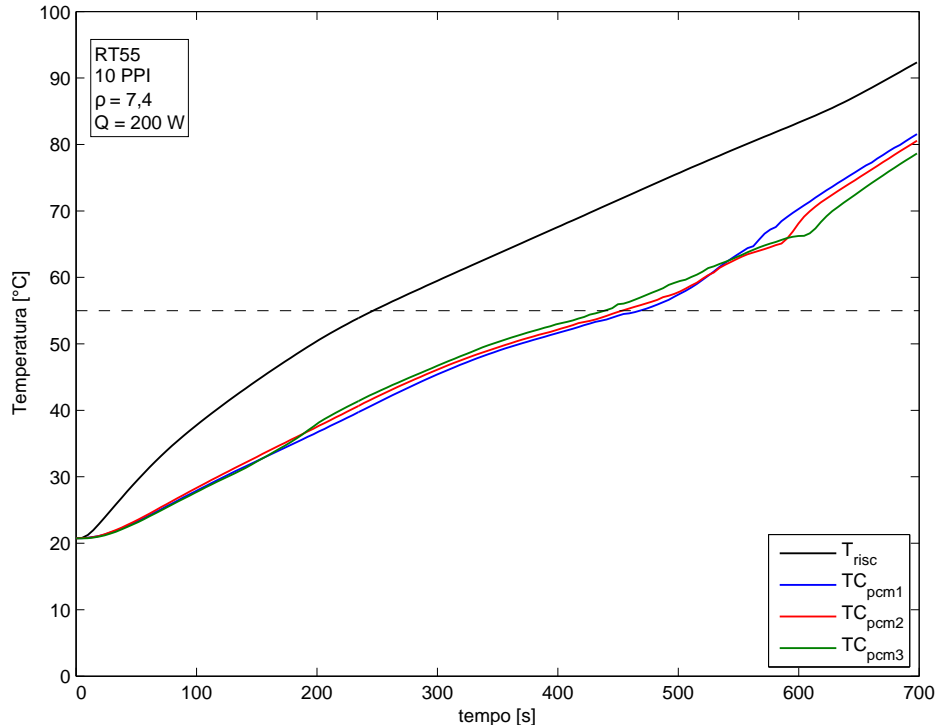


Figura 3.53: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

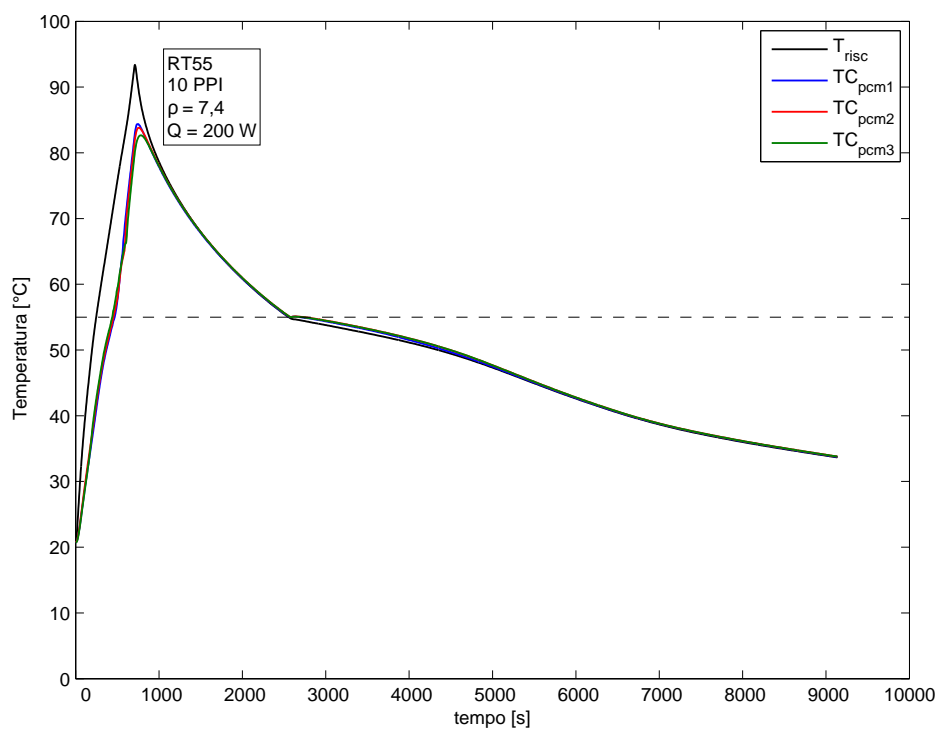


Figura 3.54: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

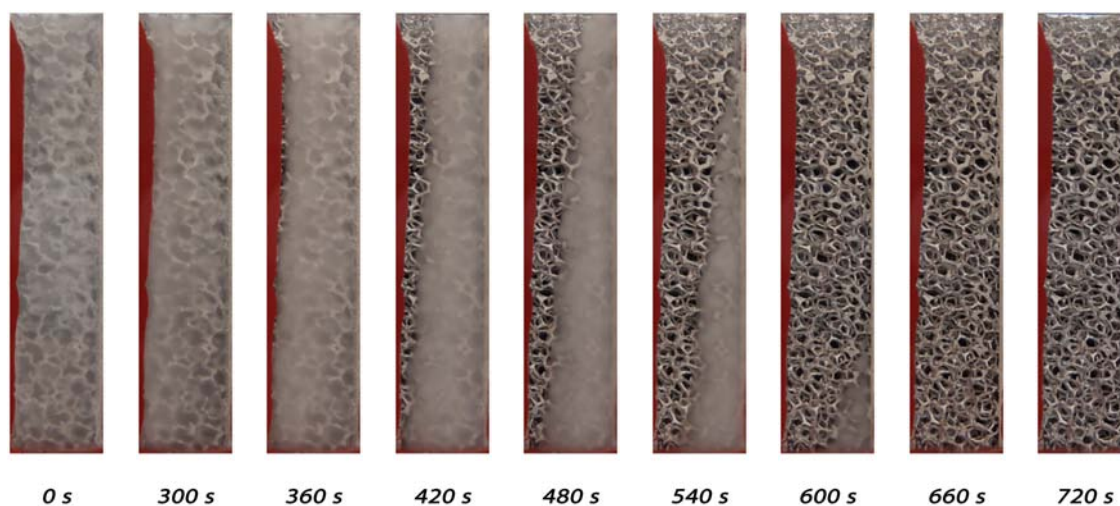


Figura 3.55: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 200 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT55, le prove sono state effettuate con la paraffina RT64HC. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.56* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.57* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.58* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione (ogni 120 s in questo caso);

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

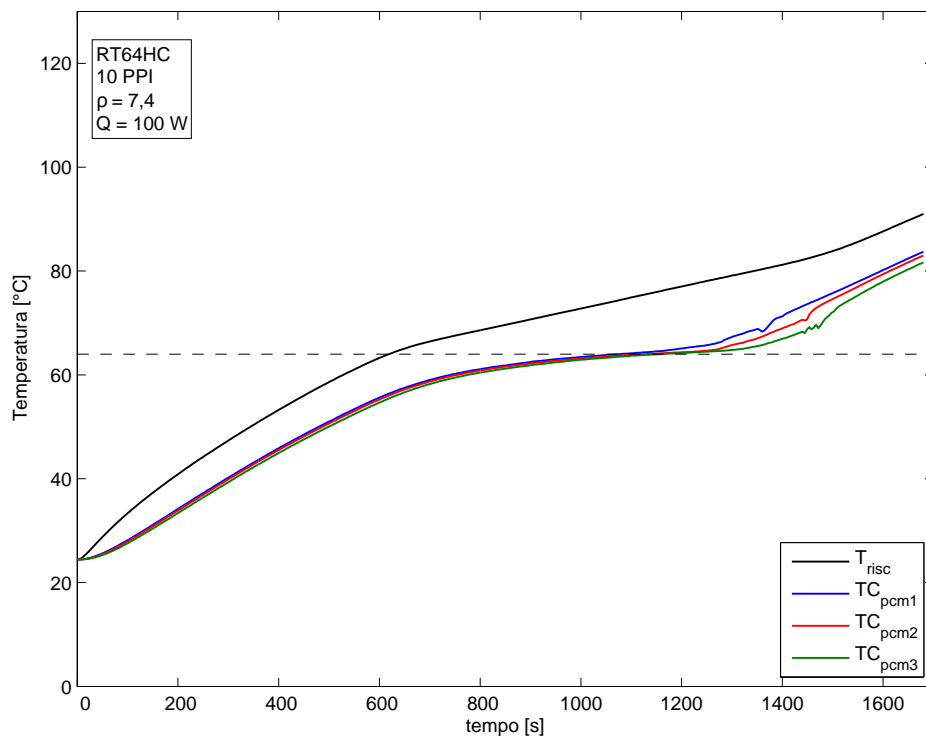


Figura 3.56: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

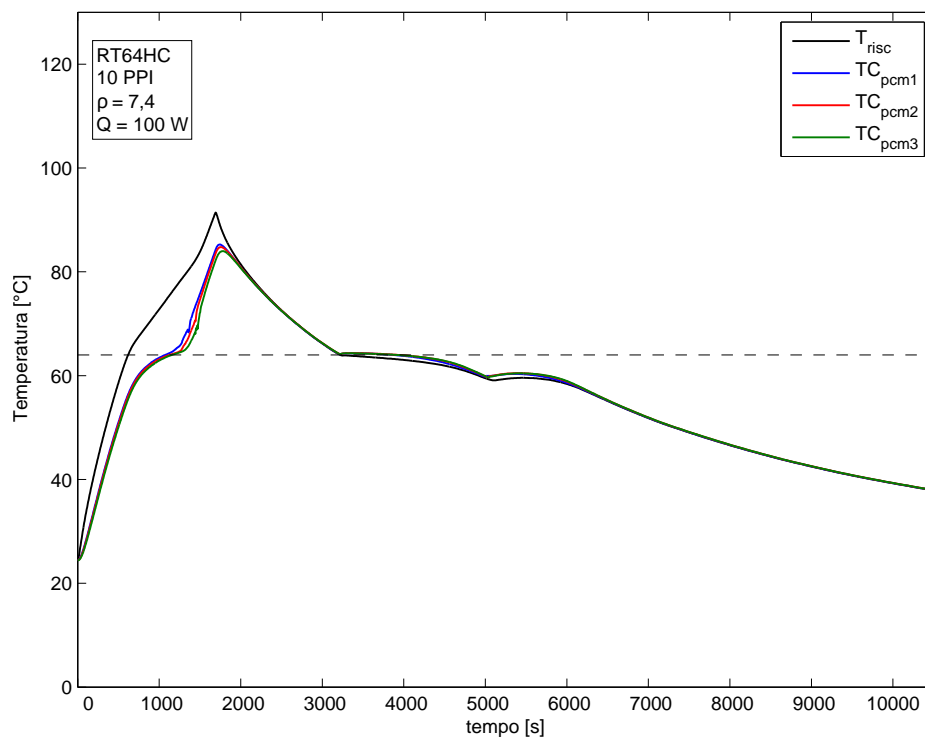


Figura 3.57: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

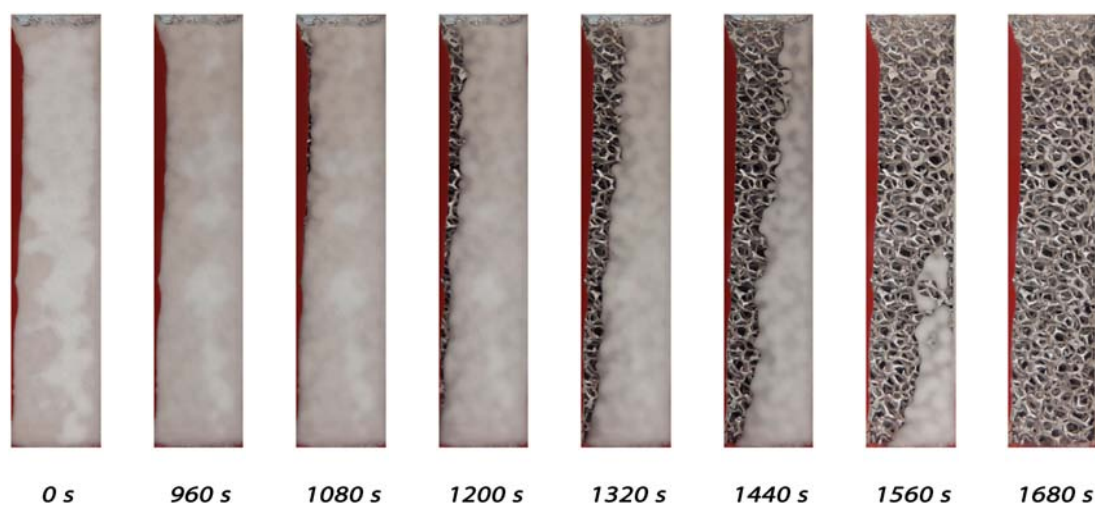


Figura 3.58: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 100 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.59* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.60* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.61* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

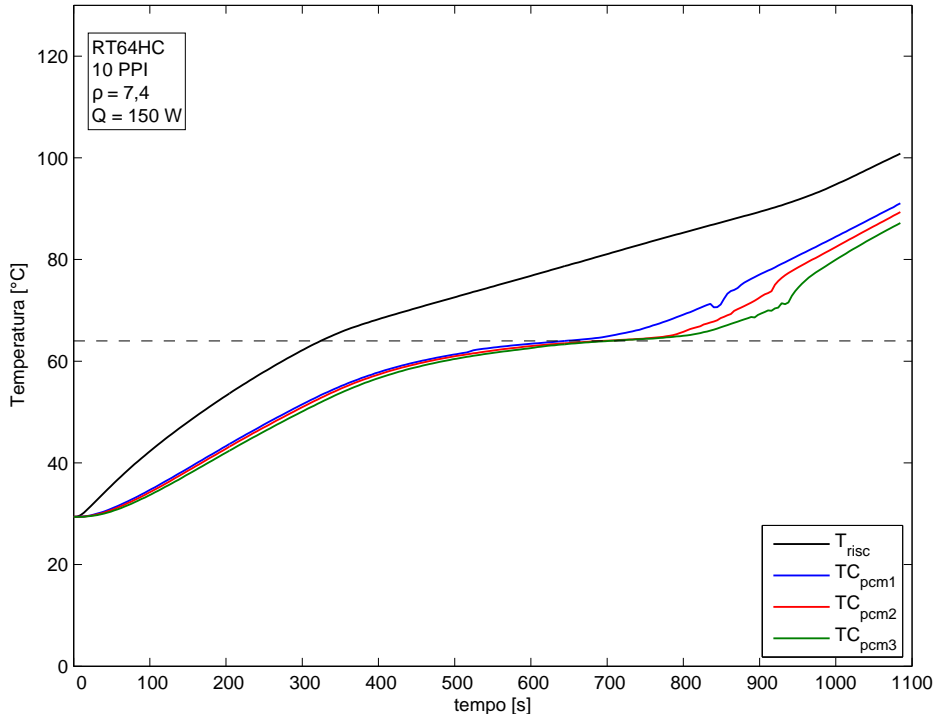


Figura 3.59: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

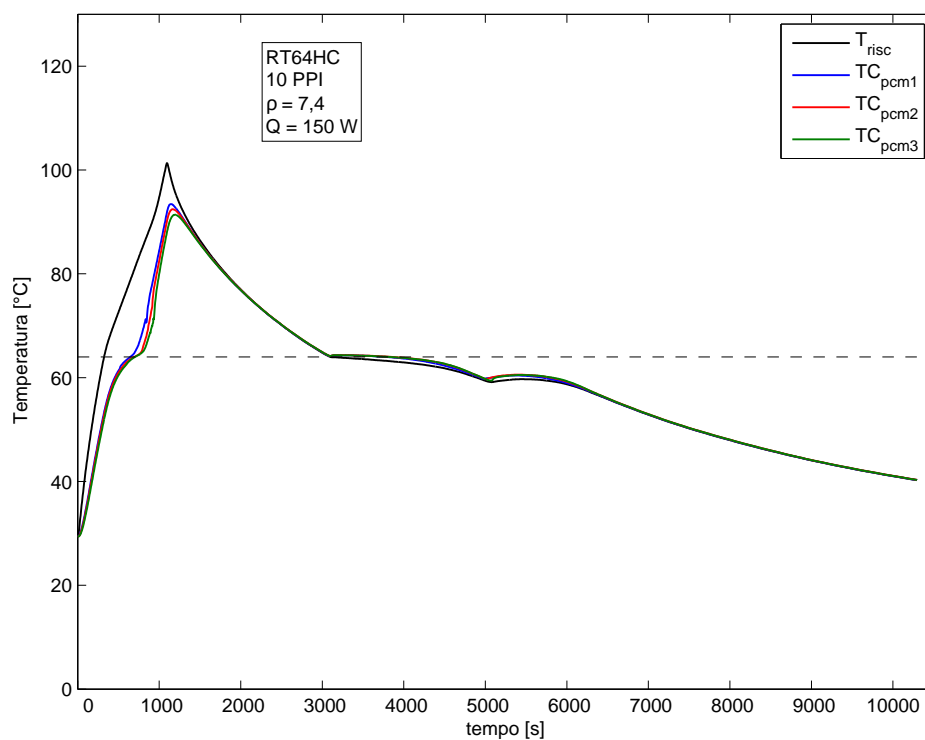


Figura 3.60: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

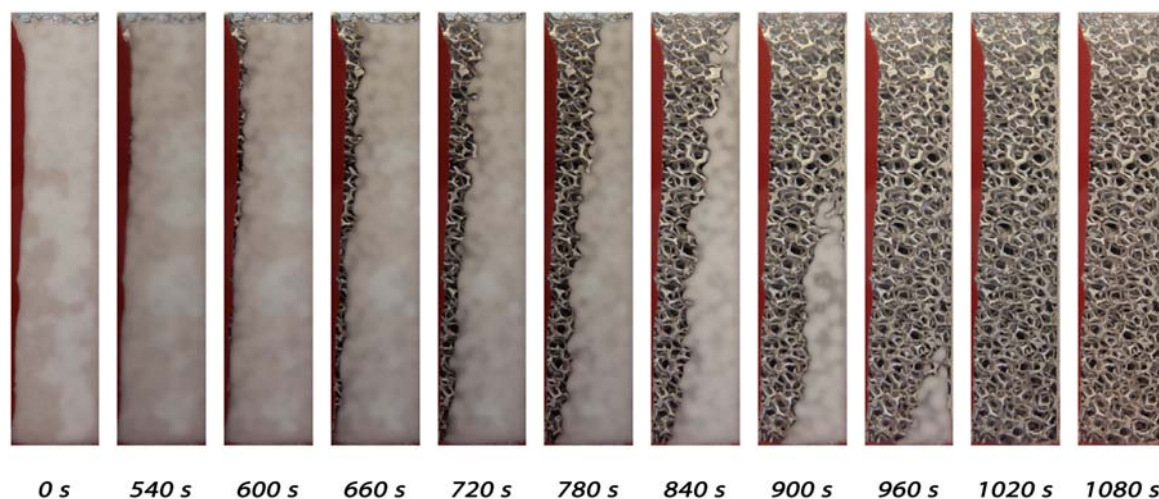


Figura 3.61: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 150 W.

