



Ricerca di Sistema elettrico

Test sperimentali di nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare performance più elevate in termini velocità di risposta del PCM alla variazione di temperatura del fluido primario

F. D'Annibale, G. Zummo, C. Menale, F. Sfrattoni

TEST SPERIMENTALI DI NUOVI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE IN GRADO DI ASSICURARE PERFORMANCE PIÙ ELEVATE IN TERMINI VELOCITÀ DI RISPOSTA DEL PCM ALLA VARIAZIONE DI TEMPERATURA DEL FLUIDO PRIMARIO

F. D'Annibale, G. Zummo (ENEA)

C. Menale (Università di Roma "Sapienza")

F. Sfrattoni (Università degli Studi "Guglielmo Marconi")

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo: Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE.....	6
2.2 DESCRIZIONE DEGLI APPARATI SPERIMENTALI	7
2.2.1 <i>L'impianto HETNA-PCM</i>	7
2.2.2 <i>L'impianto mini-PCM</i>	9
2.2.3 <i>Misura della conducibilità termica</i>	11
2.3 SPERIMENTAZIONE CON L'IMPIANTO HETNA-PCM.....	13
2.3.1 <i>Risultati sperimentali</i>	13
2.3.2 <i>Calcolo parametro galleggiamento</i>	19
2.3.3 <i>Simulazioni con FLUENT</i>	22
2.3.4 <i>Confronto delle simulazioni con gli andamenti sperimentali</i>	22
2.3.5 <i>Simulazioni per analisi di sensibilità alle variazioni di materiali o condizioni</i>	32
2.4 SPERIMENTAZIONE CON L'IMPIANTO MINI-PCM.....	38
2.4.1 <i>Risultati sperimentali</i>	38
2.4.2 <i>Simulazioni 2D con FLUENT del mini-PCM – analisi di sensibilità con materiali diversi</i>	48
2.5 SIMULAZIONE 3D PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL COMPOSITO PCM + SCHIUMA SOLIDA.....	58
2.5.1 <i>Confronto dati sperimentali con dati simulati:</i>	60
2.5.2 <i>Studio parametrico del contenitore (interfaccia rame-PCM e rame-PCM+SIC):</i>	61
2.5.3 <i>Studio dell'influenza della conducibilità della schiuma solida:</i>	67
3 CONCLUSIONI	69
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	70
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	70

Sommario

L'attività sperimentale in oggetto è finalizzata allo studio delle prestazioni dei materiali a cambiamento di fase (PCM) per il loro utilizzo come sistema di accumulo termico. Utilizzando due diversi impianti sperimentali, sono stati dapprima eseguiti i test su PCM commerciali che hanno confermato la risposta molto lenta di tali materiali a causa della bassa conducibilità termica, che ritarda il trasferimento del calore dalla superficie in contatto con l'acqua verso gli strati più interni. Sono quindi state eseguite prove sperimentali su un materiale composito ottenuto inserendo PCM in una matrice di schiuma solida di materiale con alta conducibilità, al fine di migliorarne la diffusione del calore verso l'interno, ottenendo però risultati ancora insufficienti. Sono stati inoltre realizzati due modelli delle sezioni di prova con il codice Fluent, validati attraverso il confronto con i dati sperimentali. Questo ha permesso di studiare meglio il comportamento e quindi di valutare l'effetto di ulteriori interventi e le caratteristiche necessarie per ottenere la rapidità di risposta desiderata.

1 Introduzione

La necessità di mantenere costante la temperatura di componenti è uno dei problemi principali di tutti i sistemi in cui ci sia produzione o passaggio di energia. Nel caso dei pannelli solari termici, energia ottenuta può superare la richiesta in alcune parti del giorno, mentre può diminuire notevolmente in altre fasi. Questo porta ad avere liquido primario che nelle fasi di irraggiamento raggiunge temperature molto alte e spesso la necessità di smaltire il calore in eccesso, che invece sarebbe utile nelle fasi di scarsa produzione.

La possibilità di accumulo dell'energia termica in eccesso può aumentare quindi notevolmente il rendimento medio di un impianto solare termico, per cui lo sforzo per aumentare la capacità di accumulo sta crescendo di pari passo con la diffusione dei pannelli solari.

Il metodo classico è quello dell'utilizzo di un serbatoio di accumulo, in cui l'energia accumulata dipende dalla variazione di temperatura e dalla capacità termica totale, funzione del calore specifico c_p e della massa M del fluido

$$E = M c_p \Delta T \quad (1)$$

Quindi l'energia in eccesso potrà essere accumulata solo nella quantità permessa dalla temperatura massima del fluido rispetto a quella richiesta dalle utenze.

Un metodo più efficiente può essere quello di sfruttare il calore latente di fusione λ , che permette, a parità di massa, di accumulare quantità molto maggiori di energia con temperatura pressoché costante (pari alla temperatura di fusione). L'energia accumulata durante il passaggio di fase è

$$E = M \lambda \quad (2)$$

I materiali utilizzabili a tale scopo sono definiti PCM (Phase Change Materials) e negli ultimi anni sono stati proposti e sperimentati per varie applicazioni, come mostrato ad es. in [1, 2], mentre in [3] si riportano le caratteristiche di più di 250 materiali.

Per fornire una valutazione indicativa del vantaggio ottenuto sostituendo parte dell'acqua del serbatoio di accumulo con PCM, si è confrontato il calore latente di fusione di alcuni PCM con l'energia assorbita dalla stessa massa di acqua per un $DT=10^\circ C$.

Considerando le caratteristiche riportate in Tabella 1, si può facilmente calcolare che ad es. il calore assorbito dalla fusione di un kg di A46 ($\lambda=155$ kJ) equivale al riscaldamento di $10^\circ C$ di 7.4 kg di acqua. Nell'ultima riga della tabella, nella colonna λ è mostrata l'energia assorbita dall'acqua per un $DT=10^\circ C$

Tabella 1 - Caratteristiche dei PCM in ENEA

Nome	Tipo	T_{pc} °C	ρ kg/m ³	λ kJ/kg	VHC MJ/m ³	c_p kJ/kg K	k W/m K	T_{max} °C	pericolo
S46	Sale idrato	46	1587	210	333	2.41	0.450	56	irritante
S44	Sale idrato	44	1584	100	158	1.61	0.430	120	irritante
A48	Organico	48	810	234	190	2.85	0.180	300	irritante
A46	Organico	46	910	155	141	2.22	0.220	300	No
A43	Organico	43	780	165	129	2.37	0.180	300	tossico
X40	solido-solido	40	1046	125	131	1.67	0.360		dannoso
acqua	risc. $10^\circ C$		1000	41.8	41.8	4.18	0.603	100	

Dove:

$T_{pc} = T_{\text{Phase Change}} [^{\circ}\text{C}]$

VHC = Volumetric Heat Capacity [MJ/m³]

$T_{max} = \text{Maximum Temperature} [^{\circ}\text{C}]$

Purtroppo però l'utilizzo reale di tali materiali si scontra con la limitazione dovuta alla bassa conducibilità. Questo infatti provoca una fusione molto lenta della massa di PCM, e quindi un accumulo reale molto minore se i tempi caratteristici delle variazioni di temperatura del fluido primario sono molto minori del tempo di fusione. Questo è stato visto sperimentalmente con una serie di prove effettuate su uno dei tubi di PCM installati nel serbatoio di accumulo, e attraverso la simulazione con il codice FLUENT è stato valutato il valore di conducibilità necessario per una risposta sufficientemente rapida.

Sono state allora valutati sistemi per aumentare la conducibilità termica e sono state eseguite sia prove sperimentali che simulazioni del comportamento dei PCM in tali condizioni.

I metodi proposti in letteratura per tale scopo sono normalmente quelli di aumentare la superficie di scambio o di favorire il trasporto di calore all'interno del PCM [1, 2, 4]. Il primo metodo si ottiene ad es. incapsulando il PCM in piccole sfere ottenendo così un grande rapporto superficie/volume, ma con ovvii problemi meccanici in caso di dispersione di tali particelle in liquidi in movimento. Un metodo leggermente più promettente può essere quello di disperdere nanoparticelle nel PCM, in quanto questo dovrebbe dare problemi meccanici minori, ma i miglioramenti ottenuti non sembrano entusiasmanti. Ad es. in [5] la conducibilità del BaCl₂ è aumentata del 12.7% aggiungendo il 0.5wt% di nanoparticelle di TiO₂, in [6] il tempo di cambiamento di fase di acido oleico ($T_{pc}=5^{\circ}\text{C}$) diminuisce del 28% con il 2wt% di nanoparticelle di CuO, in [7] il tempo di cambiamento di fase di acido stearico ($T_{pc}=57^{\circ}\text{C}$) diminuisce del 42% con il 0.3wt% di nanoparticelle di TiO₂.

Il secondo può essere l'uso di alette o schiume solide ad alta conducibilità, in cui inserire il PCM, per fornire passaggi preferenziali al calore verso le zone interne della massa di PCM, ottenendo un effetto equivalente all'aumento della conducibilità media del sistema [1, 8, 9].

Nel presente lavoro si è dapprima esaminato il comportamento sperimentale delle candele contenenti PCM S46 (vedi Tabella 1), utilizzate nel serbatoio di 1000 l dell'impianto di "solar heating and cooling" in Casaccia. Tale studio è stato effettuato utilizzando l'impianto sperimentale HETNA (già esistente) per fornire ad una singola candela (L=1 m, D=0.05 m) una condizione tipica e valutarne la risposta. Tali risultati sono stati poi confrontati con la simulazione FLUENT e, verificato il buon accordo, sono state simulate le risposte ottenute variando la conducibilità del PCM.

Si è proceduto quindi con la misura sperimentale dell'incremento di conducibilità ottenuto inserendo il PCM in una schiuma solida ad alta conducibilità (SiC). La prima misura è stata effettuata tramite un misuratore di conducibilità termica di tipo "transient plane source technique". Considerando però l'incertezza dovuta alla non uniformità del materiale, che rende poco affidabile la misura locale con lo strumento utilizzato, si è proceduto alla misura sperimentale del transitorio con provini di PCM o PCM+schiuma, usando un dispositivo di prova appositamente realizzato.

Anche questo provino è stato simulato con il codice Fluent e la schematizzazione ottenuta, dopo il confronto con i dati sperimentali, è stata poi utilizzata per valutare le prestazioni di schiume di altri materiali o con altri PCM.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Materiali a cambiamento di fase

Sono noti un ampio numero di PCM che fondono nei range di temperatura richiesti per l'utilizzo in sistemi di raffreddamento delle batterie. Per una loro scelta, comunque, devono anche avere anche proprietà fisiche e chimiche adeguate alle condizioni di utilizzo.

Una classificazione sintetica può farli dividere in tre famiglie:

- Organici (paraffine, non-paraffine)
- Inorganici (sali idrati, composti metallici)
- Eutettici

Le loro principali caratteristiche sono riassunte in Tabella 2:

Tabella 2 – Principali caratteristiche dei diversi tipi di PCM

tipo di PCM	Vantaggi	Svantaggi
Paraffine	Disponibili in un ampio range di temperatura, sicure, affidabili, poco costose e non corrosive. Chimicamente inerti e stabili sotto i 500°C, con bassa tensione di vapore e minimi cambiamenti di volume durante la fusione, fusione uniforme e buone proprietà di nucleazione	Hanno un ciclo di condensazione-fusione molto lungo, una bassa conducibilità termica, incompatibilità con i contenitori di plastica e una moderata infiammabilità.
Non paraffine (esteri, acidi grassi, alcoli)	elevato calore di fusione	Instabili alle alte temperature e infiammabili. Bassa conducibilità termica, lievemente corrosivi e spesso tossici
Sali idrati	elevato calore latente di fusione per unità di volume, conducibilità termica relativamente alta (quasi il doppio di una paraffina) e piccoli cambiamenti di volume durante la fusione. Non sono molto corrosivi, sono compatibili con la plastica e sono solo leggermente tossici	Durante la fusione il sale solido si deposita e il processo di fusione-congelamento diminuisce ad ogni ciclo. Alla temperatura di fusione la velocità di nucleazione è bassa e rende necessario il sottoraffreddamento. Se esposto all'aria può deteriorarsi per disidratazione.
Metalli (basso-fondenti, eutettici)	elevata conducibilità termica, alto valore del calore di fusione per unità di volume, tensione di vapore relativamente bassa	elevato peso (basso calore di fusione per unità di peso), basso calore specifico.
Eutettici	fondono e solidificano senza segregazione	elevato costo

Una ulteriore distinzione può essere fatta in base alla transizione: nella maggior parte di PCM commerciali si ha il passaggio solido-liquido, ma alcuni sfruttano invece il cambiamento di struttura cristallina consentendo la trasformazione in condizioni di solido-solido.

2.2 Descrizione degli apparati sperimentali

2.2.1 L'impianto HETNA-PCM

L'impianto sperimentale è stato realizzato sfruttando parte dell'impianto HETNA (Hydraulic Experiments on Thermo-mechanical of NANofluids) utilizzato per lo studio dei nanofluidi.

In Figura 1 è mostrato lo schema del circuito. I componenti principali sono:

- Pompa volumetrica (Ismatec MCP-Z micropump con portata 2.4-230 l/h e controllo remoto della portata), ingranaggi in PTFE e fibra di carbonio, $T_{max}=121^{\circ}C$ per funzionamento continuo
- Misuratore di portata Coriolis (Danfoss MASS 2100 DI 3, range 12-250 kg/h con precisione migliore dello 0.15%)
- Preriscaldatore (Thermocoax single core heating element with Inconel sheath, potenza fino a 2.5 kW con alimentazione 0-220V)

- Scambiatore compatto per raffreddare il fluido prima della pompa (Alfa Laval mod. Alfanova 14-10H in AISI 316)
- il vessel contenente la candela del PCM, con il passaggio anulare di area uguale a quella del sottocanale associato a una candela nel serbatoio reale. Le dimensioni sono:
 - Di-vessel (mm) 60
 - De-PCM (mm) 50
 - Di-PCM (mm) 44
 - L-vessel (m) 1.0000
 - L-PCM (m) 0.6600
 - L-aria (m) 0.3400

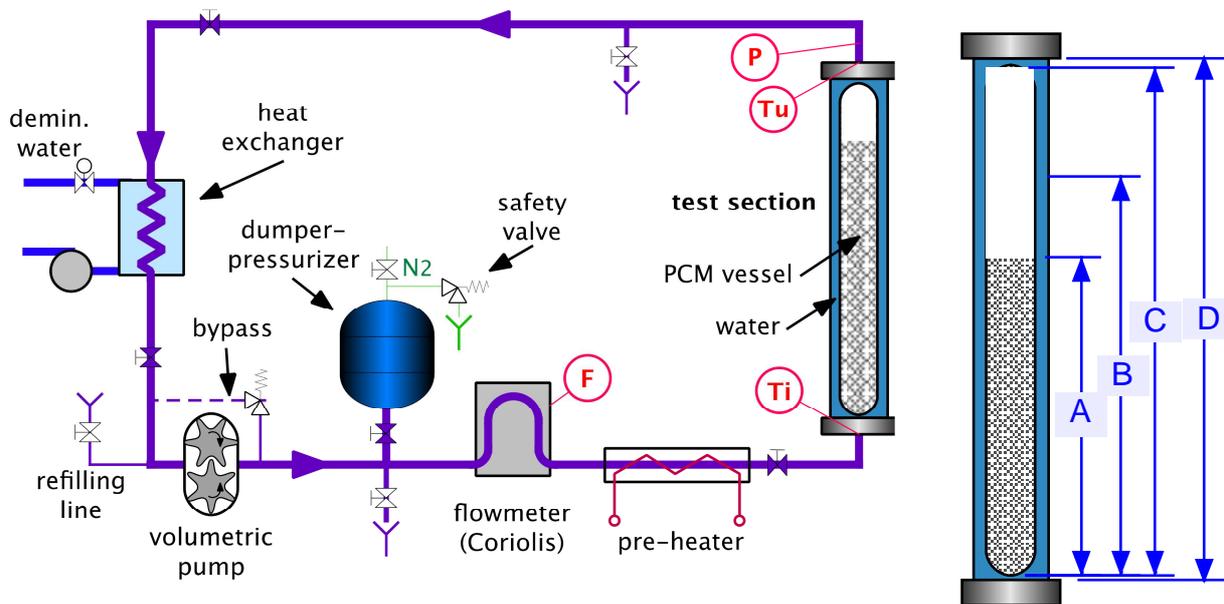


Figura 1 - Schema dell'impianto. A sinistra le altezze della sezione di prova: A=660 mm (sale dopo la fusione); B=825 mm (sale granulare prima dell'uso); C=970 mm (tubo PCM); D=1000 mm (vessel)

L'alimentazione del preriscaldatore e la velocità della pompa sono regolati dal sistema di controllo automatico per mantenere rispettivamente la temperatura d'ingresso e la portata ai valori imposti. L'acquisizione di dati e il controllo automatico sono fatti usando sistema National Instruments CompactDAQ con due moduli per termocoppie (24bit ADC, 16 canali), un modulo d'ingresso in tensione (16 bit ADC, 32 canali), un modulo d'ingresso di alta tensione (max 60 V), un modulo di uscita analogica (16 bit ADC, 16 canali), uno con 8 relè, un regolatore PID, controllato da un programma sviluppato in Labview. Il regolatore analogico PID indipendente è usato per assicurare il circuito da eventuali guasti del computer.

In Figura 2 è mostrato l'impianto, con in primo piano il preriscaldatore, sulla sinistra il misuratore di portata e la pompa, e sulla destra il vessel (il tubo verticale coibentato). In Figura 3 sono mostrati i tubi contenenti il PCM durante l'installazione nel serbatoio di accumulo reale.

L'impianto HETNA-PCM è stato utilizzato per effettuare la misura della temperatura dell'acqua in uscita, dopo aver percorso il canale in contatto con il contenitore di PCM, quando la temperatura in ingresso subiva un aumento paragonabile a quello che si verifica nel primario dell'impianto reale.

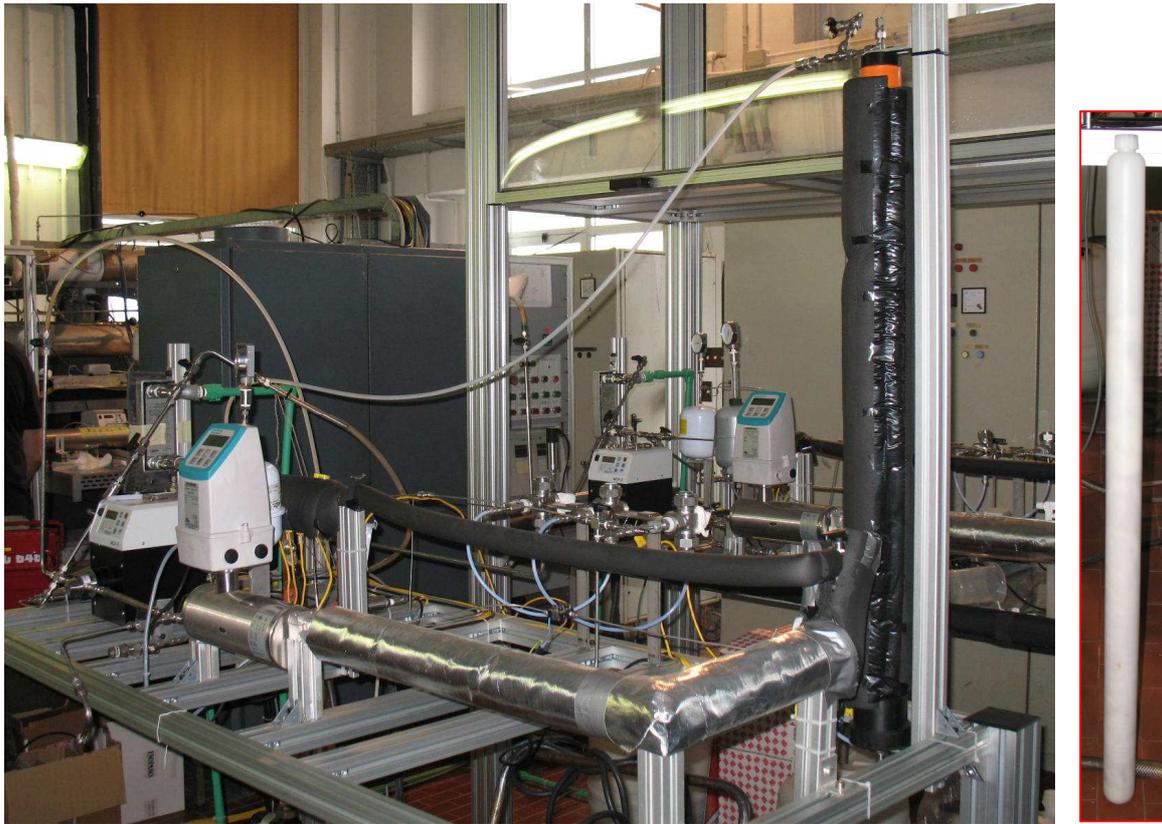


Figura 2 - Impianto HETNA-PCM e, a destra, un tubo contenente il PCM S46



Figura 3 - Tubi contenenti PCM S46, nel serbatoio di accumulo

2.2.2 L'impianto mini-PCM

L'impianto è finalizzato alla misura dei transitori di temperatura che si verificano in un volumetto di PCM quando una faccia è sottoposta a un flusso o a una temperatura imposta. Il dispositivo consiste in un blocchetto di rame di dimensioni 45 x 45 mm e altezza 10 mm, alla cui base si trova un riscaldatore. Sulla faccia superiore viene appoggiato il provino contenente il PCM da testare e con il riscaldatore è alimentato opportunamente per ottenere le condizioni volute (che si mantengono uniformi sulla superficie superiore

grazie alla massa di rame). Il monitoraggio è effettuato con un programma Labview che registra tutto il transitorio, acquisendo le termocoppie inserite nel rame e nel provino, insieme alla tensione e corrente dell'alimentatore e alla potenza calcolata da queste.

Le dimensioni e i valori tipici sono:

- Blocco rame: 45 x 45 mm, altezza 10 mm
- Blocco PCM: 40 x 40 mm, altezza 25 mm
- Resistenza del riscaldatore: 160 Ω
- Resistenze del partitore: $R_1=36000 \Omega$; $R_2=4020 \Omega$; $R_3=0.2 \Omega$
- Tensione dell'alimentatore: 0 – 90 V cc

In Figura 4 è mostrato lo schema del dispositivo, con l'indicazione della posizione delle termocoppie e delle tensioni acquisite nel partitore e nello shunt, per ottenere la tensione V_0 e la corrente I_0 nel riscaldatore (non misurabili direttamente con i componenti disponibili, in quanto la tensione poteva superare il valore 60 V permesso dalle schede di acquisizione).

La tensione viene fornita con un alimentatore EUTRON BVT 350 (regolabile da 0 a 60 V), in serie con un TTI EL302R (da 0 a 30 V).

L'acquisizione di dati è effettuato usando sistema lo stesso sistema National Instruments CompactDAQ descritto nel paragrafo precedente.

Per la pesatura dei provini, al fine di stabilire il grado di vuoto della matrice di schiuma solida conduttiva, si è usata una bilancia di precisione Gibertini Europe 500, con sensibilità di 0.001 g.

Il dispositivo in funzione, con un provino installato, è mostrato in Figura 5.

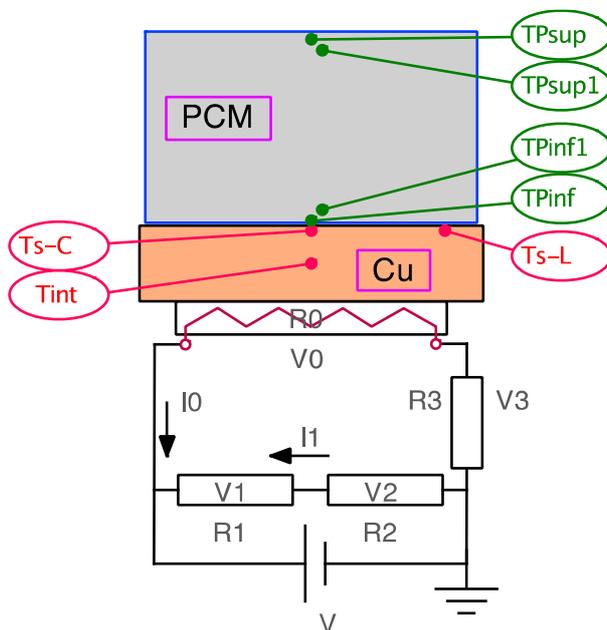


Figura 4 – schema del dispositivo “mini-PCM” per i test su volumetti di PCM

E' uno strumento che consente di valutare la conducibilità termica con un metodo non distruttivo. Il sistema è caratterizzato da un ampio range di misura (da 0 a 120 W/mK) per temperature che vanno dai -50 ai 200°C.

Le funzionalità chiave del sistema e i benefici dello stesso includono la possibilità di testare solidi, liquidi, polveri e paste con un'accuratezza che supera il 5% e una precisione che supera l'1%.

La misura è molto rapida, richiede meno di 5 s e poiché la procedura è non distruttiva, i campioni rimangono intatti e sono riutilizzabili dopo la prova.

Il C-Therm TCi si basa sul "modified transient plane source technique". Si utilizza un sensore che applica una momentanea e costante fonte di calore al campione: una corrente nota viene applicata all'elemento riscaldante del sensore portando alla generazione di una piccola quantità di calore; il calore determina un incremento di temperatura all'interfaccia tra il sensore e il provino, tipicamente minore di 2°C.

L'aumento di temperatura induce una variazione della tensione nel sensore; l'entità dell'incremento del voltaggio è utilizzata per determinare le proprietà termo-fisiche del materiale testato, inversamente proporzionali all'incremento di voltaggio nel sensore: più è isolante il materiale più è ripido l'aumento di tensione.

Dalla misura della variazione di temperatura $\Delta T(x,t)$, attraverso l'equazione del calore

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q''' \quad (3)$$

vengono ricavate sia l'effusività, che la conducibilità termica direttamente e rapidamente, fornendo una caratterizzazione termica dettagliata del campione.

L'effusività E è pari a:

$$Eff = \sqrt{k\rho c_p} \quad [W s^{1/2}/m^2K] \quad (4)$$

Il sensore TCI ha una superficie solida e dura. Quando si effettuano misurazioni sui solidi, si hanno problemi nella resistenza di contatto, che può influenzare notevolmente i risultati. Per questa ragione si utilizza un agente di contatto (normalmente acqua) che viene settato e quindi tenuto in conto dal software.

In Figura 7 è mostrata la misura della conducibilità termica del PCM A46 durante il riscaldamento da 23 a 81.5 °C ("salita") e in due raffreddamenti, una tra le stesse temperature e l'altro da 72 a 31°C ("discesa"). Il solido presenta un picco a 30.5°C con $k=0.327$ W/mK, tornando poi al valore $k=0.225$ W/mK, simile allo 0.22 nominale (Tabella 1). Dopo i 38°C si ha un notevole aumento, fino a oltre 0.5 W/mK subito prima della fusione, per poi crollare a 0.15 W/mK nel liquido. Durante il raffreddamento si nota una piccola isteresi intorno a 50°C, mentre per tutto il campo restante i valori vengono confermati quasi perfettamente.

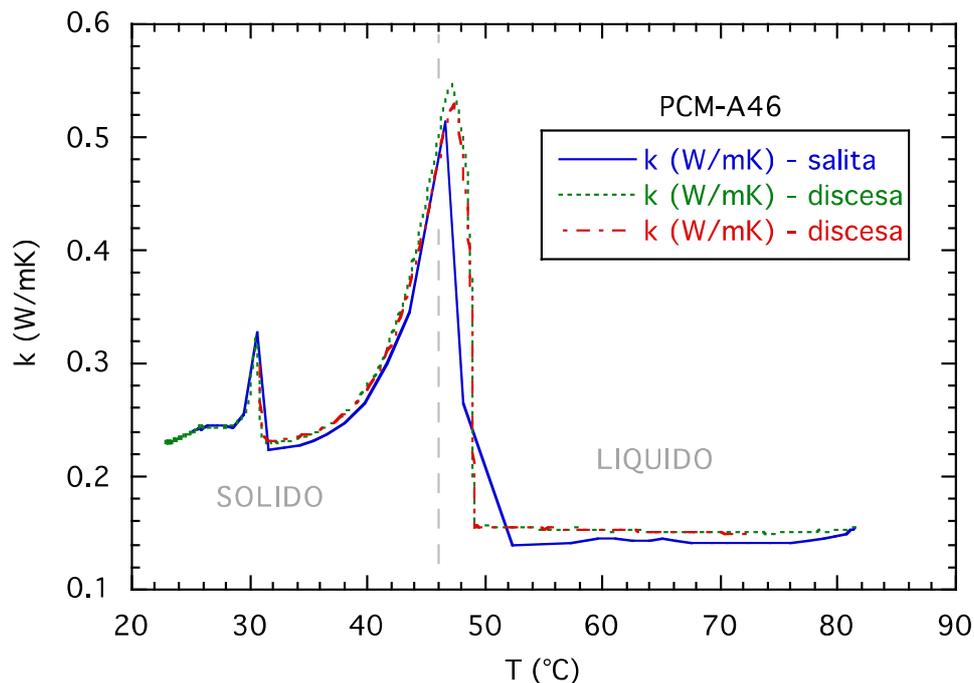


Figura 7 – Misura della conducibilità termica del PCM A-46 solido e liquido

2.3 Sperimentazione con l'impianto HETNA-PCM

2.3.1 Risultati sperimentali

In Figura 8 sono riportate le temperature registrate nel serbatoio di accumulo dell'energia termica (TES, Thermal Energy Storage) in un tipico giorno invernale [10]. La linea rossa è relativa all'acqua in alto, quella blue è quella nella parte bassa del serbatoio. L'area rossa rappresenta l'energia fornita al serbatoio dai pannelli solari, mentre l'area blue è quella prelevata dalle utenze per il riscaldamento dell'edificio. Si può notare come i tempi di assorbimento e rilascio da parte del PCM siano molto lunghi, rendendo necessaria la verifica della rapidità nella risposta al variare della temperatura dell'acqua.

Per studiare in modo più dettagliato il comportamento dei contenitori di PCM, si è deciso di effettuare delle prove sperimentali su un singolo tubo con l'impianto descritto in precedenza (Figura 1).

Le condizioni di prova sono le seguenti:

- Temperatura di ingresso: da 20 a 85 °C
- Velocità dell'acqua nell'anulo: da 0.2 a 0.35 cm/s
- Pressione: da 0.1 a 0.13 Mpa
- Gradiente di temperatura in ingresso: da 5 a 600 °C/h

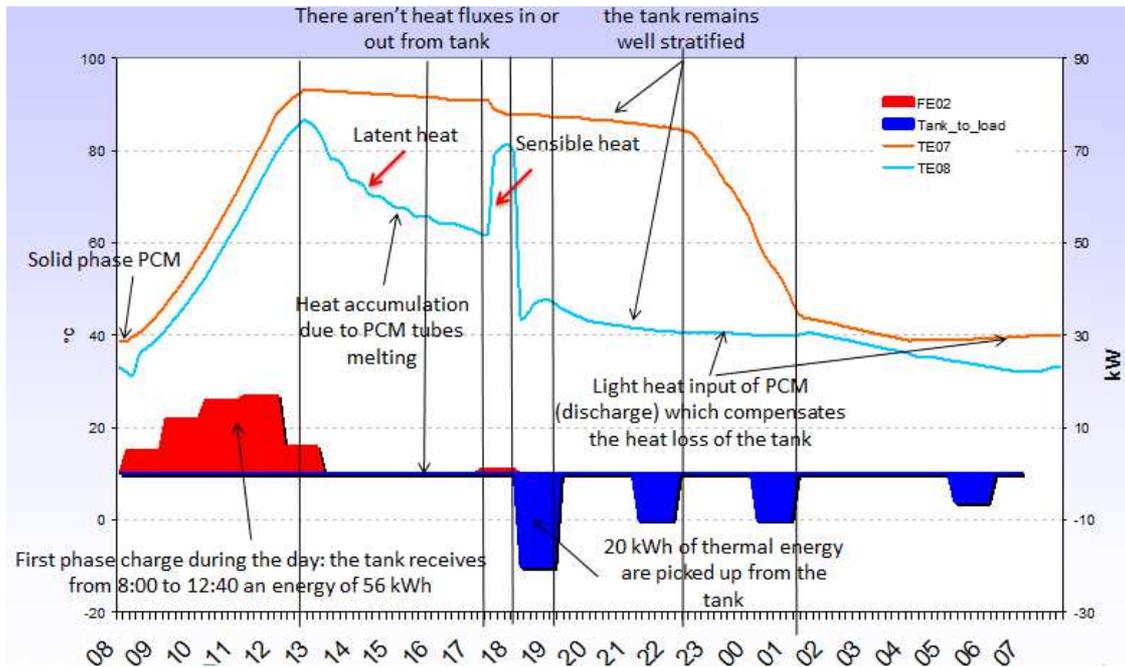


Figura 8 – Temperature acquisite nel serbatoio di accumulo dell’impianto di solar heating and cooling (SH&C) dell’ENEA-Casaccia

La geometria è equivalente a quella del sottocanale relativo ad un tubo di PCM del serbatoio in esame, con una zona anulare di spessore 5 mm in cui scorre l’acqua. La sezione di test ha un diametro interno di 60 mm e la lunghezza è pari a 1000 mm, come il tubo di PCM.