Al-10-7,4 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.62* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.63* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.64* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

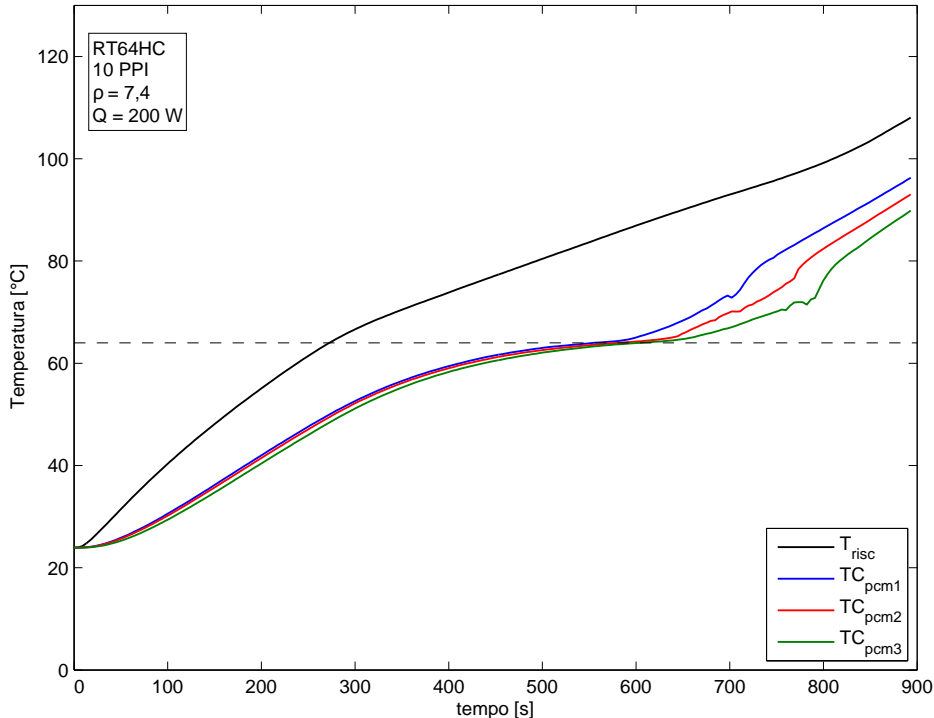


Figura 3.62: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

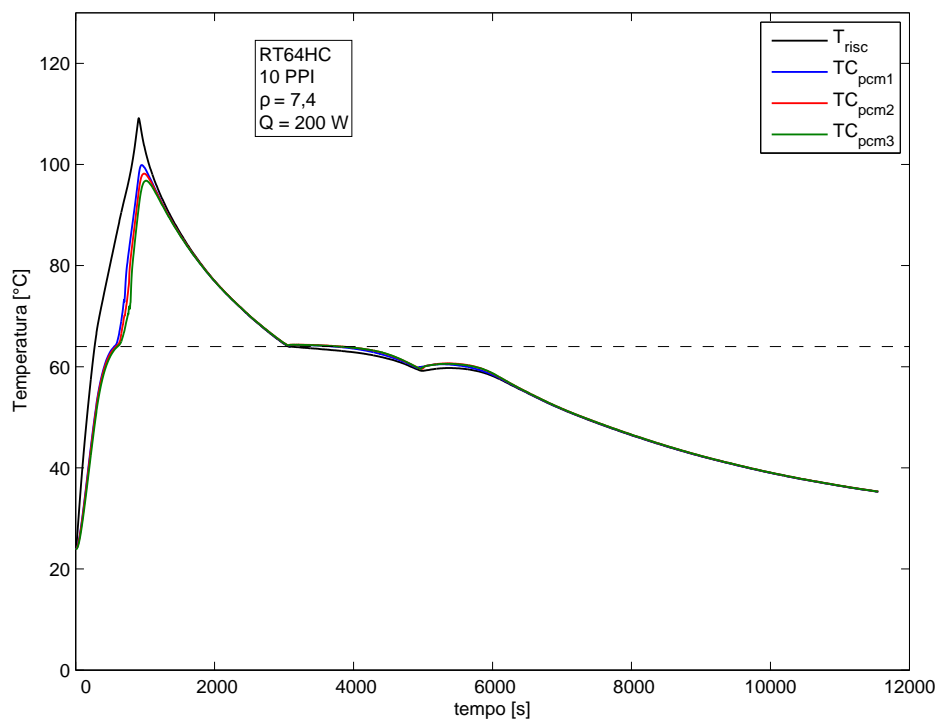


Figura 3.63: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

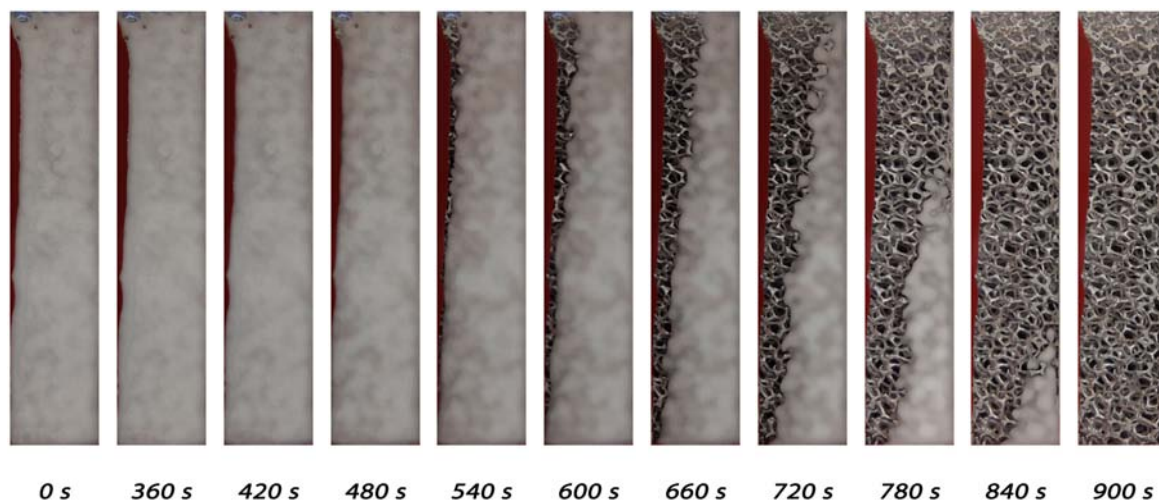


Figura 3.64: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-10-7,4 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 200 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 100 W

Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.65* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione;
- *Figura 3.66* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.67* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.68* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. La sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*. Nel *Paragrafo 3.3* verranno comunque analizzati i vari confronti fra potenze, paraffine e schiume metalliche.

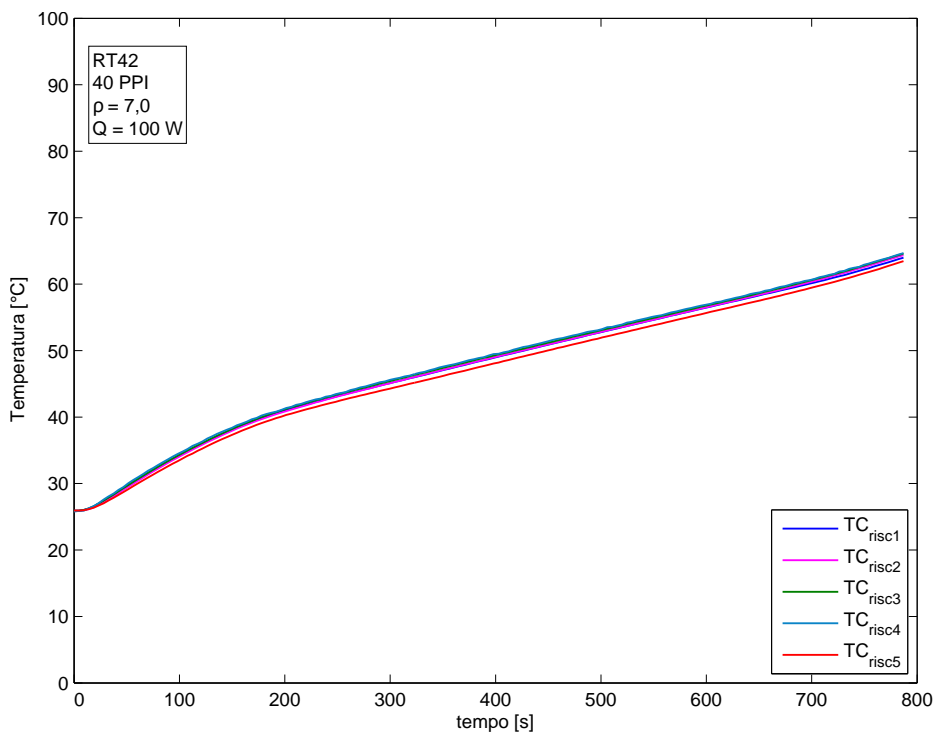


Figura 3.65: Andamento delle temperature lato riscaldatore nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

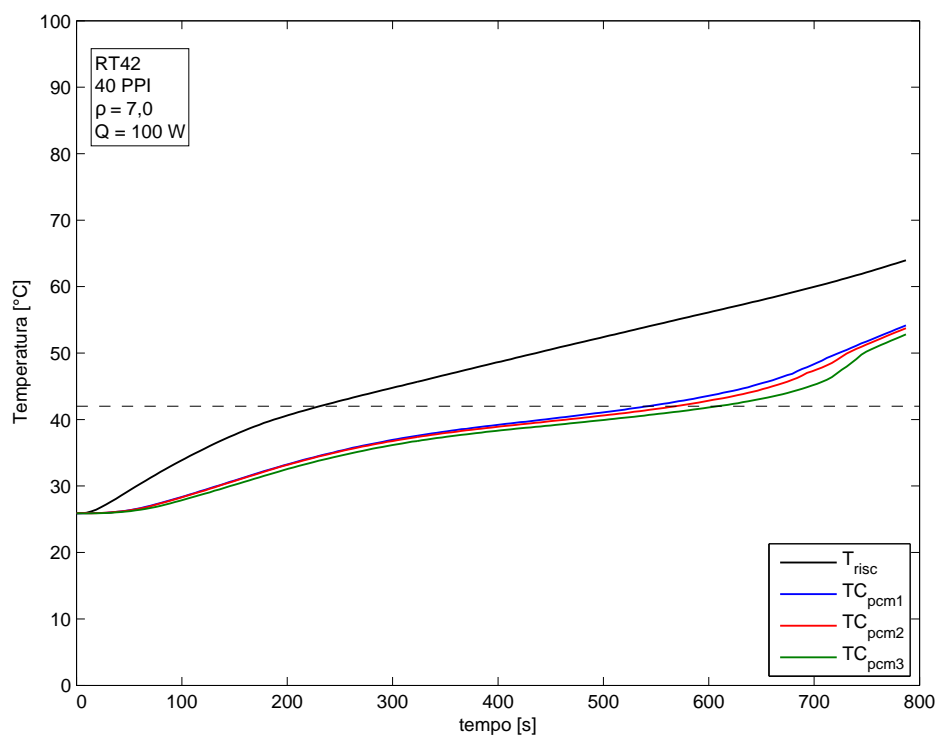


Figura 3.66: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

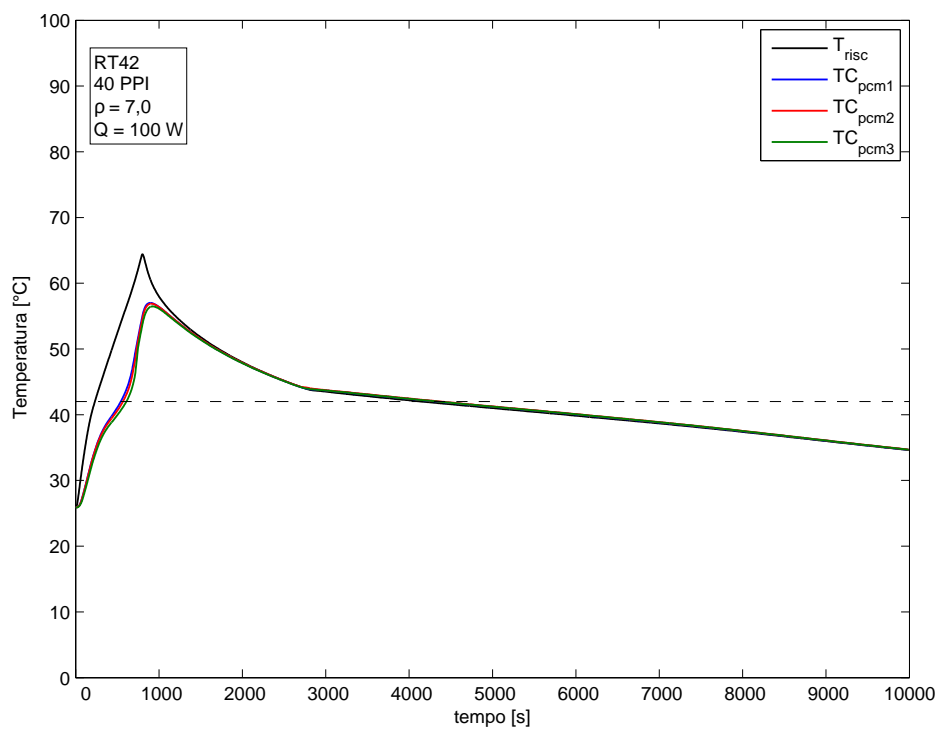


Figura 3.67: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

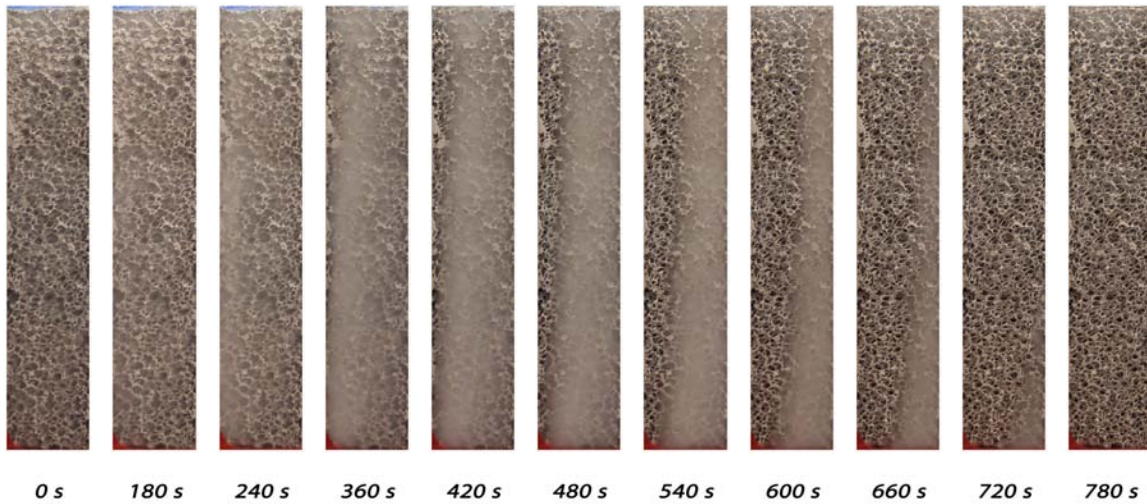


Figura 3.68: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 100 W

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.69* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.70* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.71* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

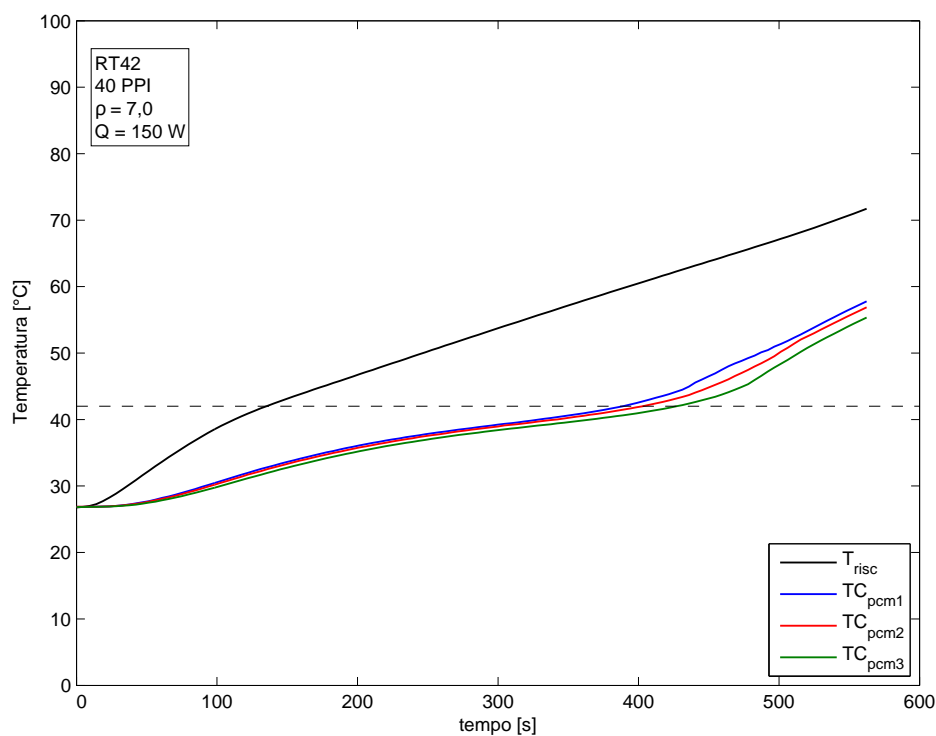


Figura 3.69: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

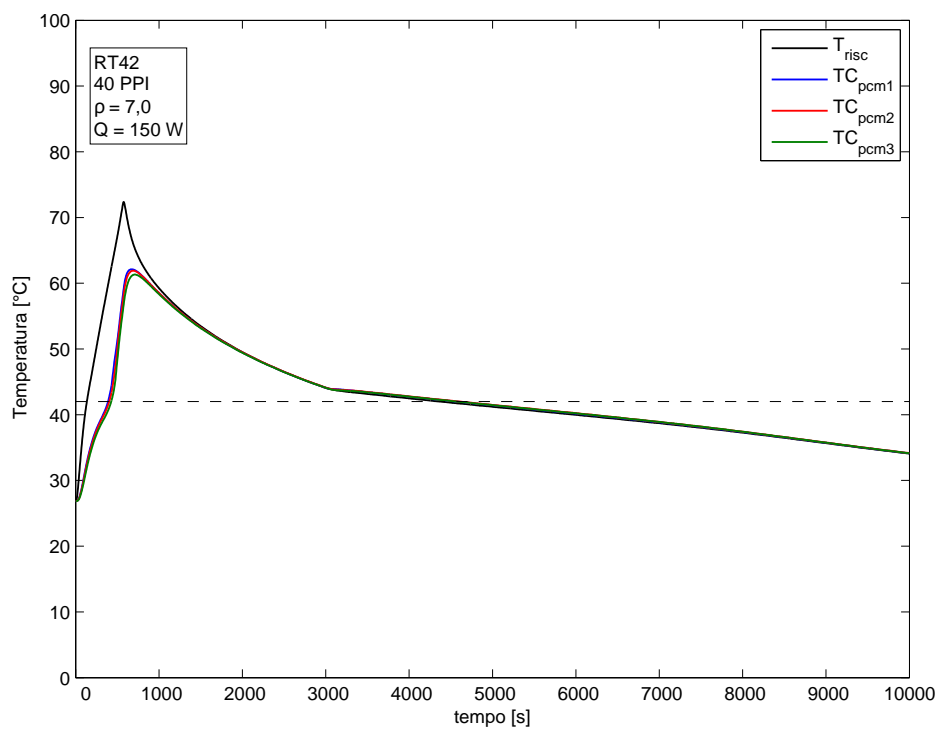


Figura 3.70: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

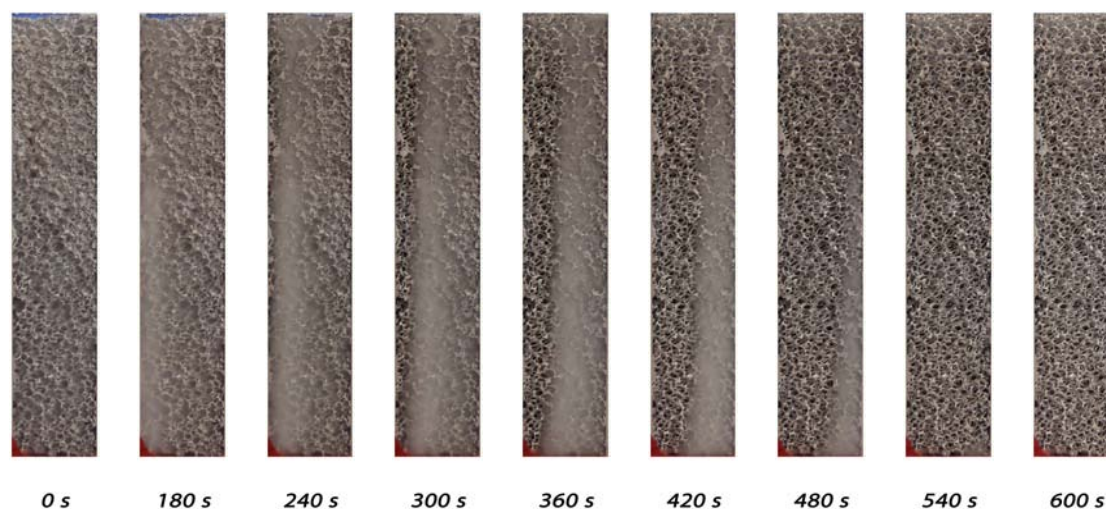


Figura 3.71: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 150 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT42 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.72* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.73* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.74* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

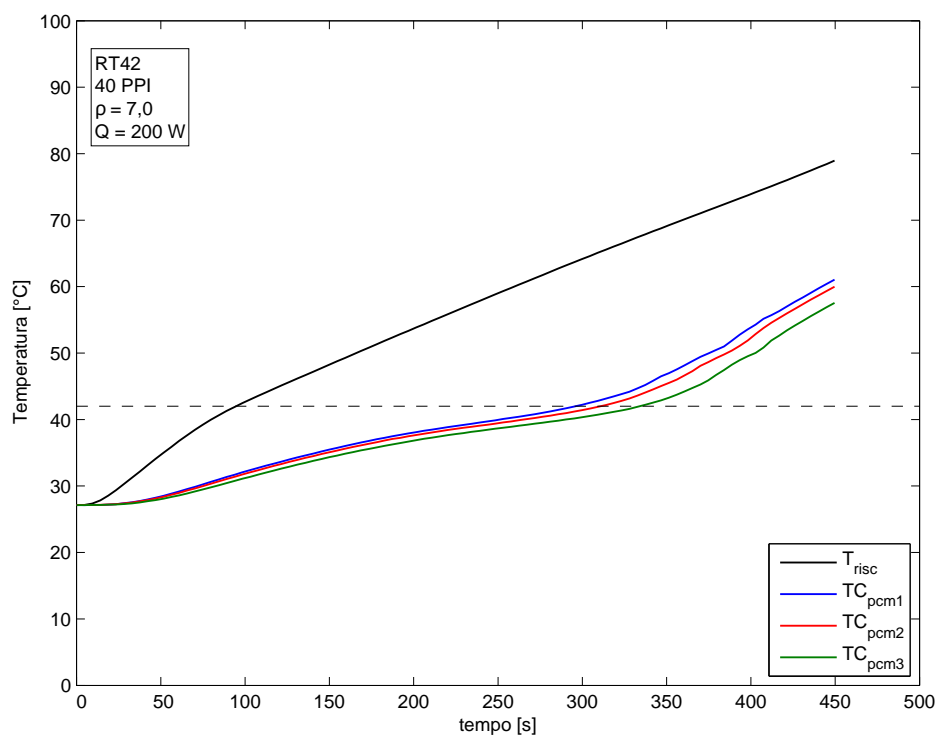


Figura 3.72: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

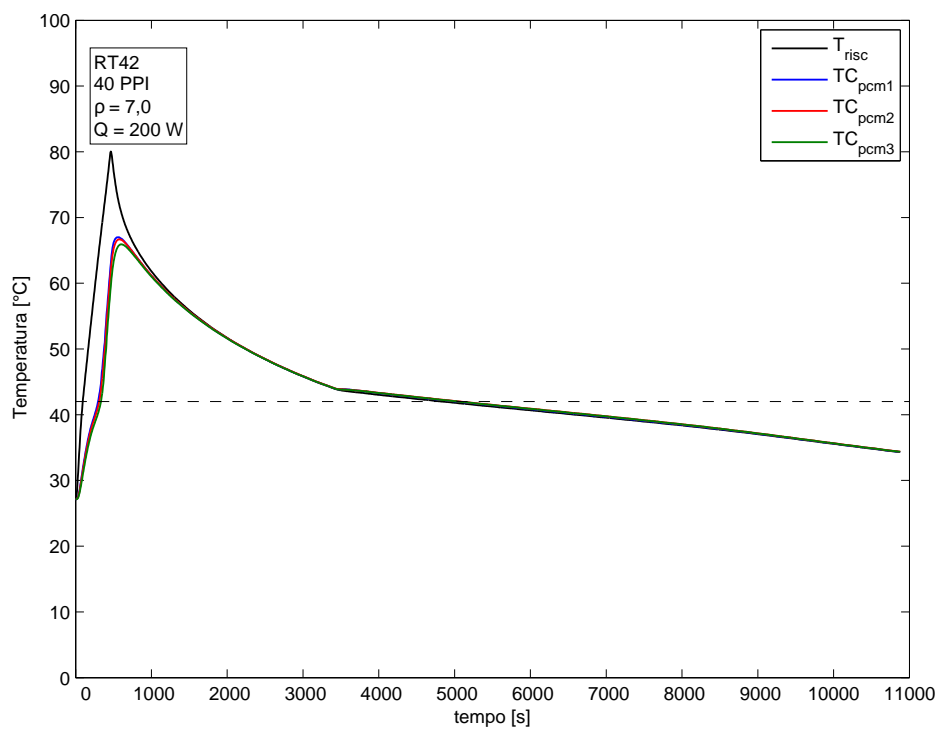


Figura 3.73: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

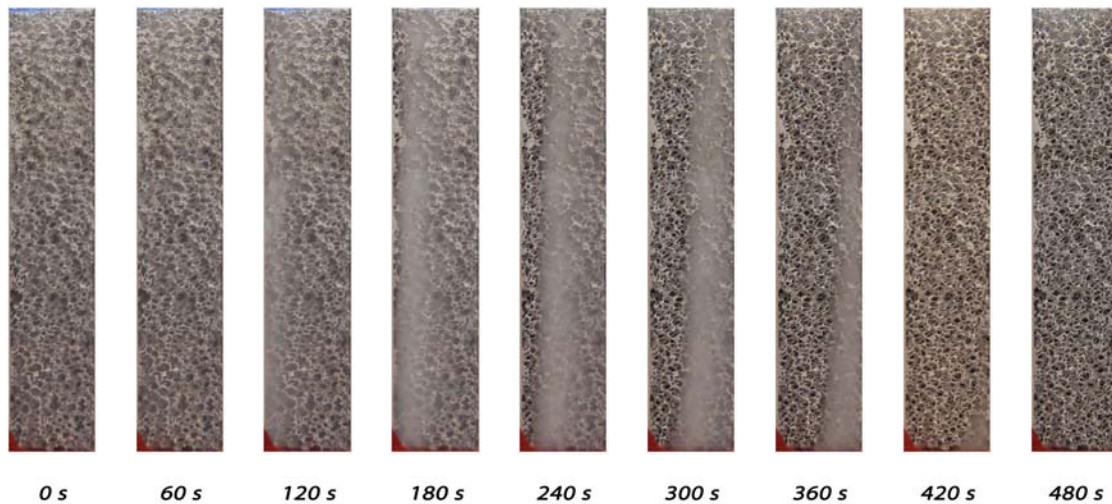


Figura 3.74: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT42 e potenza erogata 200 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT42, le prove sono state effettuate con la paraffina RT55. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.75* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.76* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.77* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

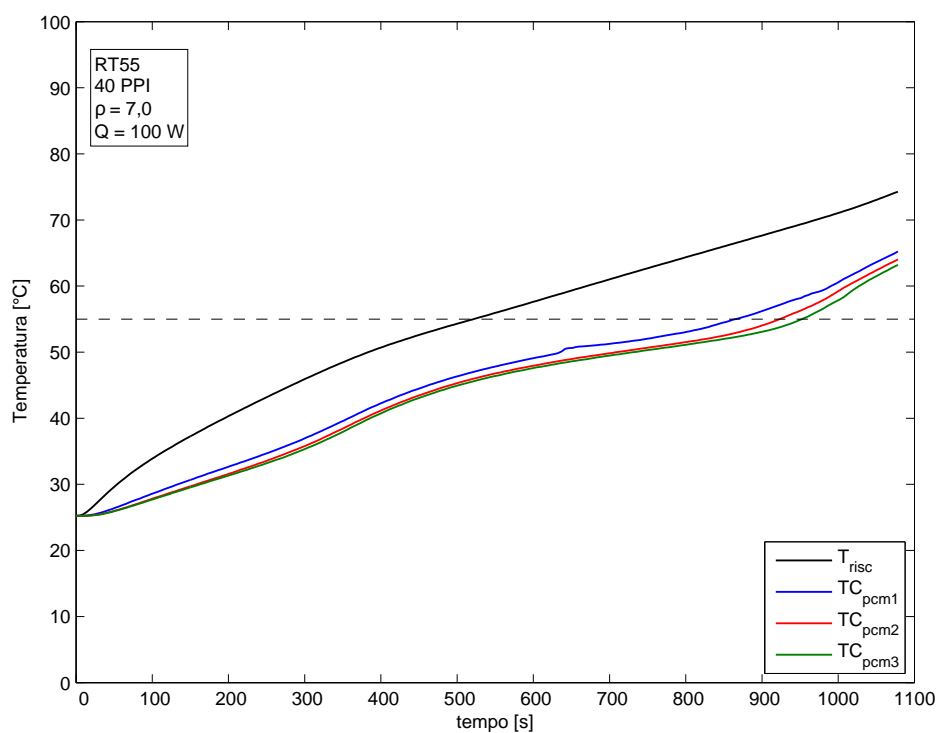


Figura 3.75: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

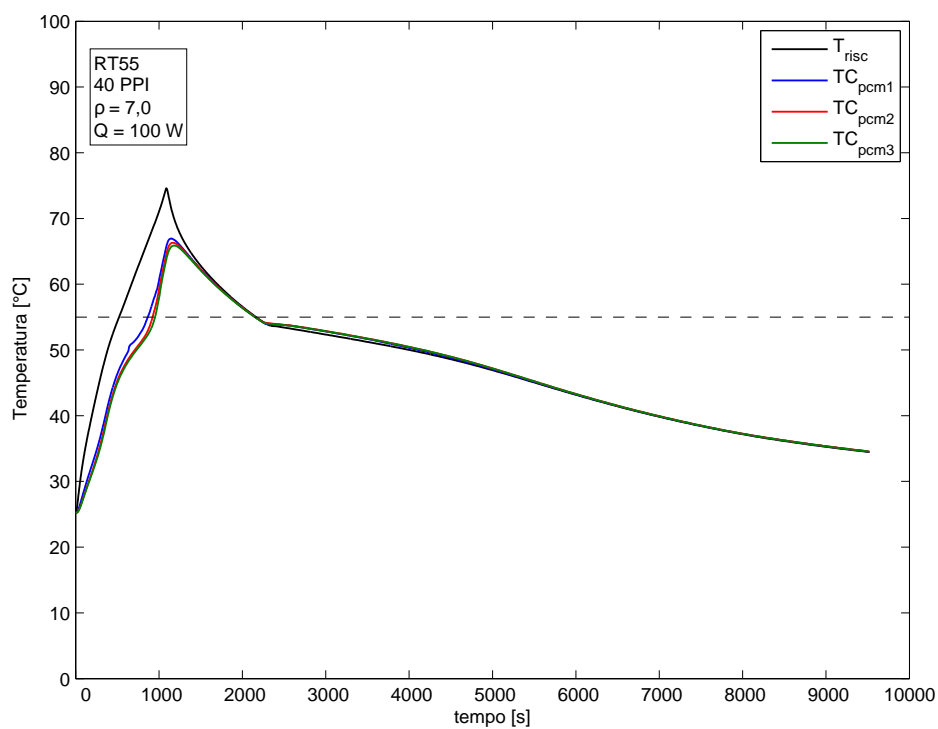


Figura 3.76: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

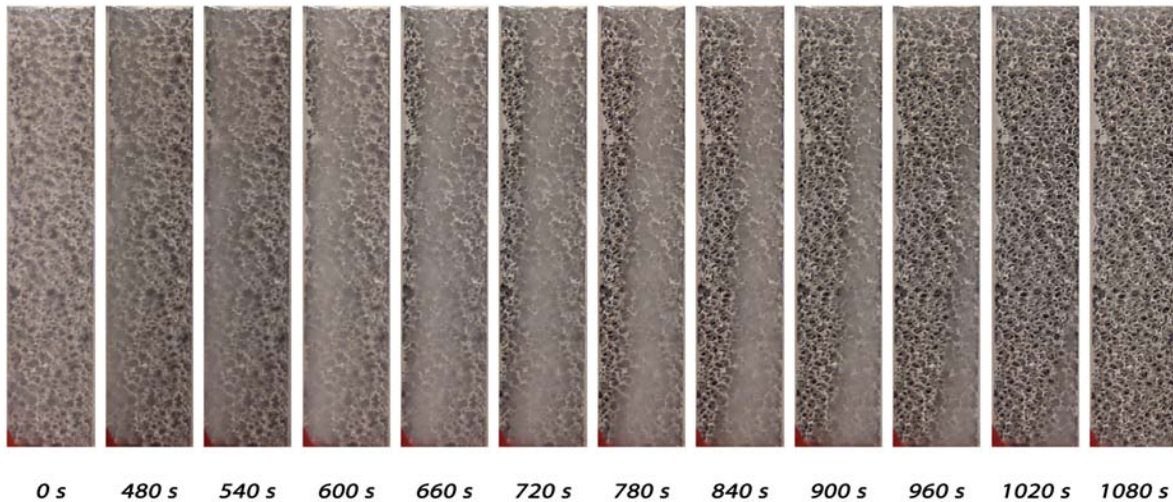


Figura 3.77: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 100 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.78* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.79* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.80* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

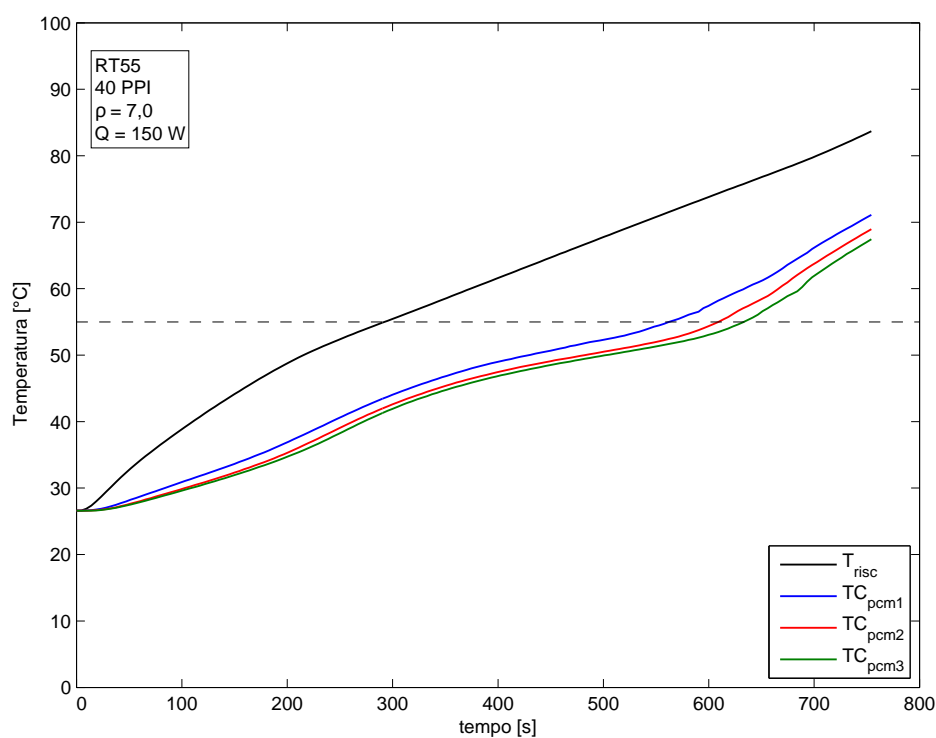


Figura 3.78: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

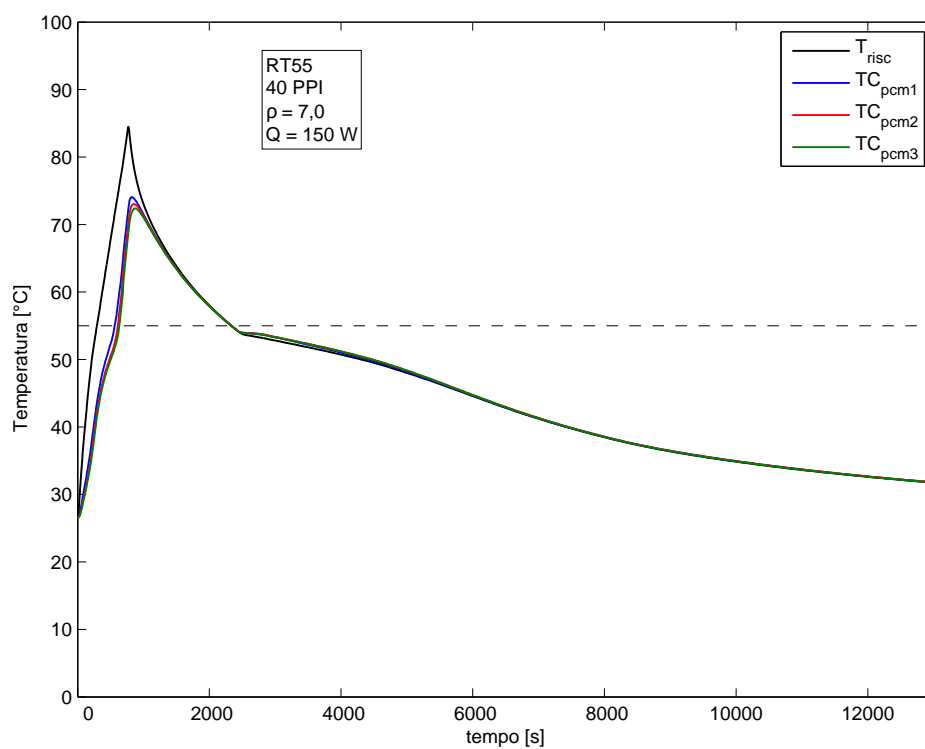


Figura 3.79: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

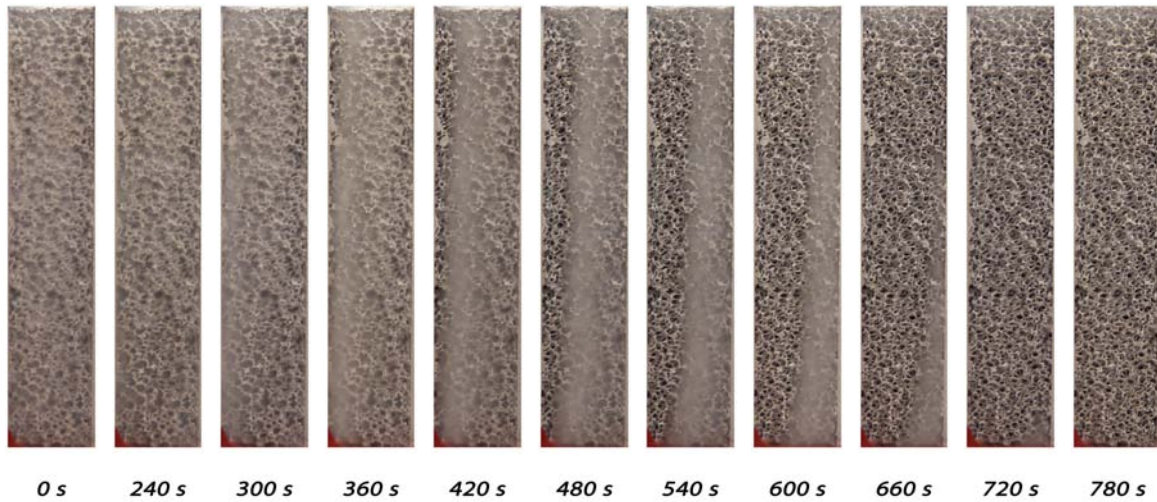


Figura 3.80: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 150 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT55 con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.81* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.82* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.83* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

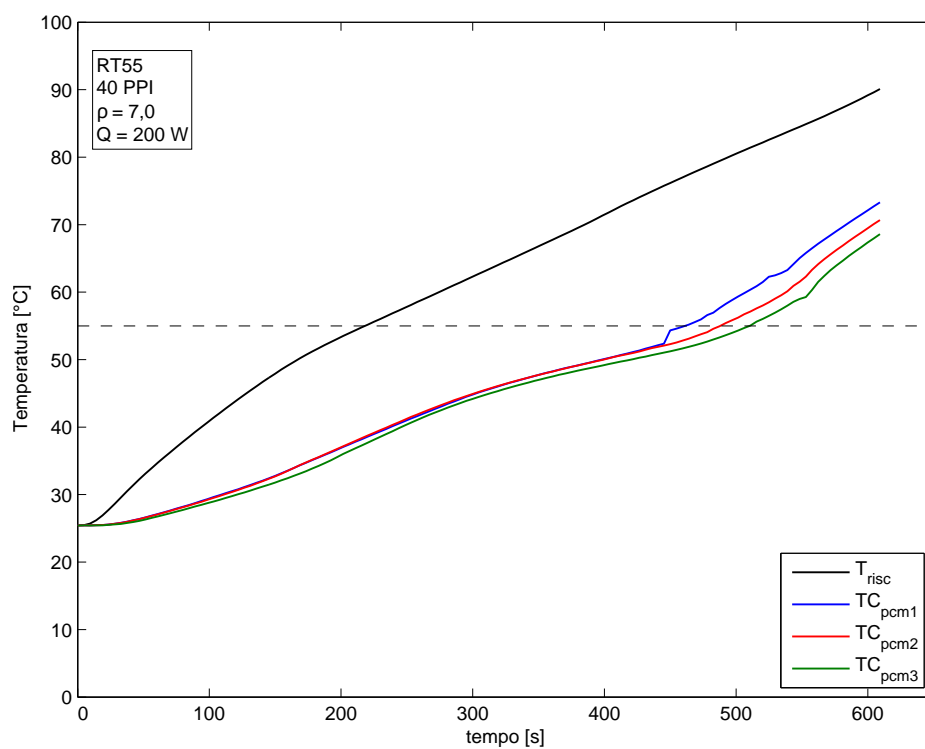


Figura 3.81: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

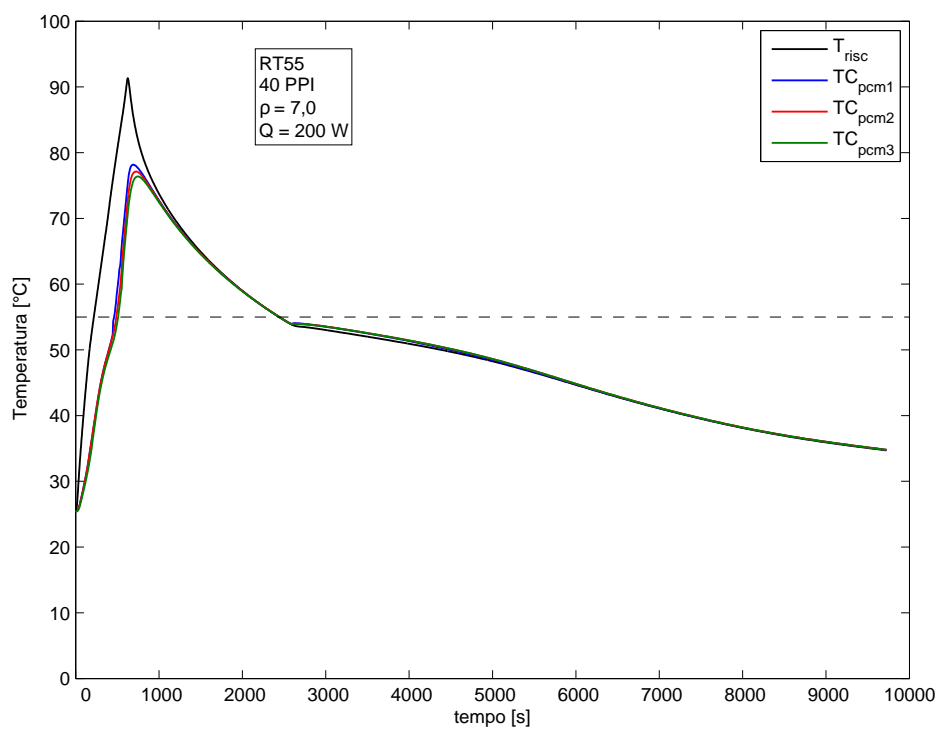


Figura 3.82: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

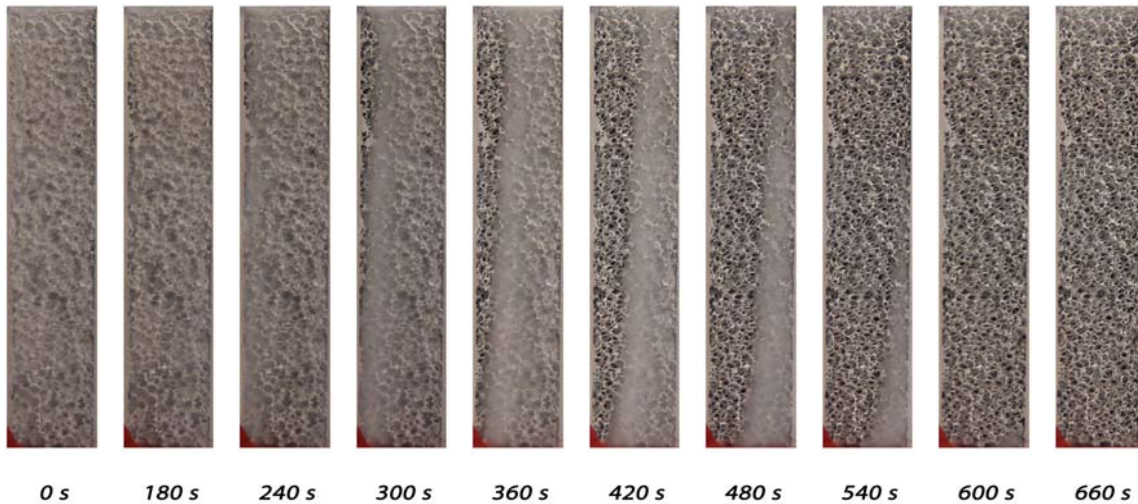


Figura 3.83: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT55 e potenza erogata 200 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 100 W

Dopo aver testato la paraffina RT55, le prove sono state effettuate con la paraffina RT64HC. Le figure inerenti alla prova a 100 W sono le seguenti:

- *Figura 3.84* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.85* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.86* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione (ogni 120 s in questo caso);

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

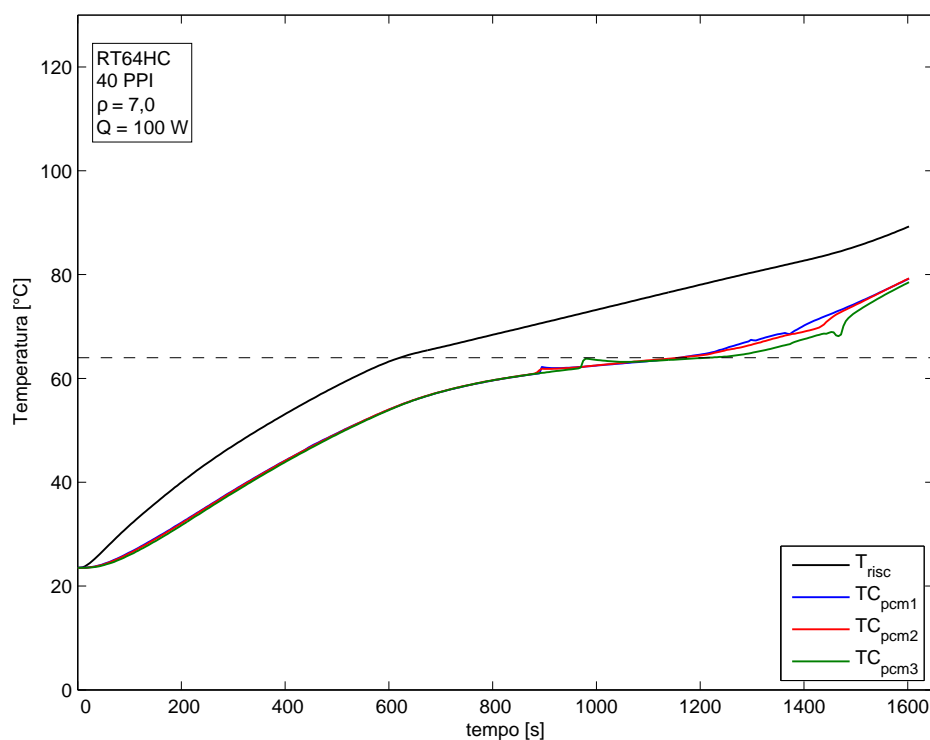


Figura 3.84: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fase di fusione.