L’acqua calda entra dal basso ed esce dall’alto (Figura 1), entrambe le temperature vengono monitorate in continuo tramite un sistema di acquisizione realizzato in Labview.

Le prime prove effettuate sono caratterizzate da un rapido incremento della temperatura (600°C/h) utilizzando una portata di 6 l/h; i risultati della rampa di temperatura in salita e in discesa sono riportati in Figura 9, dove sono mostrate la temperatura in uscita e la potenza scambiata in corrispondenza al transitorio di temperatura in ingresso.

La potenza è stata calcolata dalle temperature acquisite:

$$W = \Gamma c_p (T_u - T_i) \tag{5}$$

Non si notano effetti visibili sul gradiente di temperatura in uscita intorno ai 46°C (temperatura di fusione). Questo a conferma che l’energia di fusione è assorbita e rilasciata in ore e il suo contributo non può essere distinto da quello derivante dalla capacità termica del materiale monofase.

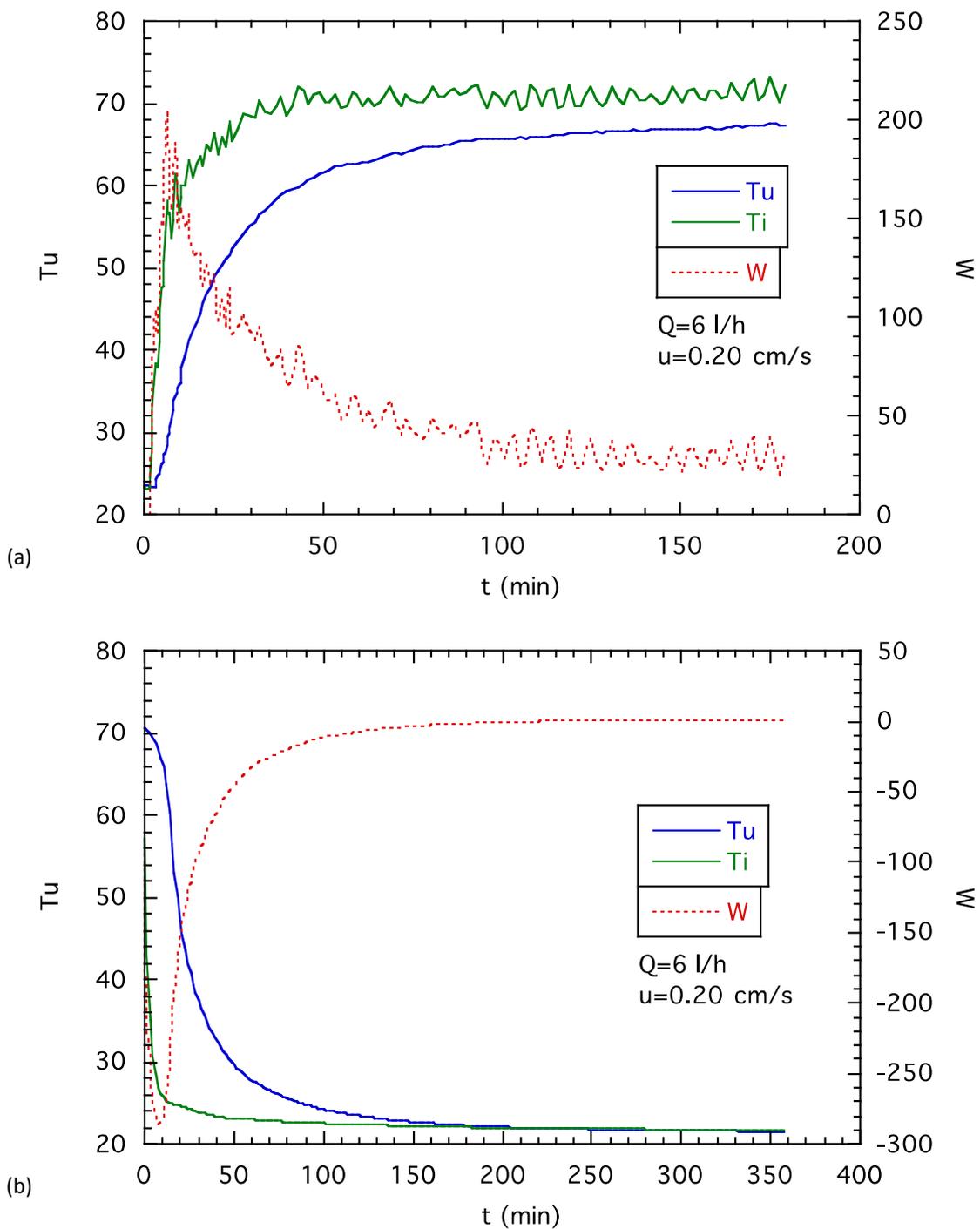


Figura 9 – Rampa di temperatura veloce: a) salita; b) discesa

Il medesimo risultato si ha anche nel caso di un incremento di temperatura molto più lento (la rampa in salita viene realizzata con un gradiente di $15^\circ\text{C}/\text{h}$, quella in discesa con un gradiente di $5^\circ\text{C}/\text{h}$). Anche in questo caso l'energia di fusione viene assorbita e rilasciata in tempi troppo lunghi.

La portata d'acqua utilizzata in questo caso è di 10 l/h, dato che con portate più basse il regolatore PID non ha un comportamento stabile ed induce oscillazioni di temperatura. I risultati dei test sono riportati in Figura 10.

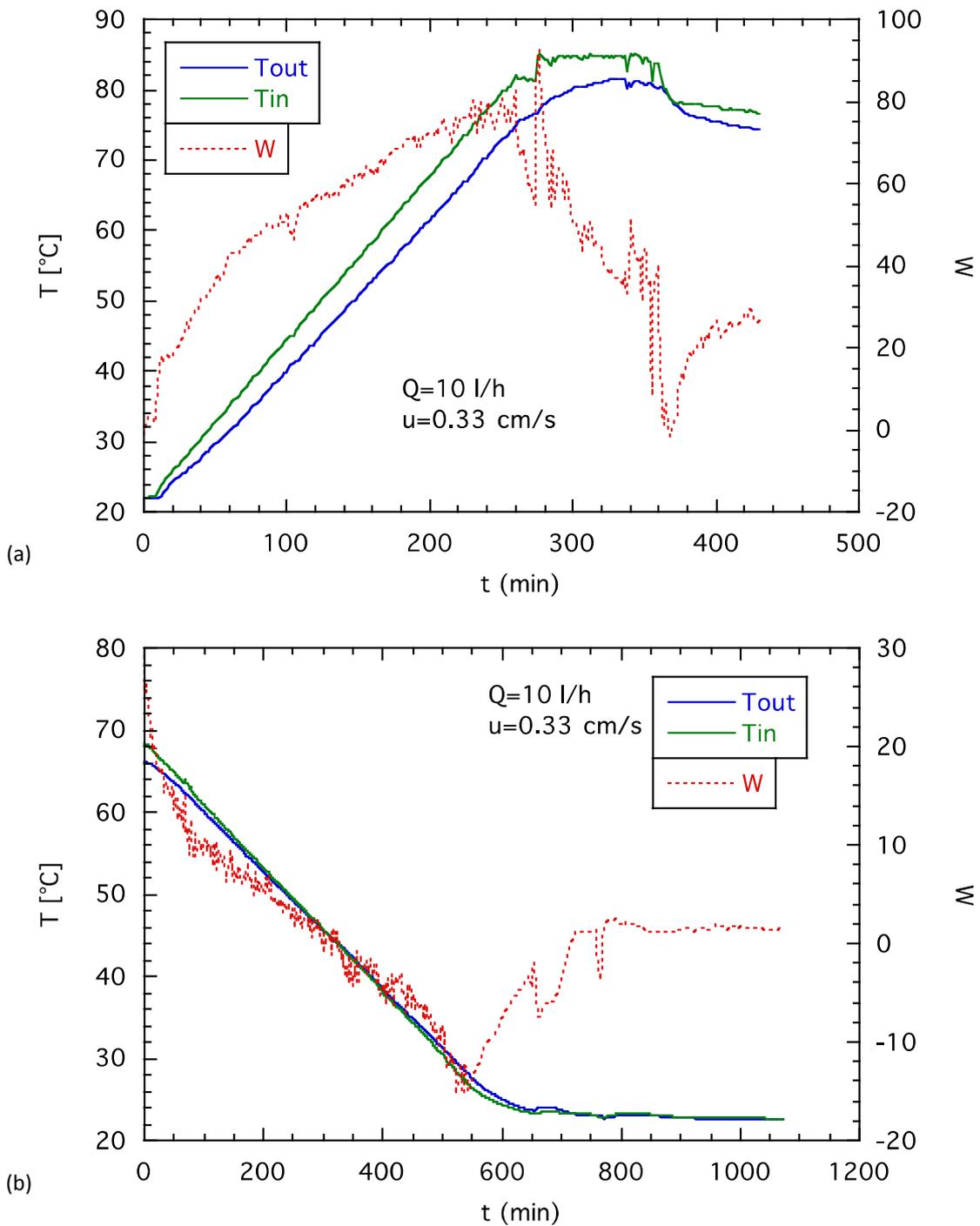


Figura 10 – Rampa di temperatura lenta: a) salita; b) discesa

Fornendo la rampa di temperatura veloce, ma con la portata 10 l/h (velocità di 0.33 m/s), in Figura 11a si nota un piccolo cambio di pendenza della T_{out} intorno ai 52°C dopo circa 15 minuti, quindi molto in ritardo rispetto al superamento dei 46°C di inizio fusione.

Sono state eseguite anche delle prove riempiendo il tubo d'acqua per mettere a confronto il caso del serbatoio d'accumulo tradizionale con quello contenente PCM.

I risultati delle due prove con portata 10 l/h e rampa di temperatura veloce (600°C/h) sono mostrati in Figura 11 per il tubo con il PCM, ed in Figura 12 per il caso con solo acqua.

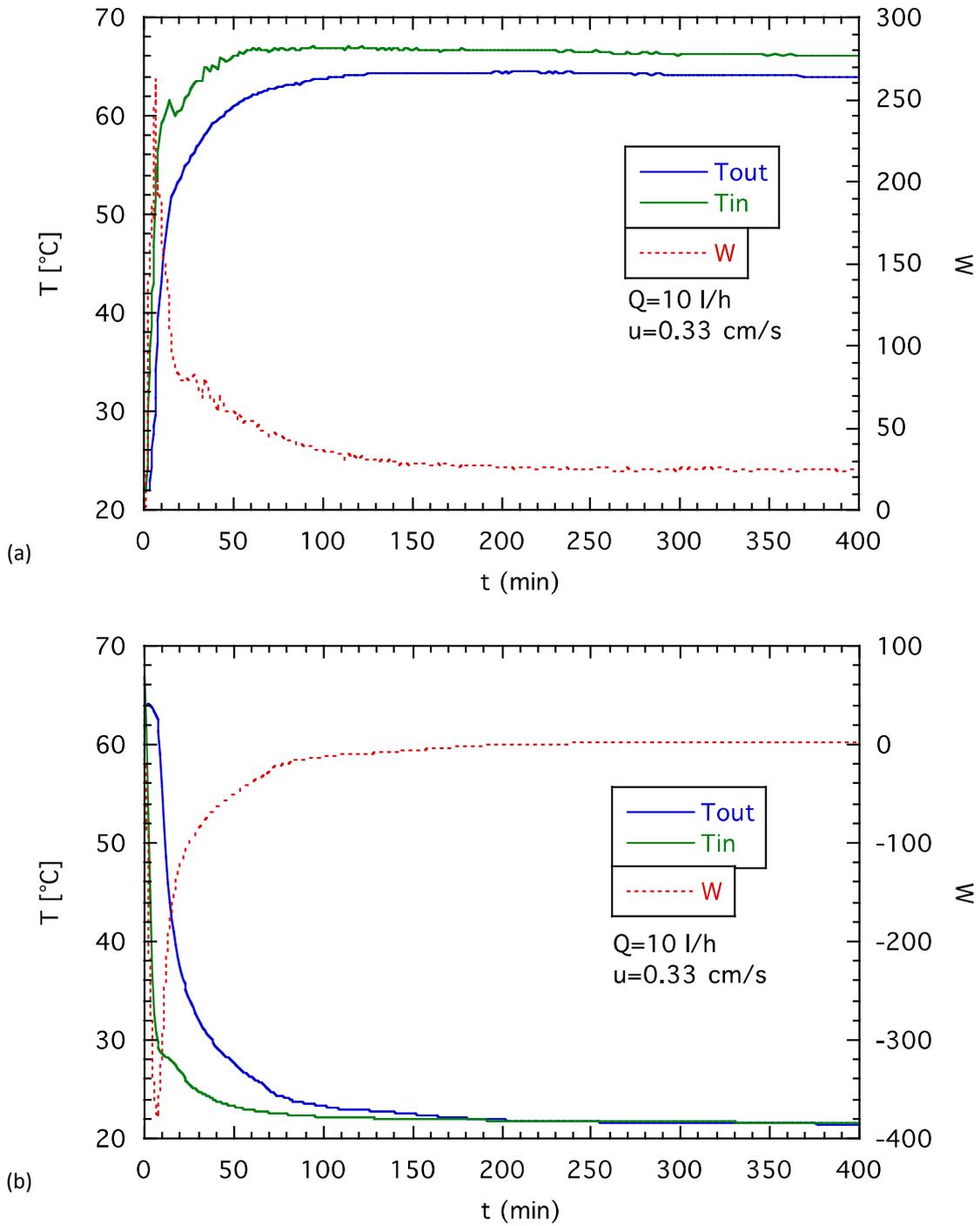


Figura 11 – Rampa di temperatura veloce, con PCM: a) salita; b) discesa

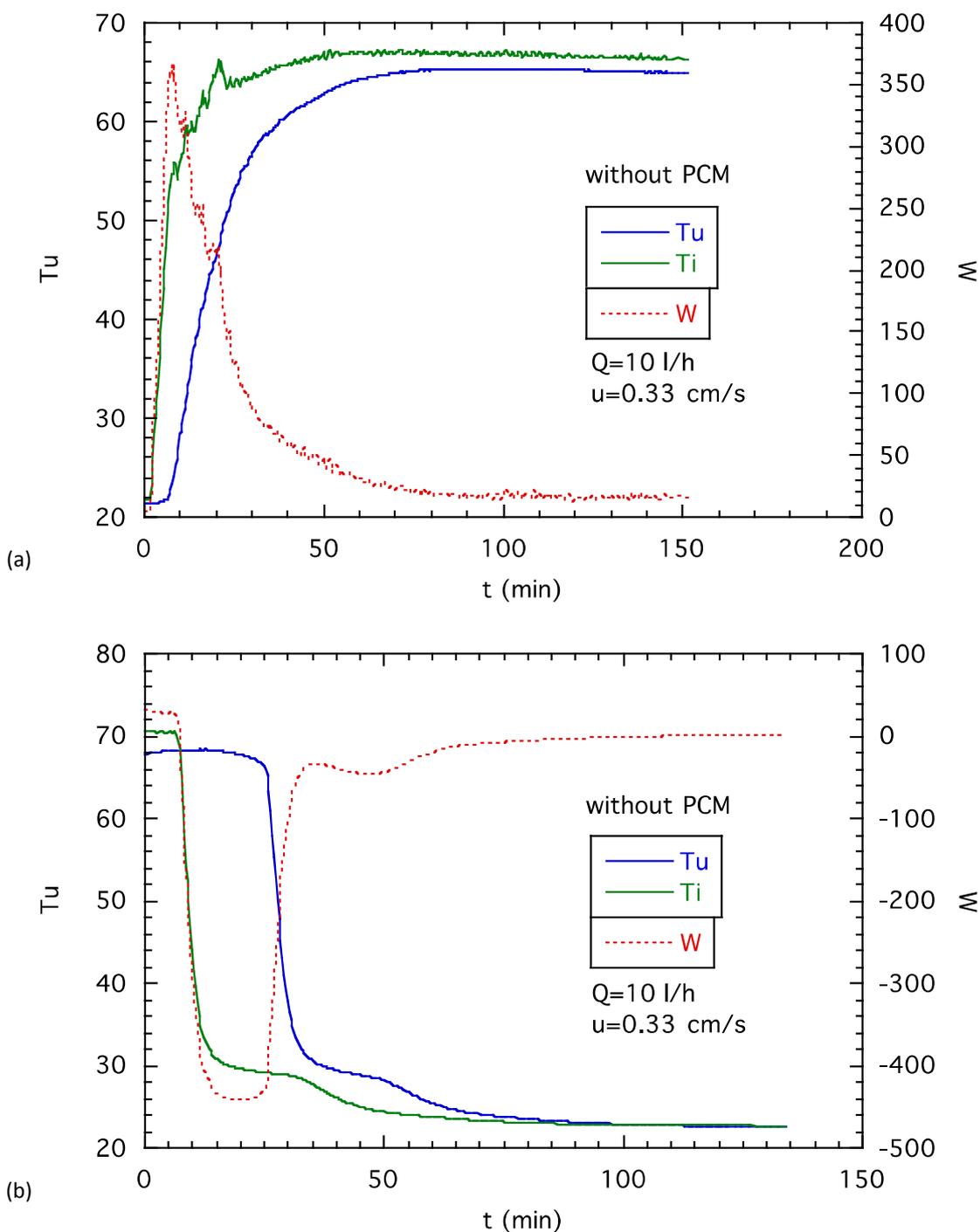


Figura 12 – Rampa di temperatura veloce, tubo con solo acqua: (a) salita; (b) discesa

Il confronto diretto dei risultati, riportato in Figura 13, mostra che nel caso si utilizzi il PCM l'aumento della T_{in} causa un aumento più rapido della T_{out} nei primi 30', ma dopo questo tempo il valore della T_{out} si mantiene più basso di quello della sola acqua, dato che in quest'ultimo caso si ha una maggiore capacità termica della massa di acqua e un tempo di transito molto più lungo. La stessa cosa si verifica con una improvvisa diminuzione della T_{in} : senza il PCM la T_{out} rimane più alta nella prima fase del transitorio, ma poi scende rapidamente ad un valore molto vicino alla T_{in} , mentre col PCM il calore latente di fusione la mantiene ad una temperatura leggermente superiore.

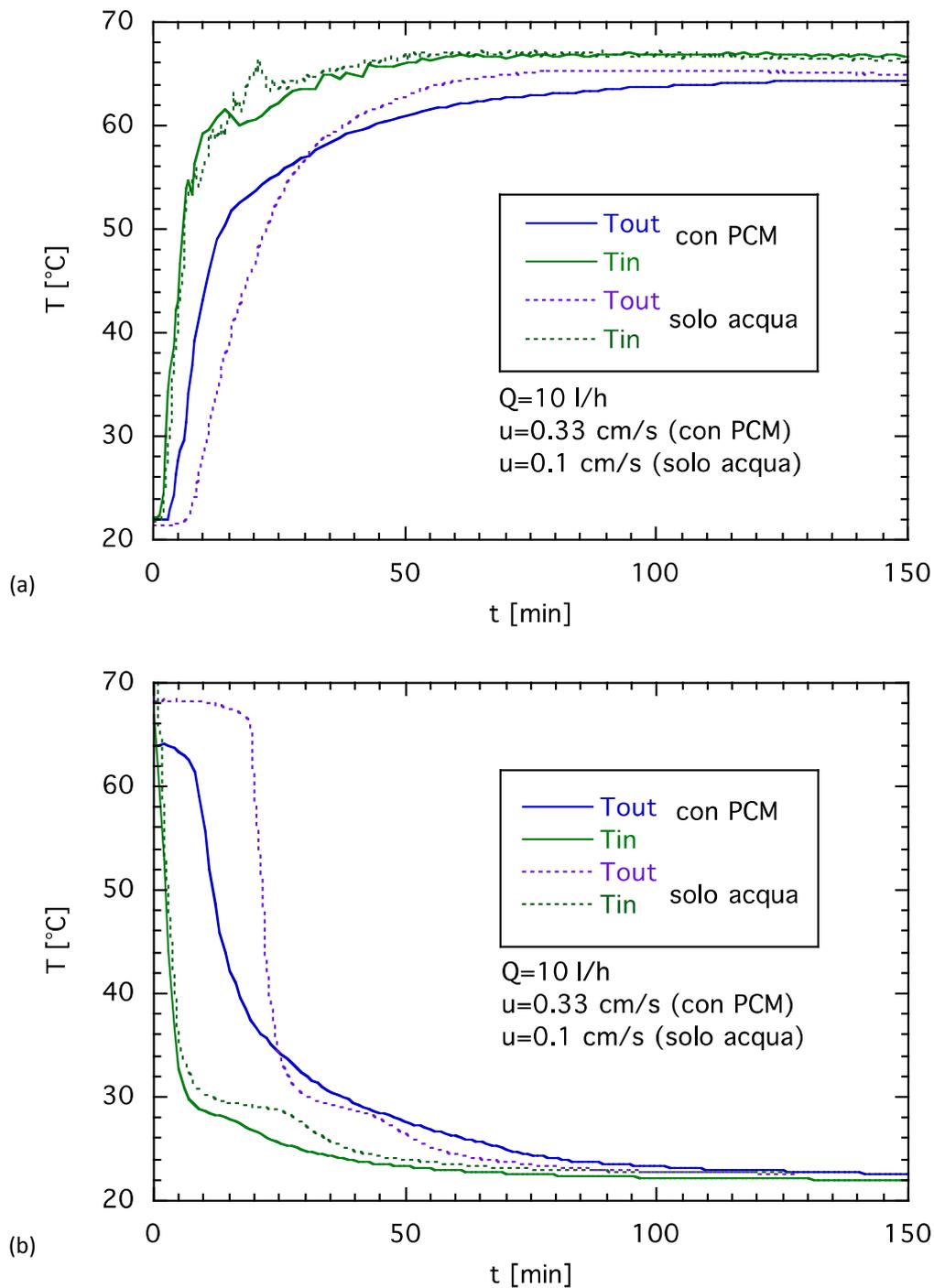


Figura 13 – Confronto tra il comportamento con PCM e solo acqua, in una rampa veloce: (a) salita; (b) discesa

Per avere una risposta più rapida è quindi necessario aumentare la conducibilità dei materiali a cambiamento di fase, che come evidente da Tabella 1 hanno un k notevolmente basso.

2.3.2 Calcolo parametro galleggiamento

Le prove sono state realizzate inviando l'acqua dal basso e facendola uscire dalla sommità, e quindi il galleggiamento indotto dal PCM avrà il verso opposto al moto nella fase di salita della temperatura (l'acqua entra più calda della parete, per cui lo strato limite tenderà a opporsi al moto), mentre avrà lo stesso verso

durante la discesa di temperatura, quando lo strato limite sarà più caldo del bulk e tenderà a muoversi verso l'alto.

Dato che questa situazione in alcuni casi non è quella che si ha nella realtà perché il serbatoio è strutturato con ingressi e uscite disposte in modo diverso, si è deciso di verificare quanto potesse incidere la convezione naturale o forzata sul nostro moto oppure se ci trovavamo in un regime misto [11]. Nel primo caso non ha importanza se siamo in downflow o upflow perché prevale o convezione forzata o naturale e dal punto di vista dello scambio non cambia nulla. Se siamo in una situazione di regime misto invece può contare molto se siamo in downflow o upflow.

Definiti il numero di Grashof

$$Gr_T = \frac{g\beta(T_{par} - T_b)D^3}{\mu_{par}/\rho_{par}} \quad (6)$$

ed il numero di Rayleigh

$$Ra = Gr Pr \quad (7)$$

I valori tipici delle prove sperimentali riportate sono

Gr_T : intorno a 3000

Re : da 30 a 70

Ra : circa $3 \cdot 10^5$

In Figura 14 è mostrata la mappa del regime di convezione, da [12], con la regione in cui cade la maggior parte delle nostre prove. Il regime è di convezione mista, ma al limite di quella naturale.

In tal caso bisogna verificare se tale regime condiziona lo scambio termico in maniera differente in caso di downflow o upflow. Questo comportamento è evidenziato dalla mappa, da [13], riportata in Figura 15. La regione in cui la convezione mista può far assumere comportamenti diversi nei due casi è quella con il parametro in ascissa tra 0.1 e 0.3. Nel nostro caso si ha

$$Ra^{1/3} / (Re^{0.8} Pr^{0.4}) : \text{da } 1.4 \text{ a } 2.2$$

e quindi ci si trova nella regione in cui l'effetto della convezione mista è trascurabile ed il comportamento è quello della convezione naturale pura. Questo assicura la compatibilità dei dati sperimentali con quelli del serbatoio reale anche nelle situazioni in cui il galleggiamento ha un effetto diverso rispetto al moto.

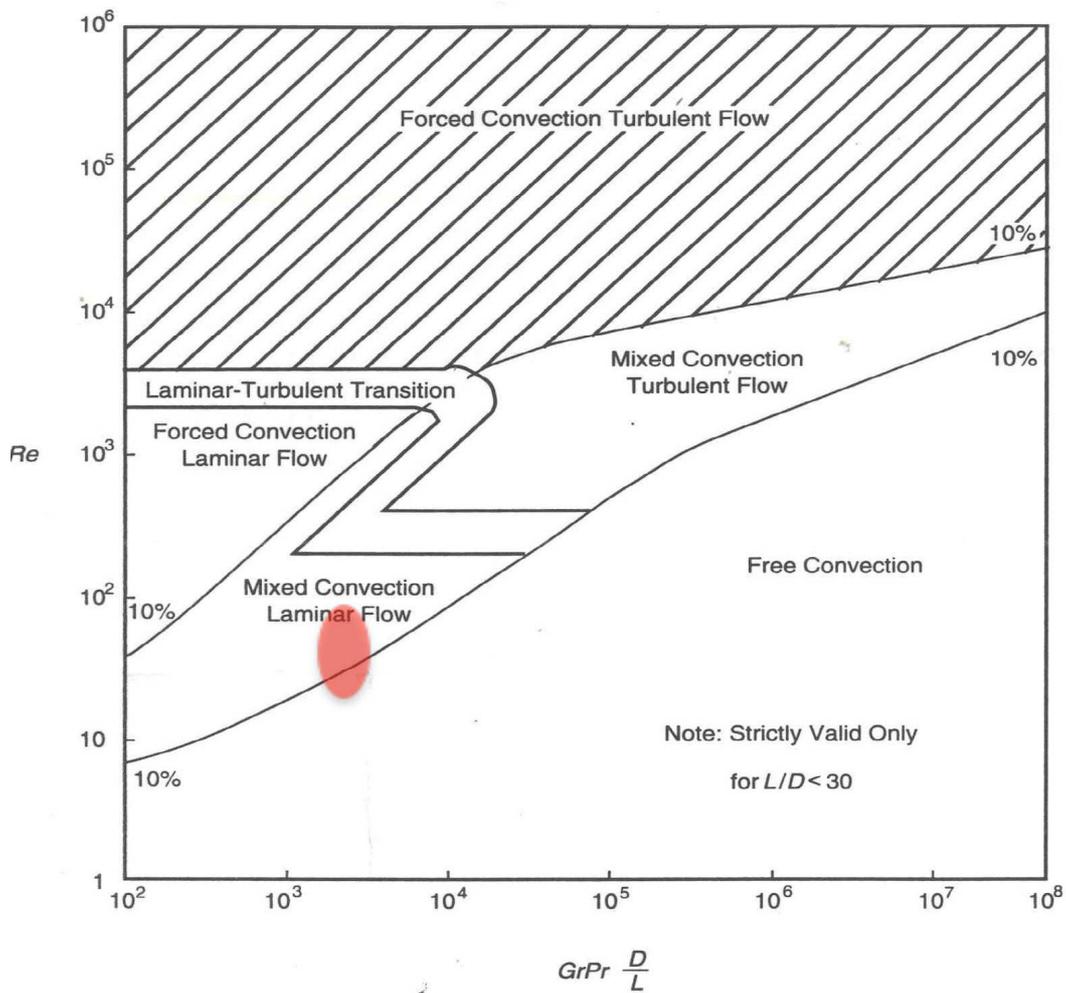


Figura 14 – Regime di convezione forzata, mista o naturale, per tubi verticali [12]

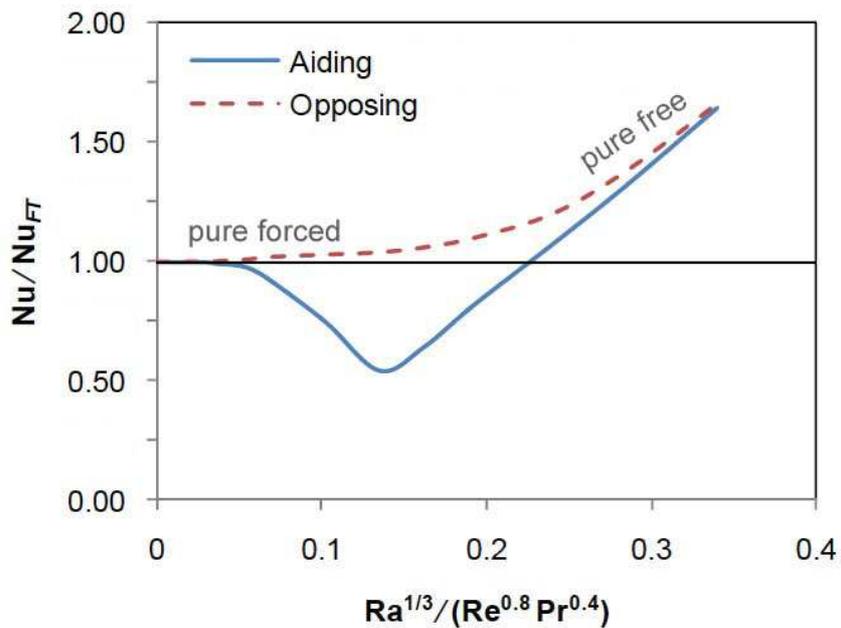


Figura 15 – Scambio termico per convezione mista, riferita a quella in convezione forzata, in caso flusso in verso uguale o opposto al galleggiamento [13]

2.3.3 Simulazioni con FLUENT

E' stata eseguita la simulazione del vessel sperimentale usando il codice fluidodinamico FLUENT, , nello specifico la versione è la 6.3.26.

La sezione di prova è stata schematizzata in geometria cilindrica con la nodalizzazione mostrata in Figura 16, in cui la dimensione verticale è stata espansa). In Figura 17 il tubo è mostrato intero (con l'asse di simmetria e con il volume del PCM in blue).

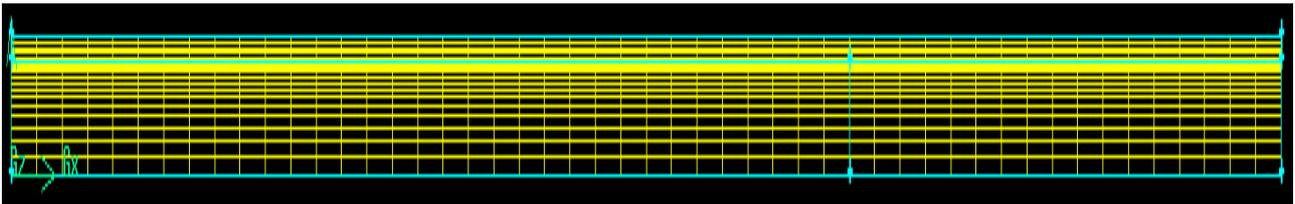


Figura 16 – nodalizzazione (scala y non proporzionale)



Figura 17 – visualizzazione dei volumi (anulo con acqua, PCM, aria)

Il PCM è definito come fluido con attivata l'opzione "melting", la parete del contenitore di PCM ha spessore 3 mm.

Per tenere conto delle dispersioni attraverso la coibentazione della parete esterna, è stata valutata sperimentalmente la potenza dispersa nella fase stazionaria con tutto il PCM ormai fuso ed in equilibrio di temperatura con l'acqua. In questo caso, la diminuzione della temperatura dell'acqua tra ingresso ed uscita è dovuto solo alle dispersioni della parete esterna del vessel:

$$W_{disp} = \Gamma c_p (T_u - T_i) \tag{8}$$

Per la condizione utilizzata (a $T_i=65^\circ\text{C}$, $T_{amb}=22^\circ\text{C}$ e $T_u=63^\circ\text{C}$), si è ottenuto un flusso disperso $q'' = -120 \text{ W/m}^2$, a cui corrisponde un coefficiente di scambio convettivo

$$h = q''/\Delta T = 2.86 \text{ W/m}^2\text{K} \tag{9}$$

Questo valore è stato inserito nella simulazione come "boundary condition" della parete esterna.

2.3.4 Confronto delle simulazioni con gli andamenti sperimentali

Il primo caso simulato è quello con le stesse condizioni della prova di Figura 11 , con cui sono stati confrontati i risultati, al fine di validare il modello ed avere informazioni aggiuntive su parametri non monitorati nel caso reale. Le caratteristiche della prova sono: Tubo con 66 cm PCM e 34cn aria, sale S46 ($k=0.45$), T_i : rampa ($10^\circ\text{C}/\text{min}$).

In Figura 18 sono mostrati i risultati considerando (come nella realtà) la parete del tubo di PCM di materiale plastico (polietilene). Si può vedere che la simulazione è soddisfacente per i primi 25 minuti di salita della

Ti, ma dopo questa fase la Tu_cal prevista dal FLUENT inizia ad appiattirsi per l'effetto della fusione del PCM, mentre questo è molto meno evidente nel caso reale, dove l'effetto del PCM sembra più lento.

Una simulazione molto più simile al caso sperimentale si ottiene sostituendo le proprietà fisiche del PCM S46 con quelle della paraffina A46, come mostrato in Figura 19. Questo sembrerebbe indicare che la conducibilità e la capacità termica del sale nelle candele reali probabilmente risente di vuoti derivanti dalla granulosità iniziale.

La T-par mostra la temperatura sulla parete interna del PCM, T-asse quella sull'asse. Tutti questi valori (calcolati da FLUENT), sono le medie sulla superficie o sull'asse della zona occupata dal PCM.

Si può notare che l'A46 fonde più rapidamente nonostante la sua minore conducibilità (la T-asse inizia ad aumentare dopo 140 min, contro i 160 dell'S46). Questo è dovuto alla sua minore densità e quindi alla minore capacità termica totale. Invece dal punto di vista dell'effetto di "thermal storage" è l'S46 a mostrare un contributo maggiore (seppure piccolo) sulla temperatura dell'acqua. Infatti la Tu_cal si mantiene più bassa per un tempo maggiore (fino a 200 minuti) a causa dell'assorbimento del calore di fusione da parte del PCM, che però comincia a far vedere il suo effetto a Tu_cal=53°C (mentre la fusione inizia a 46°C), a causa della resistenza termica della parete di plastica del contenitore.

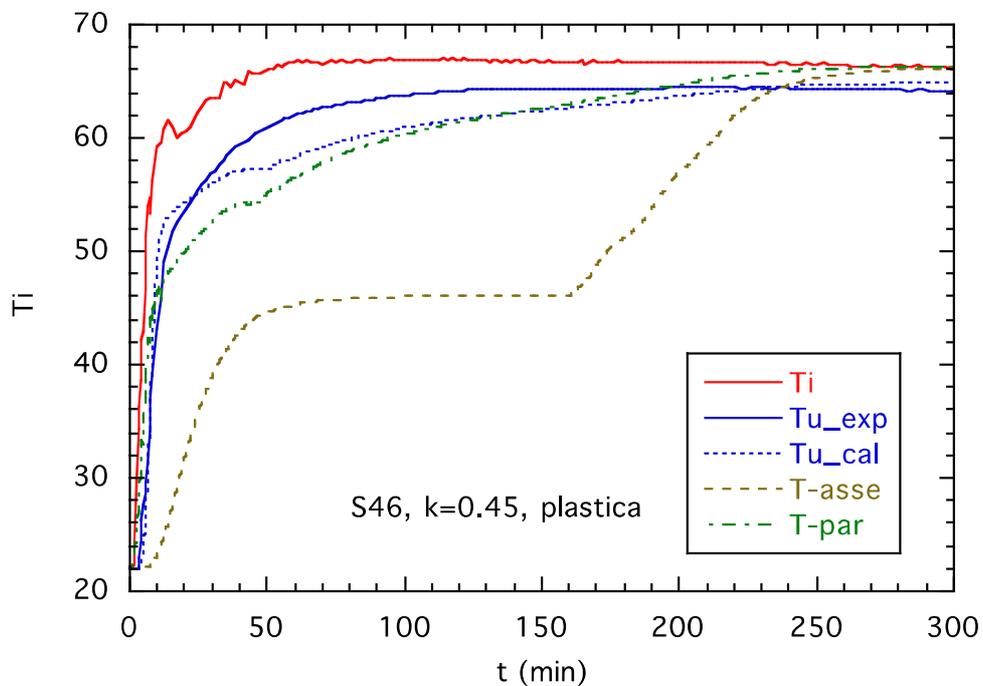


Figura 18 – confronto della Tu sperimentale con la simulazione con: sale S46 e parete del tubo di PCM in materiale plastico

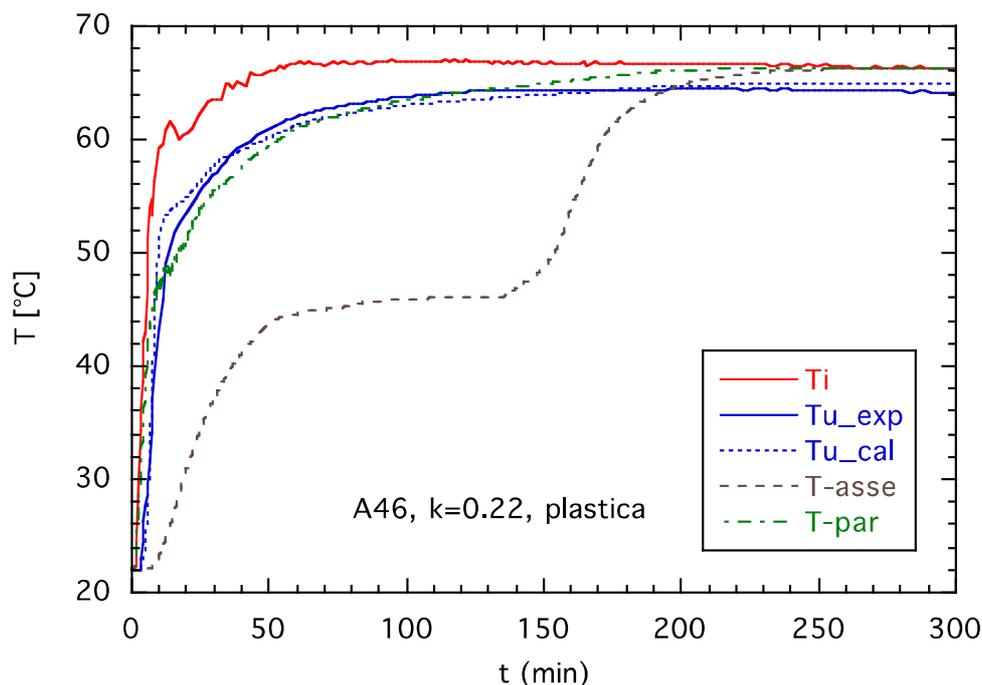


Figura 19 – confronto della T_u sperimentale con la simulazione con: paraffina A46 e parete del tubo di PCM in materiale plastico

In Figura 20 viene mostrata la simulazione del caso del S46, ma considerando che la parete del contenitore del PCM sia di alluminio. Diminuendo la resistenza della parete si nota un effetto migliorativo rispetto a Figura 18, con la T_u che inizia ad appiattirsi proprio a 46°C.

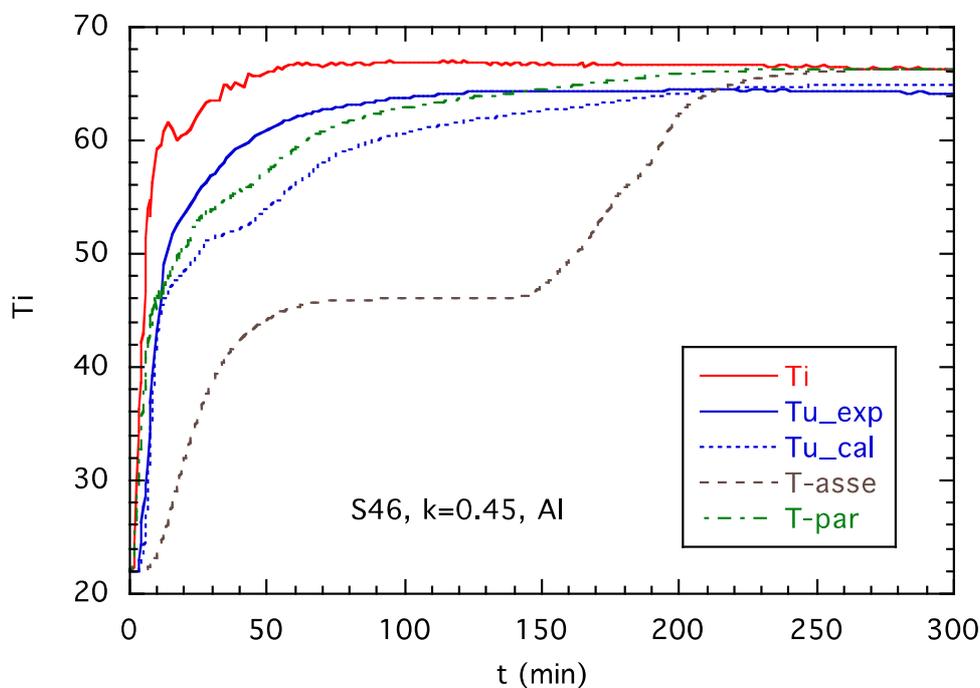


Figura 20 – confronto della T_u sperimentale con la simulazione con: sale S46 e parete del tubo di PCM in Alluminio

In Figura 21 sono mostrati i confronti tra i flussi termici verso il PCM tra i dati sperimentali e quelli calcolati con i due PCM S46 e A46. La variabile sul secondo asse è la frazione di PCM liquido (calcolata). Entrambe le simulazioni forniscono una potenza assorbita in modo più continuo, mentre quella ottenuta dai dati sperimentali con l'equazione (5) presenta un picco all'inizio della fusione e poi un abbattimento maggiore (sempre a causa della non completa compattazione del sale). Anche da questi grafici si vede la maggior potenza assorbita teoricamente dall'S46.

In

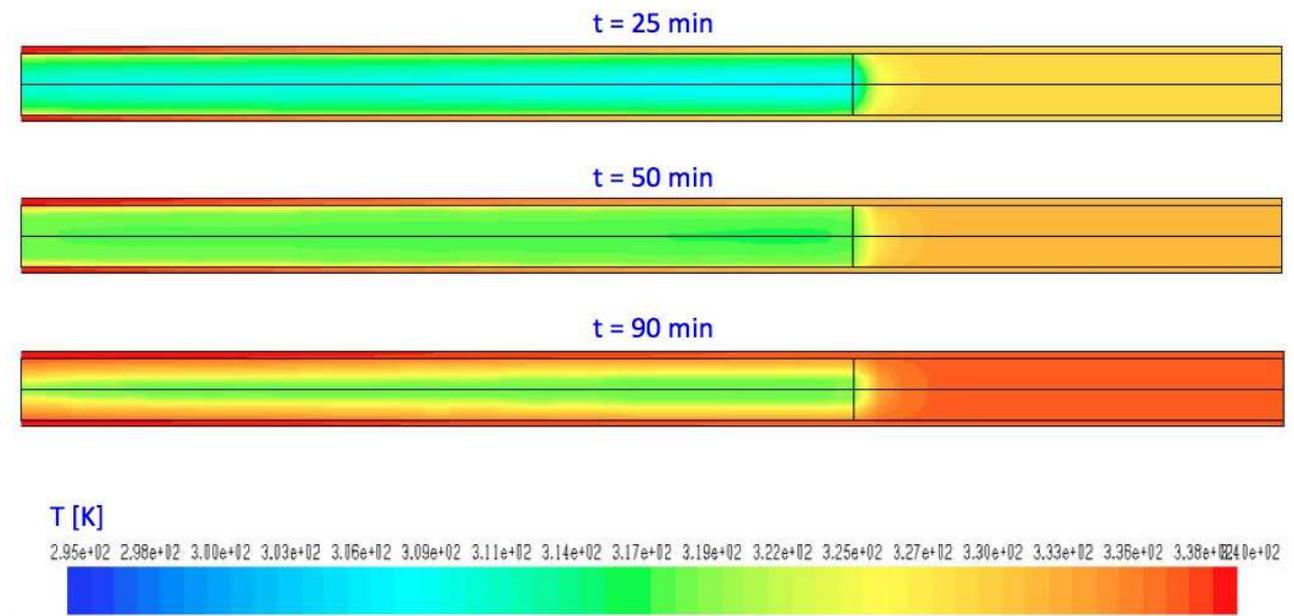


Figura 22 e

Figura 23 sono mostrate le "color map" delle temperature e della frazione di liquido nella simulazione S46 in tre istanti: dopo 25' (1500 s), quando l'effetto della fusione è diventato visibile; dopo 50' (3000s s), quando la superficie del PCM è ormai fusa e la temperatura interna del solido tende a stabilizzarsi; dopo 150' (9000 s), a fusione quasi completa. Si può notare come l'acqua nell'anulo viene raffreddata sempre meno all'aumentare dello spessore di liquido fuso intorno al nocciolo di PCM solido. L'effetto della parete di alluminio aumenta leggermente lo scambio, come si vede confrontando Figura 24 con le "t=50 min" delle due figure precedenti.

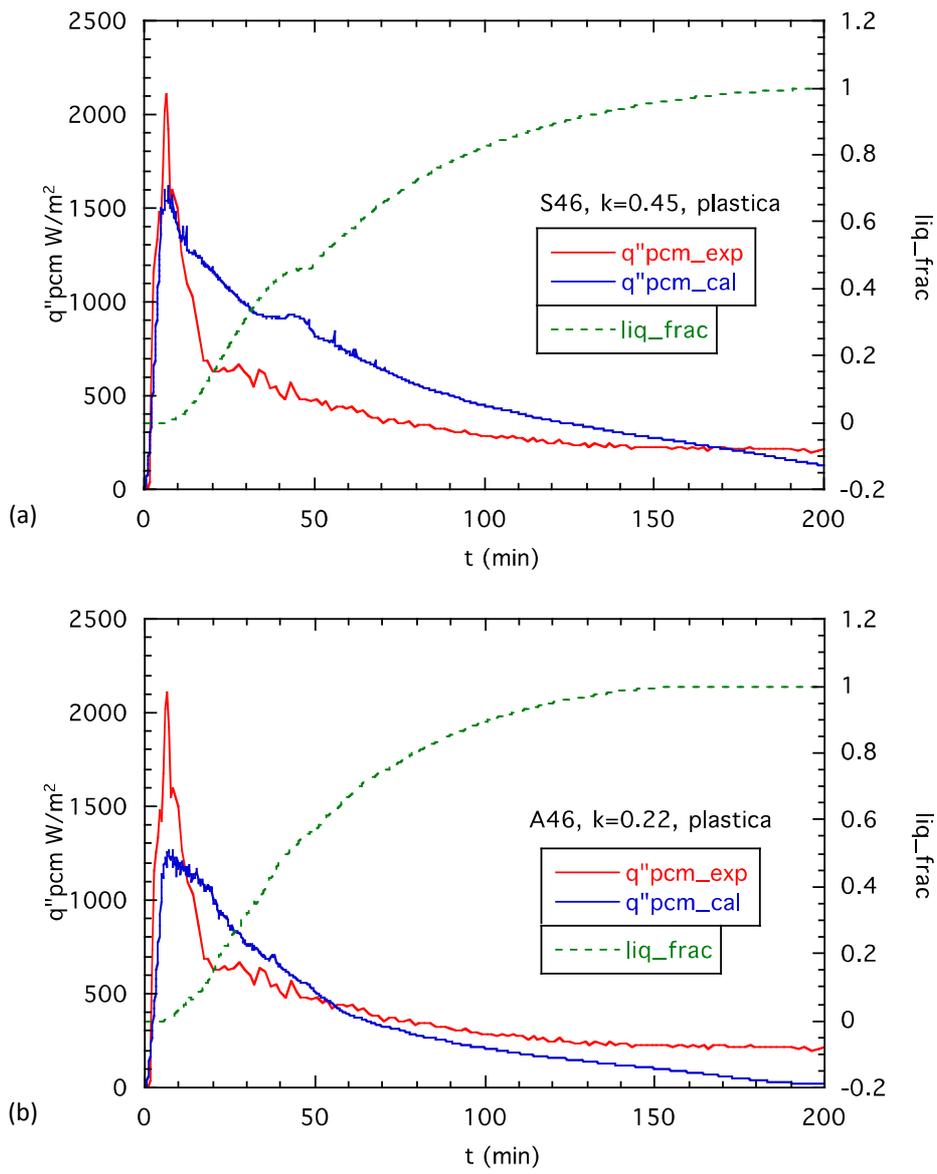


Figura 21 – confronto del flusso termico sperimentale con la simulazione con: sale S46 e paraffina A46

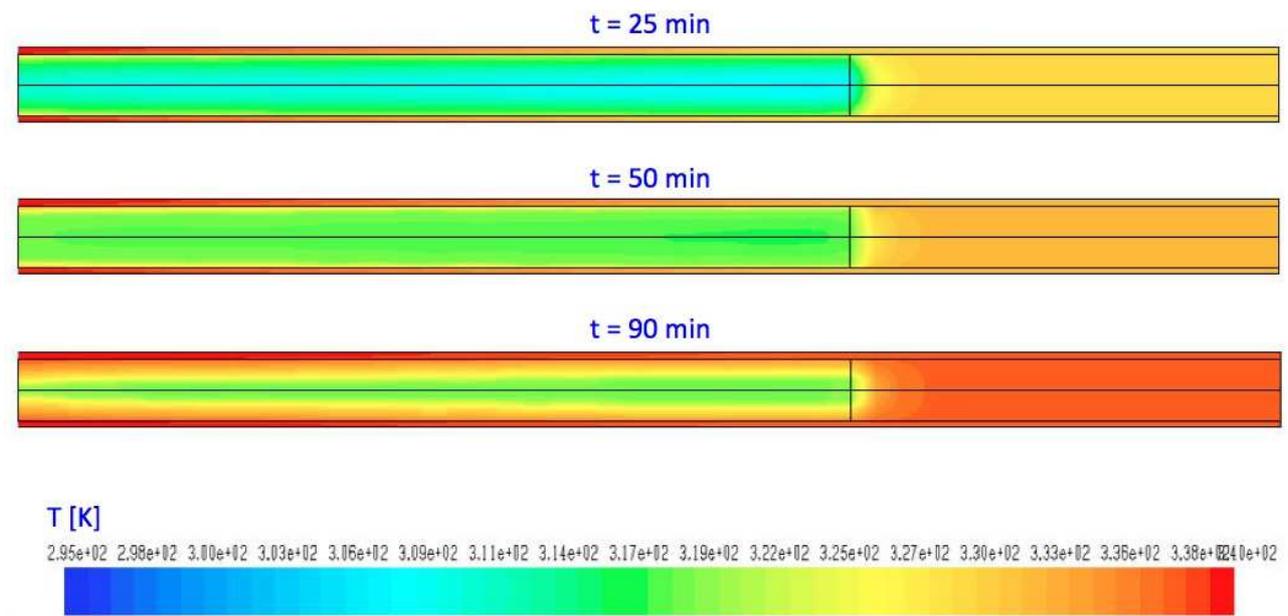


Figura 22 – simulazione con sale S46: temperature a 25', 50' e 150'

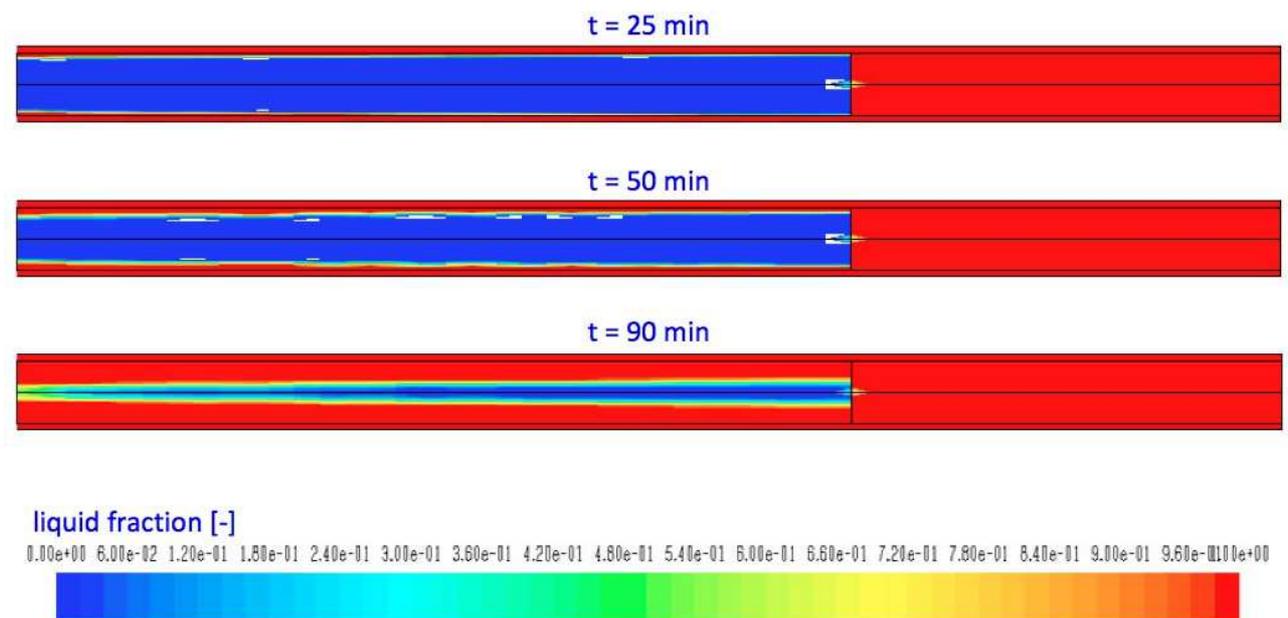


Figura 23 – simulazione con sale S46: frazione di liquido a 25', 50' e 150'

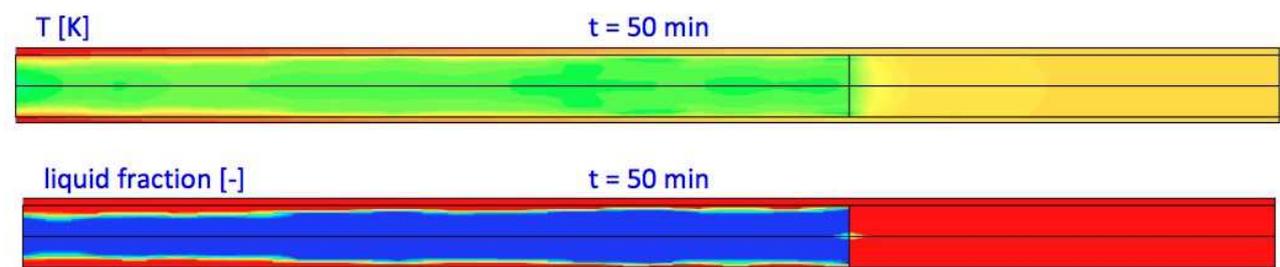


Figura 24 – Sale S46: temperatura e frazione di liquido a 50' (stesse scale di

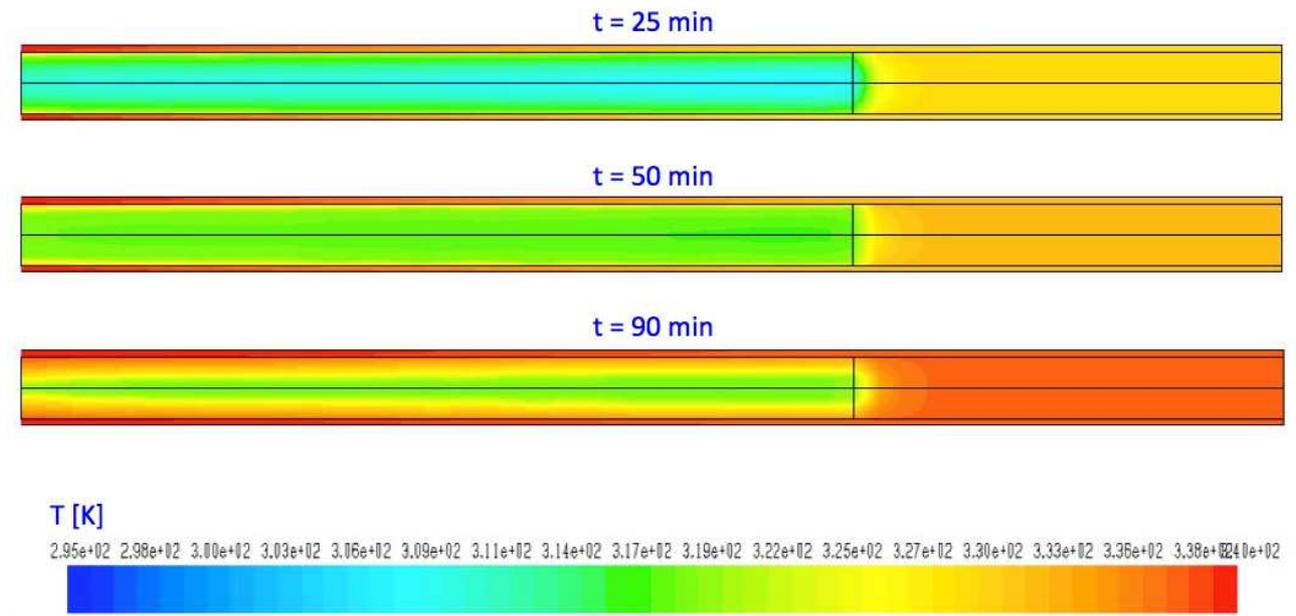
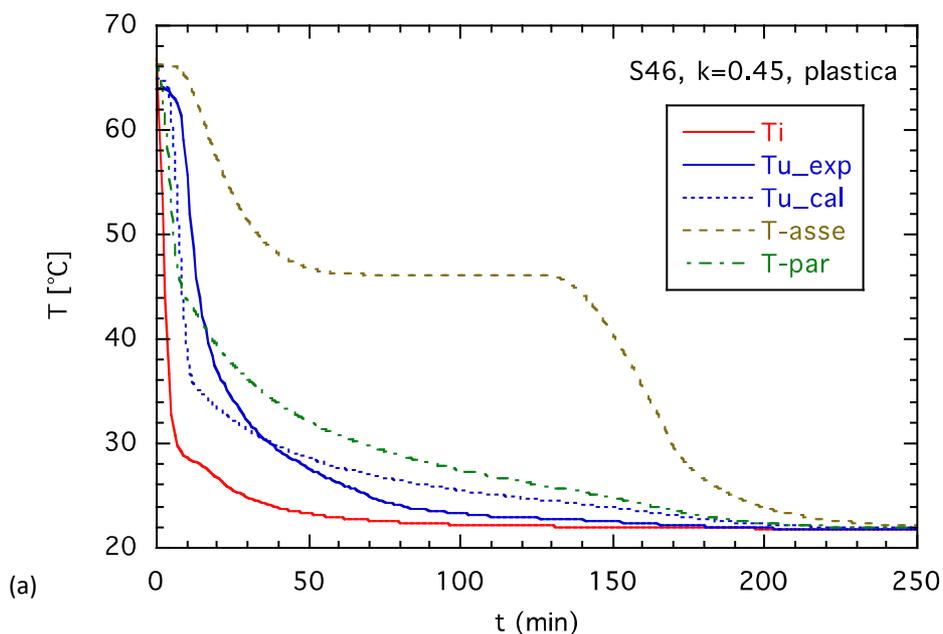


Figura 22 e

Figura 23)

Sono stati confrontati anche i transienti con discesa temperatura (Figura 11b), ottenendo risultati simili a quelli descritti in precedenza. Da Figura 25 si vede che la solidificazione dell'S46 impiega un tempo più lungo dell'A46, (per la maggiore capacità termica), ma l'effetto scaldante sull'acqua è migliore a causa della maggior conducibilità, risultato confermato anche in questo caso dall'andamento del flusso termico mostrato in Figura 26.

In Figura 27 e Figura 28 sono mostrate anche per il transitorio in discesa le mappe della temperatura e della frazione di liquido. Come per la salita di temperatura, si vede che l'effetto del PCM diminuisce notevolmente all'aumentare dello strato anulare già solidificato.