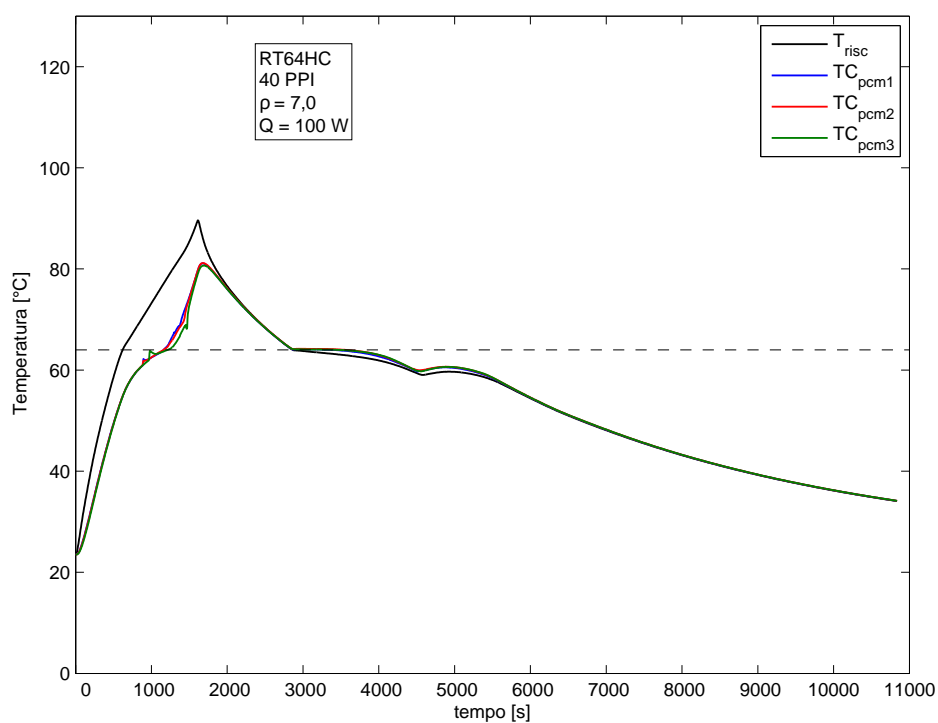


Figura 3.85: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 100 W; fasi di fusione e solidificazione.

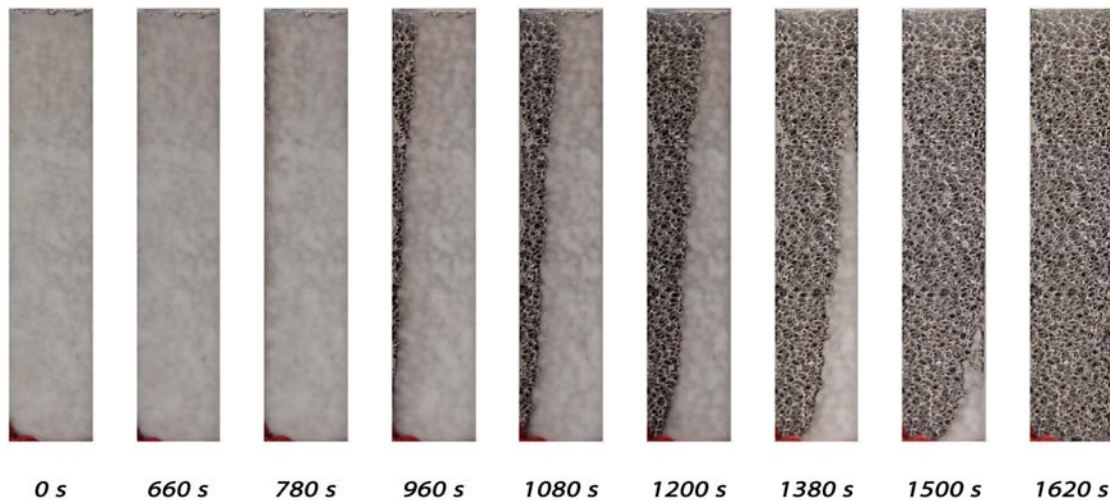


Figura 3.86: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 100 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 150 W

Le figure inerenti alla prova a 150 W sono le seguenti:

- *Figura 3.87* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.88* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.89* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

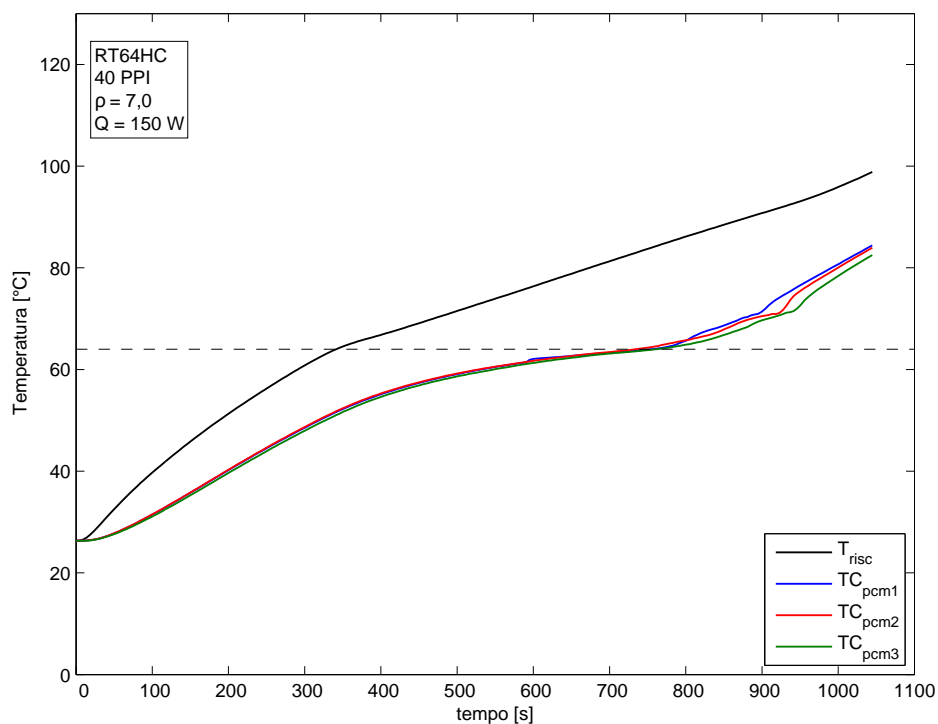


Figura 3.87: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fase di fusione.

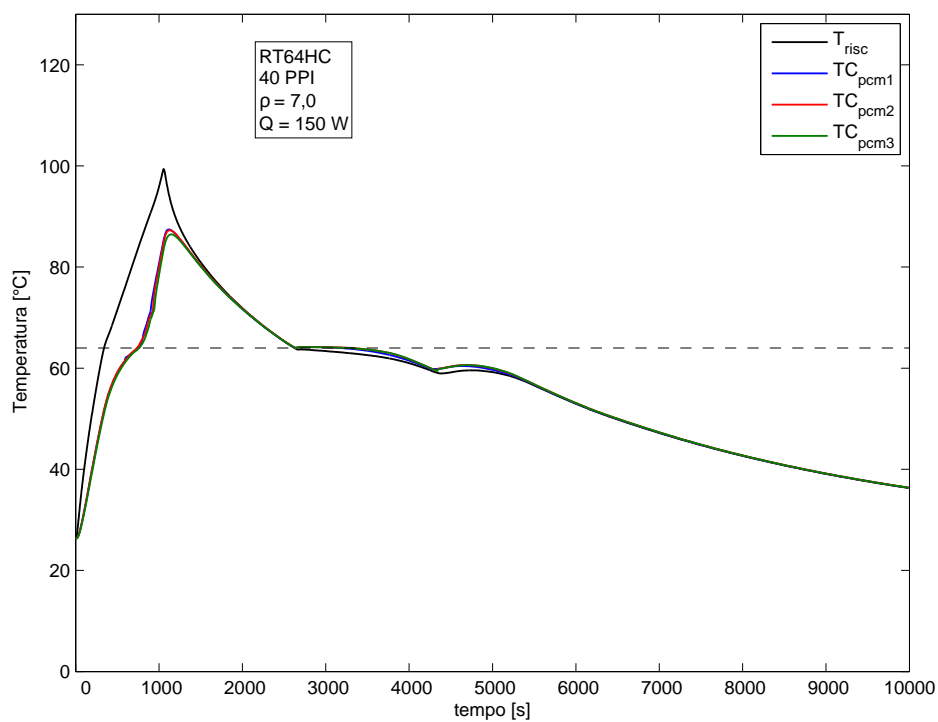


Figura 3.88: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 150 W; fasi di fusione e solidificazione.

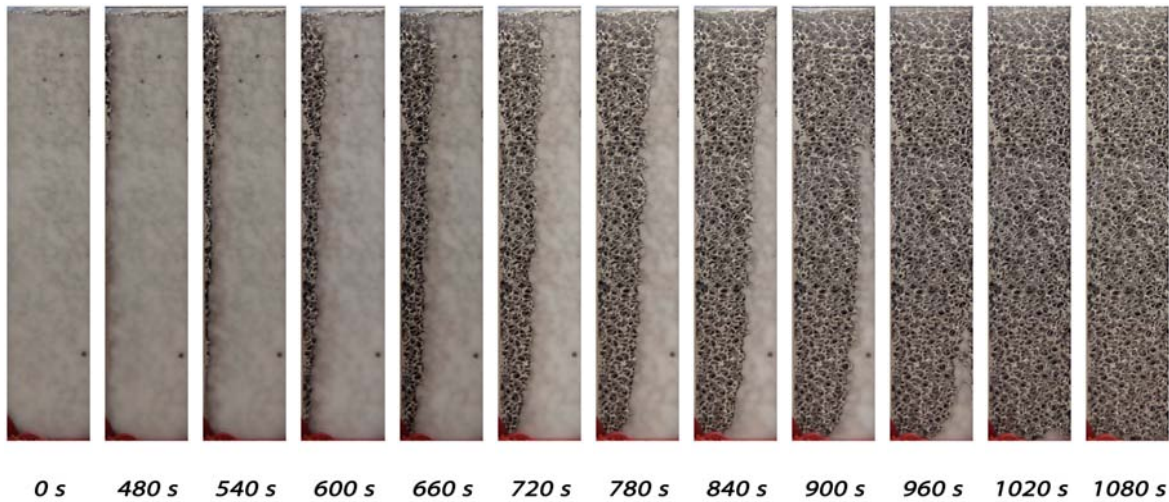


Figura 3.89: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 150 W.

Al-40-7,0 20 mm: Paraffina RT64HC con potenza termica 200 W

Le figure inerenti alla prova a 200 W sono le seguenti:

- *Figura 3.90* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante la fase di fusione;
- *Figura 3.91* rappresentante gli andamenti delle temperature delle termocoppie inguainate in inox e la temperatura media del lato riscaldatore durante l'intera prova;
- *Figura 3.92* rappresentante la sequenza temporale delle foto scattate durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questa prova sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.2.2*. Non viene riportato il grafico inerente alle termocoppie del lato riscaldatore durante la fusione per una questione di spazio: è stata comunque verificata l'uniformità del riscaldamento anche per questa prova. Anche la sequenza temporale delle foto scattate durante la solidificazione non viene riportata in quanto si tratta di un cambiamento di fase uniforme e visivamente identico a quello riportato in *Figura 3.12*.

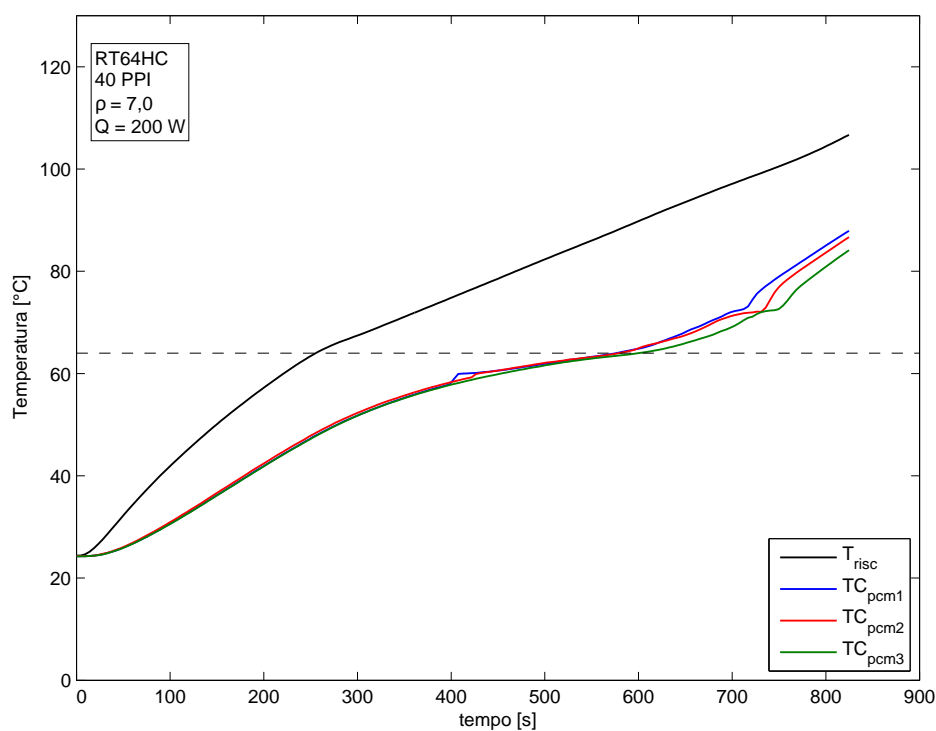


Figura 3.90: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fase di fusione.

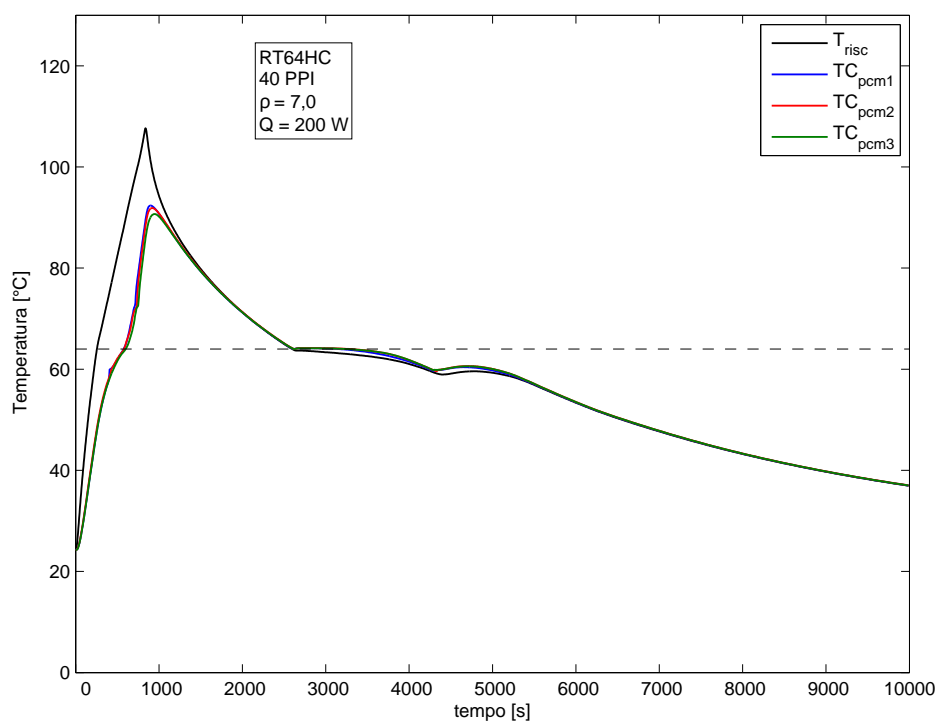


Figura 3.91: Andamento delle temperature nel tempo della paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm con potenza elettrica erogata di 200 W; fasi di fusione e solidificazione.

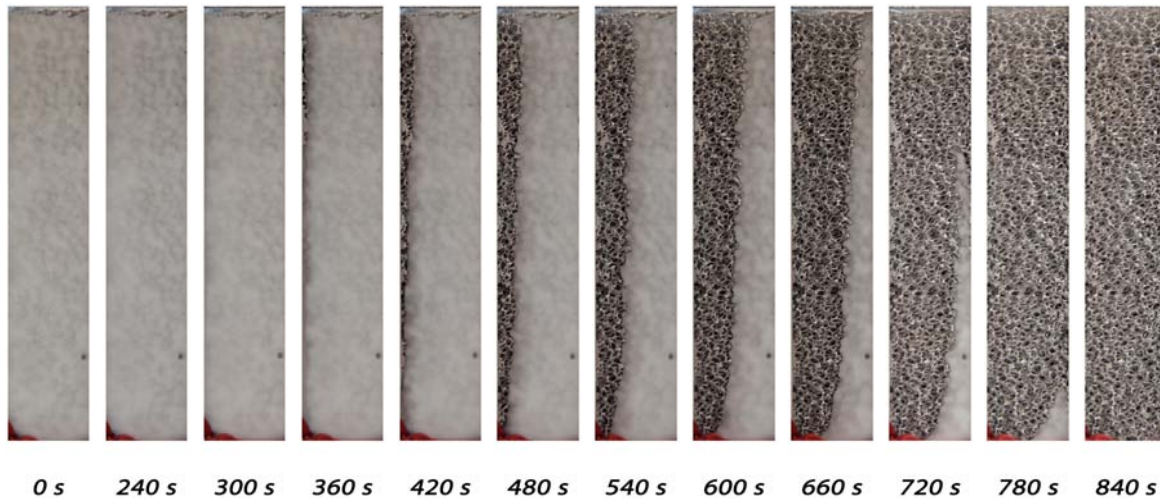


Figura 3.92: Sequenza durante la fusione per schiuma Al-40-7,0 20 mm con paraffina RT64HC e potenza erogata 200 W.

3.3 Confronti fra i moduli di prova

Come descritto al *Paragrafo* 3.1, sono stati effettuati dei confronti fra le varie prove. In particolare, in questo paragrafo ci si focalizza sul lato del riscaldatore relativo ai moduli di prova: la ragione risiede nel fatto che l'argomento principale di questa tesi riguarda il raffreddamento passivo dei componenti elettronici. A tal proposito, l'obiettivo degli studi condotti con i *PCM* è quello di mantenere il componente elettronico ad una temperatura più bassa possibile. In questo caso, il lato del modulo a contatto con il riscaldatore funge da componente elettronico, perciò i grafici che seguono sono esclusivamente relativi a questo componente. Verranno proposti confronti fra potenze, paraffine e moduli di prova: in ogni caso il modulo che manterrà il lato del riscaldatore alla temperatura minore potrà essere considerato quello opportuno allo scopo di questa tesi. Per poter confrontare le varie prove è stata considerata la differenza di temperatura tra la temperatura media del lato riscaldatore T_{risc} e la temperatura dell'ambiente esterno (valore di T_{risc} all'istante iniziale $t=0$ della prova): questo parametro verrà indicato con ΔT_{amb} e corrisponde all'ordinata dei grafici riportati di seguito.

3.3.1 Confronti fra le potenze termiche a parità di modulo di prova e paraffina

Di seguito vengono riportati i grafici in cui si confrontano le potenze termiche relative allo stesso modulo. Poichè anche in questo caso gli andamenti delle curve sono simili, si farà una trattazione generale in questo paragrafo. Per quanto riguarda il modulo di prova senza schiuma, sono state effettuate prove solo alla minima potenza (per le

ragioni descritte al *Paragrafo 3.2.1*), perciò in questo paragrafo si riportano solo confronti relativi ai moduli con schiuma metallica. Come lecito pensare, la potenza erogata dal riscaldatore influenza la temperatura raggiunta dalle termocoppie del riscaldatore. In particolare, la differenza di temperatura con l'ambiente esterno ΔT_{amb} risente della potenza termica erogata in modo direttamente proporzionale: la pendenza delle curve aumenta con l'aumentare della potenza termica fornita. A parità di modulo e paraffina, ma aumentando la potenza termica, la fase di fusione ha una durata minore e comporta temperature maggiori. In ogni caso, tutte le curve cambiano pendenza durante la fusione, come descritto al *Paragrafo 3.2*: ovviamente questo cambiamento si verifica prima se la potenza termica fornita al modulo è maggiore.

Modulo con schiuma Al-5-8,0 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.93* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT42 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.94* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT55 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.95* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT64HC durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.1*.

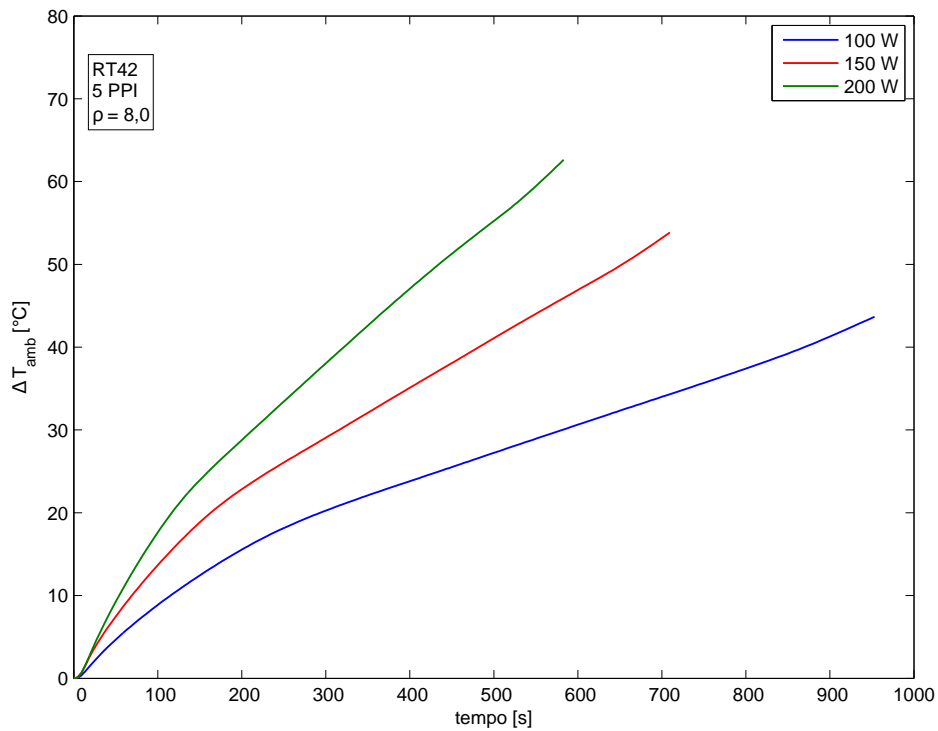


Figura 3.93: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

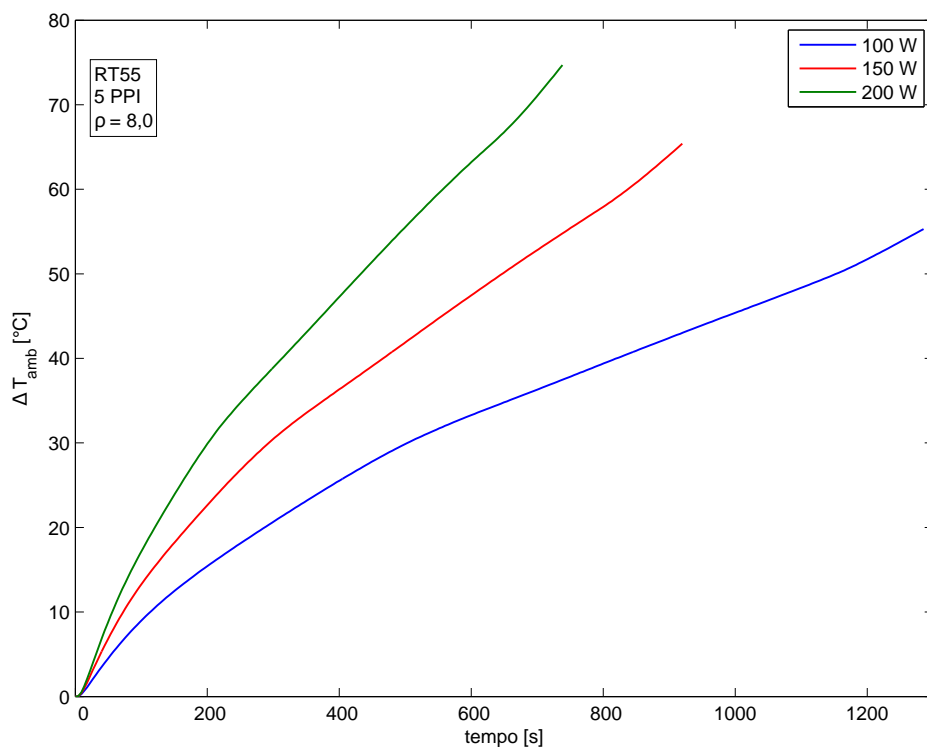


Figura 3.94: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

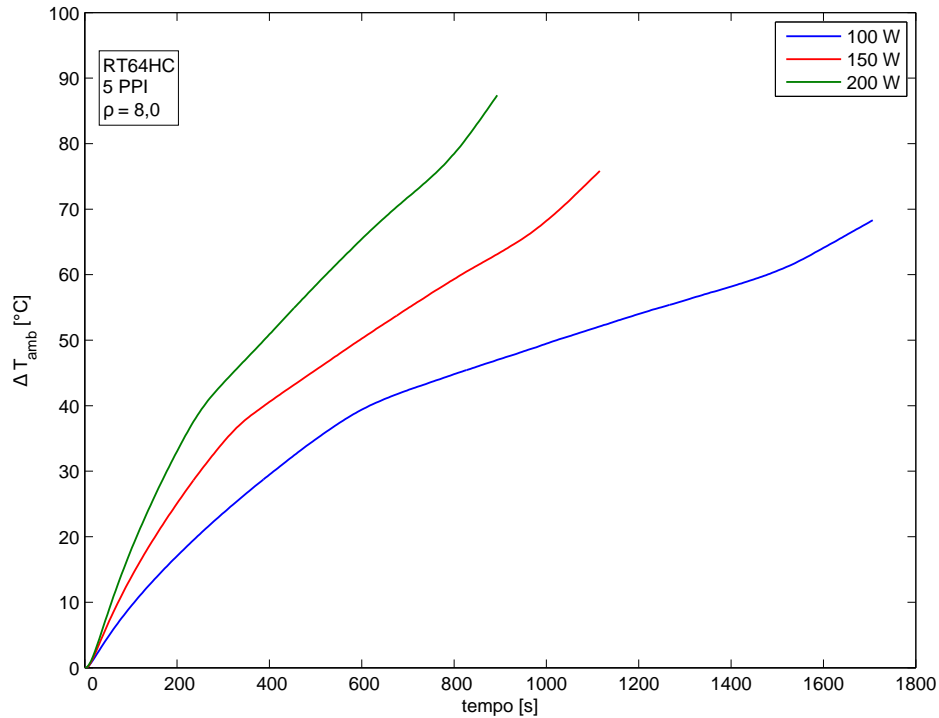


Figura 3.95: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-5-8,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Modulo con schiuma Al-10-7,4 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.96* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT42 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.97* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT55 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.98* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT64HC durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.1*.

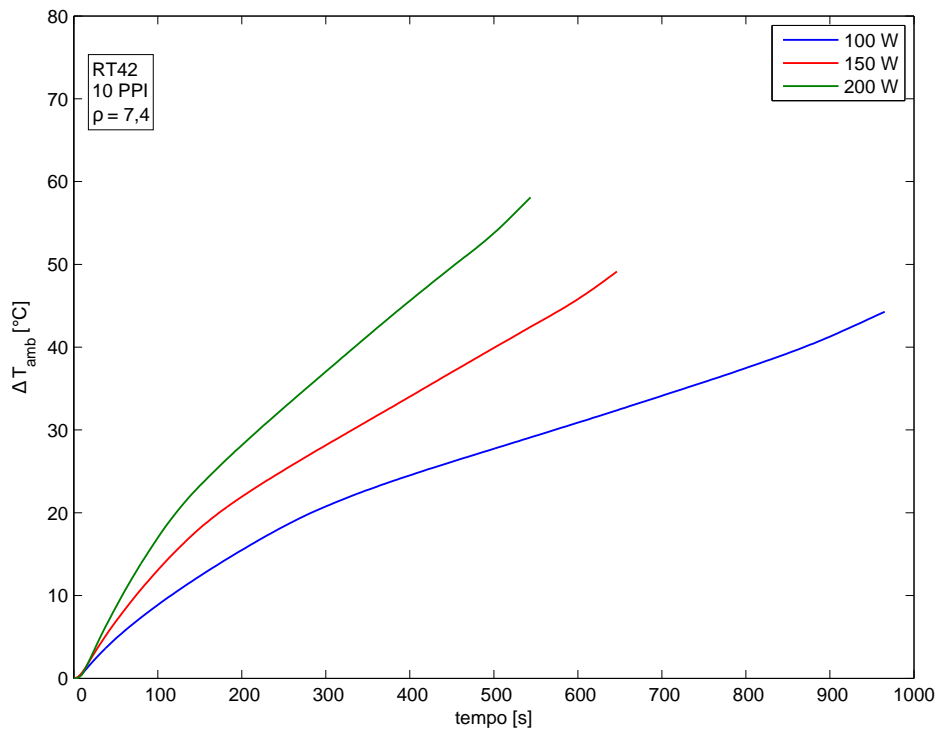


Figura 3.96: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

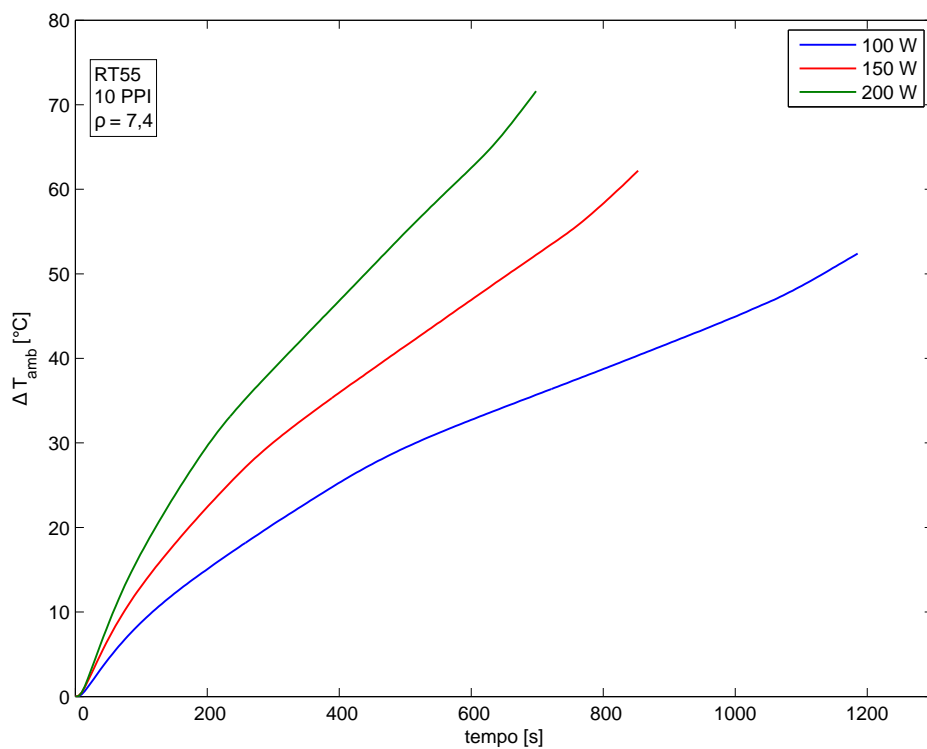


Figura 3.97: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

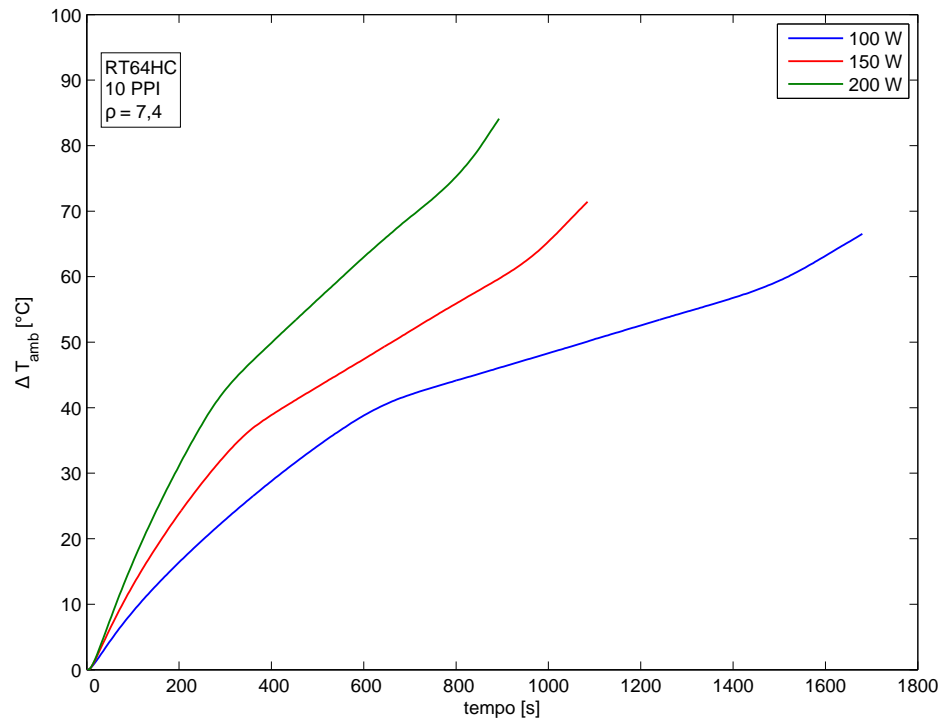


Figura 3.98: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-10-7,4 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Modulo con schiuma Al-40-7,0 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.99* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT42 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.100* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT55 durante la fase di fusione;
- *Figura 3.101* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con la paraffina RT64HC durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.1*.

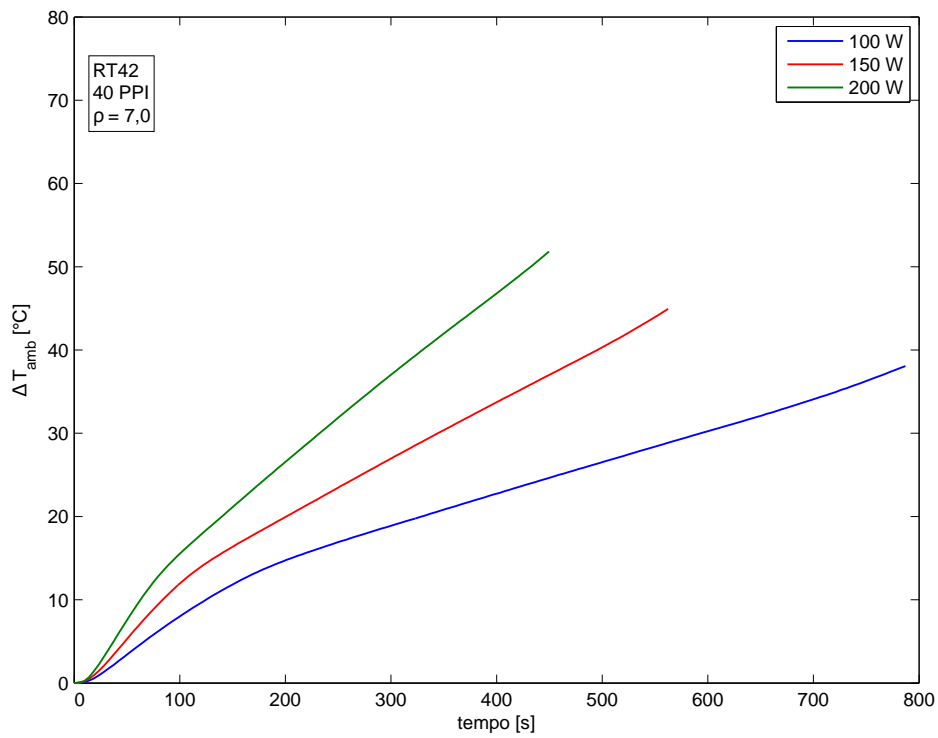


Figura 3.99: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

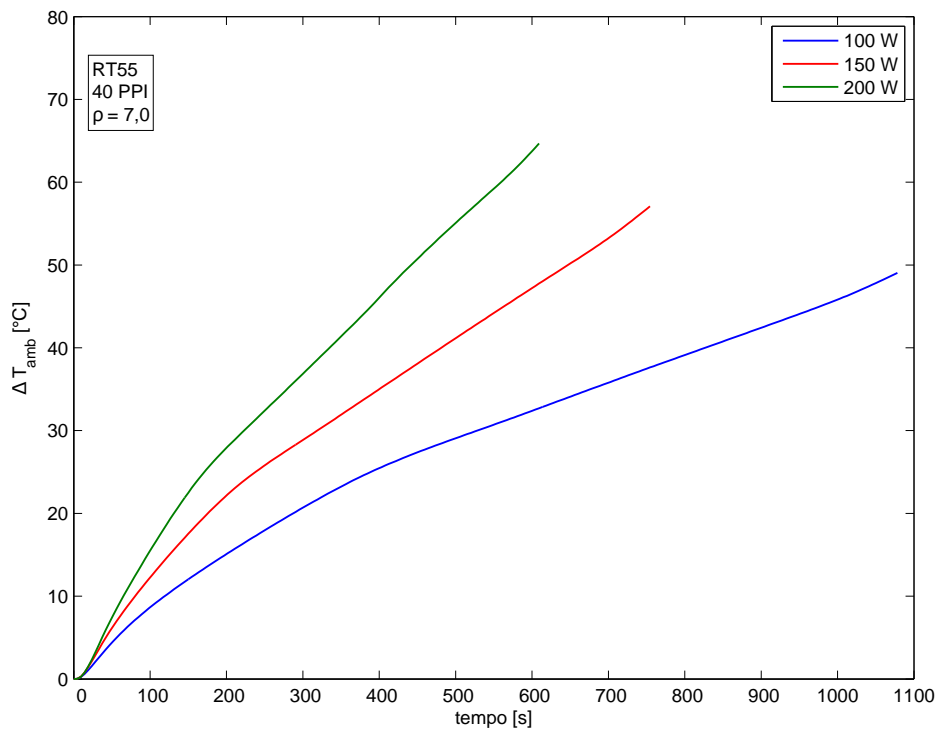


Figura 3.100: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

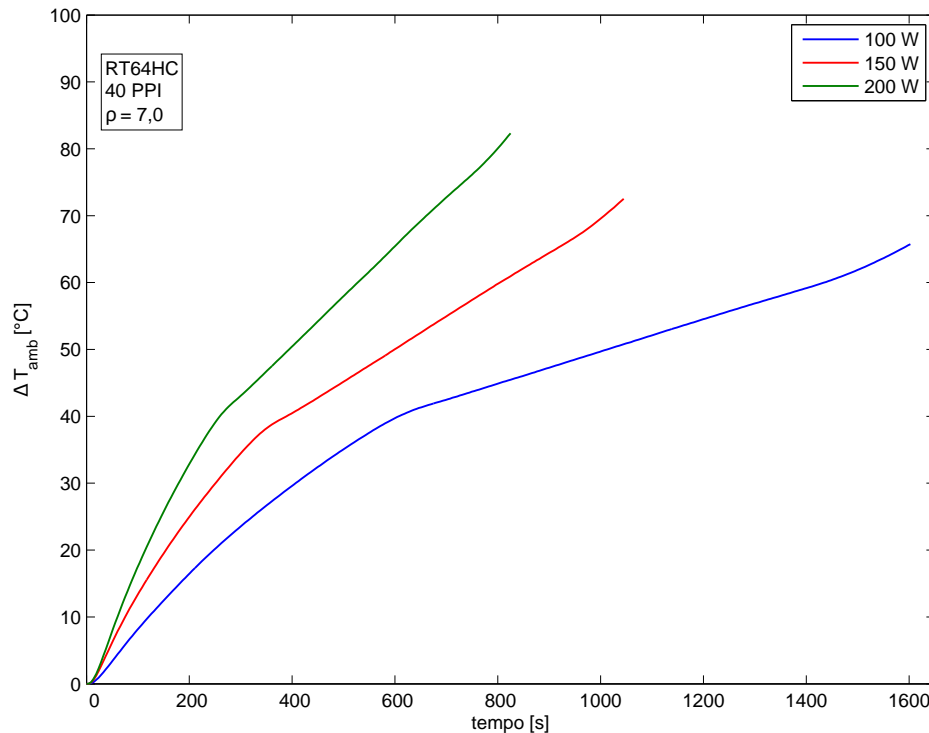


Figura 3.101: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC inserita nella schiuma Al-40-7,0 20 mm per le tre potenze considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

3.3.2 Confronti fra le paraffine a parità di modulo di prova e potenza termica

Di seguito vengono riportati i grafici in cui si confrontano le paraffine. Poichè anche in questo caso gli andamenti delle curve sono simili, si farà una trattazione generale in questo paragrafo. Osservando i grafici proposti, si nota come la paraffina utilizzata influenzi la temperatura raggiunta dalle termocoppie del riscaldatore. In particolare, durante il processo di fusione, la differenza di temperatura con l'ambiente esterno ΔT_{amb} raggiunge temperature inferiori utilizzando paraffine con bassa temperatura di fusione. Ovviamente, si raggiungono temperature inferiori nei moduli dotati di schiuma metallica. Focalizzandosi su questi ultimi, anche la durata della fusione diminuisce con le paraffine aventi temperatura di fusione più bassa. A tal proposito, per quanto riguarda le applicazioni elettroniche, bisognerà tener conto della ciclicità delle fasi di fusione e solidificazione: se il componente elettronico generasse potenza termica per tempi brevi, le paraffine con bassa temperatura di fusione sarebbero più adatte; al contrario, per durate importanti della fase di fusione, servirebbero *PCM* con temperature di fusione maggiori. In ogni caso, tutte le curve cambiano pendenza durante la fusione, come descritto al *Paragrafo 3.2*: come lecito pensare, questo cambiamento si verifica prima se la paraffina utilizzata ha una temperatura di fusione minore.