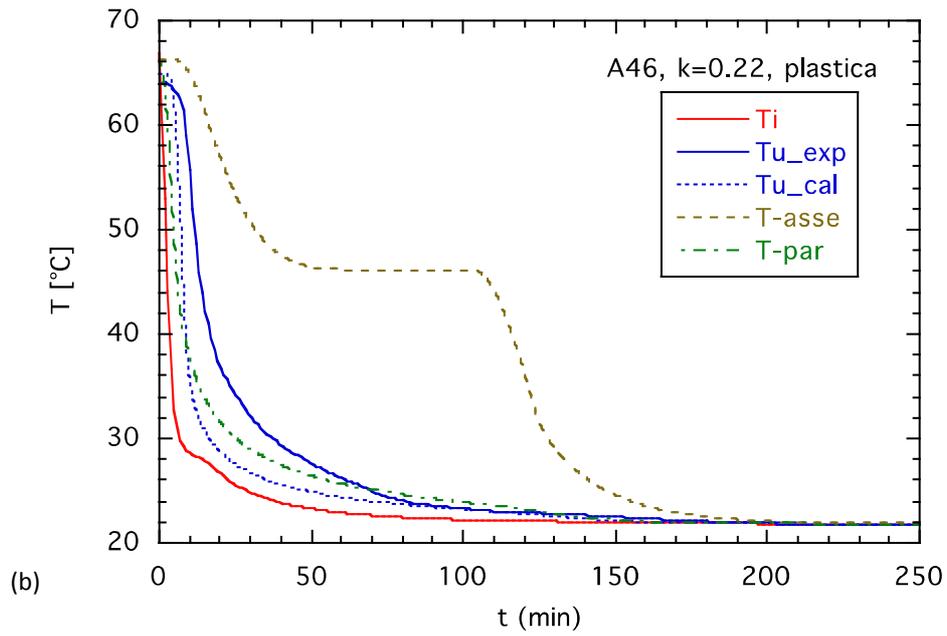
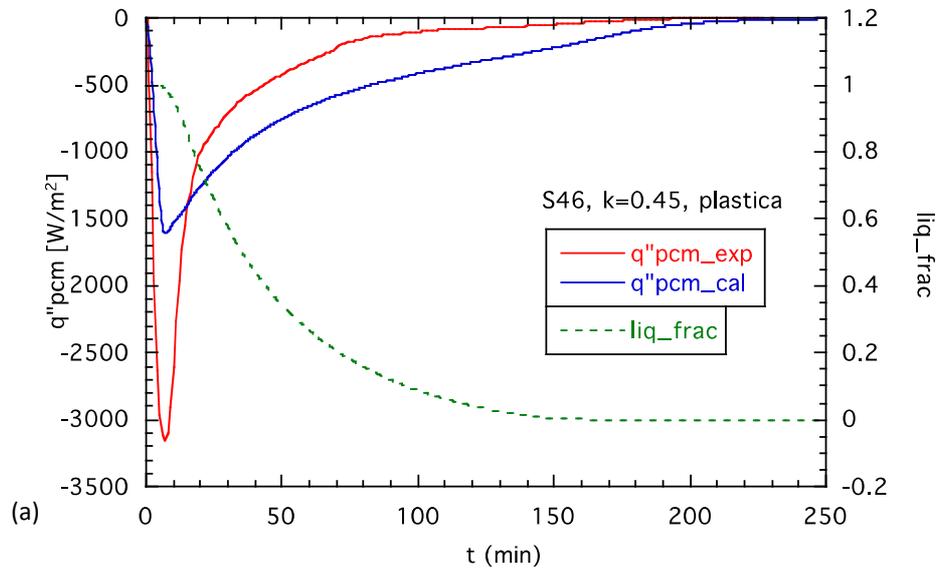


Figura 25 – confronto della Tu sperimentale con la simulazione con sale A46 e paraffina A46, nel transitorio con discesa di temperatura



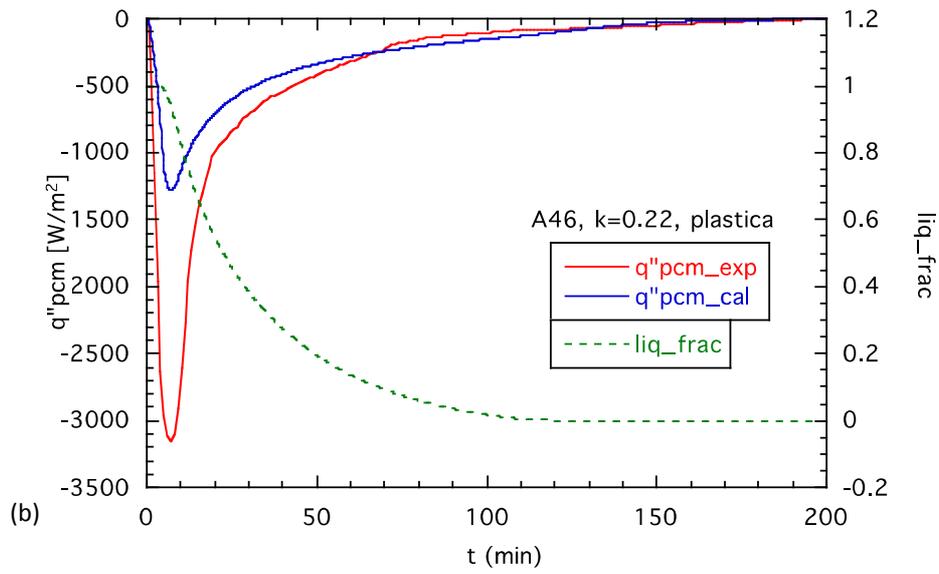


Figura 26 – confronto del flusso termico sperimentale con la simulazione con: sale S46 e paraffina A46, nel transitorio con discesa di temperatura

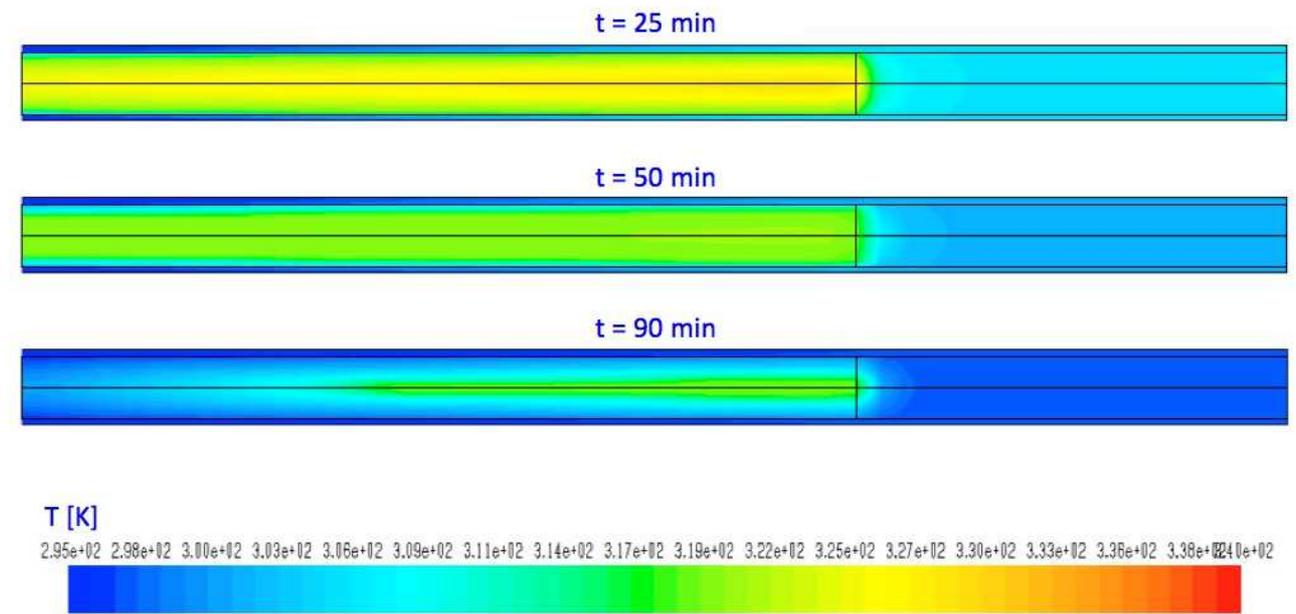


Figura 27 – simulazione con sale S46: temperature a 25', 50' e 150'

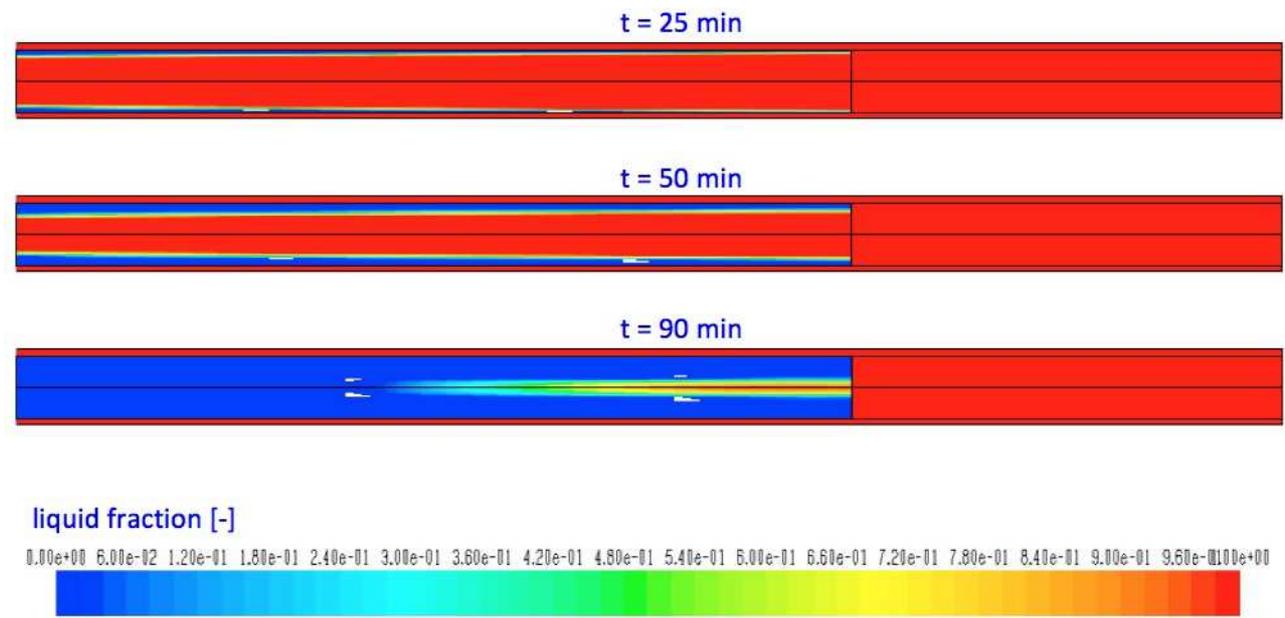


Figura 28 – simulazione con sale S46: frazione di liquido a 25', 50' e 150'

Considerando il serbatoio di accumulo reale, con le sue 120 candele di PCM S46 (superficie 12.4 m²), la potenza assorbita dopo un aumento di temperatura di circa 40°C, o rilasciata dopo una diminuzione simile, può essere valutata considerando i risultati di Figura 21a e Figura 26a:

In condizioni ideali, la simulazione prevede, dopo l'aumento della temperatura, per 88 minuti un flusso medio assorbito di circa 1000 W/m², cioè una potenza totale di circa 12.4 kW, dopo i quali l'assorbimento continua ma a potenze molto minori.

Il risultato sperimentale invece mostra un picco iniziale maggiore, ma molto più breve, per cui la stessa potenza media si ha per solo 42 minuti.

Dopo la diminuzione della temperatura invece i risultati sono più vicini ma dello stesso ordine di grandezza, i 15 kW sono rilasciati per circa 67 minuti nella simulazione, 61 minuti nel caso sperimentale.

Queste potenze però sono scambiate solo se il salto di temperatura è abbastanza alto, con una differenza rispetto alla temperatura di fusione di almeno 8-10°C, cioè per avere un buon assorbimento di energia nel nostro caso bisogna superare i 55°C, per avere il rilascio bisogna scendere sotto i 38°C

Per quanto riguarda l'effetto sulla temperatura in uscita, esso è molto limitato e, per i primi minuti, molto minore di quello che si ottiene con il serbatoio senza le candele di PCM, dalla capacità termica del volume di acqua che prende il loro posto, come si è visto in Figura 13 e Figura 18.

Possiamo anche valutare il confronto tra caso con pcm e quello con sola acqua, per quanto riguarda l'energia accumulata o rilasciata quando in ingresso si ha lo stesso gradino di temperatura del caso sperimentale, $\Delta T=45^\circ\text{C}$. Considerando che i tubi di PCM occupano un volume di 0.34 m³, l'energia dovuta al salto entalpico dell'acqua è pari a 6.4 MJ, che equivale 86 minuti con la precedente potenza di 12.4 kW, dopo i quali tutta l'acqua è alla nuova temperatura e non c'è più passaggio di energia.

Quindi possiamo dire che la sostituzione dell'acqua col PCM diventa conveniente solo se le variazioni di temperatura hanno durata abbastanza lunga, mentre per tempi fino a circa 90 minuti l'accumulo di energia nell'acqua risulta maggiore.

Dall'analisi effettuata si possono trarre le seguenti conclusioni:

La simulazione è abbastanza fedele al processo fisico reale, con le discrepanze che si possono imputare imprecisioni dei dati derivanti dalle condizioni sperimentali non perfettamente misurabili. A esempio le candele di PCM contengono inizialmente un volume di sale granulare, che dopo le prime fusioni si compatta diminuendo l'altezza occupata, ma non sempre in modo uniforme in quanto la solidificazione

comporta una diminuzione di volume che provoca la formazione di vuoti o fori nella massa solida, lasciando quindi un blocco di PCM non omogeneo, e questo diminuisce la conducibilità media rispetto al valore nominale; un altro importante aspetto può essere la degradazione chimica del materiale, che da specifiche del produttore ha una temperatura massima di 56°C, minore di quella normalmente raggiunta sia nelle prove sperimentali che nell'impianto di solar cooling.

Preso quindi per accettabile il modello, l'analisi dei parametri che esso fornisce hanno permesso di spiegare meglio i risultati sperimentali. L'indicazione principale, rispetto alle esigenze di accumulo termico nel serbatoio dell'impianto di solar cooling, è che con le loro caratteristiche nominali tutti i PCM valutati hanno una risposta molto lenta, fornendo vantaggi solo nelle fasi in cui la temperatura varia a cavallo del valore di fusione e poi si mantiene nel nuovo valore per ore.

Per rendere il PCM conveniente anche nelle variazioni più brevi, bisogna aumentarne la conducibilità ottenendo così una risposta più rapida.

2.3.5 Simulazioni per analisi di sensibilità alle variazioni di materiali o condizioni

Per valutare quali sono i parametri più importanti nell'aumento della rapidità di risposta del PCM, si sono effettuate simulazioni variando la conducibilità (e il tipo) del PCM, il materiale della parete della candela di PCM, il salto di temperatura intorno alla T_{pc} di 22°C invece dei 45°C delle prove trattate finora.

Come PCM rappresentativi sono stati scelti i due già trattati in precedenza, paraffina A46 e sale S46, e gli stessi con la conducibilità aumentata: l'A46 con $k=1$ W/mK, che come si vedrà in seguito è il valore ottenuto con l'inserimento in una schiuma solida di SiC, indicato come A46+; l'S46 con una conducibilità $k=10$ W/mK, valore che si potrebbe ottenere con ulteriori sforzi, indicato come S46+.

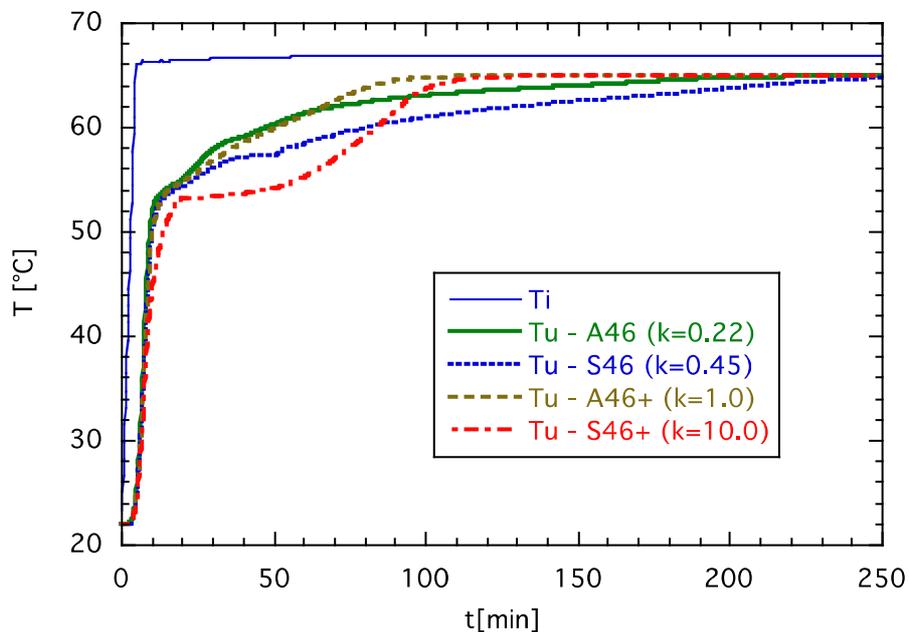


Figura 29 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con diversa conducibilità, nel transitorio con salita di temperatura

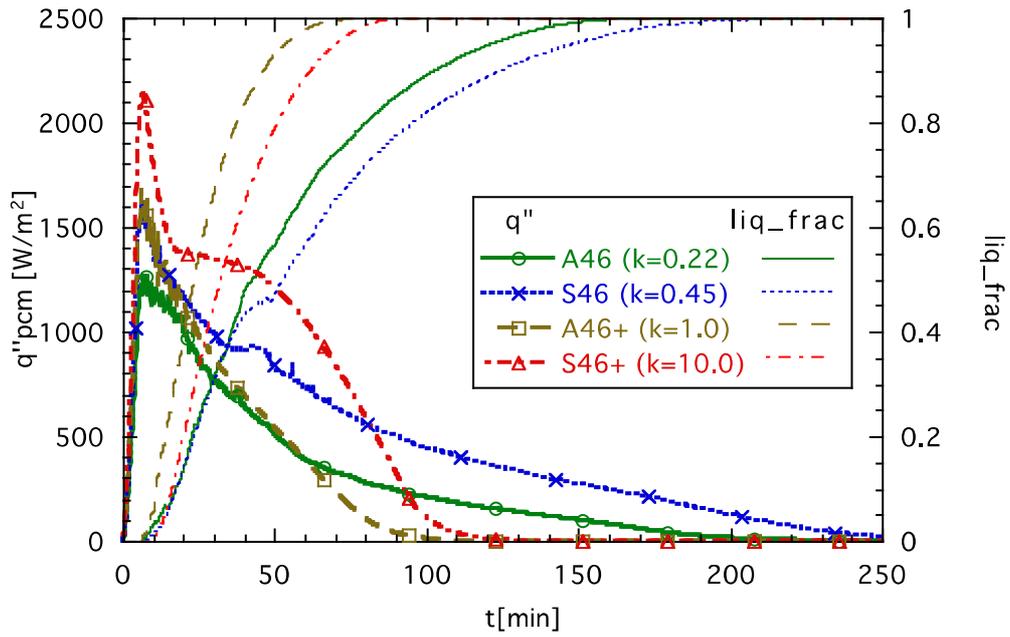


Figura 30 – confronto del flusso termico e della frazione di liquido per PCM simulati con diversa conducibilità, nel transitorio con salita di temperatura

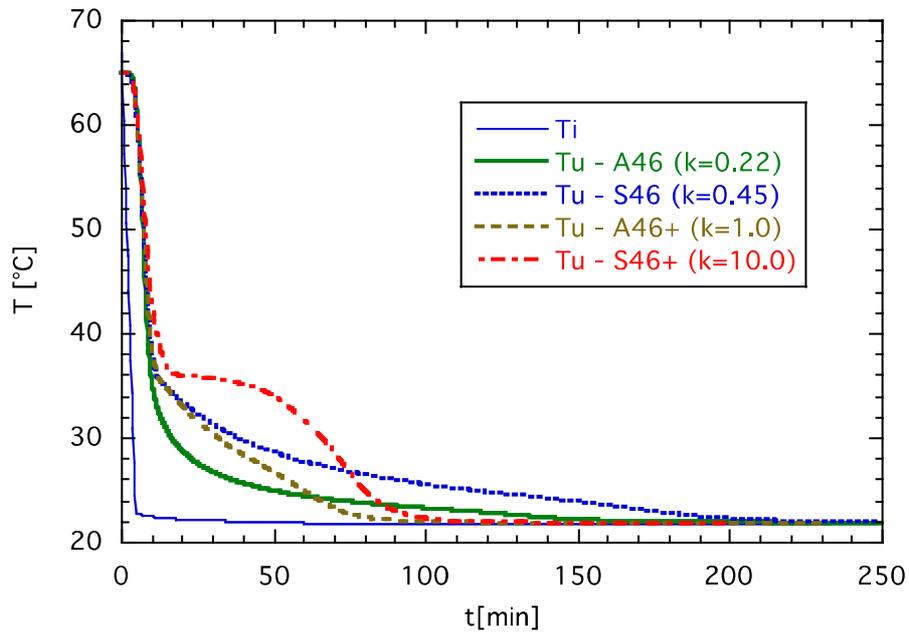


Figura 31 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con diversa conducibilità, nel transitorio con discesa di temperatura

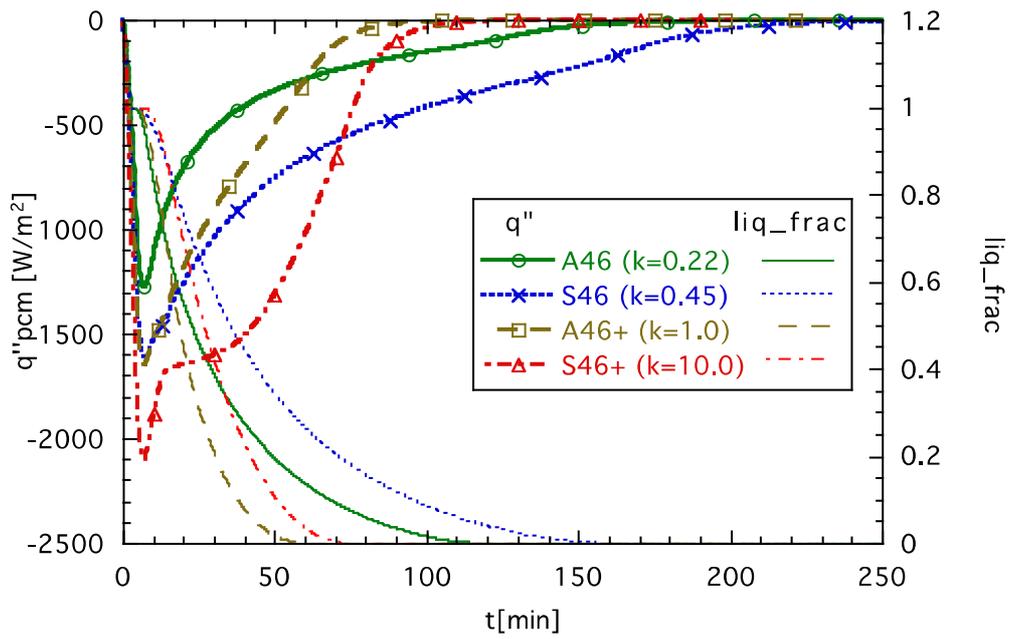


Figura 32 – confronto del flusso termico e della frazione di liquido per PCM simulati con diversa conducibilità, nel transitorio con discesa di temperatura

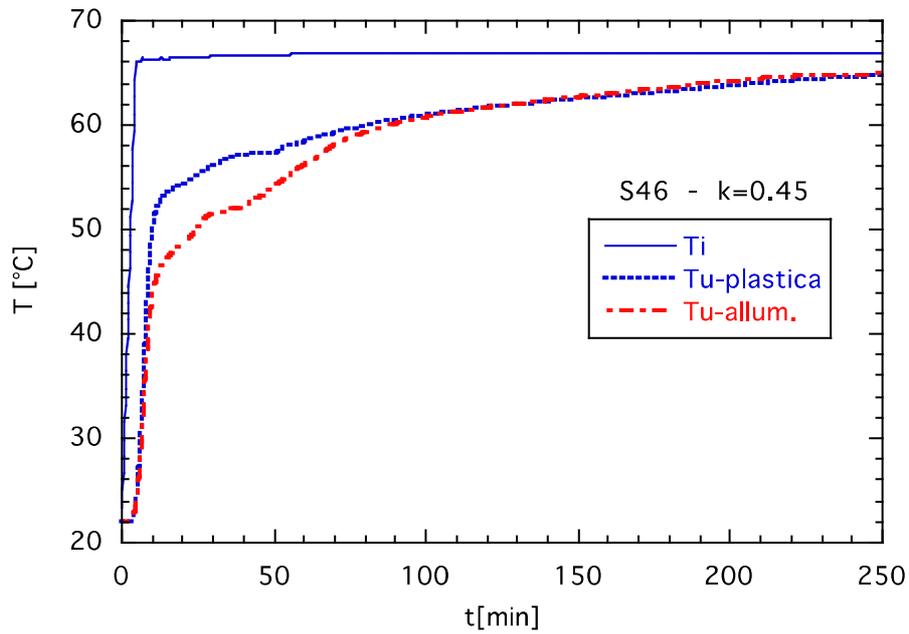


Figura 33 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con parete di plastica o alluminio, nel transitorio con salita di temperatura

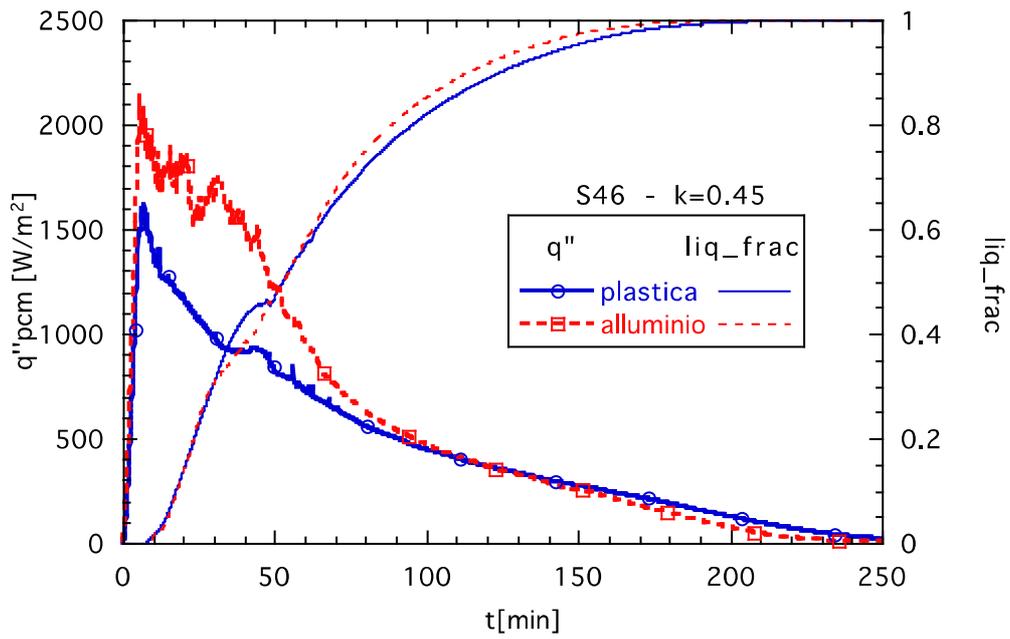


Figura 34 – confronto del flusso termico e della frazione di liquido per PCM simulati con parete di plastica o alluminio, nel transitorio con salita di temperatura

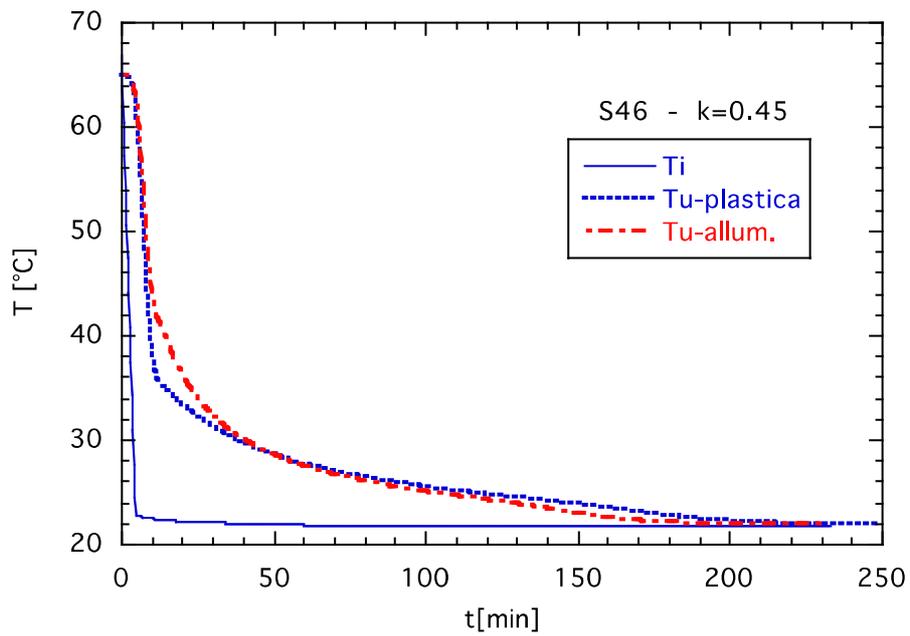


Figura 35 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con parete di plastica o alluminio, nel transitorio con discesa di temperatura

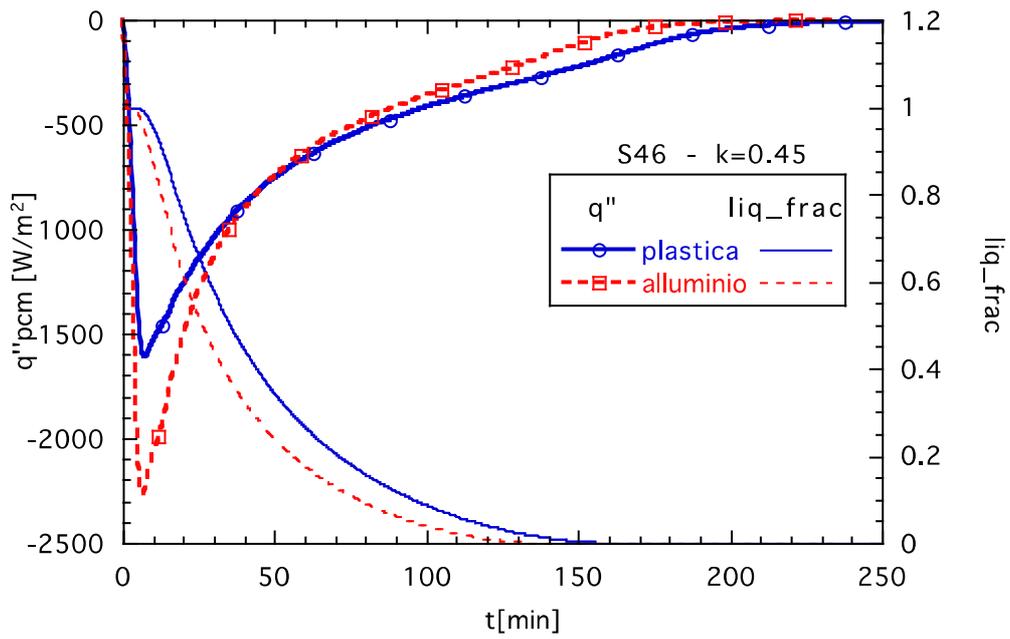


Figura 36 – confronto del flusso termico e della frazione di liquido per PCM simulati con parete di plastica o alluminio, nel transitorio con discesa di temperatura

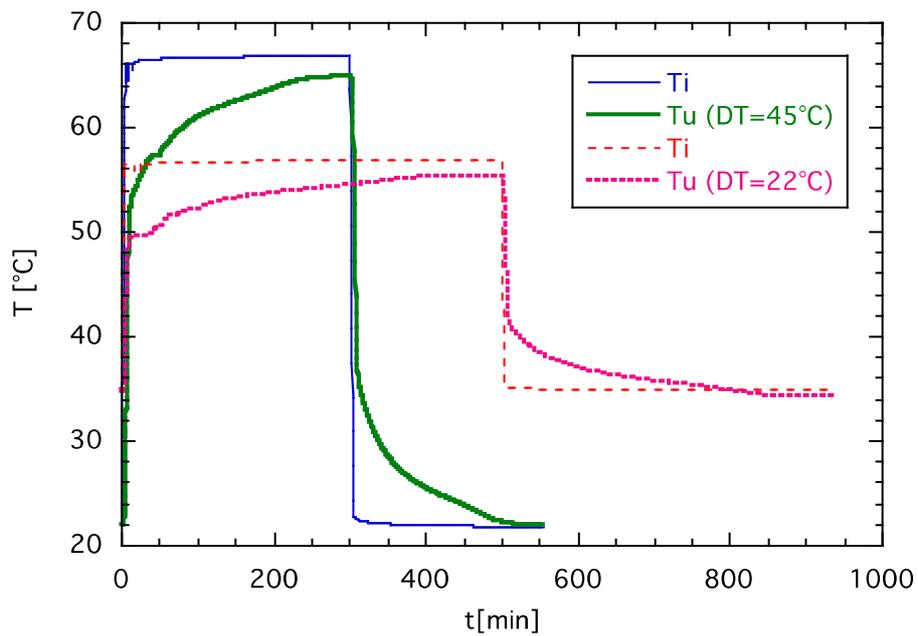


Figura 37 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con due variazioni di temperatura: da 22 a 67°C o da 35 a 57°C

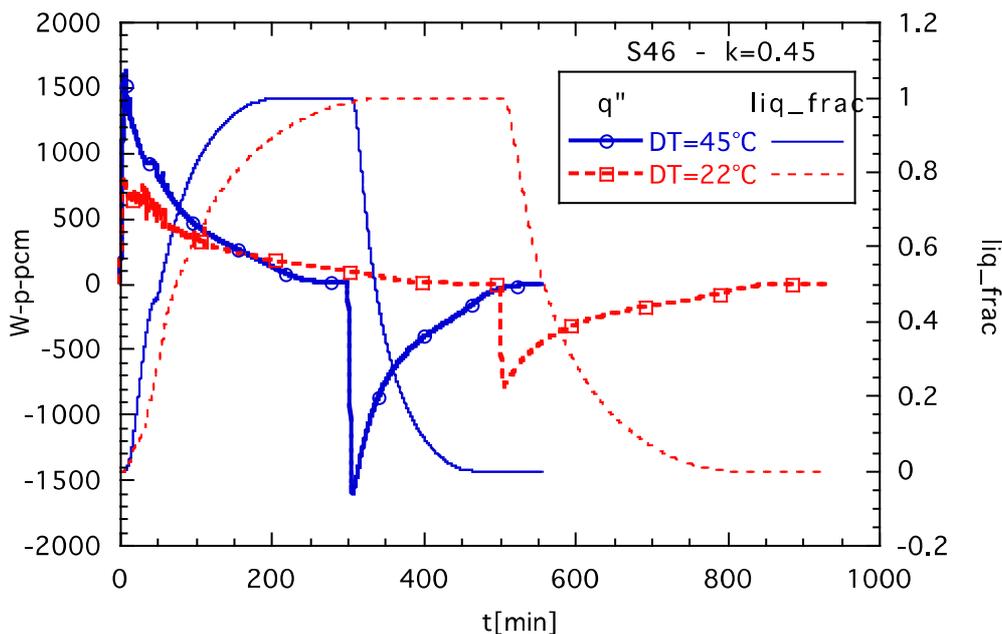


Figura 38 – confronto del flusso termico e della frazione di liquido per PCM simulati con due variazioni di temperatura: da 22 a 67°C o da 35 a 57°C

Effetto della conducibilità del PCM:

da Figura 29 si vede che l'aumento della conducibilità termica provoca sulla temperatura in uscita una diminuzione modesta, quasi impercettibile nel passaggio di k da 0.22 a 1 dell'A46, più apprezzabile per il salto da 0.45 a 10 dell'S46. In quest'ultimo caso la temperatura resta più bassa già da 40°C (la maggiore conducibilità aumenta l'assorbimento anche nel solido prima della fusione), ma l'incremento maggiore è dopo i 46°C, quando raggiunge i 5.4°C di differenza per poi diminuire leggermente restando maggiore di 3°C fino a circa 90 minuti. A questo punto l'S46+ è completamente fuso mentre quello originale continua ad assorbire calore per cui le temperature si invertono.

Considerando il flusso termico in Figura 30, si conferma che per il sale S46 l'aumento è notevole fino a circa 80 minuti, poi si ha l'inversione dato che per quello ad alta conducibilità la frazione di liquido diventa 1 a circa 74 minuti. Per la paraffina A46 (con k da 0.22 a 1) l'aumento di flusso è minore, ma anche nella zona di massimo aumento non supera quello dell'S46 puro ($k=0.45$) a causa della minore capacità termica.