Modulo con schiuma Al-5-8,0 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.102* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.103* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.104* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.2*.

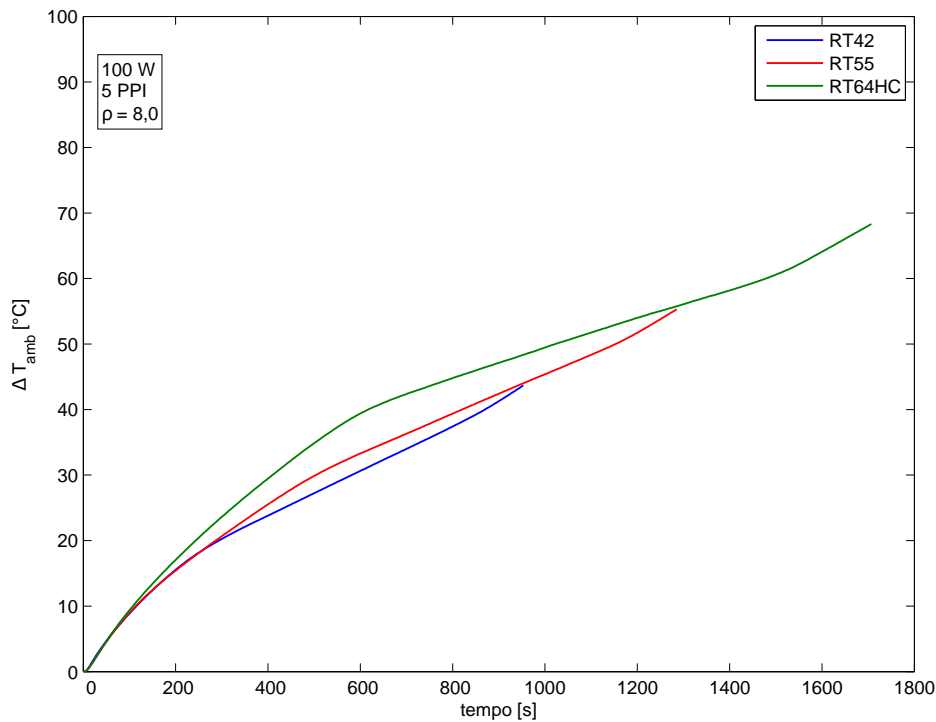


Figura 3.102: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-5-8,0 20 mm e potenza 100 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

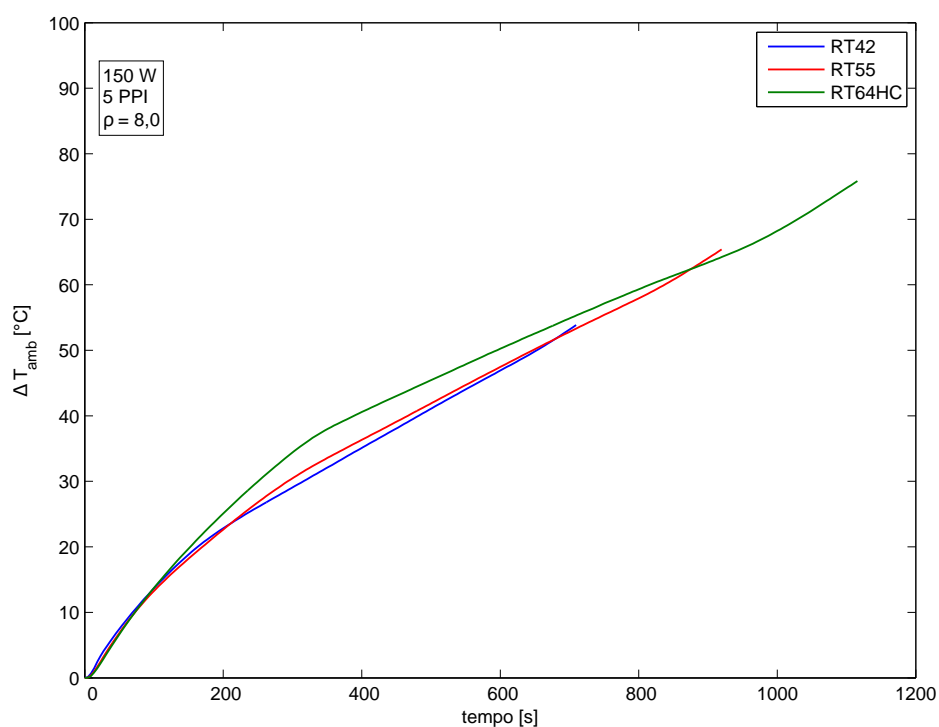


Figura 3.103: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-5-8,0 20 mm e potenza 150 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

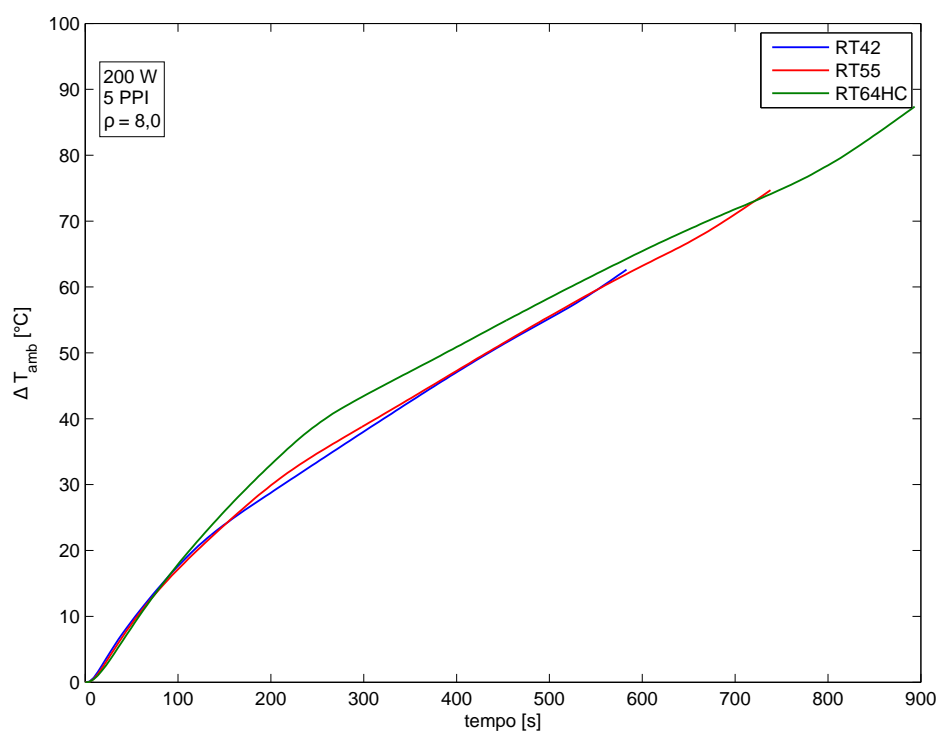


Figura 3.104: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-5-8,0 20 mm e potenza 200 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Modulo con schiuma Al-10-7,4 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.105* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.106* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.107* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.2*.

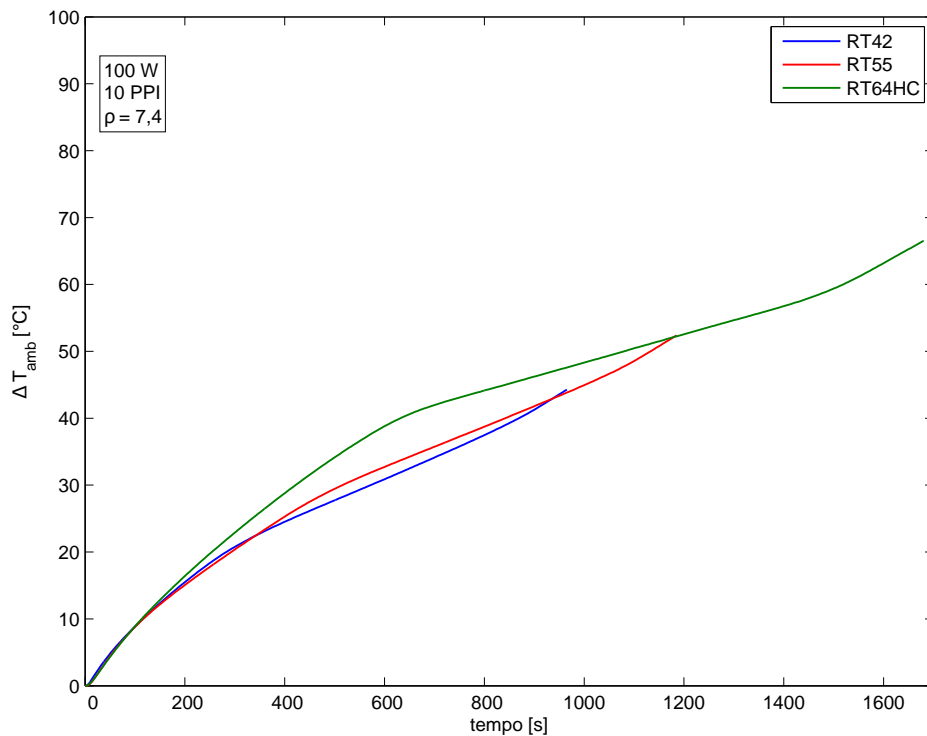


Figura 3.105: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-10-7,4 20 mm e potenza 100 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

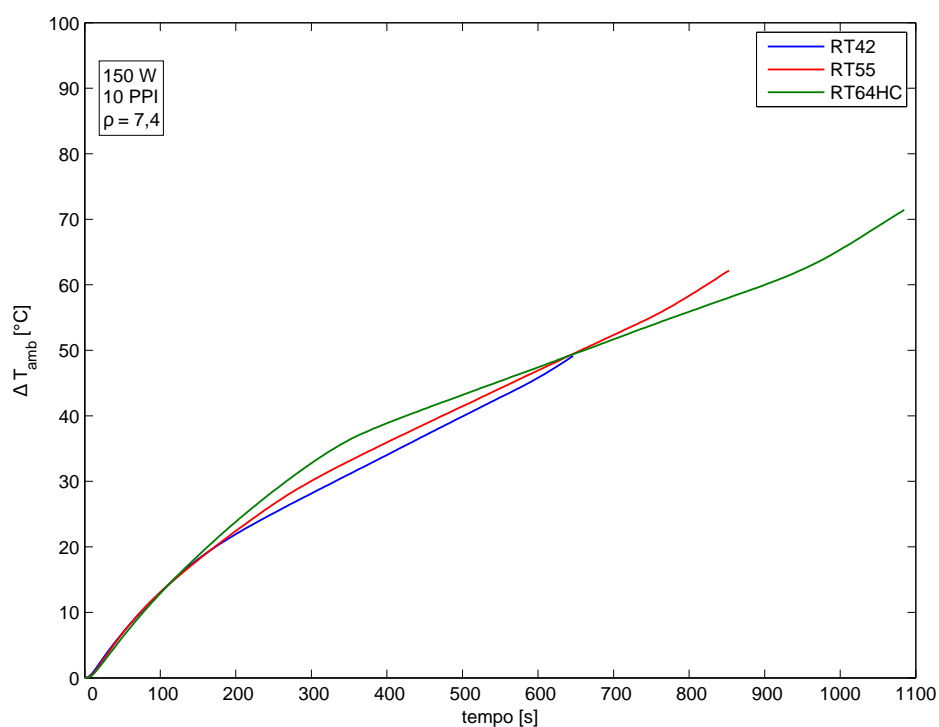


Figura 3.106: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-10-7,4 20 mm e potenza 150 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

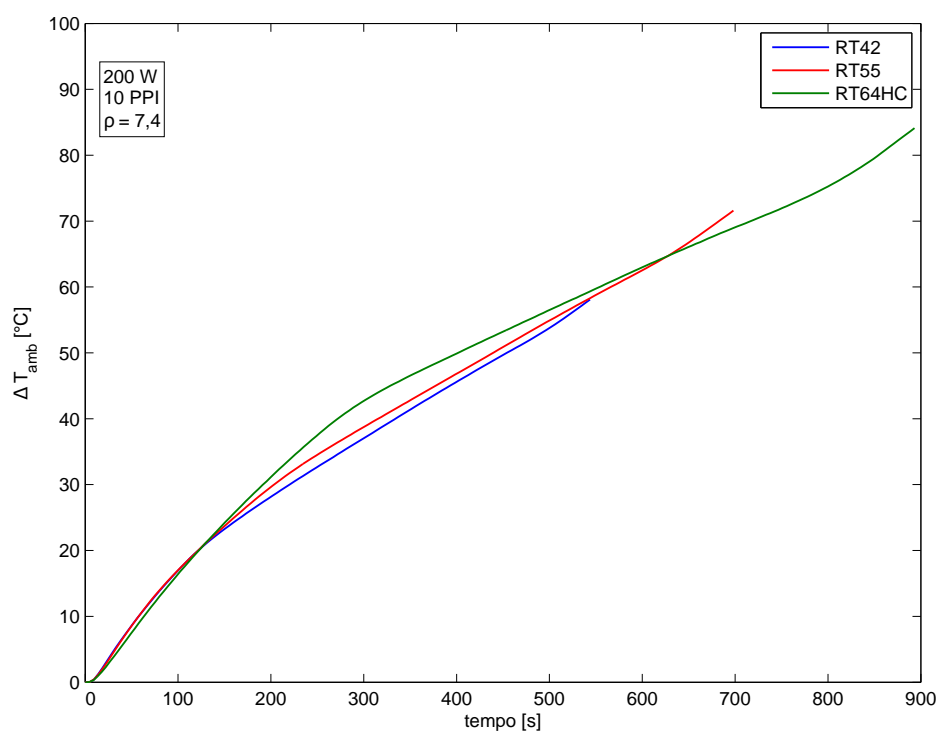


Figura 3.107: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-10-7,4 20 mm e potenza 200 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Modulo con schiuma Al-40-7,0 20 mm

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.108* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.109* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.110* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.2*.

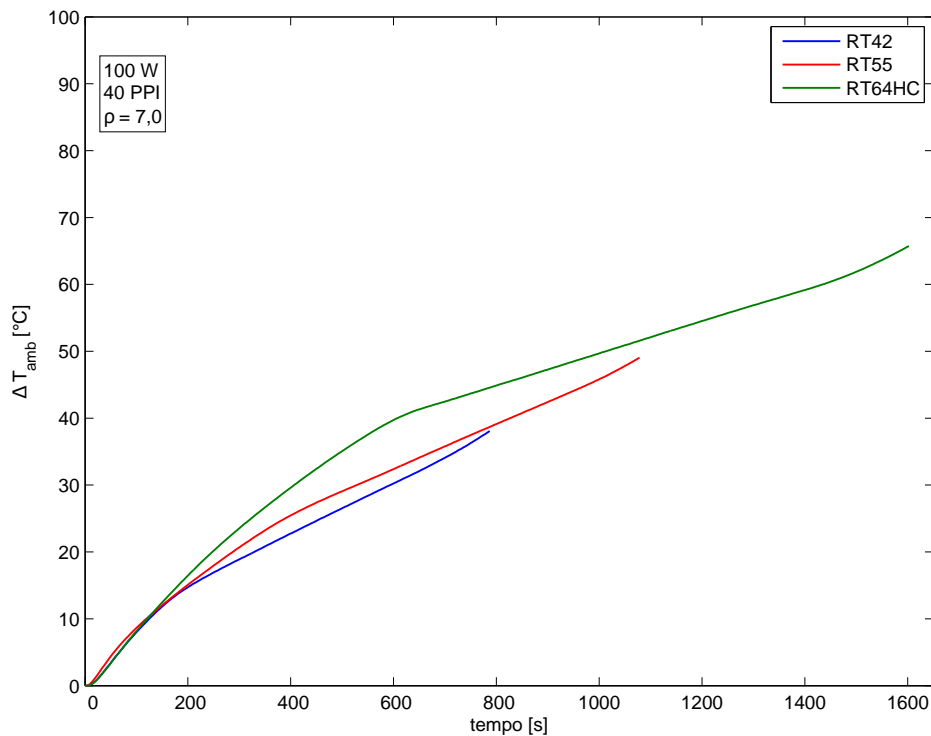


Figura 3.108: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-40-7,0 20 mm e potenza 100 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

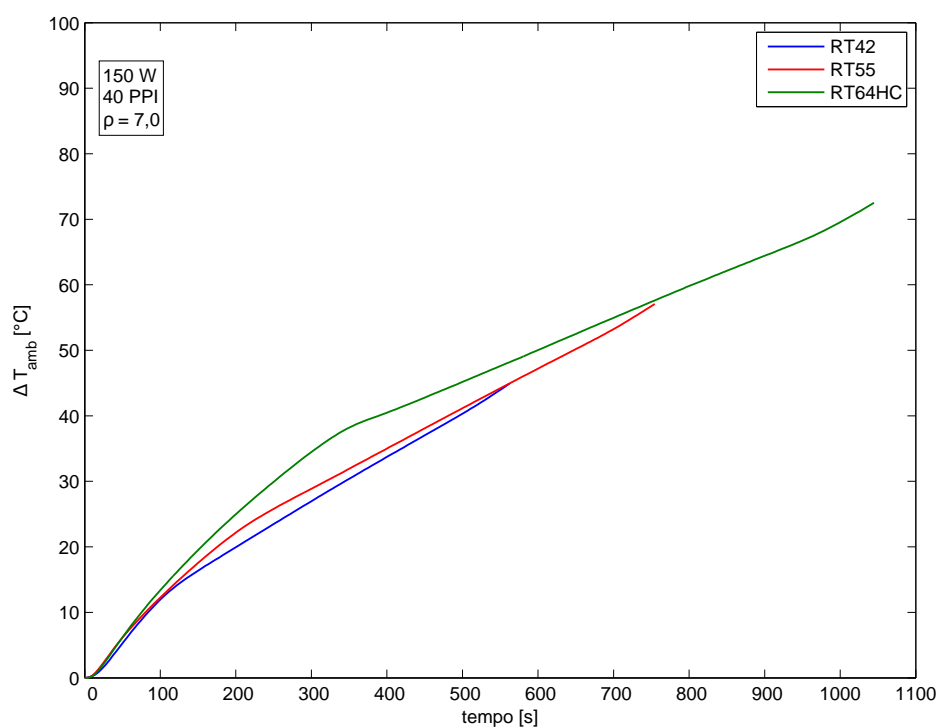


Figura 3.109: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-40-7,0 20 mm e potenza 150 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

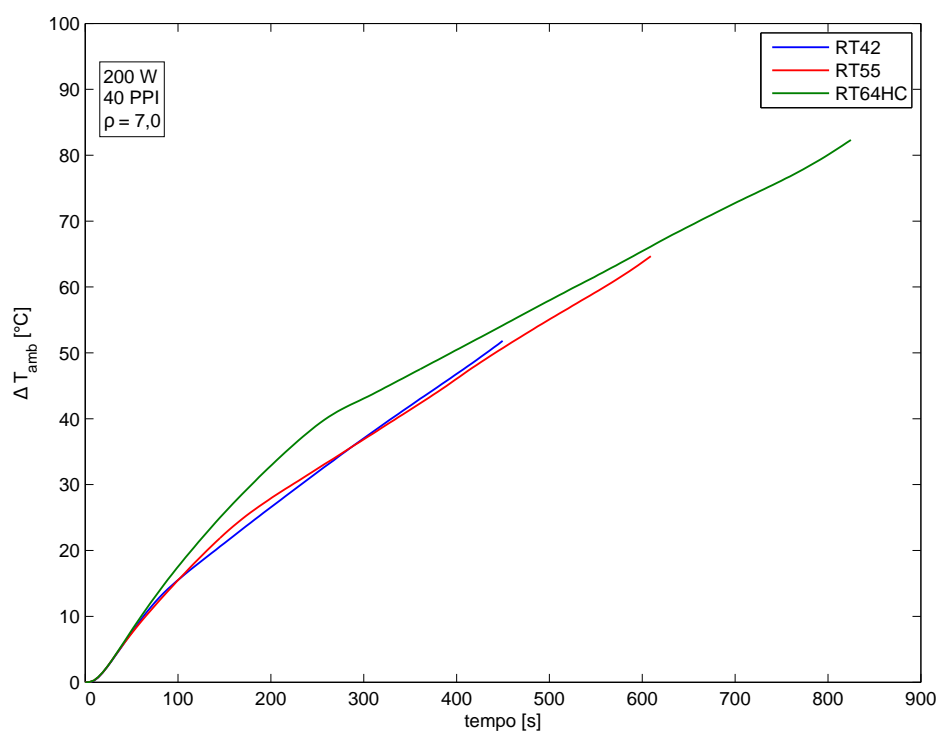


Figura 3.110: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per i moduli con schiuma Al-40-7,0 20 mm e potenza 200 W in funzione delle paraffine considerate; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

3.3.3 Confronti fra i moduli di prova a parità di potenza termica e paraffina

Di seguito vengono riportati i grafici in cui si confrontano i moduli di prova a parità di potenza e paraffina. Poichè anche in questo caso gli andamenti delle curve sono simili, si farà una trattazione generale in questo paragrafo. Visto che con il modulo senza schiuma è stata effettuata solo la prova con la paraffina RT42 e potenza termica 100 W, il confronto con questo modulo viene riportato solo nella *Figura 3.111*. Da questo grafico si nota immediatamente come l'incremento di conduttività termica del sistema associato alle schiume metalliche influenzi positivamente la temperatura raggiunta dalla parete del lato del riscaldatore dei moduli di prova: la fase di fusione impiega meno tempo (come anche la solidificazione) e le temperature raggiunte sono molto inferiori rispetto al caso senza schiuma metallica. Confermato questo punto, ci si può focalizzare sulle diverse schiume metalliche utilizzate, perciò bisogna fare riferimento a quanto descritto al *Paragrafo 1.3.3*. I due parametri più importanti che caratterizzano le schiume metalliche sono la porosità ε e la densità di pori ω : in questo caso, le schiume usate in questa tesi sono caratterizzate da porosità ε simile, mentre le densità di pori ω variano molto. Osservando i grafici si nota che non ci sono particolari differenze fra le tre schiume adottate: gli andamenti della temperatura media del riscaldatore rispetto alla temperatura ambiente sono molto simili, al massimo differiscono di pochi gradi. Le prestazioni migliori in termini di raffreddamento del lato del riscaldatore si riscontrano con la schiuma Al-40-7,0 20 mm per le paraffine RT42 e RT55, mentre con la paraffina RT64HC la schiuma più adatta è la Al-10-7,4 20 mm. In ogni caso si parla sempre di pochi gradi di differenza e non c'è una schiuma che prevale sulle altre in tutte le condizioni operative. Effettivamente, poichè le schiume hanno densità relative comprese fra il 7 e l'8%, la quantità di *PCM* all'interno dei moduli è molto simile perciò la conduttività termica dei sistemi è praticamente la stessa. L'influenza della densità di pori non è molto evidente in questi casi: a livello teorico, le schiume con bassa densità di pori hanno pori con diametro più grande, in cui è più probabile che si instaurino moti convettivi che rendono lo scambio termico più efficiente. In questo caso, i dati sperimentali non rispettano molto la teoria: bisogna considerare però che i moti convettivi si annullano per diametri dei pori inferiori ai 5 mm.

Moduli con paraffina RT42

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.111* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;

- *Figura 3.112* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.113* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.3*.

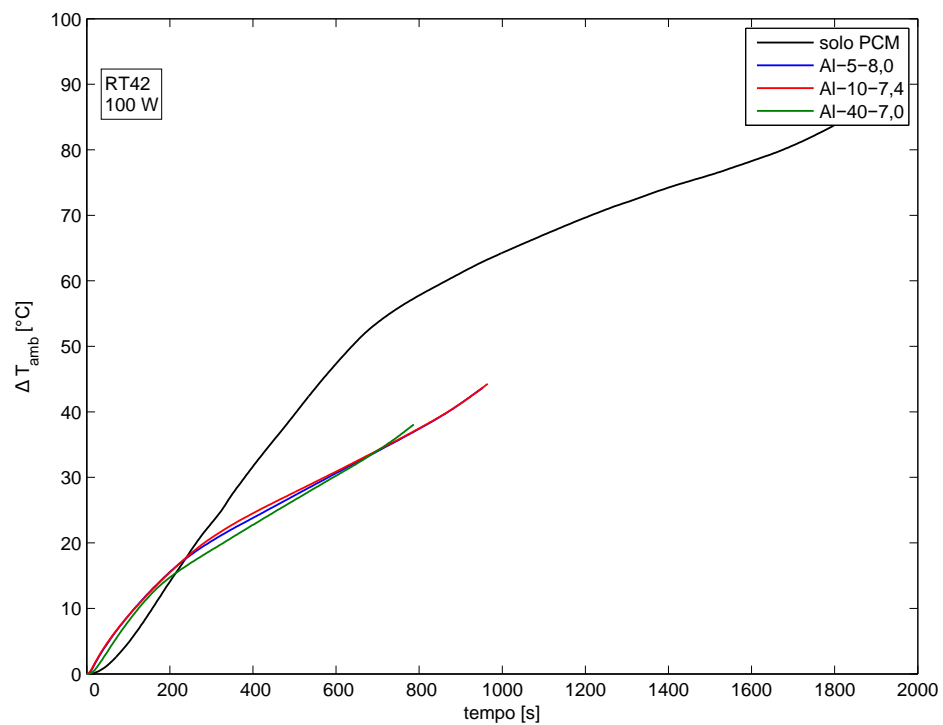


Figura 3.111: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 e potenza 100 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

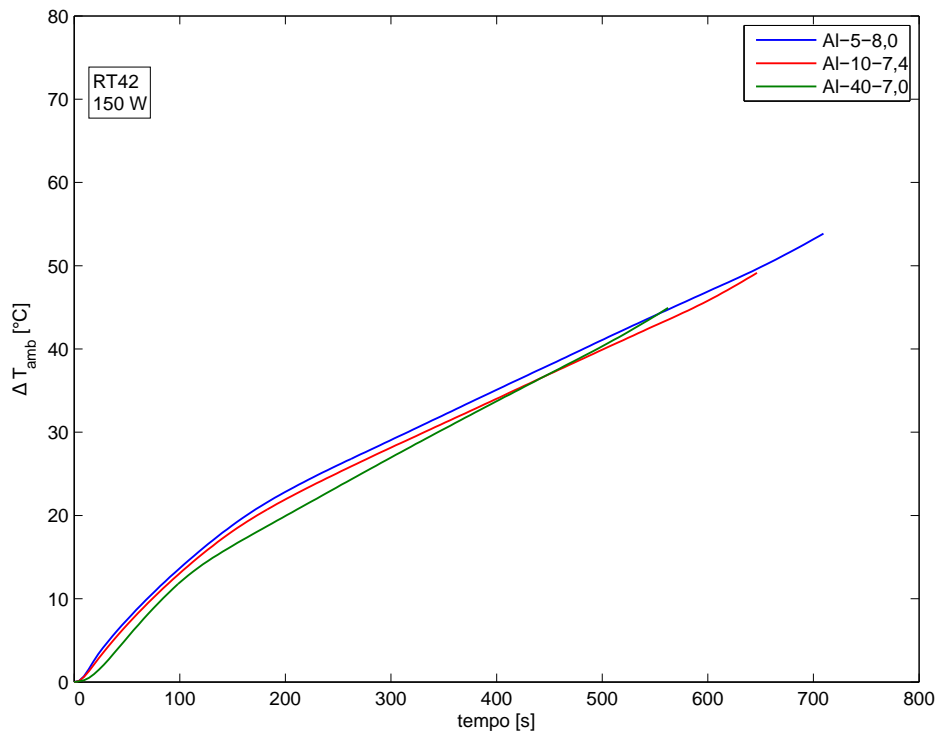


Figura 3.112: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 e potenza 150 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

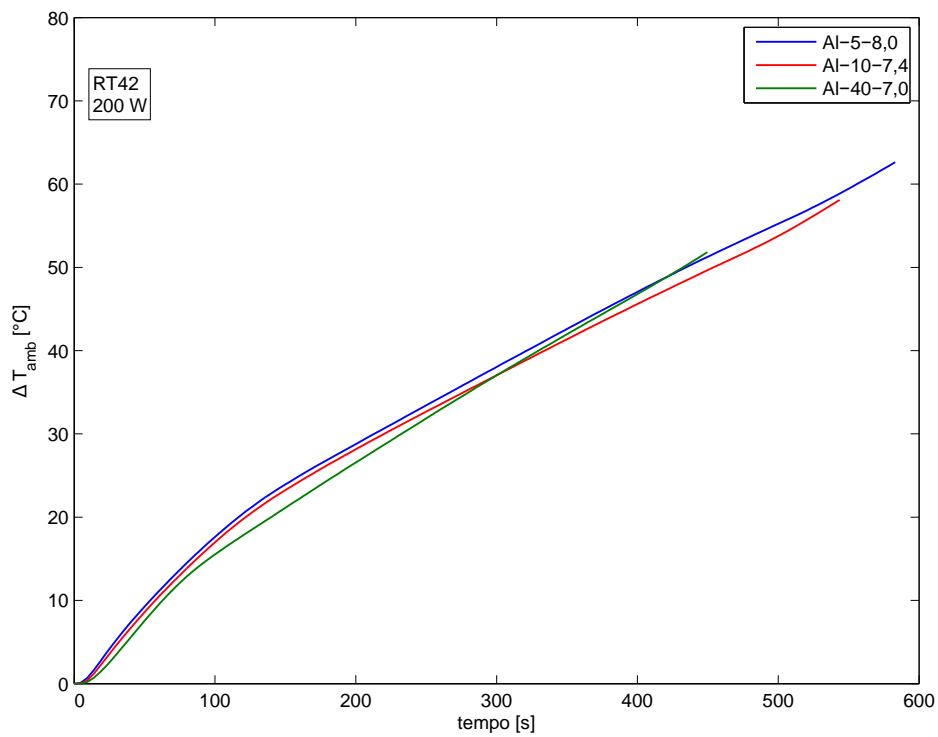


Figura 3.113: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT42 e potenza 200 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Moduli con paraffina RT55

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.114* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.115* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.116* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.3*.

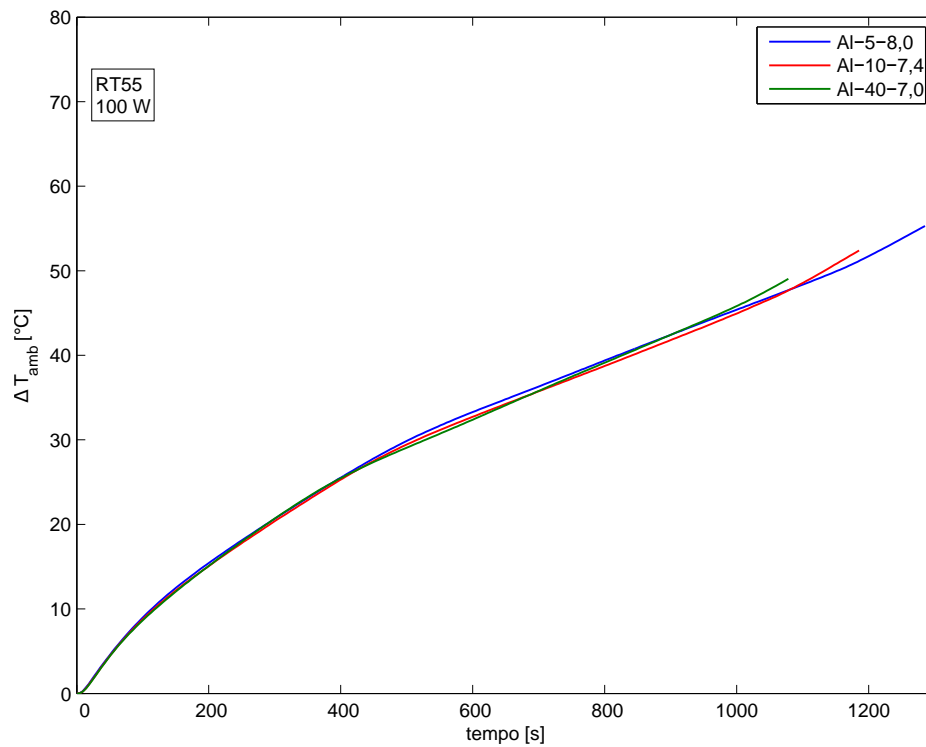


Figura 3.114: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 e potenza 100 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

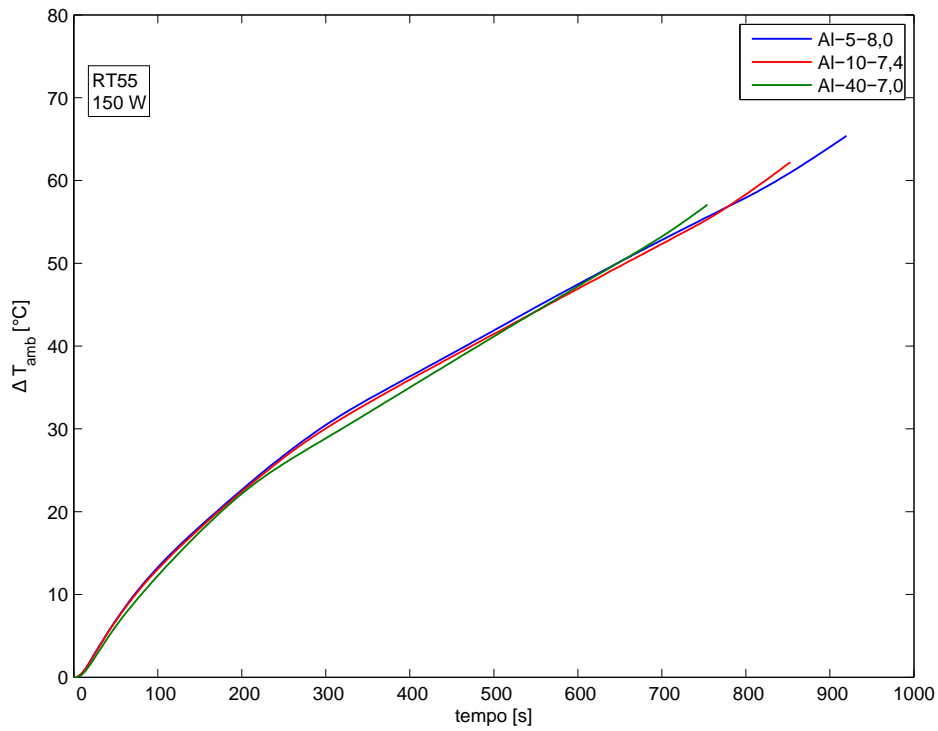


Figura 3.115: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 e potenza 150 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

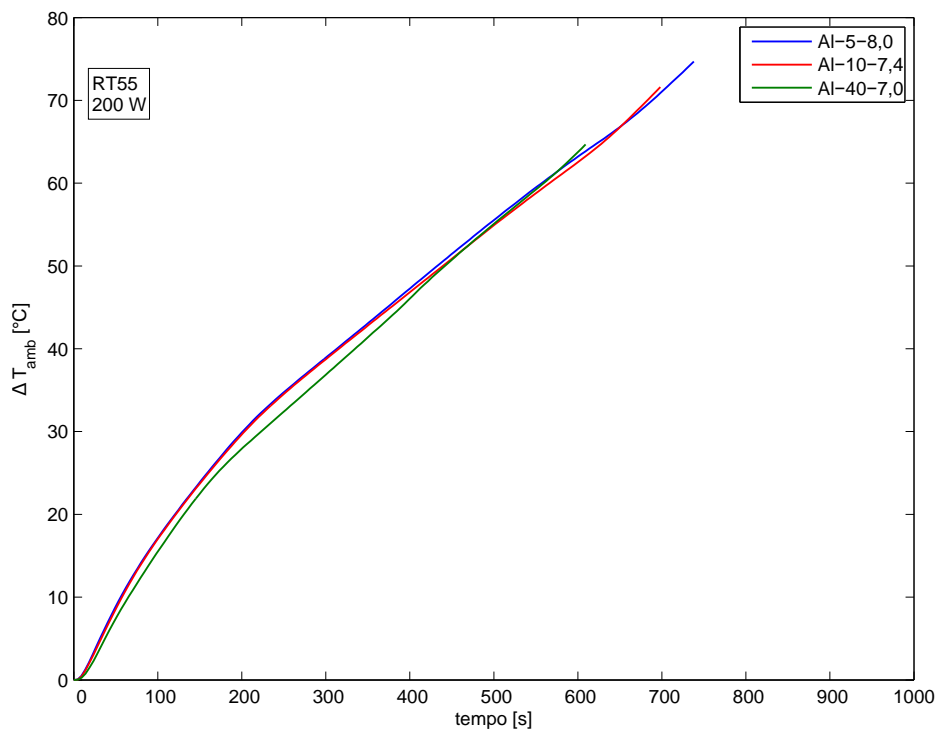


Figura 3.116: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT55 e potenza 200 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

Moduli con paraffina RT64HC

Si riportano le seguenti figure inerenti al lato riscaldatore:

- *Figura 3.117* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 100 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.118* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 150 W durante la fase di fusione;
- *Figura 3.119* rappresentante l'andamento di ΔT_{amb} con potenza fornita di 200 W durante la fase di fusione;

Le considerazioni in merito a questi confronti sono le stesse riportate al *Paragrafo 3.3.3*.

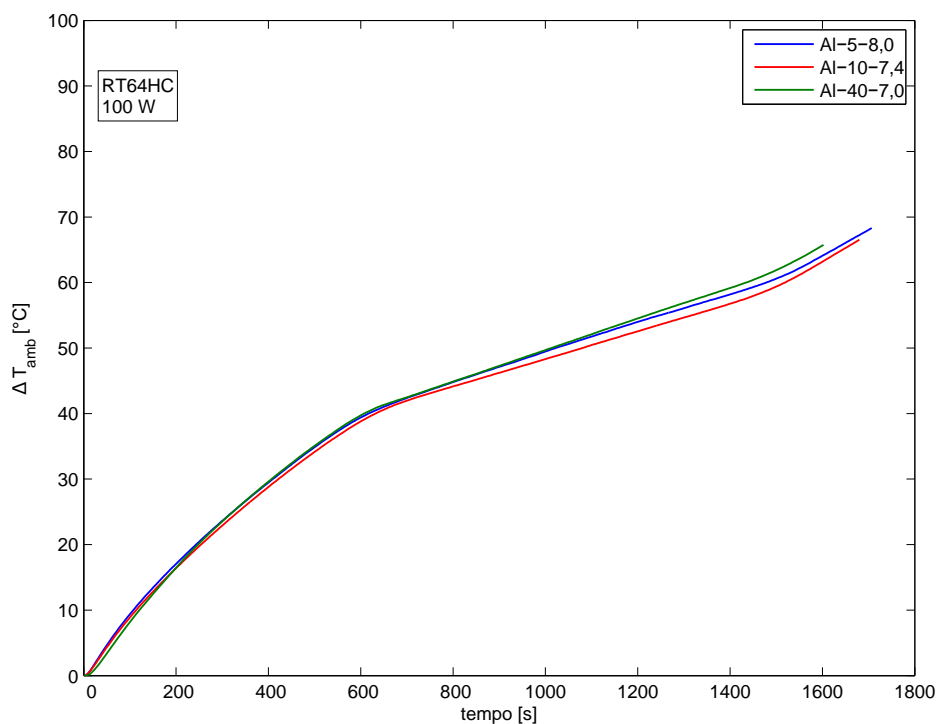


Figura 3.117: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC e potenza 100 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

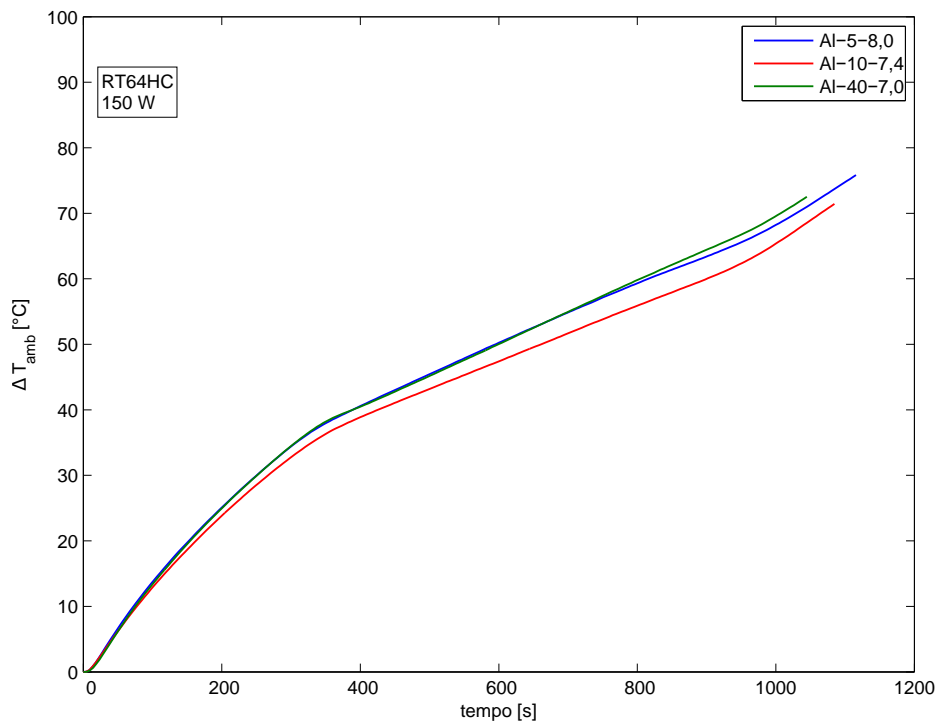


Figura 3.118: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC e potenza 150 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

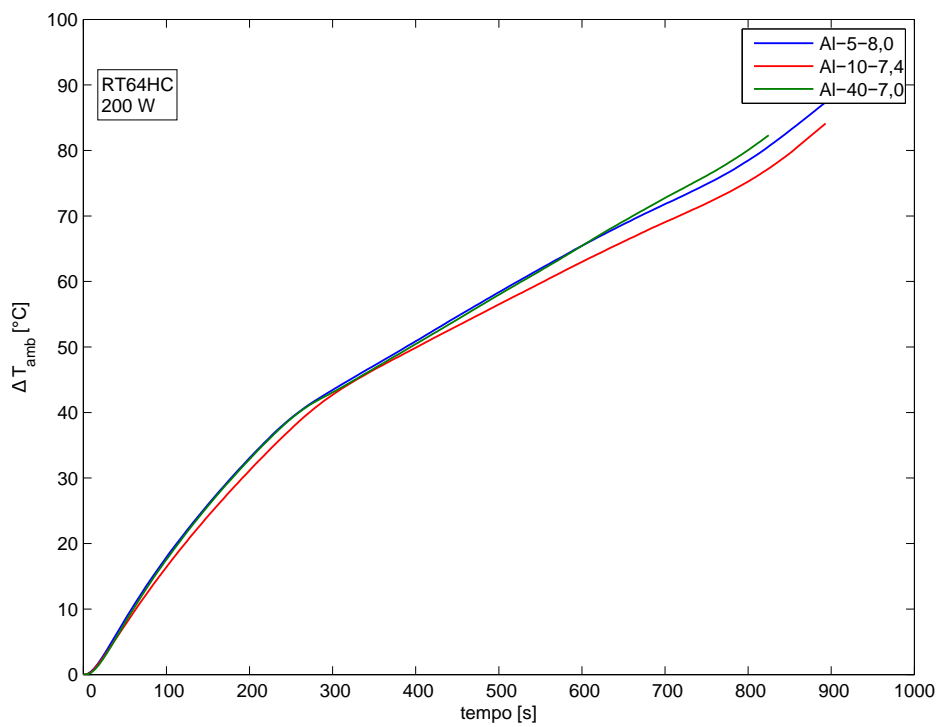


Figura 3.119: Andamento di ΔT_{amb} nel tempo per la paraffina RT64HC e potenza 200 W in funzione dei moduli considerati; fase di fusione relativa al lato riscaldatore.