Un comportamento molto simile si ha anche durante il rilascio di calore, nel transitorio con diminuzione di temperatura in ingresso., come si vede da Figura 31 e Figura 32. Un PCM con caratteristiche simili all'S46 ma conducibilità $k=10$ W/mK permetterebbe di ottenere la cessione all'acqua di gran parte del calore latente di fusione in tempi minori di un'ora, rendendo quindi molto più efficiente la funzione di accumulo di calore durante le variazioni dovute ad effetti meteorologici. In questa fase la temperatura di uscita dell'acqua rimarrebbe superiore ai 35°C (entrando a 22°C), mentre con l'S46 puro scenderebbe sotto i 30°C. Non si ha comunque il mantenimento alla temperatura di fusione, $T_{pc}=46°C$.

Effetto della conducibilità della parete del contenitore di PCM:

Anche questo parametro risulta abbastanza importante, come mostrato in Figura 33 e Figura 34. La parete di alluminio porta ad un miglioramento paragonabile a quello ottenuto con la conducibilità $k=10$ W/mK durante l'aumento di temperatura, un po' minore durante la diminuzione (Figura 35 e Figura 36).

Effetto del salto di temperatura in ingresso:

Dato che il PCM fornisce il suo contributo solo se la variazione di temperatura si verifica intorno al punto di fusione, è interessante vedere se un salto minore ma sempre intorno alla T_{pc} . In Figura 37 e Figura 38 sono mostrati gli andamenti della temperatura, flusso termico e frazione di liquido, per il $\Delta T=22^{\circ}C$ (da 35 a 57 °C) invece del caso standard visto in precedenza, con $\Delta T=45^{\circ}C$ (da 22 a 67°C). La diminuzione del gradino comporta un allungamento del tempo di fusione e quindi un flusso termico minore nei primi 150 minuti.

2.4 Sperimentazione con l'impianto mini-PCM

2.4.1 Risultati sperimentali

Il PCM S46 utilizzato nelle prove precedenti, essendo un sale idrato ha grossi limiti di utilizzo: non può essere maneggiato in quanto irritante e può degradarsi facilmente, sia se si supera una temperatura massima molto limitata (56°C), sia se si espone all'aria (in quanto si disidrata).

Per la sperimentazione si è utilizzato il PCM A46, che ha caratteristiche termiche inferiori, ma essendo una paraffina è molto più versatile (vedi Tabella 1). La disposizione è quella mostrata in Figura 4.

Oltre a blocchetto di PCM puro, sono state eseguite prove anche con lo stesso materiale inglobato in una matrice solida di carburo di silicio (SiC) per valutarne l'aumento di conducibilità termica globale e l'effetto reale sull'assorbimento di energia dopo un aumento di temperatura di una faccia. Il provino di schiuma di SiC ha le seguenti caratteristiche:

- lato 40.5 X 40.0 mm
- altezza 25.5 mm
- peso 14.7 g

da cui deriva una densità della schiuma di 355kg/m³ e un grado di vuoto di 0.889, considerando la densità del SiC riportata in Tabella 3. Nella tabella sono riportate le caratteristiche del SiC, dell'A46 e quelle nominali della schiuma riempita di PCM A46 ottenute come medie pesate col grado di vuoto.

Tabella 3 – proprietà fisiche nominali dei materiali usati

materiale	ρ [kg/mc]	k [W/mK]	c_p [J/kg-K]	λ [kJ/kg]
SiC	3210	370	1100	
A46	910	0.22	2220	155
A46+SiC	1164	41	2096	138

L'impianto mini-PCM è stato utilizzato per monitorare i transitori di temperatura: in particolar modo è stata testata la paraffina A46, le cui proprietà sono riportate in Tabella 1.

Il PCM (allo stato liquido) viene disposto all'interno di un piccolo contenitore di PVC che lo mantiene nella forma desiderata insieme alle termocoppie (Figura 4). Poi una volta solidificato, viene avvolto con un foglio di un materiale di contenimento (coffee-bag), per evitarne la fuoriuscita quando si trova allo stato liquido. Il blocchetto viene disposto sulla lastra scaldante con la faccia aperta della scatola di PVC rivolta in basso, in modo da avere solo il coffee-bag tra il riscaldatore e il materiale a cambiamento di fase.

Il coffee bag è un materiale costituito da 3 strati laminati, legati insieme da collanti:

- Strato esterno di polietilene che conferisce resistenza meccanica in un ampio range di temperatura
- Foglio di Alluminio che costituisce una barriera al passaggio del vapor d'acqua
- Strato interno di polietilene a bassa densità, che rende il laminato saldabile senza che ci sia degradazione dello strato di poliestere esterno.

Il PCM all'interno del contenitore viene poggiato sulla lastrina di Rame e, alimentando la resistenza, viene riscaldato in maniera uniforme attraverso la superficie di contatto.

Per i test con il PCM all'interno della matrice di SiC, si inserisce il blocchetto di SiC nel contenitore di PVC e si riscalda ad una temperatura superiore a quella di fusione del materiale a cambiamento di fase, poi si cola

il PCM fuso fino a riempire tutti i vuoti, infine si procede come già descritto per il materiale puro. In Figura 39 è mostrato il blocchetto di SiC vuoto ed uno dei provini usati dopo il riempimento con la paraffina A46.

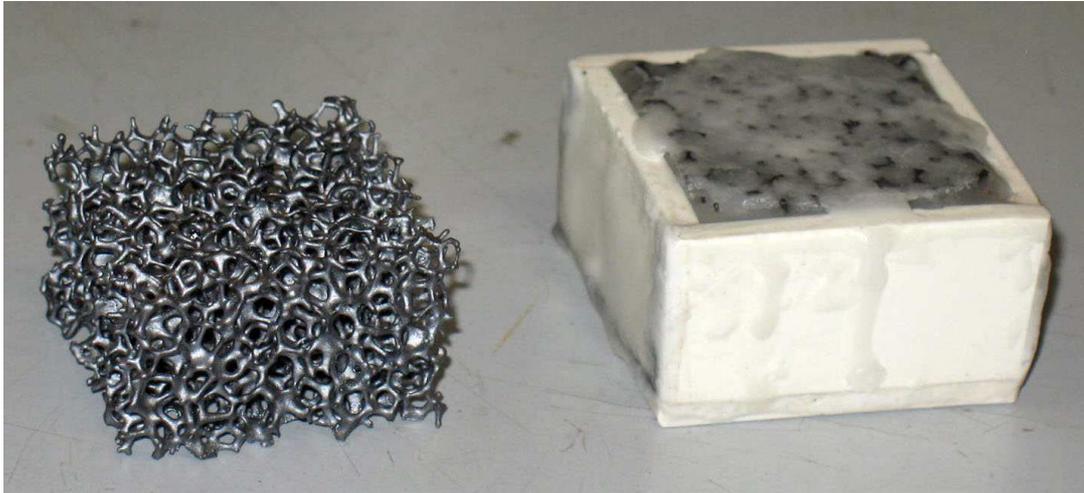


Figura 39 – blocchetto di schiuma di SiC e provino di schiuma riempita con la paraffina A46, in fase di preparazione per il test sperimentale

Sono state effettuate misure di conducibilità sul materiale composito (Paraffina+SiC) con lo strumento della C-Therm (descritto nel paragrafo 2.2.3).

Il materiale, disposto all'interno di un contenitore in Pirex, è stato liquefatto; si è inserita poi la sonda e la paraffina, lasciata a temperatura ambiente, ha risolidificato nuovamente. Così si è riusciti a garantire un ottimo contatto tra il PCM e la sonda: per questa ragione si è utilizzato il metodo "liquidi", selezionato nel programma di acquisizione dati dello strumento, come suggerito dai costruttori; selezionando questo metodo non è stato necessario scegliere un agente di contatto (generalmente acqua distillata).

I risultati ottenuti dalla misurazione del campione sono riportati in Tabella 4, dove E è l'effusività e K la conducibilità termica. Per il confronto sono riportati anche quelli del PCM puro. Quest'ultima misura, per un esteso il campo di temperature, è stato mostrato in Figura 7.

Tabella 4 – Risultati delle misure di conducibilità sul blocco PCM+SiC

materiale	Eff [$W s^{1/2}/m^2K$]	k [$W/m K$]	T ($^{\circ}C$)
PCM A46 solido	741	0.238	25
PCM A46 liquido	480	0.155	50
PCM A46 solido + schiuma di SiC	896	0.293	25

In Tabella 5 è riportata una matrice sperimentale dei test che sono stati effettuati sul blocco di paraffina e sul blocco di paraffina+SiC: inizialmente il flusso viene mantenuto costante fino ad una temperatura massima stabilita, viene poi regolato manualmente per mantenere la temperatura costante all'interfaccia.

Tabella 5 – Matrice sperimentale

Tipologia	Flusso (W/m^2)	Tensione alimentatore (V)	T max
A46	1200	20	~60 $^{\circ}C$
	2726	30	~60 $^{\circ}C$
	2726	30	~90 $^{\circ}C$
A46+SiC	1200	20	~60 $^{\circ}C$
	2726	30	~60 $^{\circ}C$

	2726	30	~90°C
--	------	----	-------

Si è valutata dapprima sperimentalmente la potenza dispersa: dopo aver interrotto l'alimentazione si è acquisita la fase di discesa, ossia la fase di raffreddamento del blocco di rame.

Sono state utilizzati i risultati ottenuti dalla fase di discesa di tre prove "a vuoto" con l'obiettivo di identificare un polinomio in grado di descrivere l'andamento della potenza dispersa.

La potenza dispersa è stata valutata in funzione del $\Delta T = T - T_a$, con T_a costante e pari alla temperatura ambiente. I risultati del fittaggio sono di seguito riportati (Fig.3).

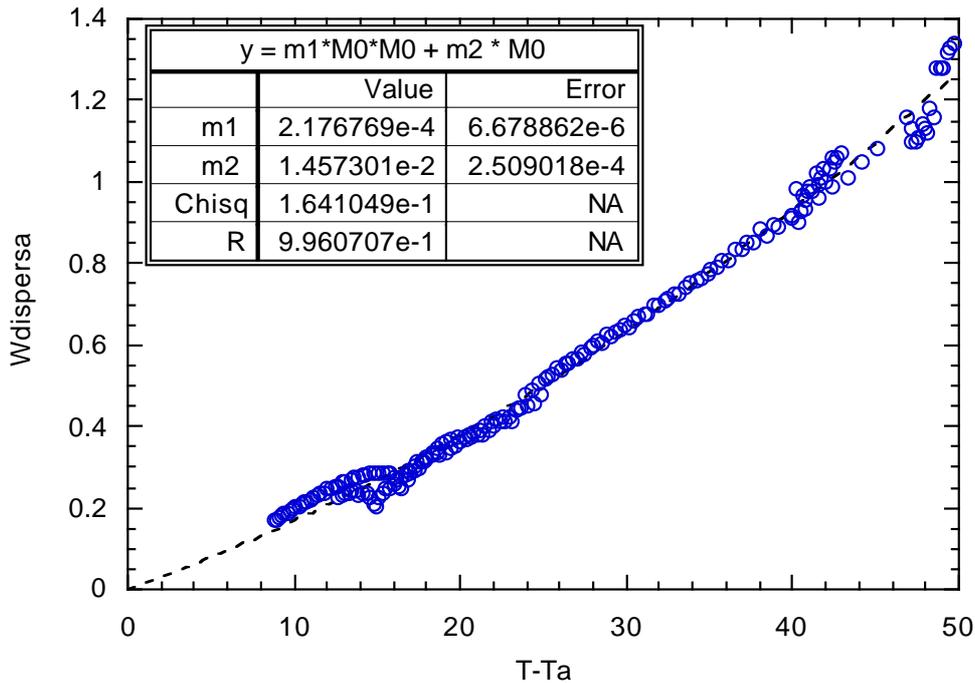


Figura 40 – Potenza dispersa in funzione di (T-Ta).

Dal Fit delle curve si ottiene il seguente polinomio che descrive la potenza dispersa:

$$W_{disp} = 2.177E-4*(T-T_a)^2 + 1.457E-2*(T-T_a) \tag{10}$$

In Figura 41 è mostrata la temperatura dell'interfaccia tra rame e PCM nelle prove con flusso 1200 W/m². La temperatura all'interfaccia con solo PCM aumenta nel tempo senza risentire troppo del punto d'inizio fusione, mentre con il SiC si ha già da 35°C si ha un piccolo cambiamento di pendenza che aumenta avvicinandosi al punto di fusione e intorno a 55°C si ha un evidente appiattimento della temperatura.

Per quanto riguarda la temperatura del PCM nella parte superiore, da Fig.2 risulta aumentare di più nel caso di solo PCM, che nel caso di PCM+SiC. Questo comportamento anomalo può essere spiegato considerando che nel caso di solo PCM quando la quantità di liquido comincia ad essere rilevante, questo può muoversi anche aiutato dal peso della parte solida che tende a scendere essendo di densità maggiore. Questo moto provoca un trasporto di calore aggiuntivo verso la zona alta, cosa che non si verifica, invece, quando la matrice di SiC impedisce i movimenti convettivi.

Considerando questo aspetto trascureremo il confronto delle temperature superiori nell'analisi dei dati sperimentali, tenendo però presente che questo fenomeno si verifica in qualsiasi caso in cui il PCM solido può per gravità spostarsi all'interno del contenitore.

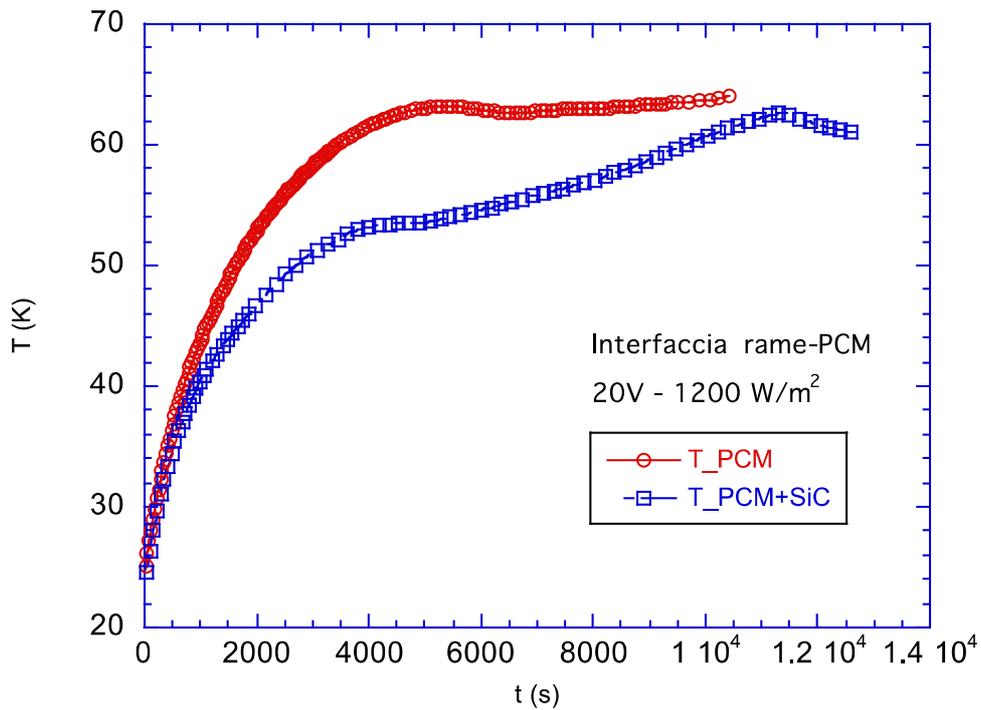


Figura 41 – flusso 1200 W/m², Temperatura del Rame all'interfaccia, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC

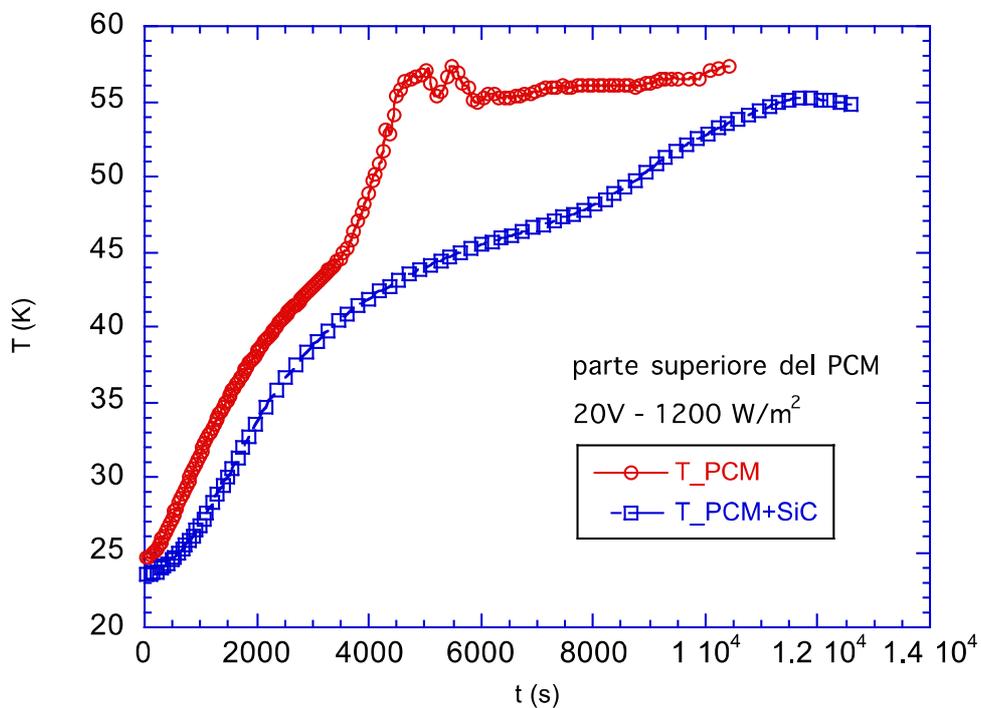


Figura 42 – flusso 1200 W/m², Temperatura del PCM nella parte superiore, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC.

Per confrontare le prestazioni del PCM con quelle del serbatoio con sola acqua, si è calcolata la potenza che sarebbe assorbita da un volume equivalente di acqua (con miscelazione continua) a parità di potenza fornita al sistema.

Considerando che la potenza fornita alla base del rame (cioè quella totale meno quella dispersa data dalla (10)) genera l'aumento della temperatura sia del rame che del blocchetto di PCM (o la sua fusione), si ha:

$$W_T = W_{tot} - W_{disp} = \left(M c_p \frac{dT}{dt} \right)_{Cu} + W_{PCM} \quad (11)$$

Se al posto del PCM ci fosse lo stesso volume di acqua, rimescolata continuamente, essa seguirebbe la temperatura del rame assorbendo una potenza

$$W_w = \left(M c_p \frac{dT}{dt} \right)_w \quad (12)$$

Uguagliando i due casi, che per ipotesi hanno la stessa potenza totale, si ottiene

$$W_w = \frac{(\rho V c_p)_w W_T}{(\rho V c_p)_{Cu} + (\rho V c_p)_w} \quad (13)$$

In Figura 43 è riportato il confronto tra le potenze assorbite dal PCM e quelle che sarebbero assorbite da un volume equivalente di acqua (con miscelazione continua) a parità di potenza fornita al sistema.

Dalle figure si vede che il PCM inizialmente assorbe meno potenza rispetto all'acqua, in quanto nel primo caso la potenza genera soprattutto l'aumento di temperatura del rame.

Intorno ai 1700 s la potenza fornita al PCM supera quella che andrebbe all'acqua, tendendo alla potenza totale poiché il rame non aumenta più di temperatura (siamo nella fase con la Temperatura mantenuta costante a 60°C regolando il flusso termico alla lastrina). Nel caso dell'acqua fornendo la stessa potenza sia il rame che l'acqua continuerebbero ad aumentare la loro temperatura.

Con la presenza del SiC il comportamento è qualitativamente simile, ma dal punto di vista quantitativo ci sono importanti differenze, infatti la potenza assorbita dal PCM aumenta più rapidamente e supera quella dell'acqua già prima dei 1000 s.

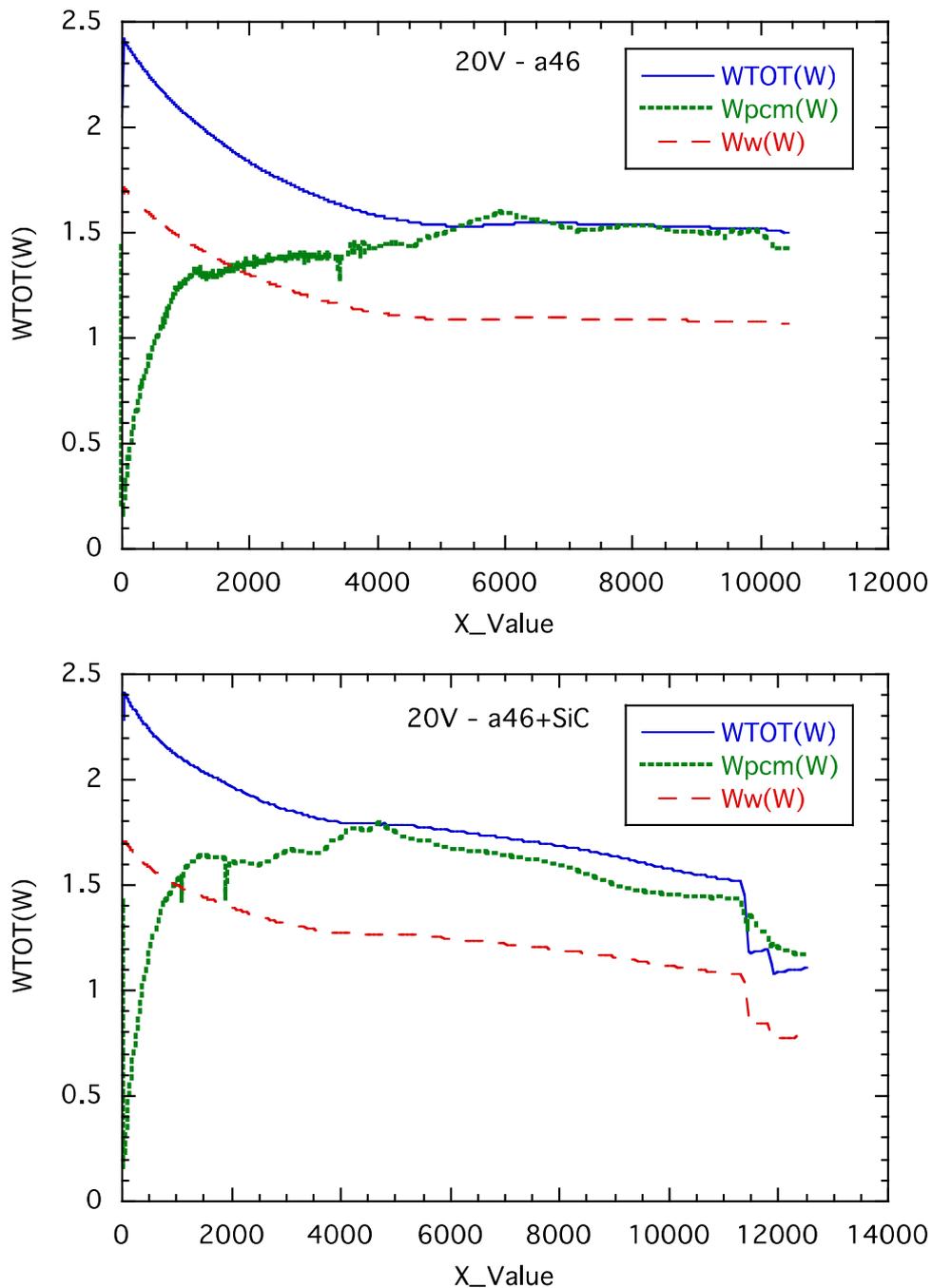


Figura 43 – Potenze scambiate nel caso solo PCM e in quello con PCM+SiC. Prova con flusso 1200 W/m²

Si può confrontare anche l'energia assorbita, ottenuta dall'integrale nel tempo delle potenza calcolate con le Eq. (11), (12), (13). Da Figura 44 si vede che, per quanto riguarda l'energia assorbita dal PCM essa rimane minore fino a circa 5000 s per poi superare quella assorbita dall'acqua. Anche relativamente alle energie la presenza del SiC aumenta la capacità di assorbimento del PCM: in questo caso l'energia assorbita dall'acqua viene superata ad un tempo pari a 3300 s.

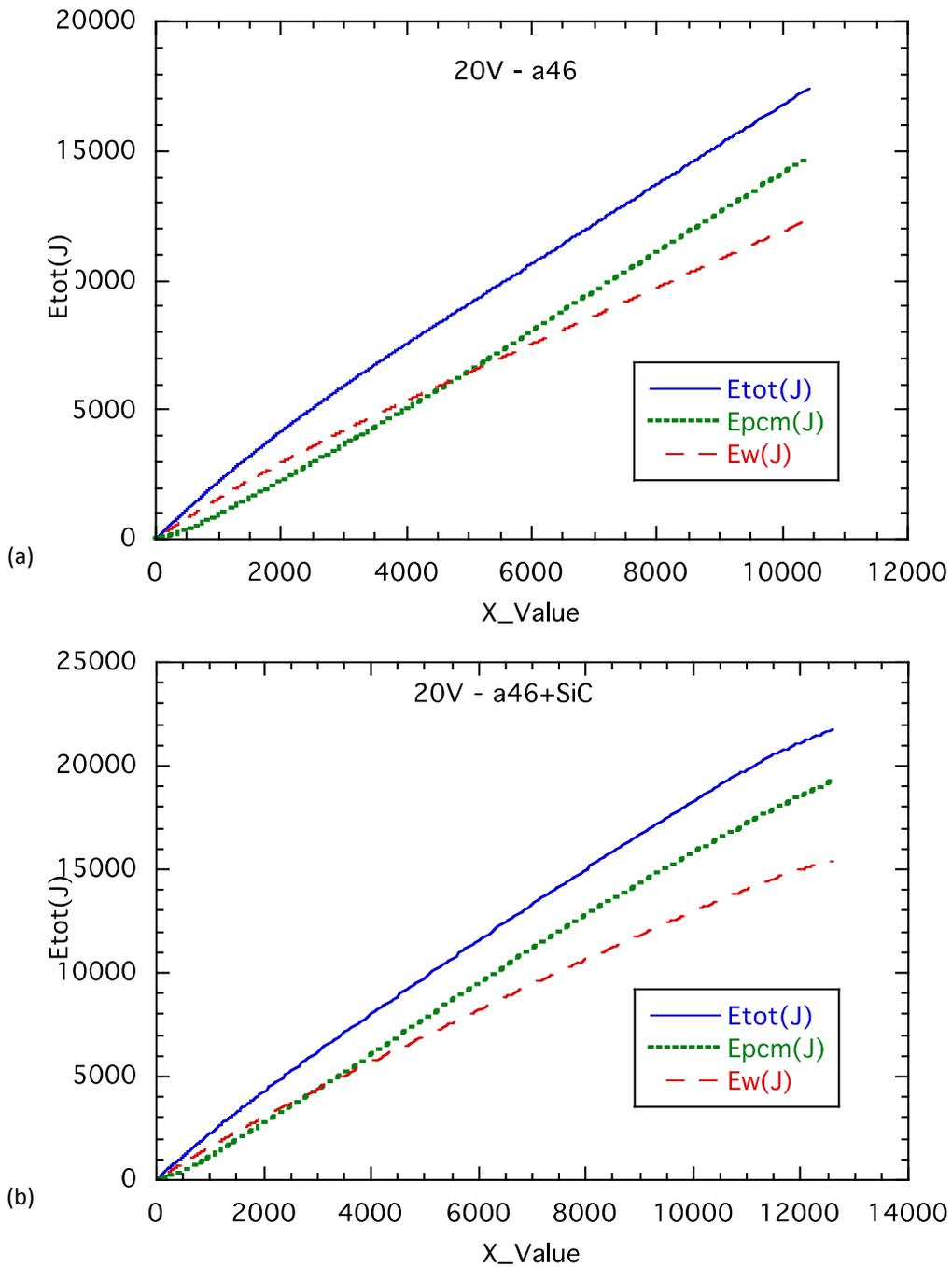


Figura 44 – Energie scambiate nel caso solo PCM e in quello con PCM+SiC. Prova con flusso 1200 W/m2

Le prove il flusso termico maggiore, riportate in Figura 45 e Figura 46 per le temperature, sono caratterizzate da una rampa di temperatura del rame più rapida. Quando viene raggiunta la temperatura massima di 60°C la quantità di PCM fuso è minore e quindi anche il cambiamento di pendenza a 46°C è meno visibile, ma anche in questo caso la presenza del SiC limita l'aumento della temperatura dell'interfaccia, dimostrando quindi un maggior assorbimento di potenza nel PCM. Per la temperatura superiore si verifica di nuovo il comportamento anomalo dovuto al movimento del pcm fuso, già visto in Figura 41 ma in di minore entità

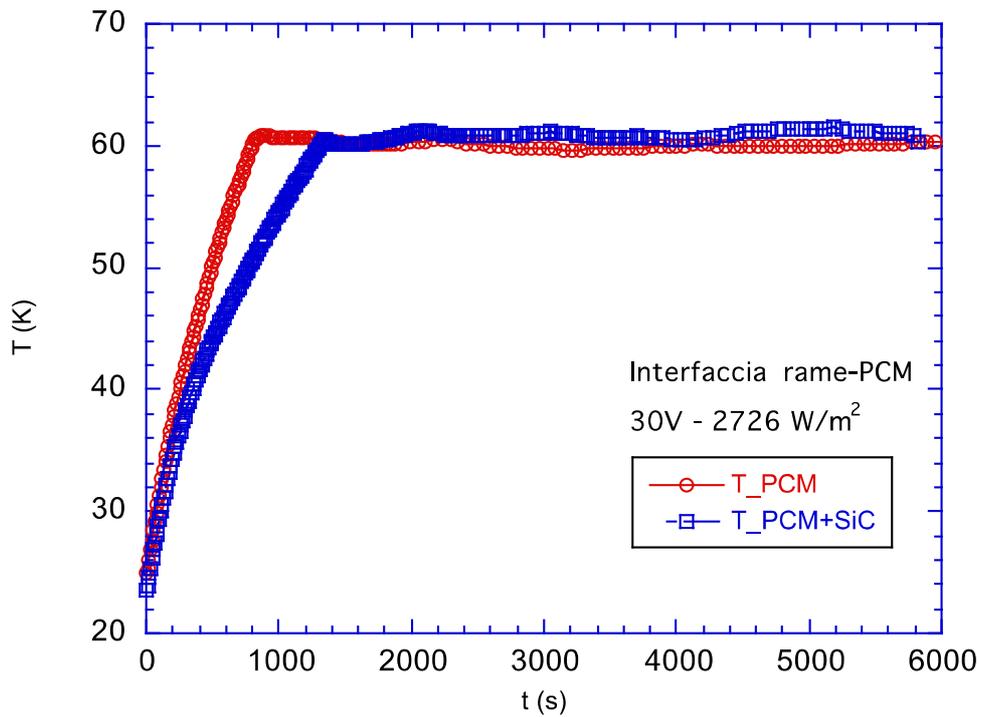


Figura 45 – flusso 2726 W/m², Temperatura del Rame all'interfaccia, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC.

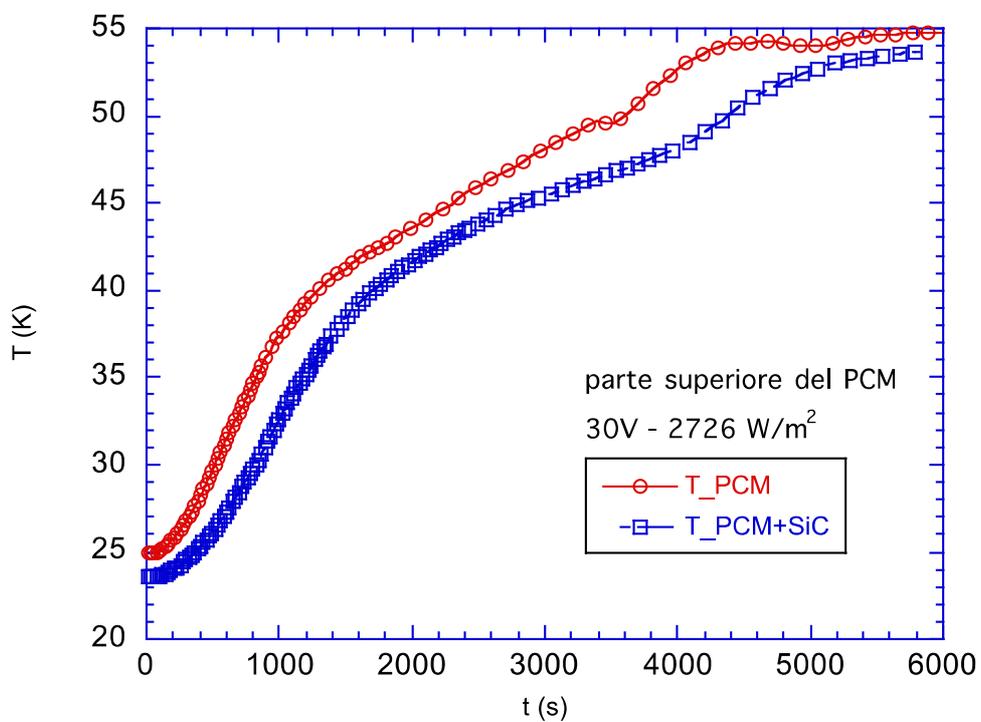


Figura 46 – flusso 2726 W/m², Temperatura del PCM nella parte superiore, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC.

Anche in questo caso il confronto della potenza scambiata con quella teoricamente assorbita da sola acqua, Figura 47 mostra che nel caso con SiC essa aumenta più rapidamente, e dalle energie in Figura 48 si deduce che la il PCM diventa conveniente in un tempo molto più breve nel con la schiuma di SiC.

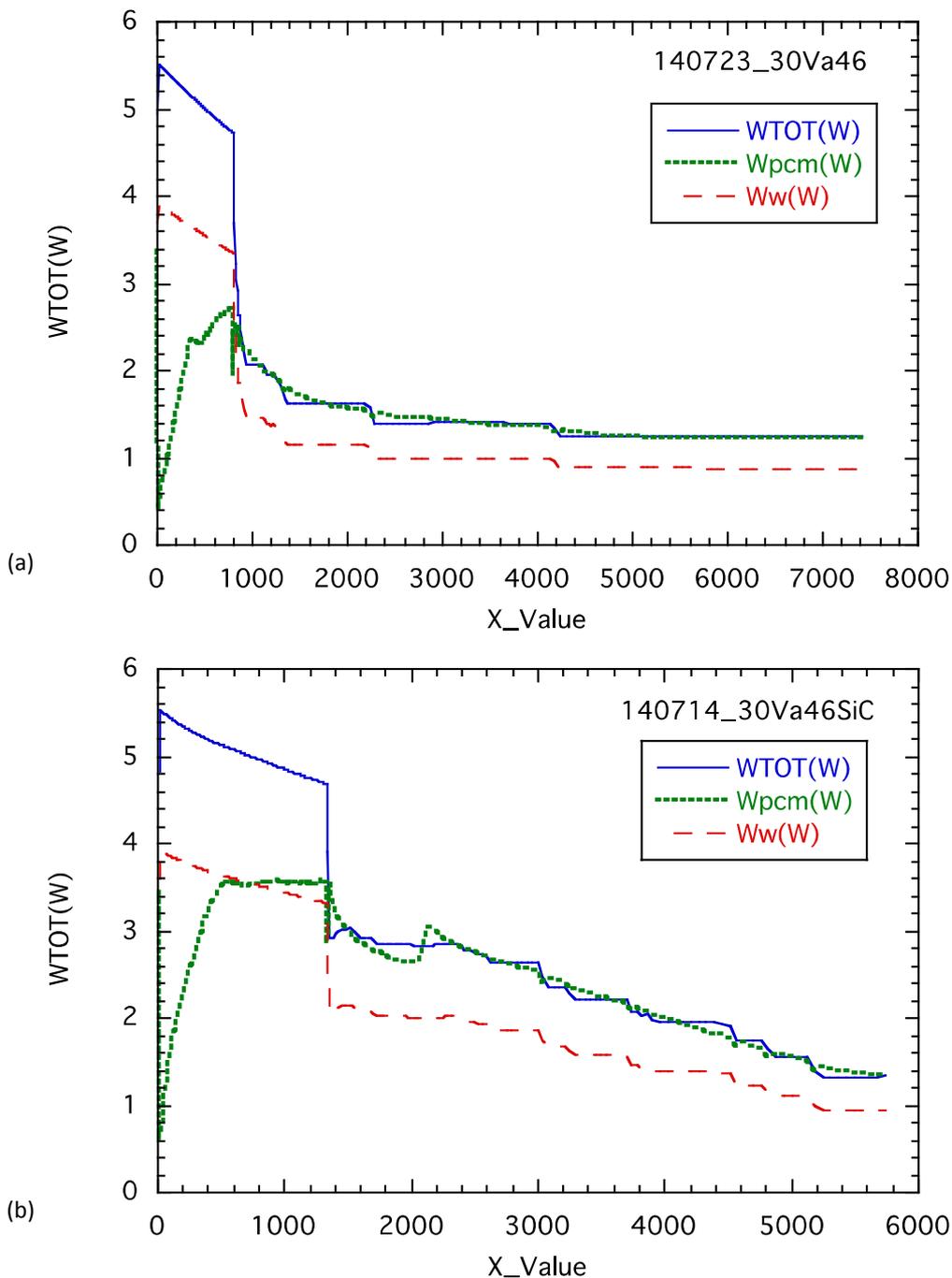


Figura 47 – Potenze scambiate nel caso solo PCM e in quello con PCM+SiC. Prova con flusso 2726 W/m²

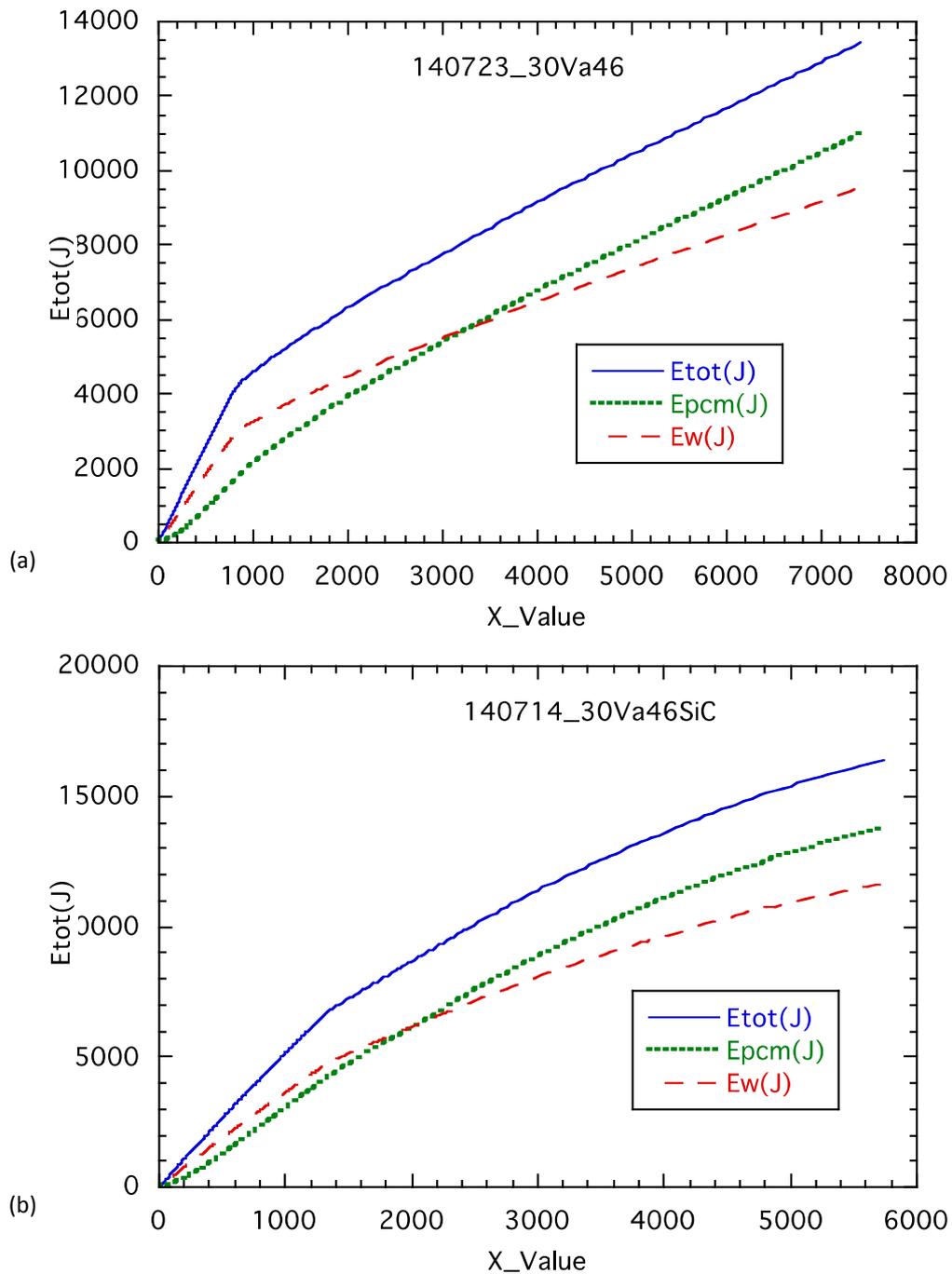


Figura 48 – Energie scambiate nel caso solo PCM e in quello con PCM+SiC. Prova con flusso 2726 W/m²

Per le prove con aumento di temperatura fino a 90°C, Figura 49 mostra il confronto della temperatura dell'interfaccia, che anche in questo caso differisce notevolmente dopo la $T_{PC}=46^{\circ}C$, con un riavvicinamento dopo i 2000 s dovuto al movimento del nocciolo solido del PCM senza schiuma di SiC.

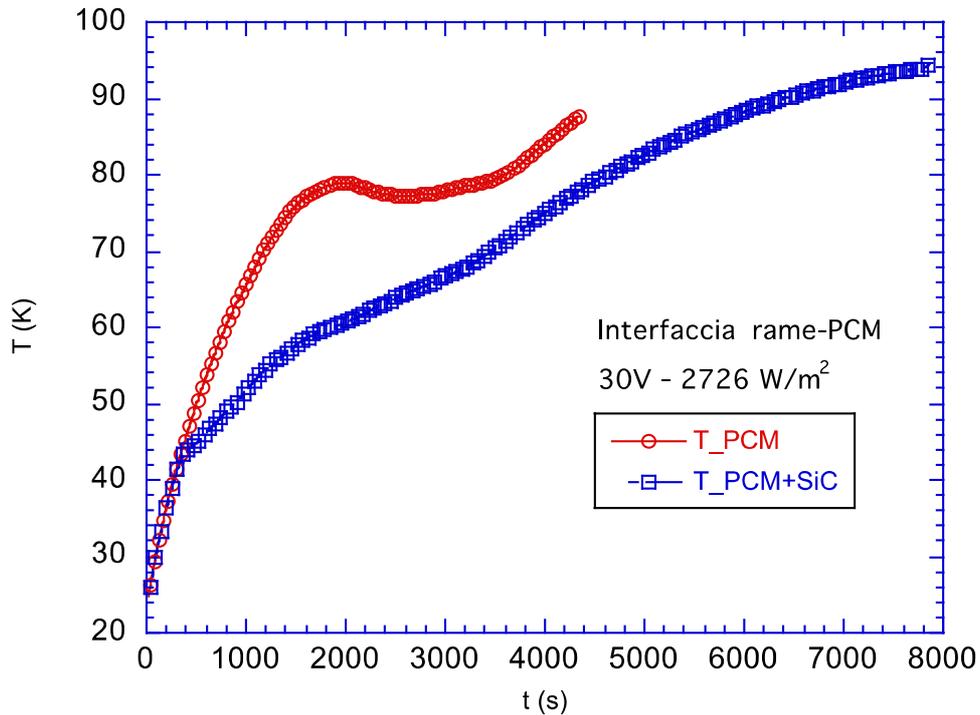


Figura 49 – flusso 2726 W/m², Temperatura del Rame all’interfaccia, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC. T_{max}=90°C

2.4.2 Simulazioni 2D con FLUENT del mini-PCM – analisi di sensibilità con materiali diversi

Sono state realizzate delle simulazioni con il codice FLUENT, usando una nodalizzazione rettangolare in 2-D del dispositivo di Figura 4.

La potenza dispersa data dalla equazione (10) è stata scritta una funzione in linguaggio C ed implementata nella simulazione.

Per validare il modello sono stati simulati i test sperimentali sull’impianto mini-PCM riportati nel precedente paragrafo. Di seguito sono riportati i grafici che consentono di mettere a confronto i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti tramite il codice di calcolo.

Nel grafico di Figura 50 la prova sperimentale con flusso alimentato pari a 2726 W/m² viene messa in relazione con la rispettiva simulazione (alcuni frame della stessa sono mostrati in Figura 53 e Figura 54). Nel grafico si riporta in particolare il confronto relativo alla temperatura all’interfaccia (T_s-C), ossia la temperatura misurata sulla lastrina di rame a contatto con il blocco di materiale a cambiamento di fase. E’ possibile notare che c’è una quasi perfetta coincidenza tra le due curve.

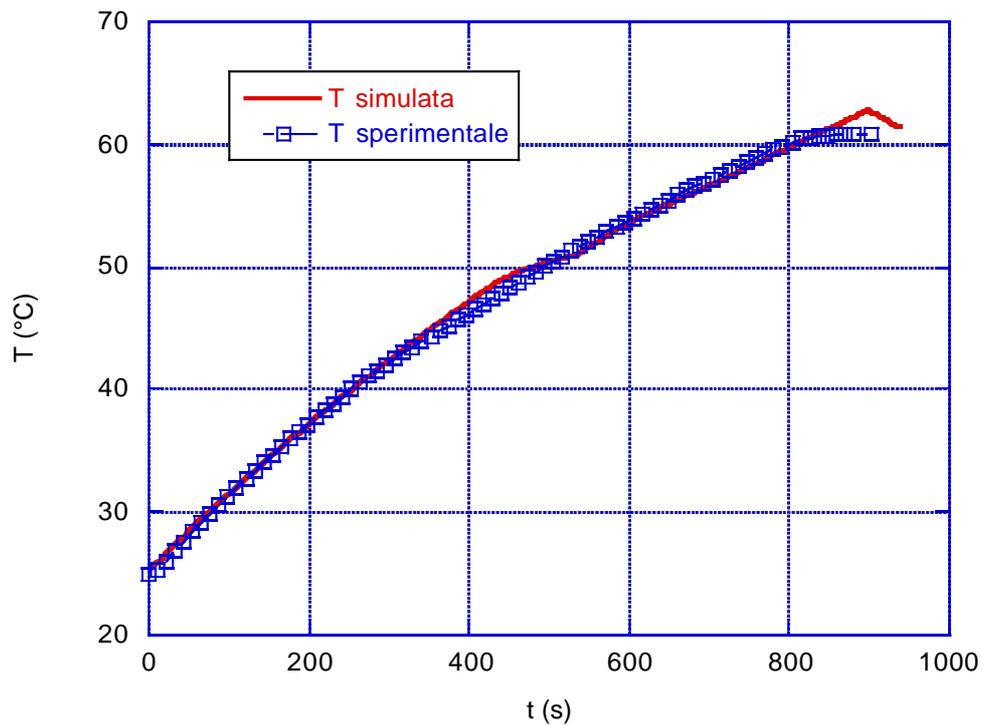


Figura 50 – Confronto tra prova sperimentale e simulata con flusso alimentato pari a 2726 W/m², blocco PCM, k=0.22 W/m K, Tmax=60°C.

Le prove sperimentali sull'impianto mini-PCM realizzate inserendo il materiale a cambiamento di fase all'interno di una schiuma di SiC, sono state simulate con lo stesso modello. Per quanto riguarda le proprietà fisiche del materiale composito (materiale a cambiamento di fase+ schiuma ceramica), la densità, calore specifico e calore latente sono ottenuti dalle medie pesate come in Tabella 3, mentre per la conducibilità si è usato il valore misurato con lo strumento descritto in 2.2.3.

Inserendo il valore ottenuto $k=0.293$ W/m K nella simulazione si ottiene l'andamento riportato in Figura 50. E' evidente che la simulazione si allontana da una riproduzione effettiva della realtà.

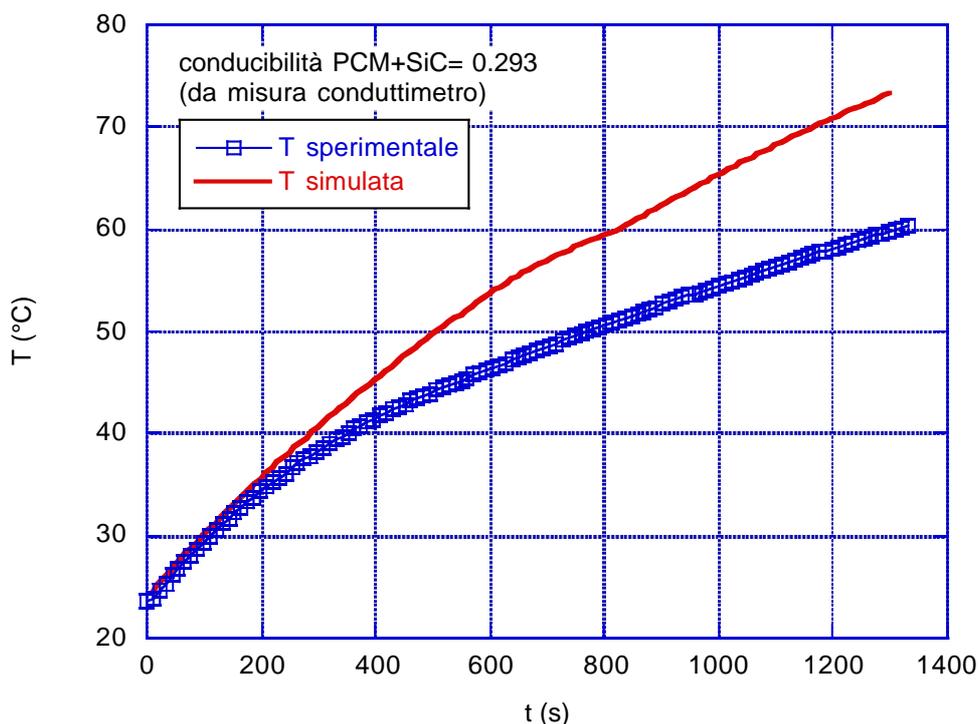


Figura 51 – Confronto tra prova sperimentale e simulata con flusso alimentato pari a 2726 W/m², blocco PCM+schiuma, k=0.293 W/m K, Tmax=60°C.

Dai risultati ottenuti è possibile dedurre che la differenza tra i risultati ottenuti dipende da una sottostima della conducibilità termica del materiale, cosa già temuta considerando che per questo tipo di materiale la misura della conducibilità con i metodi di tipo “transient plane” sono considerato poco affidabili.

Sono state quindi realizzate simulazioni inserendo conducibilità più alte, e per il valore $k=1$ W/mK si è ottenuto il risultato mostrato in Figura 52.

Da ciò è possibile dedurre che l’effettiva conducibilità del materiale è molto più alta rispetto a quella che si riesce a misurare con il misuratore di conducibilità, ed quindi l’aumento indotto dalla matrice di SiC è quasi 5 volte il valore originario, da 0.22 a circa 1 W/mK.

Quindi il valore dell’incremento di conducibilità termica media del materiale composito “PCM + Schiuma”, ottenuto usando un misuratore di conducibilità, non è affidabile a causa delle disuniformità macroscopiche della struttura e del comportamento non costante del PCM, per cui si rende necessaria la prova sperimentale del processo durante la variazione di temperatura e il suo confronto con l’andamento teorico

Inserendo questo valore nel modello FLUENT si sono simulate le altre prove sperimentali a diversi flussi e temperature finali. In Figura 53 e Figura 54 sono mostrate rispettivamente le mappe della frazione di liquido e della temperatura ottenute durante la salita della temperatura, per la simulazione con il PCM puro (a sinistra) e quello nella schiuma di SiC (a destra). Sono visualizzati tre istanti: a 450 s, quando la fusione interessa il primo strato prossimo alla lastrina; a 600 s, durante la rampa di temperatura; a 810 s, quando la fase di alimentazione è terminata. La maggiore conducibilità del caso con SiC all’inizio limita la fusione del materiale in quanto mantiene le temperature più uniformi, mentre con solo PCM lo strato vicino all’interfaccia rimane molto più caldo. Quando però la temperatura sale, la zona interessata alla fusione aumenta più rapidamente con il SiC, che assorbe più potenza dal rame.

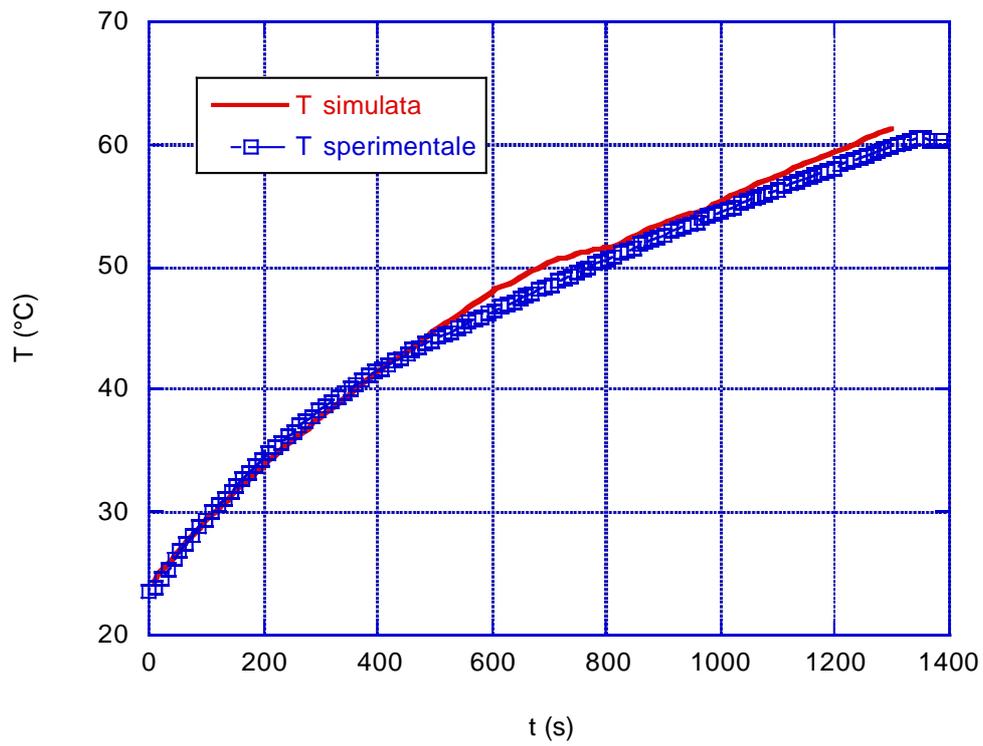


Figura 52 – Confronto tra prova sperimentale e simulata con flusso alimentato pari a 2726 W/m², blocco PCM+schiuma, k=0.293 W/m K, T_{max}=60°C.

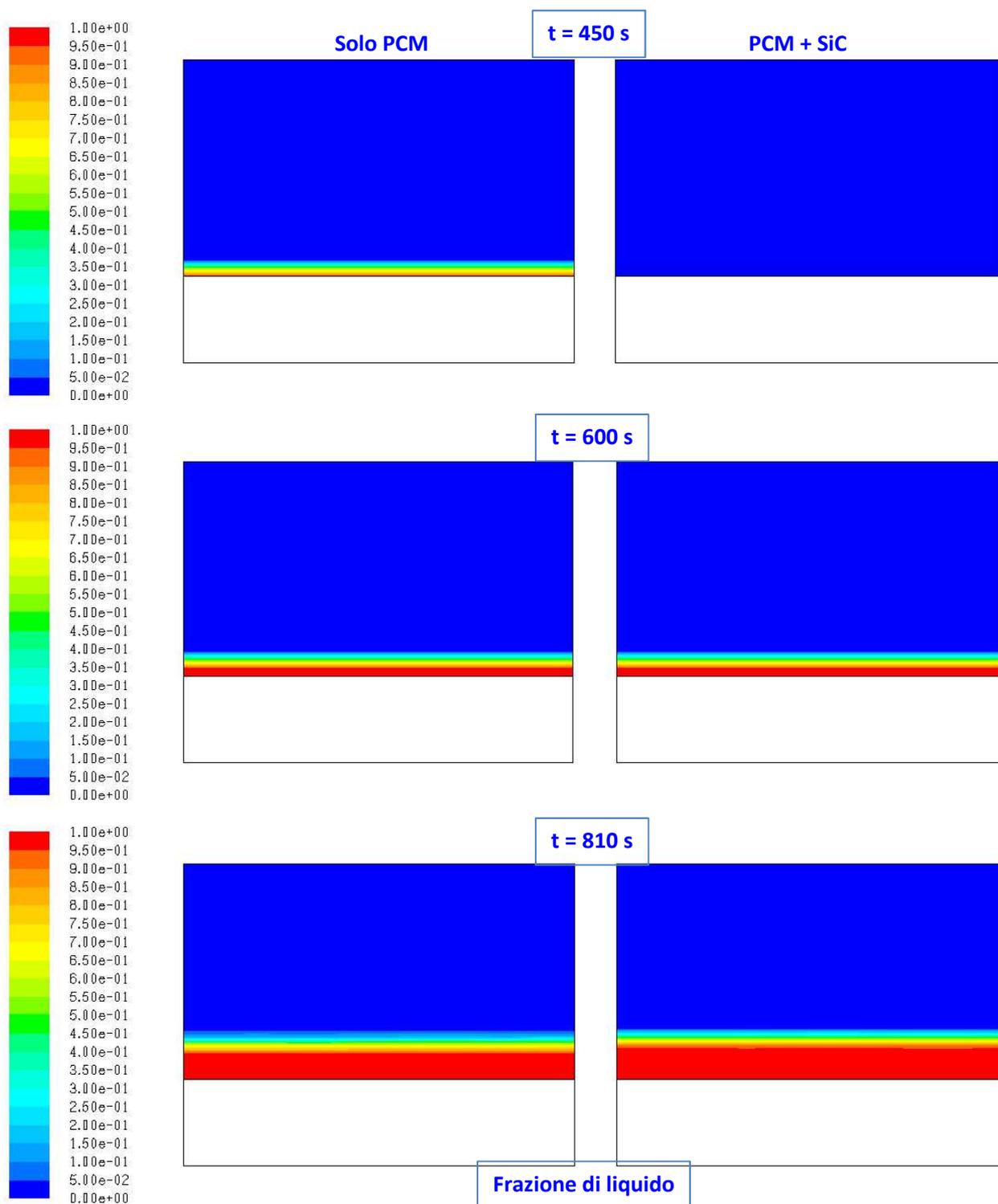


Figura 53 – mappe della frazione di liquido: evoluzione nel tempo per il PCM puro (a sinistra) e quello nella schiuma di SiC (a destra)

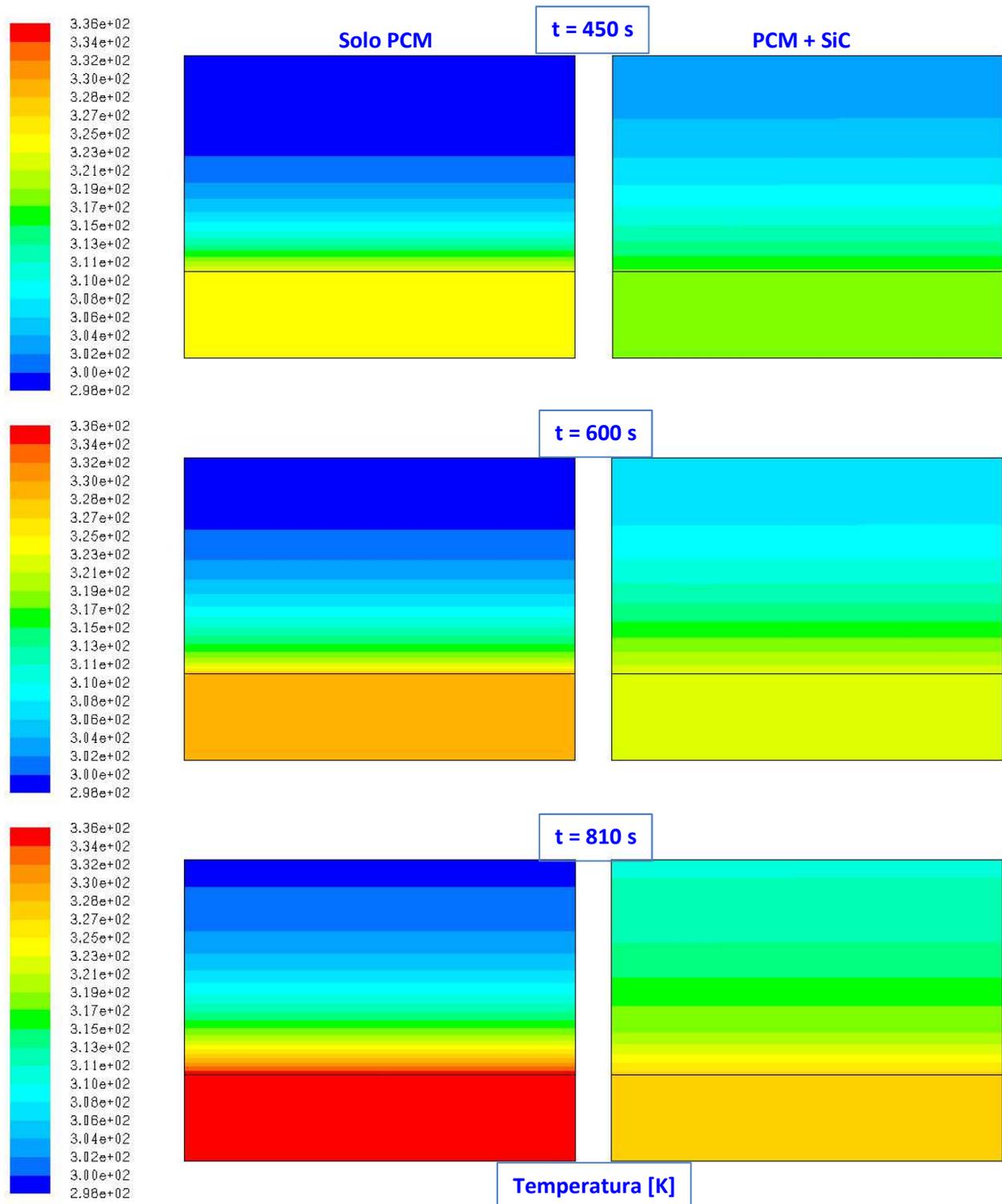


Figura 54 – mappe della temperatura: evoluzione nel tempo per il PCM puro (a sinistra) e quello nella schiuma di SiC (a destra)

In Figura 55 sono mostrate le temperature relative alla prova sperimentale con un flusso pari a 2726 W/m^2 fino a raggiungere una temperatura massima sulla lastrina di rame pari a circa 90°C . E' possibile notare che l'andamento sperimentale della curva viene riprodotto in maniera ottimale fino ad un temperatura pari a circa 77°C ; per temperature più alte i dati sperimentali si differenziano notevolmente da quelli simulati.

Ciò è probabilmente spiegabile considerando che nella condizione reale s'instaurano dei moti convettivi che provocano una miscelazione del materiale: il blocco più freddo sulla superficie superiore tende a portarsi verso il basso, a contatto con la lastrina di rame, raffreddandola. Questo allontana i risultati dalla situazione ideale mostrata in Figura 55.

Un andamento simile si ottiene anche in Figura 56 nel caso di flusso imposto pari a 1200 W/m^2 , molto probabilmente per il medesimo motivo: anche in questo caso i tempi più lunghi di riscaldamento del materiale comportano la formazione di moti convettivi che facilitano lo scambio termico.

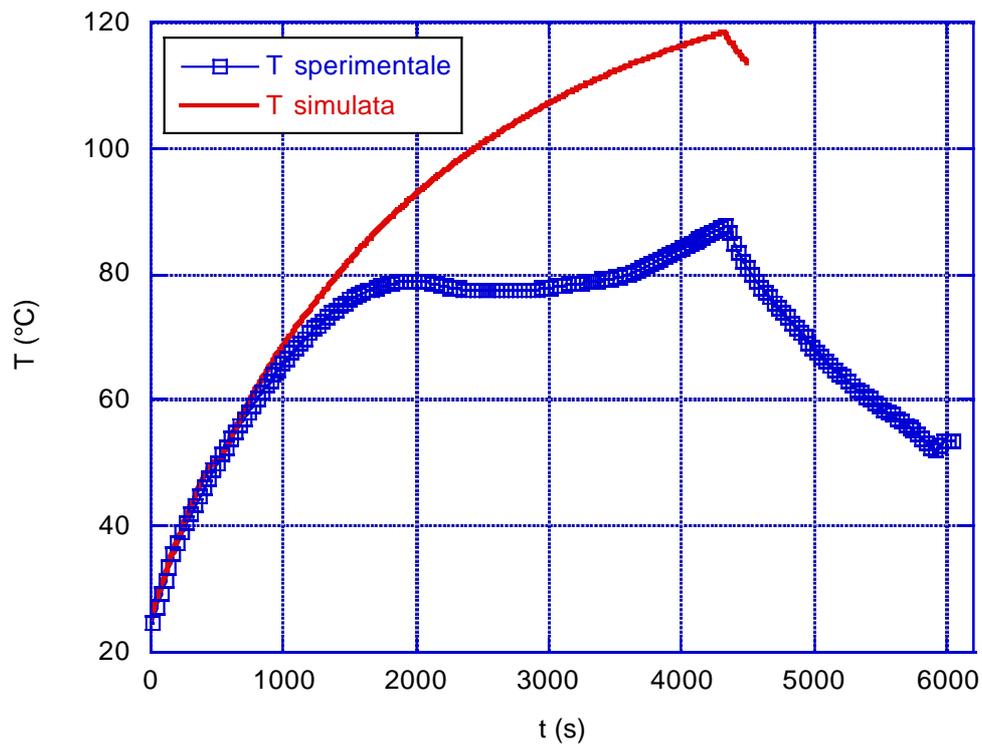


Figura 55 – Confronto tra prova sperimentale e simulata con flusso alimentato pari a 2726 W/m^2 , blocco PCM, $k=0.22 \text{ W/m K}$, $T_{\text{max}}=90^\circ\text{C}$.