CAPITOLO

4

CONCLUSIONI

Il periodo successivo agli anni ottanta viene definito "era dell'informazione": questo termine si riferisce al periodo in cui il movimento dell'informazione è diventato più veloce del movimento fisico. Secondo la teoria economica, successiva all'era dell'informazione è l'era dell'economia della conoscenza, ovvero l'era della globalizzazione: il mondo è diventato improvvisamente più piccolo, soprattutto a partire dagli anni novanta, con lo sviluppo di internet. Nel concreto, questa velocità del movimento dell'informazione rispetto a quello fisico si traduce in dispositivi altamente tecnologici, che negli anni hanno subito innumerevoli miglioramenti. Il futuro spinge verso nuovi miglioramenti legati al mondo dei dispositivi elettronici: ogni anno nascono nuovi prodotti, con velocità di connessione e potenze di calcolo sempre maggiori, ma caratterizzati da ingombro sempre minore. Dispositivi come i personal computer generano molto calore durante il loro funzionamento, un calore che deve essere asportato per garantire il corretto e duraturo funzionamento dell'apparecchio. Una possibile soluzione a questo problema è stata identificata in un materiale a cambiamento di fase (*PCM*) che assorba il calore prodotto dal chip del computer, sfruttando quindi il calore latente associato al cambiamento di fase da solido a liquido. In letteratura sono molti gli articoli che trattano di dissipatori a *PCM* proprio perchè tale problematica è molto attuale: utilizzare un materiale a cambiamento di fase significa ridurre le spese energetiche per il raffreddamento e ridurre il rumore prodotto da un sistema di raffreddamento classico come le ventole dei pc. Altri aspetti positivi rilevanti risiedono nella grande varietà di *PCM* presenti in commercio, nel costo

non troppo elevato e nella sicurezza in termini di salute derivante dall'utilizzo di questi prodotti. Nello specifico, i materiali più opportuni a questa applicazione sono le paraffine: oltre alle caratteristiche appena citate, le paraffine sono caratterizzate da una variazione di volume contenuta durante la fase di fusione (generalmente entro il 10%). Lo svantaggio associato a questi prodotti risiede nella bassa conduttività termica: le paraffine sono praticamente degli isolanti, per cui sarebbe impensabile utilizzare solo un *PCM* per raffreddare il chip che genera calore. Per questo motivo, in letteratura sono molti gli studi che si focalizzano sull'incremento della conduttività termica dei materiali a cambiamento di fase. Uno dei metodi più apprezzati per questa applicazione è l'utilizzo di schiume metalliche o di carbonio: inglobando la paraffina nella schiuma, il calore prodotto viene asportato più facilmente, permettendo al chip di operare a temperature più accettabili. La presenza della schiuma metallica riduce inoltre la probabilità che si verifichino delle perdite di paraffina durante la fusione: il problema non si elimina completamente in quanto le dimensioni dei pori della schiuma non sono piccole abbastanza da generare tensioni superficiali adeguate, ma sicuramente limitano fortemente questo problema caratteristico dei sistemi che utilizzano solo paraffina. Un altro vantaggio associato alle schiume risiede nel loro peso specifico modesto: un dissipatore che non comporti pesi elevati è molto importante per esempio in applicazioni aerospaziali/aeronautiche, in cui la massa del velivolo gioca un ruolo importante anche in termini di consumi.

Questa tesi è quindi focalizzata sul raffreddamento passivo dei componenti elettronici. A tal proposito si è partiti dalla realizzazione del dissipatore: si è quindi optato per un riscaldamento laterale del modulo di prova. La ragione di questo risiede nel fatto che in alcune applicazioni le schede elettroniche dei computer sono disposte verticalmente (per esempio negli aerei), inoltre si è voluto analizzare l'effetto della forza di gravità sulla paraffina durante la fusione. Il calore da dissipare del componente elettronico che genera calore è stato riprodotto da un riscaldatore di rame al cui interno è stata inserita una resistenza. Sono stati realizzati quattro moduli: uno contenente solo paraffina e gli altri tre con schiume metalliche aventi caratteristiche diverse (*Paragrafo 2.2.3*). L'incremento della conduttività termica del sistema è stato confermato confrontando il modulo contenente solo paraffina con gli altri: la temperatura raggiunta dalla piastra a contatto con il riscaldatore nei sistemi dotati di schiuma è inferiore di circa 20 °C rispetto al modulo con solo *PCM*. Ogni modulo dotato di schiuma metallica è stato testato con tre paraffine diverse (*Paragrafo 2.2.1*): la temperatura di fusione del *PCM* influisce molto sul comportamento del dissipatore. A tal proposito, bisogna considerare la ciclicità delle fasi di fusione e solidificazione: se il componente elettronico generasse potenza termica per tempi brevi, le paraffine con bassa temperatura di fusione sarebbero più adatte; al contrario, per durate importanti della fase di fusione, servirebbero *PCM* con temperature di fusione maggiori che permettano di mantenere il chip ad una temperatura

minore per più tempo. Un altro parametro che influisce sul dissipatore è ovviamente la potenza termica generata dal chip: le prove sono state effettuate con tre potenze termiche diverse (*Paragrafo 2.2.2*) e si è confermato che aumentando la potenza, la fase di fusione del *PCM* ha una durata minore, ma comporta temperature maggiori del componente elettronico da raffreddare. L'utilizzo di tre diverse schiume metalliche non ha implicato grandi differenze nel comportamento del dissipatore: questo è dovuto principalmente alla porosità delle schiume. Avendo porosità simile (fra il 92 e il 93%), la quantità di *PCM* all'interno dei moduli è praticamente la stessa, perciò la conduttività termica dei sistemi non è molto diversa. Anche la densità di pori non ha influito particolarmente sullo scambio termico: a livello teorico, le schiume con bassa densità di pori hanno pori con diametro più grande, in cui è più probabile che si instaurino moti convettivi che rendono lo scambio termico più efficiente. In realtà, dalle prove sperimentali condotte, non è stato confermato questo comportamento: bisogna considerare però che i moti convettivi si annullano per diametri dei pori inferiori ai 5 mm.

Per concludere, si può affermare che l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase per il raffreddamento passivo dei componenti elettronici è una valida soluzione: ovviamente bisogna cercare di risolvere il problema della bassa conduttività termica del materiale, perciò risulta necessario adottare sistemi che incrementino lo scambio termico. L'accoppiamento delle paraffine come *PCM* con delle schiume metalliche è un'ottima soluzione in quanto permette di ridurre notevolmente le temperature raggiunte dal chip del componente elettronico. Dalle prove effettuate in questa tesi si è constatato che non c'è un modulo migliore di altri: sicuramente è opportuno utilizzare delle schiume metalliche per migliorare lo smaltimento del calore prodotto; mentre, per quando riguarda le paraffine testate, bisogna considerare la temperatura di fusione e la ciclicità delle fasi di fusione e solidificazione. Infine, per quanto riguarda il prossimo futuro, sarebbe interessante testare schiume con porosità molto diverse, oppure schiume realizzate con materiali diversi (per esempio rame e alluminio).

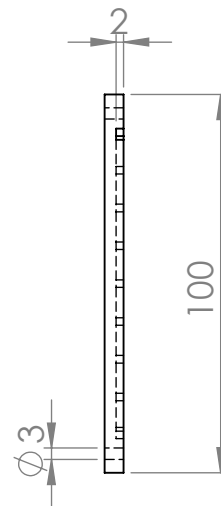
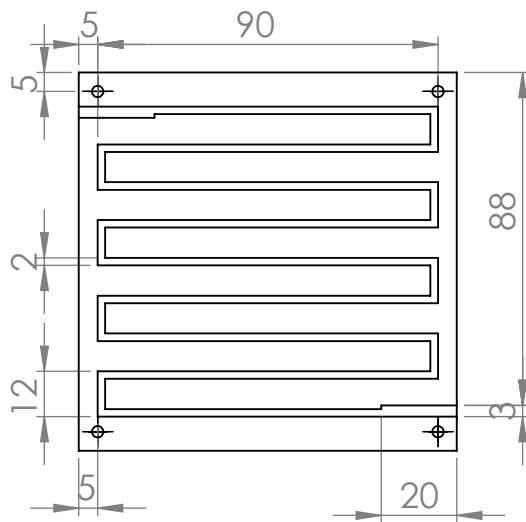
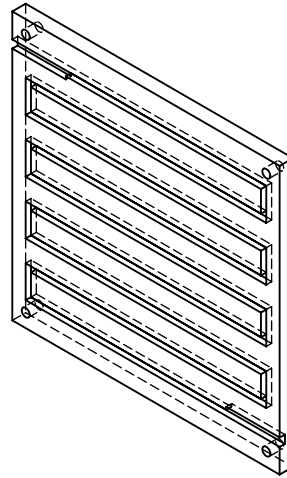
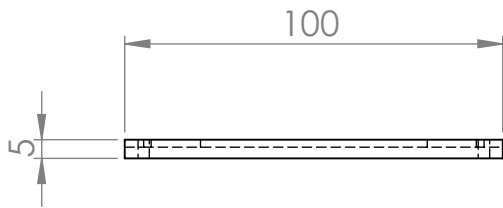
APPENDICE

A

DISEGNI TECNICI

In questa sezione vengono presentati alcuni disegni tecnici realizzati per costruire i moduli di prova. In particolare, si riportano i seguenti:

- Prima parete del riscaldatore di rame su cui è inciso il percorso a serpentina contenente la resistenza che fornisce la potenza termica ai moduli;
- Seconda parete del riscaldatore di rame dove non è presente il percorso a serpentina;
- Parete laterale sinistra in alluminio del modulo di prova senza schiuma metallica in cui ci sono i fori lungo i bordi per le termocoppie;
- Parete laterale destra in alluminio del modulo di prova senza schiuma metallica in cui, oltre ai fori lungo i bordi, ci sono anche i fori per le termocoppie inguainate in inox.



Università degli studi di Padova

Descrizione:

Parete del riscaldatore con percorso
a serpentina

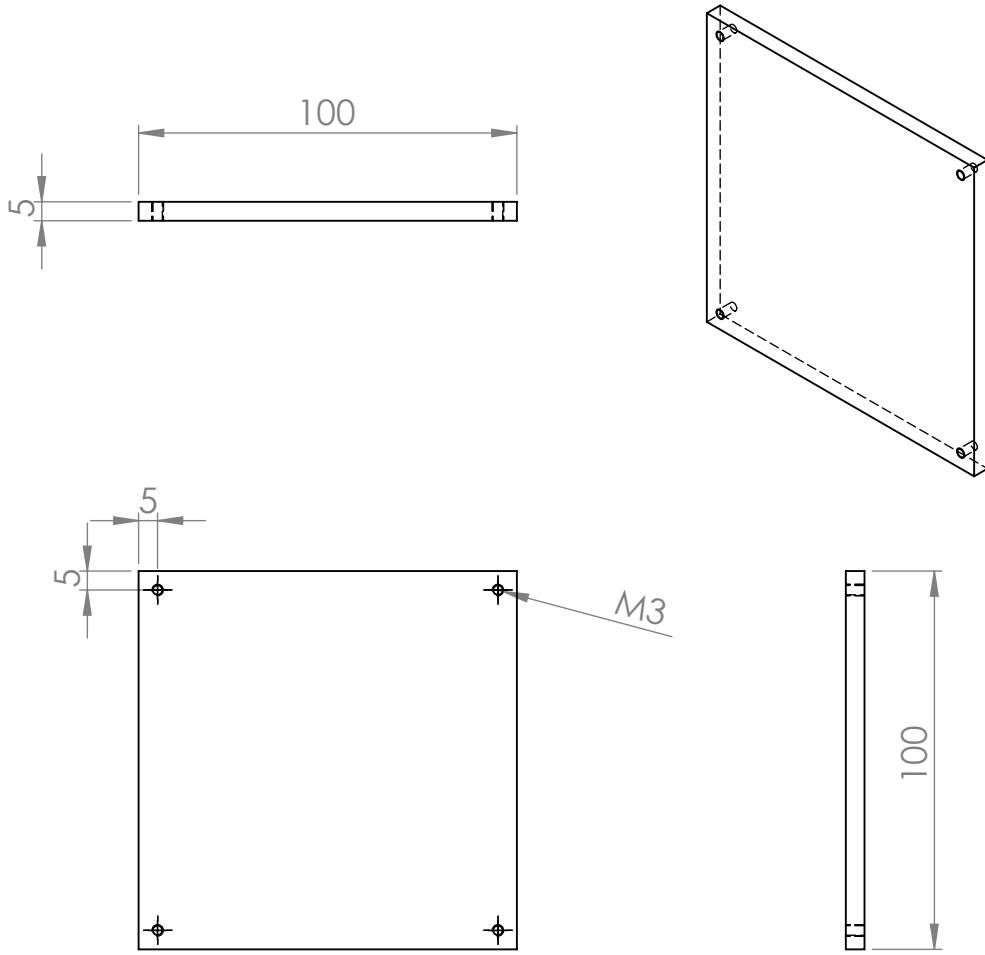
Disegnatore:

Alberto Pellizzari

A4

SCALA:1:2

FOGLIO 1 DI 1

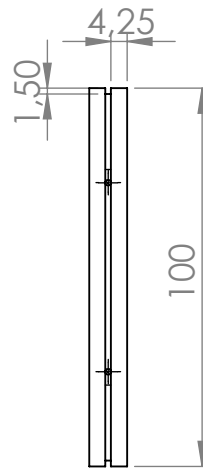
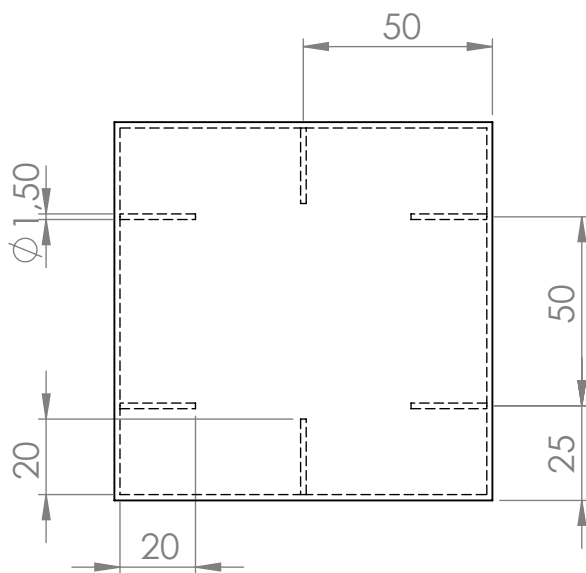
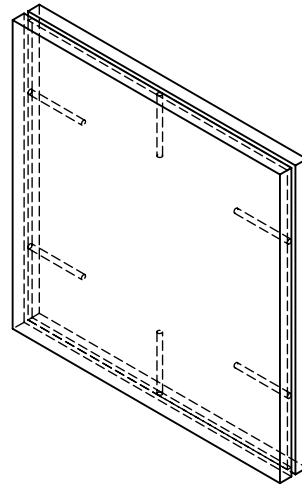
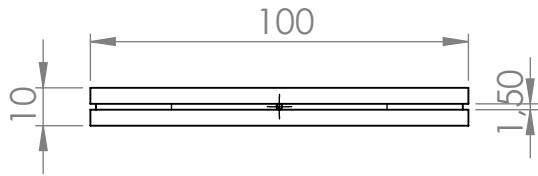


Università degli studi di Padova

Descrizione:
 Parete del riscaldatore senza percorso a serpentina

Disegnatore: Alberto Pellizzari

A4



Università degli studi di Padova

Descrizione:

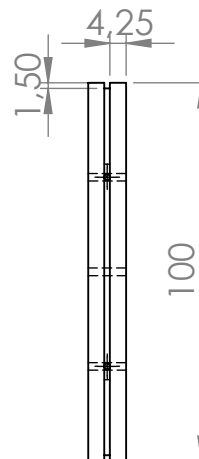
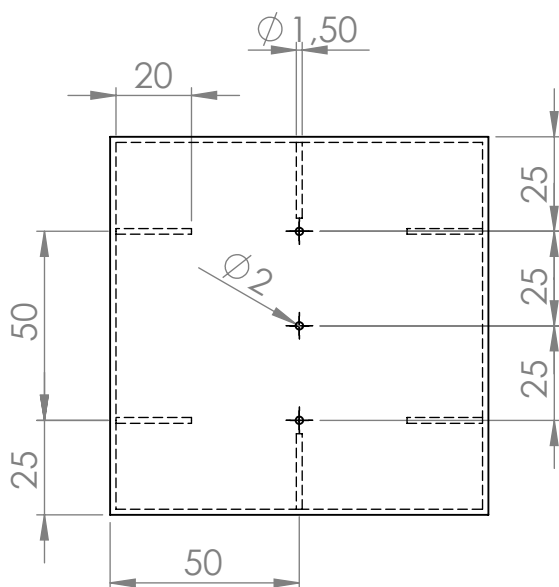
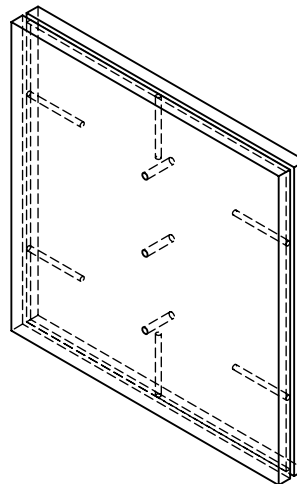
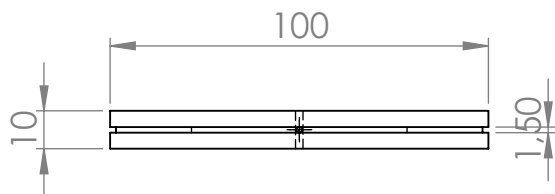
Parete laterale sinistra del modulo
contenente solo paraffina

Disegnatore: Alberto Pellizzari

A4

SCALA:1:2

FOGLIO 1 DI 1



Università degli studi di Padova

Descrizione:

Parete laterale destra del modulo
contenente solo paraffina

Disegnatore: Alberto Pellizzari

A4

SCALA:1:2

FOGLIO 1 DI 1

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Akeiber, P. Nejat, M.Z.A. Majid, M.A. Wahid, F. Jomehzadeh, I.Z. Famileh, J.K. Calautit, B.R. Hughes e S.A. Zaki. *A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016), pp. 1470–1497.
- [2] 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*. In: *International Journal of Thermal Sciences* 89 (2015), pp. 79–86.
- [3] Bhattacharya. *Thermophysical properties of high porosity metal foams*. In: *International journal of heat and mass transfer* (2002).
- [4] W.D. Callister e D.G. Rethwisch. *Materials science and engineering*. Vol. 5. John Wiley & Sons NY, 2011.
- [5] M. Cazzoli. *Studio sperimentale e numerico di materiali a cambiamento di fase per il raffreddamento passivo di componenti elettronici*. 2013.
- [6] G. Costanza e M.E. Tata. *Schiуме metalliche: recenti risultati e sviluppi futuri*. In: *La Metallurgia Italiana* 3 (2011).
- [7] G. Hirn e F. Meyer. *Latent heat storage provides process steam*. In: *Bine Informationsdienst* (2008).
- [8] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman e L. Rossetto. *Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams*. In: *International Journal of Thermal Sciences* 90 (2015), pp. 79–89.
- [9] S. Motahar e R. Khodabandeh. *Experimental study on the melting and solidification of a phase change material enhanced by heat pipe*. In: *International Communications in Heat and Mass Transfer* 73 (2016), pp. 1–6.

-
- [10] S.A. Nada e W.G. Alshaer. *Comprehensive parametric study of using carbon foam structures saturated with PCMs in thermal management of electronic systems*. In: *Energy Conversion and Management* 105 (2015), pp. 93–102.
- [11] Y. Tomizawa, K. Sasaki, A. Kuroda, R. Takeda e Y. Kaito. *Experimental and numerical study on phase change material (PCM) for thermal management of mobile devices*. In: *Applied Thermal Engineering* 98 (2016), pp. 320–329.
- [12] A. Waqas e Z.U. Din. *Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—a review*. In: *Renewable and sustainable energy reviews* 18 (2013), pp. 607–625.
- [13] C.Y. Zhao, W. Lu e Y. Tian. *Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs)*. In: *Solar Energy* 84.8 (2010), pp. 1402–1412.