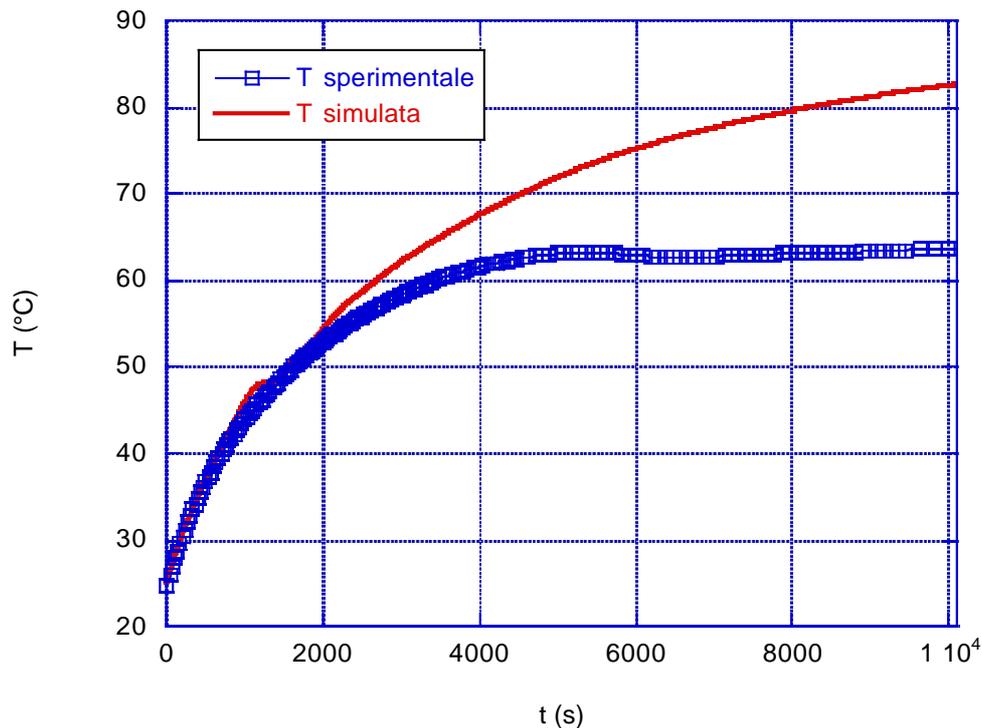


Figura 56 – Confronto tra prova sperimentale e simulata con flusso alimentato pari a 1200 W/m^2 , blocco PCM, $k=0.22 \text{ W/m K}$, $T_{\text{max}}=60^\circ\text{C}$.

CONFRONTO TRA MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

Dall'analisi precedentemente svolta è evidente che con la simulazione si riesce a prevedere in maniera molto precisa l'andamento della temperatura in funzione del tempo relativo ad un'alimentazione di 30 V (flusso pari a 2726 W/m^2), fino al raggiungimento di una temperatura massima di 60°C .

Per questo motivo, partendo da questa simulazione si sono potuti mettere a confronto diversi materiali a cambiamento di fase, simulandone il comportamento nelle medesime condizioni (flusso pari a 2726 W/m^2 , T_{max} pari a 60°C). Le caratteristiche principali dei materiali sono in Tabella 1.

I risultati sono illustrati nel grafico di Figura 57 e Figura 58.

Il materiale che mostra i maggiori benefici dal punto di vista termico è il sale s46, ma questo PCM presenta problemi notevoli dal punto di vista applicativo perché la temperatura di degradazione è molto vicina alla temperatura di fusione (vedi Tabella 1).

È evidente dal grafico che il sale s46 alla temperatura di circa 48°C inizia la fusione dello strato immediatamente a contatto con il rame e per questo motivo si ha un improvviso aumento del flusso termico. Questo si può vedere ancora meglio dalla Figura 59 dove è riportato solo il sale s46 (potenza in funzione della temperatura)

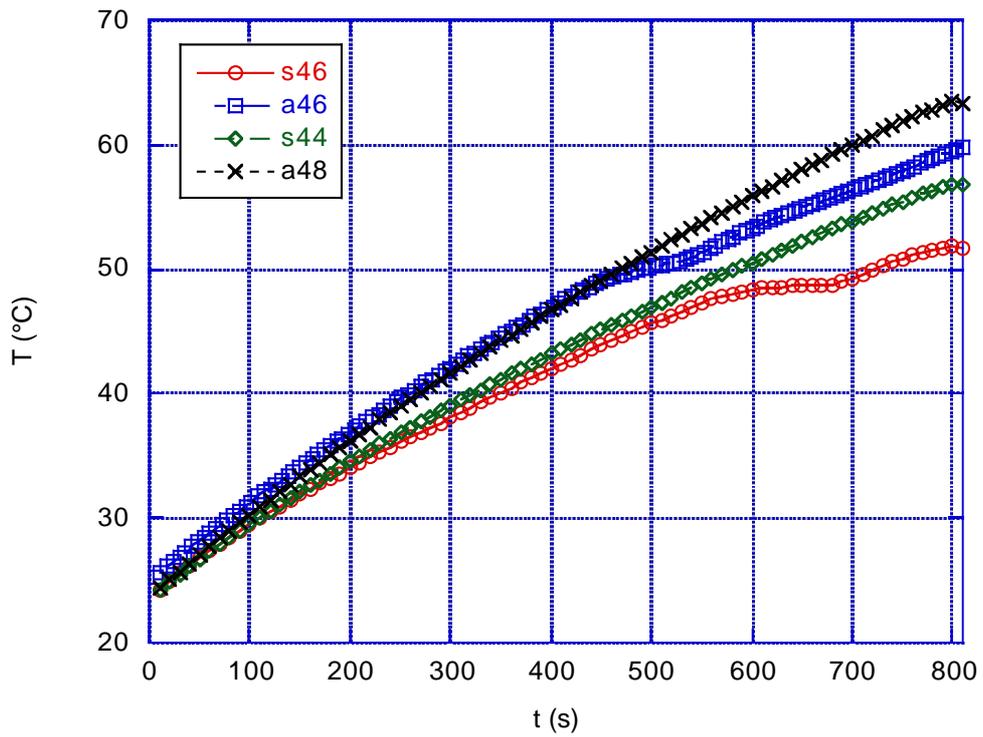


Figura 57 – Confronto dell'andamento di temperatura dell'interfaccia in funzione del tempo per diversi materiali a cambiamento di fase

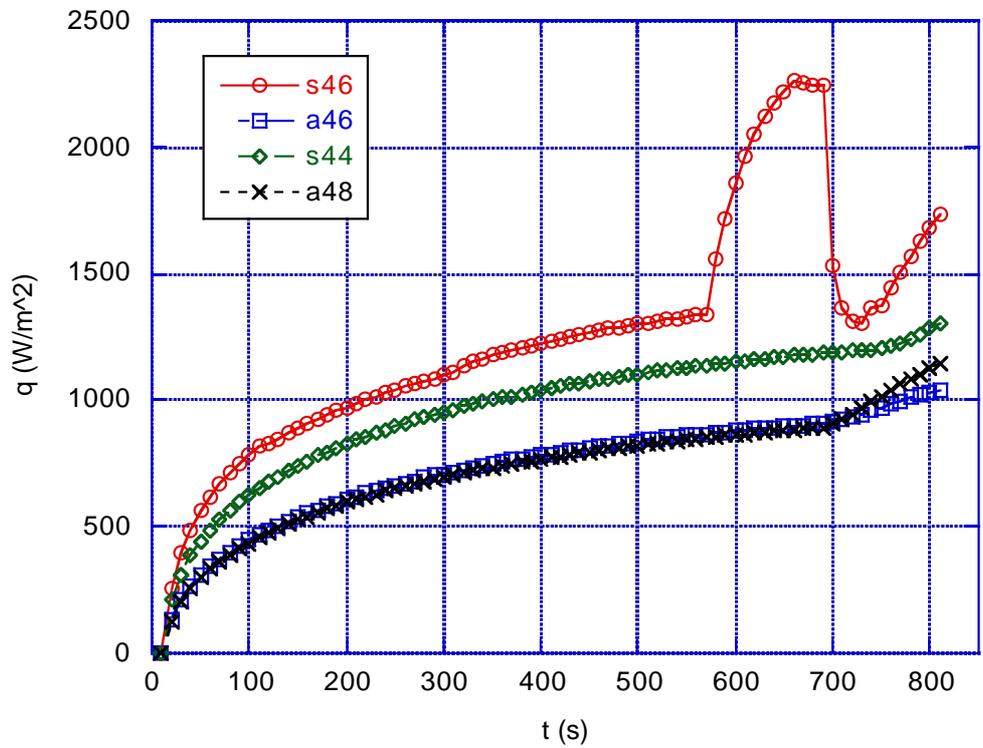


Figura 58 – Confronto dell'andamento del flusso dal rame al PCM, in funzione del tempo per diversi materiali a cambiamento di fase.

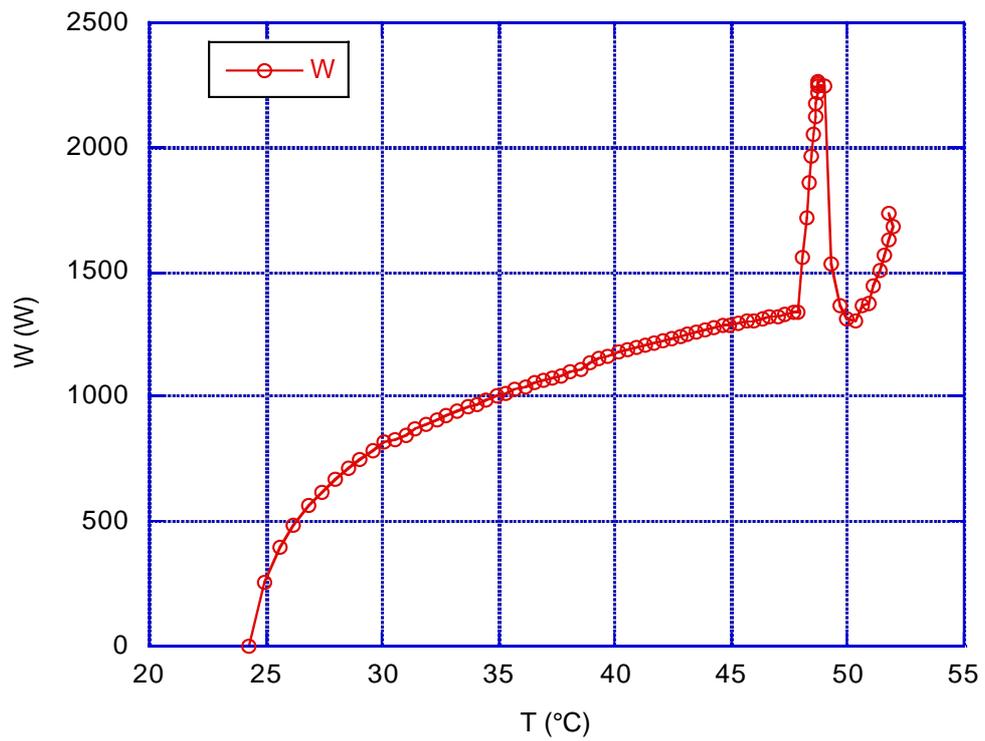


Figura 59 – Confronto dell'andamento del flusso in funzione della temperatura per il sale s46.

2.5 Simulazione 3D per la caratterizzazione del composito PCM + schiuma solida

Una ulteriore simulazione è stata finalizzata allo studio più particolareggiato della propagazione del calore nel caso di PCM + schiuma solida. Essendo la conduzione termica prevalentemente lungo la coordinata z, per ridurre il numero di celle si è scelto di simulare solo un parallelepipedo di altezza pari a quella reale (25mm), ma di base quadrata 0.8x0.8 mm . Questa dimensione deriva dalla schematizzazione della schiuma come una matrice di cubi di lato pari alla dimensione media delle bolle e con gli spigoli di SiC tali da ottenere la frazione di vuoto reale (88.1%, vedi tab. 3).

Figura 60a mostra la semplificazione effettuata. La geometria adottata si è ottenuta in GAMBIT con sottrazione di volume, con ogni elemento (che simula una bolla della schiuma) di dimensioni indicate in Figura 60b

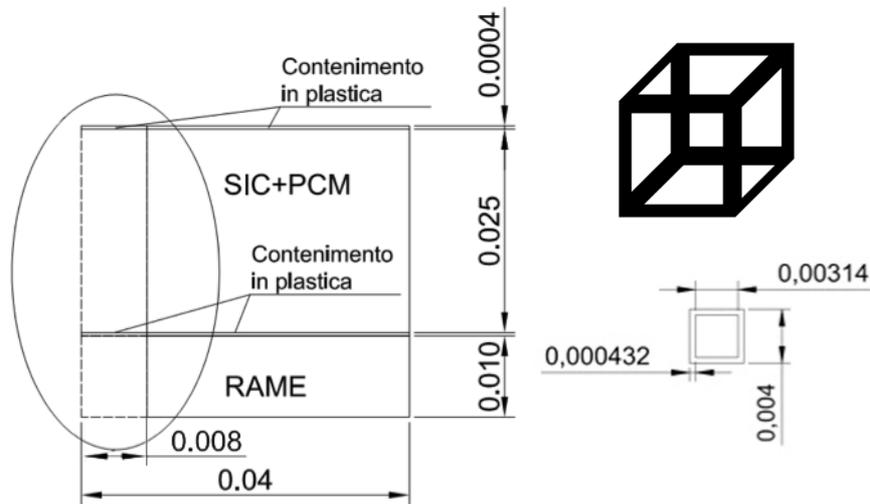


Figura 60 - sinistra: porzione simulata, destra: struttura elementare per simulare una bolla della schiuma e sue dimensioni

La geometria finale quindi contiene tutta l'altezza z del blocchetto PCM+SiC divisa in 6 celle, mentre la base è solo 1/25 divisa in 4 celle. Si è ottenuto così un parallelepipedo 0.008x0.008x0.0025 m, con un passo della mesh pari a 6 punti per lato, ottenendo così 168480 celle. La nodalizzazione è mostrata in Figura 61, mentre in Figura 62 sono evidenziate le superfici esterne (in rosso e rosa quelle adiabatiche, in giallo quella alla base del rame, in cui si applica il flusso termico), e quelle interne con i diversi materiali (il PCM in bianco, il SIC in verde e RAME in rosso).

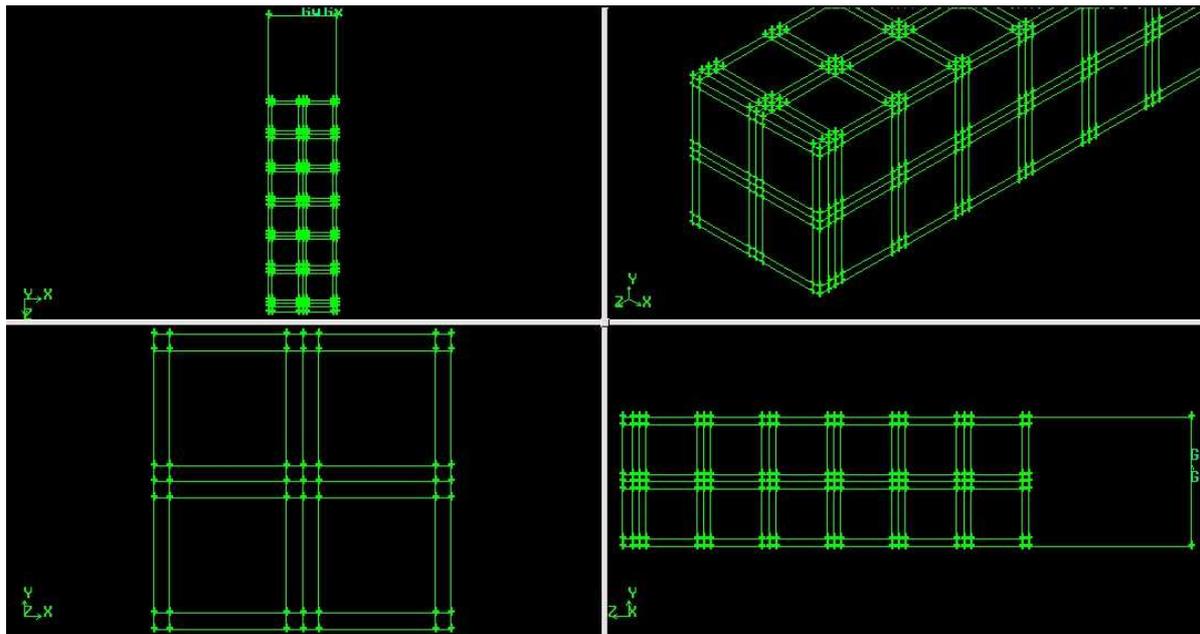


Figura 61 - nodalizzazione del volume (si nota la struttura della schiuma)

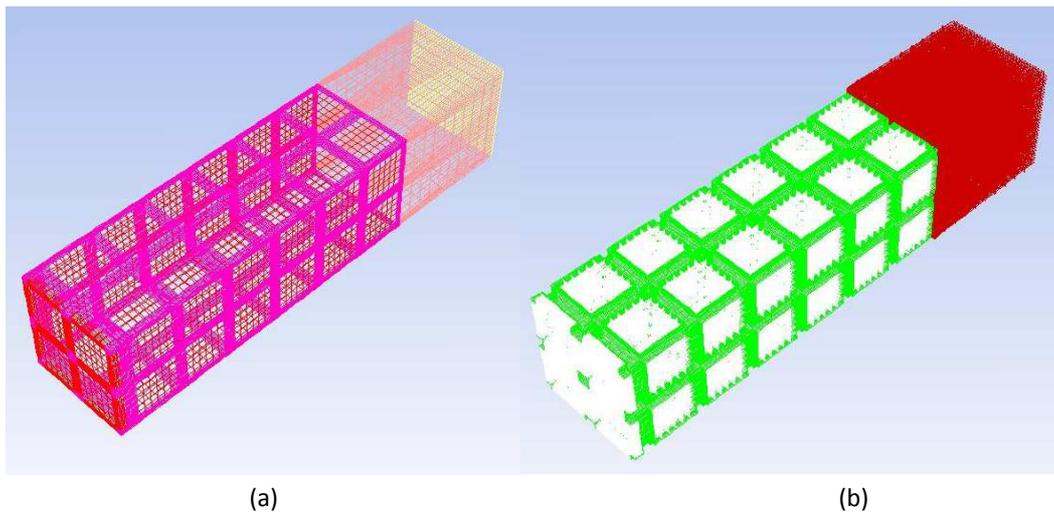


Figura 62 –Evidenziazione delle superfici esterne (a), e dei diversi materiali interni (b)

Posizionamento sensori:

Per il confronto con i dati sperimentali, le temperature sono state monitorate in posizioni equivalenti a quelle di Figura 4, come mostrato in Figura 63, in cui bisogna tenere presente che la dimensione verticale non è in scala.

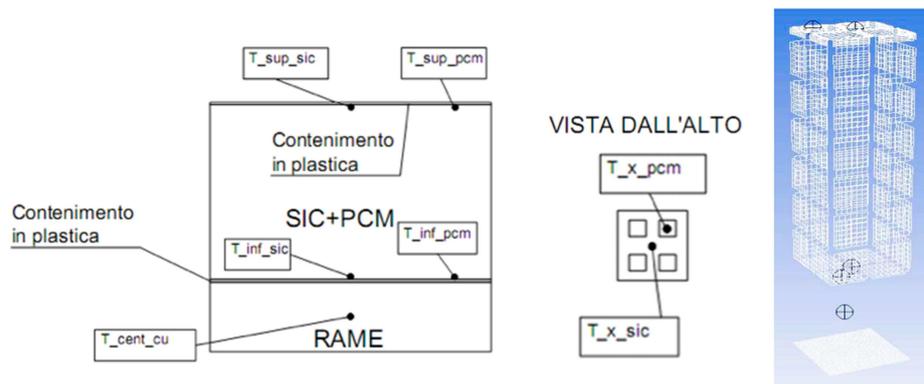


Figura 63 - posizioni e nomi dei punti di controllo della temperatura nella simulazione, e a destra visualizzazione sulla griglia 3D

2.5.1 Confronto dati sperimentali con dati simulati:

Per validare il modello si è usato in ingresso lo stesso flusso termico delle prove sperimentali (mostrate nel paragrafo 2.4.1) confrontando quindi i risultati con quelli ottenuti sperimentalmente.

In (a) e (b) Figura 64 e Figura 65 sono mostrati i confronti nella parte bassa e in quella alta del blocco, nel caso di solo PCM. Quest’ultima configurazione è stata ottenuta dalla stessa griglia in Fluent, semplicemente sostituendo il SiC con lo stesso PCM del resto della struttura (indicata nelle figure come PCM2).

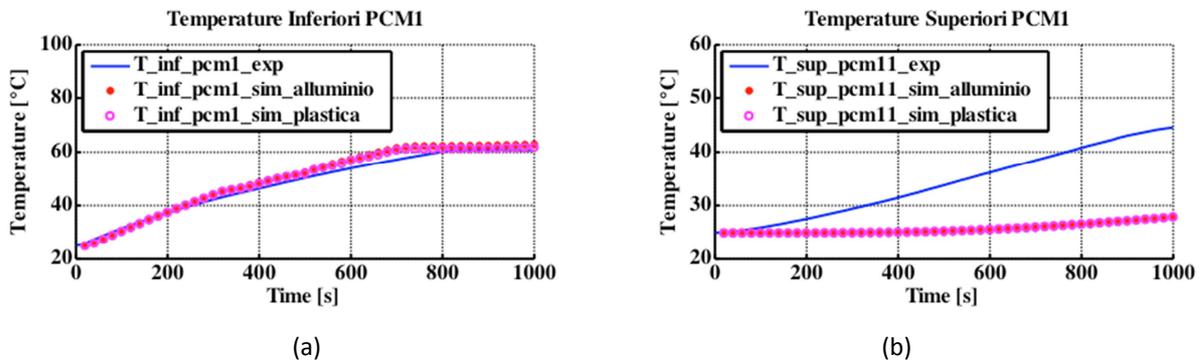


Figura 64 – a) temperatura della base del PCM, sopra l’interfaccia; b) temperatura della sommità del blocco di PCM.

Si osserva che nella parte alta del blocco di PCM i dati sperimentali sono molto diversi dalle simulazioni. Questa differenza è dovuta al movimento del nocciolo solido dopo l’inizio della liquefazione della parte in basso, come già verificato con i risultati mostrati in Figura 55. Il solido, più denso, si sposta in basso spingendo il liquido nella parte superiore, per cui le temperature sperimentali risultano molto più alte e paragonabili a quelle in basso. Quindi questo caso non può essere preso in considerazione per la validazione della simulazione.

Nel caso in cui sul blocchetto di rame è posto il PCM + SiC, in Figura 65 si riportano le temperature inferiori del blocco. Si evidenzia in questo caso che soprattutto per il sensore posto nel PCM si ha all’interfaccia un andamento praticamente identico al caso reale, in cui l’interfaccia è di plastica.

Nella parte alta del blocco la differenza della simulazione è leggermente maggiore (Figura 66), ma considerando che la misura sperimentale è la media tra le due zone PCM e SiC, anche in questo caso il risultato è soddisfacente.

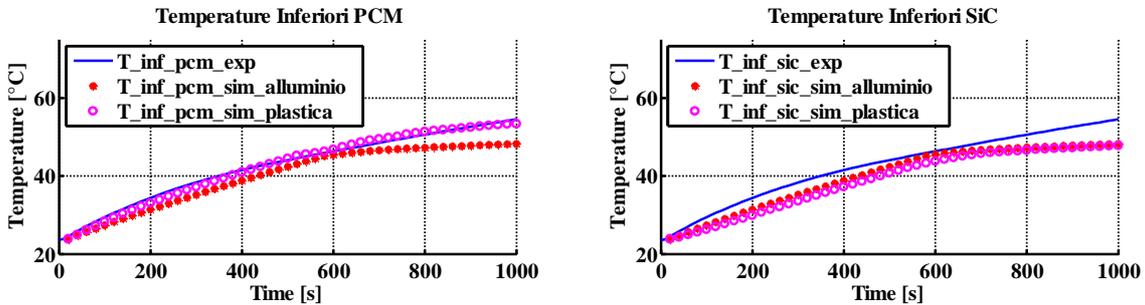


Figura 65 – temperature del PCM e del SiC alla base del blocchetto, sopra l'interfaccia

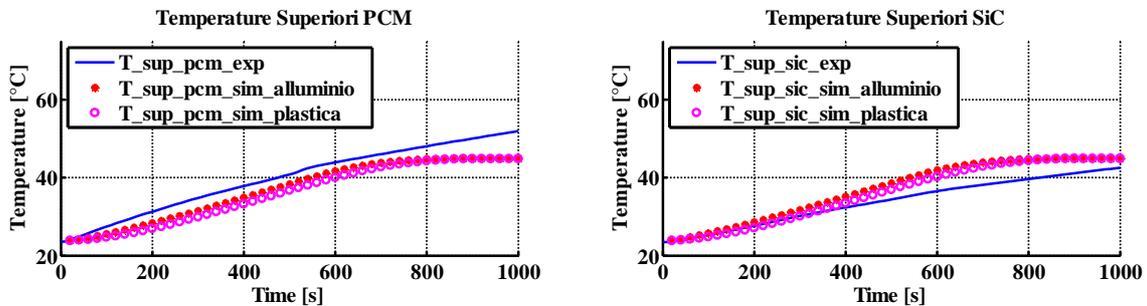


Figura 66 – temperature del PCM e del SiC alla sommità del blocchetto

Conclusioni della validazione:

In definitiva si è giunti alla conclusione che il modello geometrico adottato approssima molto bene la realtà del PCM+SiC per quanto riguarda le temperature, quindi fornisce dati abbastanza attendibili dei flussi. Per quanto riguarda invece il solo PCM, sarebbe necessaria una simulazione molto più complessa per tenere conto del movimento della parte fusa e di quella ancora allo stato solido a causa della differente densità.

2.5.2 Studio parametrico del contenitore (interfaccia rame-PCM e rame-PCM+SiC):

Un primo studio è stato effettuato sull'interfaccia di contenimento, sia nel caso di PCM+SiC, sia in quello con solo PCM, ottenuta dalla stessa griglia in Fluent sostituendo il SiC con lo stesso PCM. Sono stati confrontati quindi i seguenti casi:

Caso 1: Materiale solo PCM. Interfaccia in alluminio

Caso 2: Materiale solo PCM. Interfaccia in plastica

Caso 3: Materiale PCM+SiC. Interfaccia in alluminio

Caso 4: Materiale PCM+SiC. Interfaccia in plastica

Confronto tra il Caso1 e il Caso2:

In Figura 67 sono mostrate la struttura in PCM2 (lo "pseudo-SiC"), di colore bianco, e la distribuzione del campo di temperature in Kelvin, alla fine della simulazione di 600 secondi, per i due casi con interfaccia di alluminio (a sinistra) e di plastica (a destra). Come vedremo dai grafici la differenza è talmente piccola da non essere visibile nelle mappe di colore riportate.

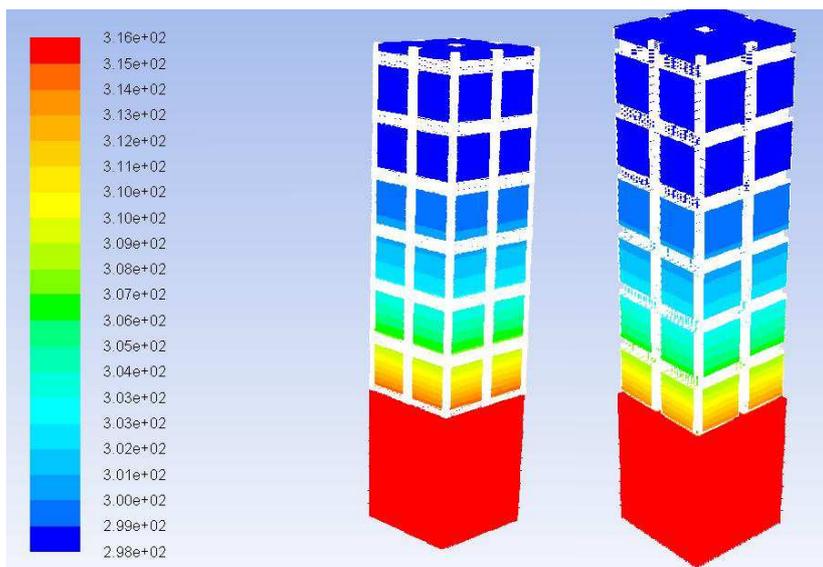


Figura 67 - campo di temperatura dopo 600 s, per il blocco con solo PCM e interfaccia di alluminio (a sinistra) e di plastica (a destra)

Figura 68 mostra le temperature del pcm subito sopra l’interfaccia. Nel grafico si può notare come la variazione di temperatura tra i due casi è minima, più alta nel caso con l’alluminio di circa 0.44°C dopo l’aumento della temperatura di 17°C a 600 s; infatti l’interfaccia in alluminio fornisce una minore resistenza al passaggio del flusso termico, rispetto al caso dell’interfaccia in plastica.

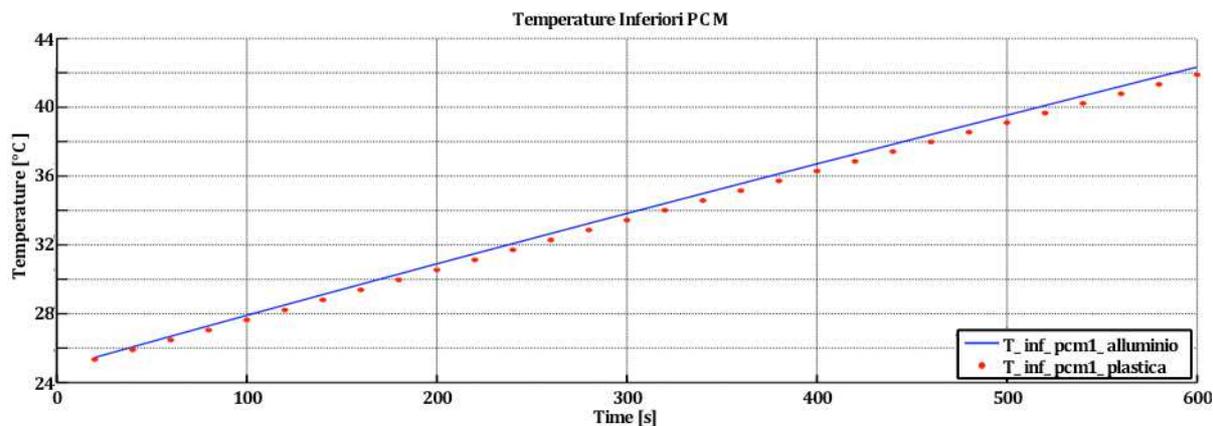


Figura 68 – temperatura della base del PCM, sopra l’interfaccia

I sensori superiori misurano la stessa tendenza che nel caso inferiore ma con un ritardo notevole (Figura 69), e con un aumento di soli 0.3°C dopo 600 s, quando la base è aumentata di 17°C. Al centro del rame invece si ha un’inversione. Nel caso con la plastica la temperatura nel centro del rame è più alta perché fornisce più resistenza al flusso termico all’interfaccia, come si vede da Figura 70.

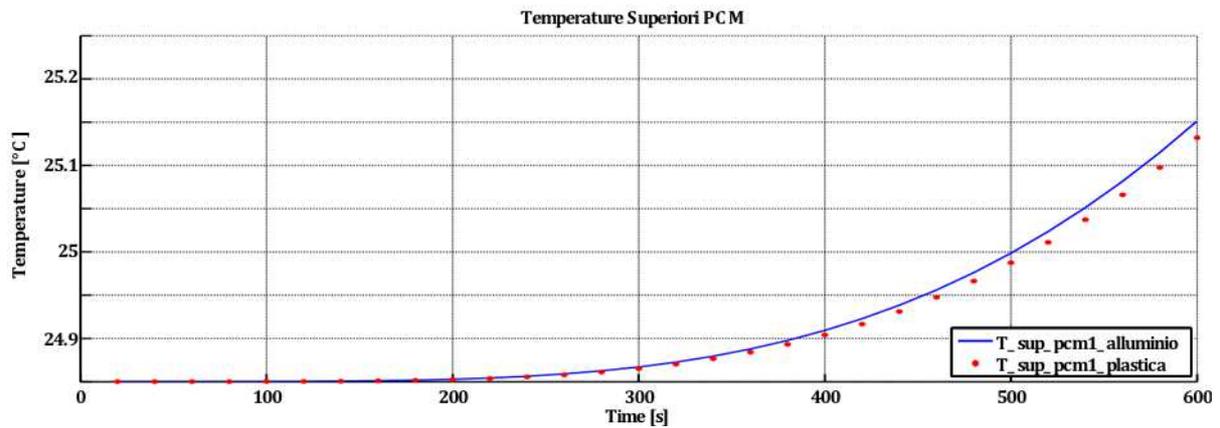


Figura 69 – temperatura della sommità del blocco di PCM.

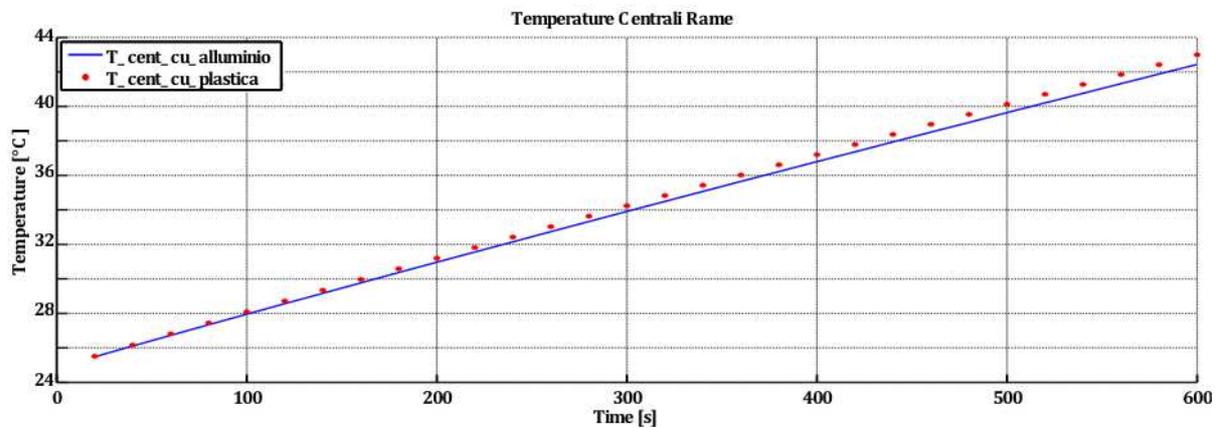


Figura 70 – temperatura al centro del blocco di rame

In (a) e (b) sono mostrati i flussi superficiali in ingresso e uscita dall'interfaccia e quello accumulato in essa. Come si può notare il valore del flusso nel caso con l'alluminio è sempre più alto, come pure quello accumulato, che però è una frazione trascurabile del totale, circa il 2%.

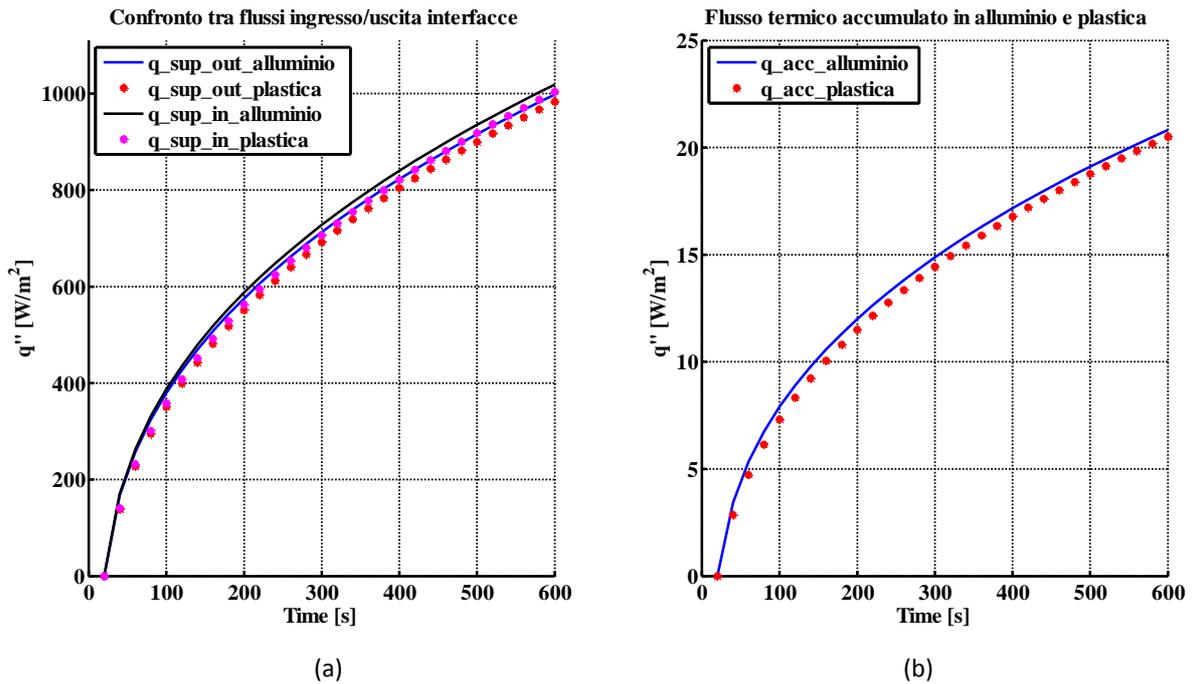


Figura 71 – Flussi superficiali in ingresso e uscita dall’interfaccia (a) e quello accumulato in essa (b)

Confronto tra il Caso3 e il Caso4:

In questo caso è presente la struttura che simula la schiuma di SiC, nelle due varianti con interfaccia alluminio o plastica. Figura 72 mostra i flussi superficiali e temperature subito sopra l’interfaccia. I casi con alluminio o plastica hanno differenze molto piccole e le figure ottenute sono identiche.

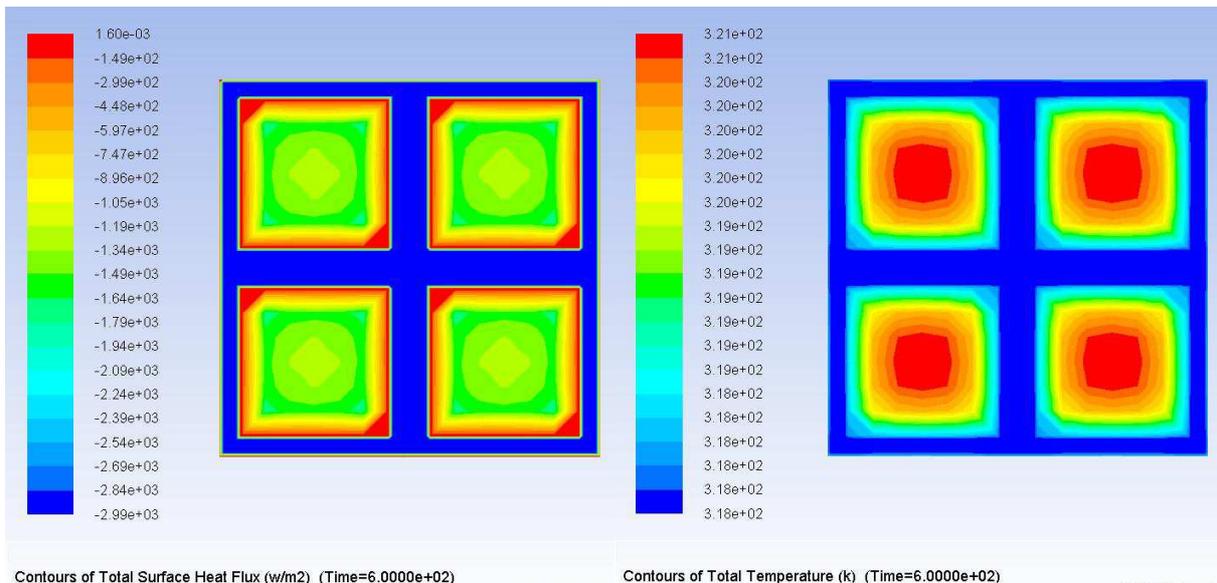


Figura 72 – Flussi superficiali (a) e temperature (b) subito sopra l’interfaccia

Le figure seguenti (Figura 73 a (a) (b)
 Figura 76) riportano per il PCM+SiC i grafici analoghi a quelli da Figura 68 a (a) (b)
 Figura 71 per solo PCM.

In Figura 73 si può notare all'interfaccia con il SiC una temperatura maggiore con alluminio, mentre nel PCM le temperature sono maggiori con la plastica in quanto con l'alluminio il maggior flusso verso la struttura di SiC viene sottratto dalle regioni adiacenti.

Questa inversione di temperature non si ha nella parte superiore della struttura in Figura 74, dove il flusso termico tende a distribuirsi uniformemente.

Come ci aspettavamo, in Figura 75 anche nel rame le temperature sono superiori nel caso della plastica, in misura maggiore che nel caso di solo PCM. Questo è confermato dai flussi superficiali di (a) (b) Figura 76, da confrontare con (a) (b) Figura 71.

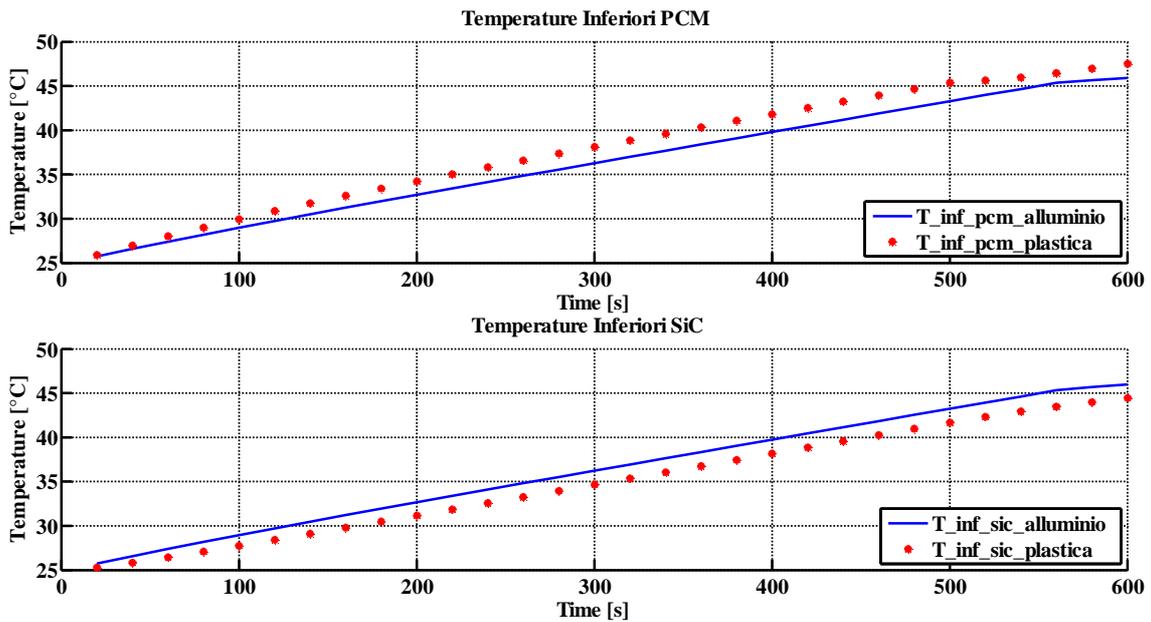


Figura 73 – temperature del PCM e del SiC alla base del blocchetto, sopra l'interfaccia

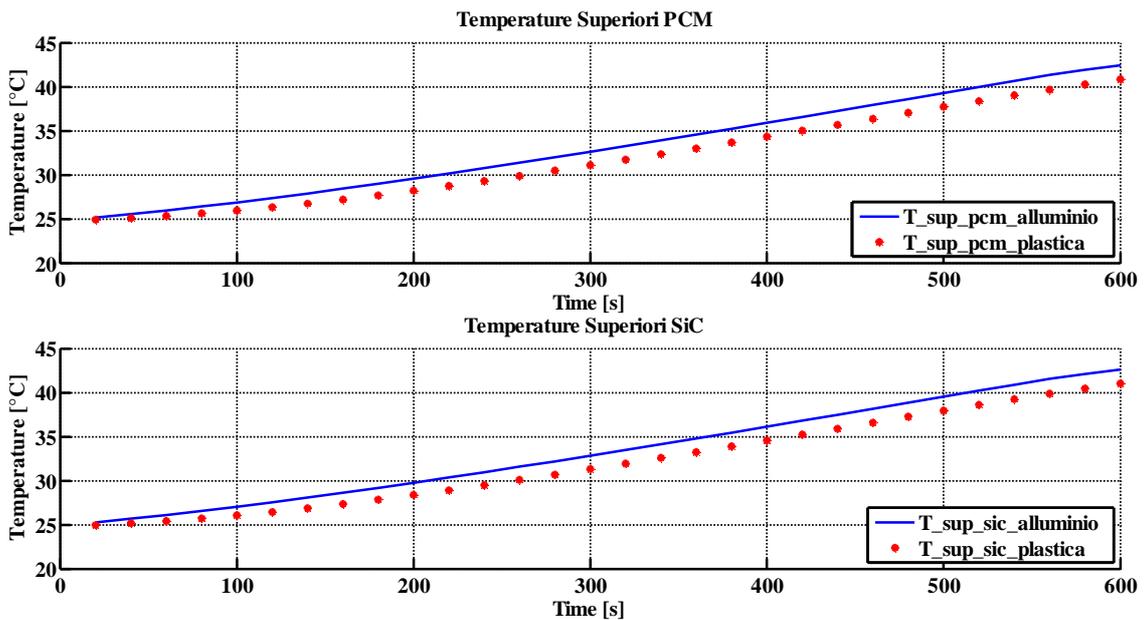


Figura 74 – temperature del PCM e del SiC alla sommità del blocchetto

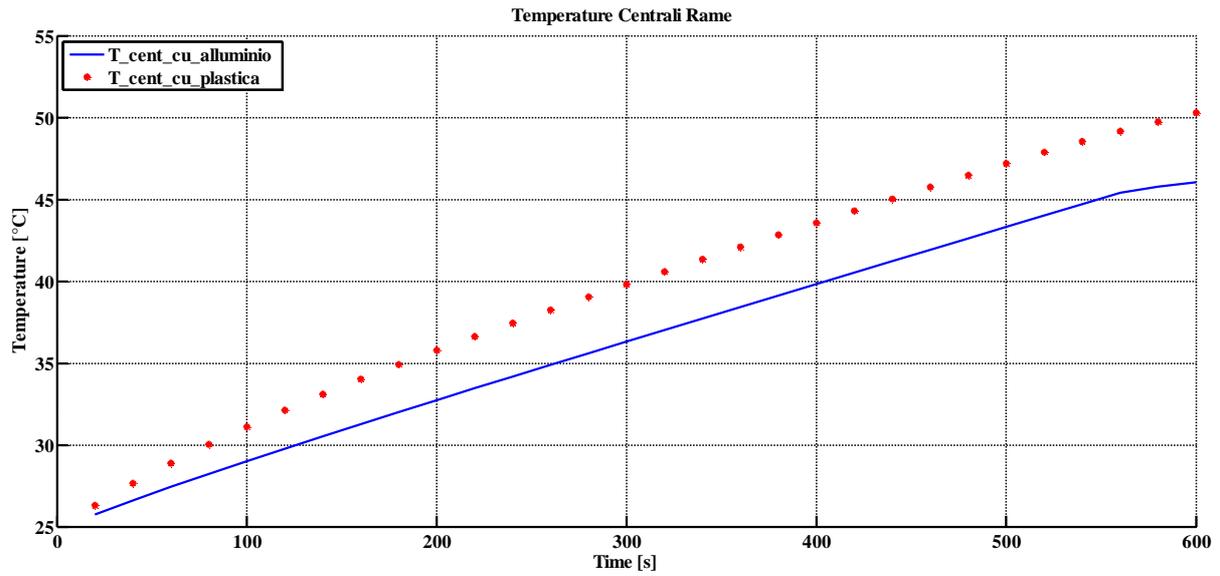


Figura 75 – temperatura al centro del blocco di rame

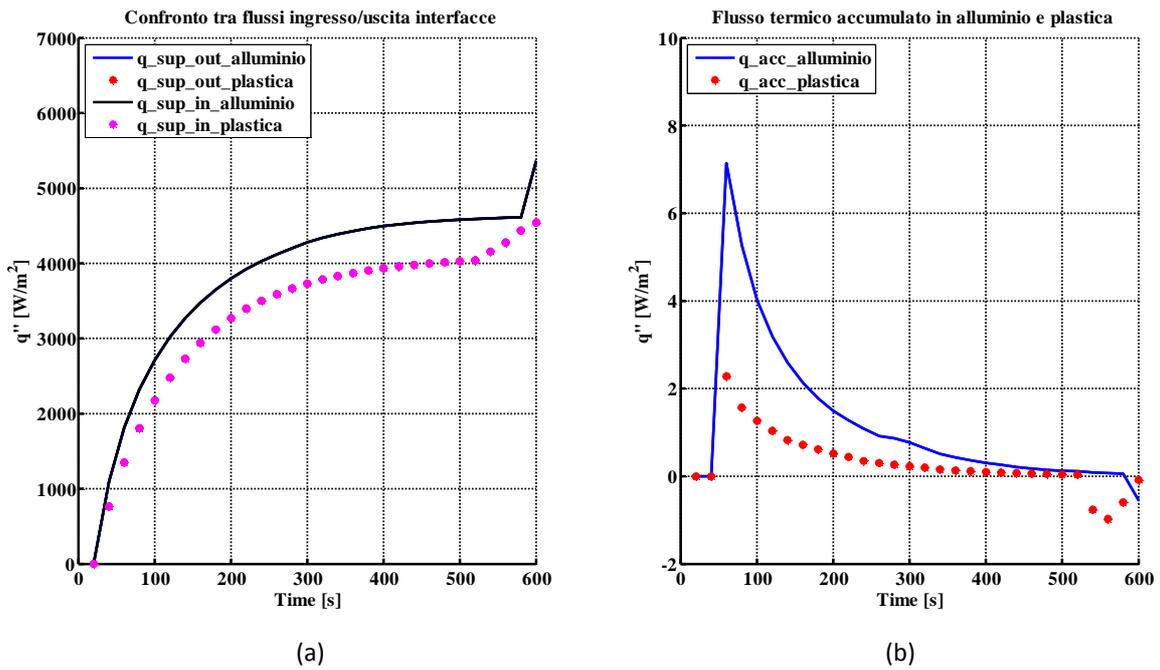


Figura 76 – flussi superficiali in ingresso (a) e uscita (b) dall'interfaccia e quello accumulato in essa

Dal confronto dei quattro casi si può concludere che l'interfaccia di alluminio aumenta le prestazioni del PCM nel caso in cui questo abbia conducibilità alta grazie alle schiume conduttiva, mentre l'effetto è piccolo se il blocchetto è di solo materiale poco conduttivo.

2.5.3 Studio dell'influenza della conducibilità della schiuma solida:

In questo capitolo si è studiato l'influenza del materiale della schiuma solida, sostituendo il SiC con rame o considerando tutto PCM. Le proprietà fisiche dei materiali inserite in FLUENT sono riportate in Tabella 6.

Tabella 6 – proprietà fisiche dei materiali usati nella simulazione

	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg-K]	k [W/m-K]	λ [J/kg]	T_solido [K]	T_liquido [K]
PCM A46	910	2220.0	0.22	910	318.15	319.15
SIC	2979	670.0	118.0			
RAME	8978	381.0	387.6			
PCM+SIC	1162 (*)	2031.4 (*)	14.5 (*)			
PCM+RAME	1892 (*)	1996.1 (*)	47.4 (*)			

(*) calcolati da Fluent in base alla geometria

Si è simulato il solo caso plastica, in quanto è il caso che rispecchierebbe le condizioni reali di funzionamento, ed usando il flusso delle prove sperimentali utilizzato in 2.5.1 per la validazione.

Come in questo caso, la trattazione è stata fatta solo con un'interfaccia in plastica.

In Figura 77 si riportano le temperature inferiori all'interfaccia per il solo PCM, PCM+SIC e PCM+RAME: si può notare che le temperature all'interfaccia sia nel caso SiC che RAME sono molto simili, mentre è abbastanza rilevante la differenza con il caso di solo PCM senza schiuma solida.

Ancora minore, quasi impercettibile, è la differenza tra SiC che RAME nella temperatura superiore del blocco, mostrata in Figura 78.

La prima vera differenza si nota in Figura 79 in cui viene graficata la temperatura media al centro del rame, minore nel caso del PCM+RAME. Questo dimostra che la struttura di rame immersa nel PCM assorbe un flusso maggiore che negli altri casi, ma comunque con un miglioramento non rilevante ai fini dell'accumulo termico.

Un parametro che sicuramente ha molto più peso è la dimensione media dei pori, che nel nostro caso è di 2.5 mm (porosità nominale 10 ppi). Una sua diminuzione dovrebbe aumentare la conduzione verso im PCM, ma lo studio di questa configurazione necessita la ridefinizione del modello geometrico, con una griglia più fitta ed un numero maggiore di celle rispetto a Figura 61. Questo dovrebbe essere seguito da nuove simulazioni per valutare l'effettivo miglioramento, ed infine da prove sperimentali con la schiuma con le caratteristiche individuate.

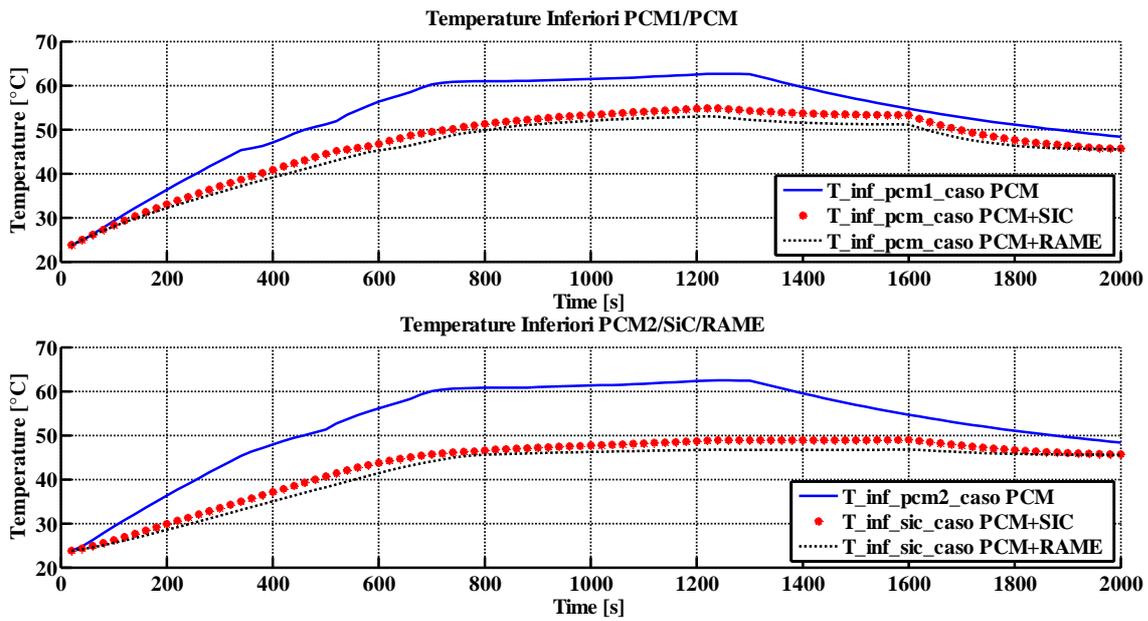


Figura 77 – temperature del PCM e del SiC alla base del blocchetto, sopra l’interfaccia, per i tre materiali

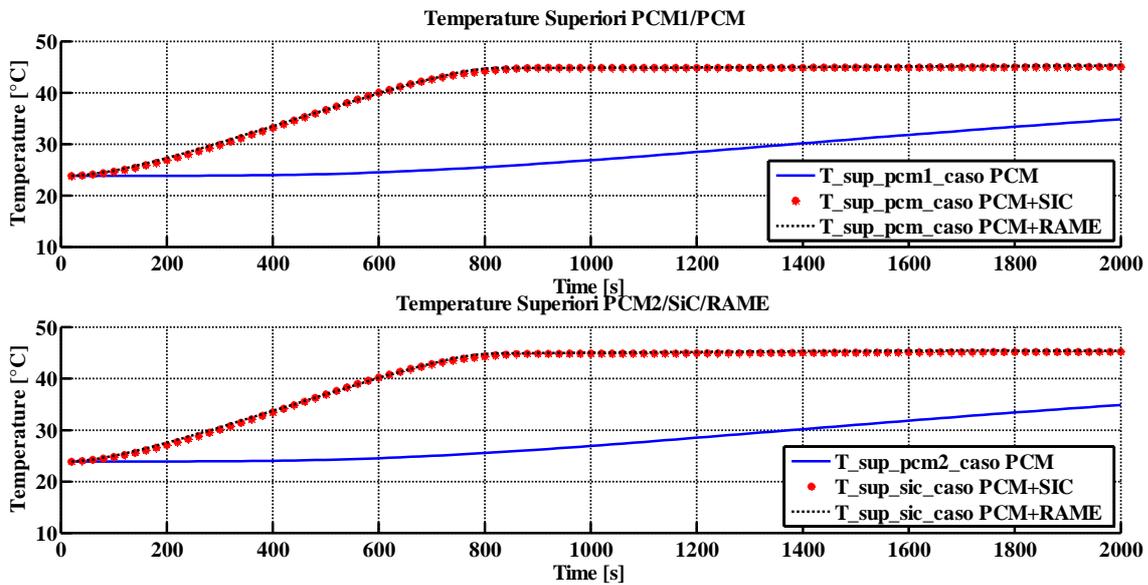


Figura 78 – temperature del PCM e del SiC alla sommità del blocchetto, per i tre materiali

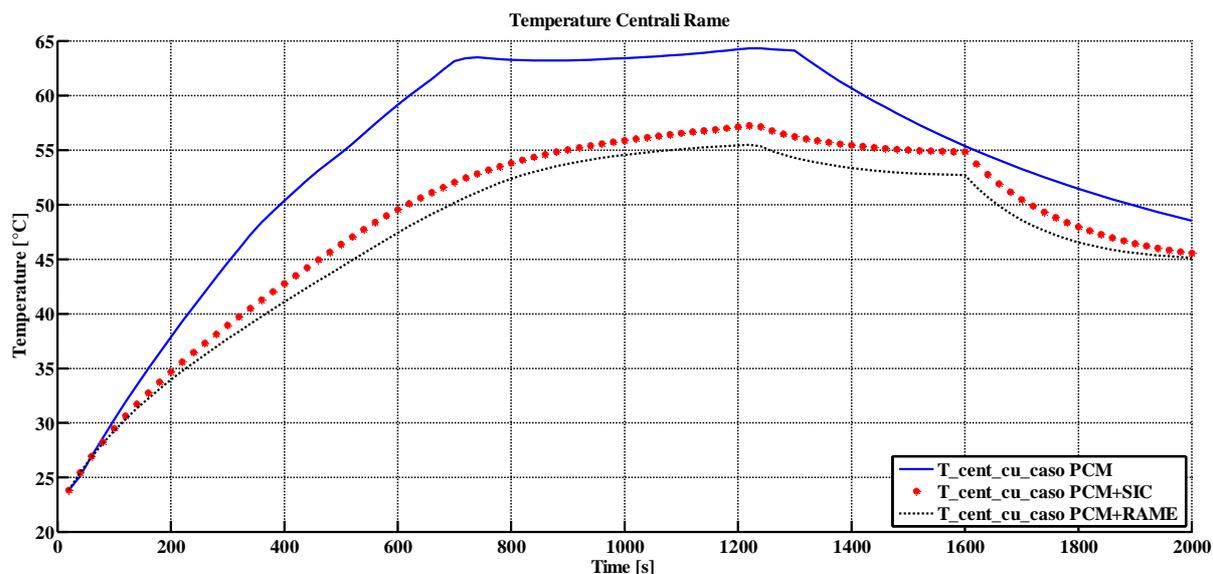


Figura 79 – temperature del PCM e del SiC al centro del blocco riscaldatore di rame.

3 Conclusioni

In questo lavoro si è svolta un'analisi dell'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM) in un serbatoio di accumulo di un'impianto di "solar heating and cooling". Con il metodo classico l'energia accumulata dipende dalla variazione di temperatura e dalla capacità termica totale, mentre sfruttando il calore latente, a parità di massa, è nettamente superiore la quantità di energia che è possibile accumulare.

L'utilizzo di PCM comporta l'alternarsi di periodi di fusione (accumulo di energia in eccesso) e la solidificazione (rilascio dell'energia accumulata). Questo si verifica se la temperatura del liquido primario nel primo periodo è sufficientemente superiore a quella di cambio di fase del PCM, e se nel secondo periodo essa scende a valori abbastanza bassi rispetto alla stessa. Inoltre è necessario che questi periodi durino un tempo sufficiente a far cambiare di fase tutto o almeno una parte consistente del materiale, per sfruttarne il calore latente di fusione.

Dai risultati ottenuti testando un serbatoio di accumulo contenente PCM sull'impianto di "solar heating and cooling" è stato possibile notare che i tempi di assorbimento e rilascio del PCM sono molto lunghi. Prove sperimentali e simulazioni sono state eseguite su un singolo tubo di PCM: esse hanno dimostrato che, a causa della bassa conducibilità, i tempi necessari ad avere miglioramenti consistenti sull'accumulo di energia possono essere troppo lunghi, spesso molte ore.

Dalle simulazioni è risultato che un PCM con conducibilità 20 volte maggiore rispetto a quello realmente utilizzato nel serbatoio permetterebbe di ottenere la cessione all'acqua di gran parte del calore latente di fusione in tempi minori di un'ora, rendendo quindi molto più efficiente la funzione di accumulo di calore durante le variazioni dovute ad effetti meteorologici. Un altro aspetto evidenziato dai risultati ottenuti, è l'importanza della parete del contenitore del PCM, attualmente di materiale plastico, che contribuisce in maniera non trascurabile ad aumentare i tempi necessari per il cambiamento di fase.

Si è allora cercato di aumentare la conducibilità del materiale inserendolo in una matrice solida molto più conduttiva. I risultati ottenuti sono incoraggianti, con la conducibilità aumentata di quasi il 500%, valore che però ancora non assicura una risposta tale da compensare la perdita di rendimento dell'accumulo alle altre temperature, quando il cambiamento di fase non avviene.

La simulazione specifica della struttura composita PCM + schiuma solida ha dimostrato che non si riesce ad ottenere questo ulteriore aumento variando il materiale della schiuma rispetto al SiC utilizzato. E' necessario quindi intervenire su altri parametri, primo fra tutti la dimensione delle bolle della schiuma, ma

uno studio di questa soluzione richiede dapprima una nuova impostazione della geometria in Fluent, seguita poi da altre simulazioni ed infine da verifiche sperimentali.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Sharma, V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), 318–345
- [2] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: materials and applications”, *Energy Conversion and Management*, 45 (2004), 1597–1615
- [3] S.D. Sharma, H. Kitano, K. Sagara, “Phase change materials for low temperature solar thermal applications”, *Res.Rep. Fac. Eng. Mie Univ.*, 29 (2004), pp 31-64
- [4] M. Kenisarin, K. Mahkamov, “Solar energy storage using phase change materials”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007), 1913–1965
- [5] Q. He, S. Wang, M. Tong, Y. Liu, “Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage”, *Energy Conversion and Management*, 64 (2012), 199–205
- [6] S. Harikrishnan, S. Kalaiselvam, “Preparation and thermal characteristics of CuO–oleic acid nanofluids as a phase change material”, *Thermochimica Acta*, 533 (2012), 46-55
- [7] S. Harikrishnan, S. Magesh, S. Kalaiselvam, “Preparation and thermal energy storage behaviour of stearic acid–TiO₂ nanofluids as a phase change material for solar heating systems”, *Thermochimica Acta* 565 (2013), 137-145
- [8] S. Al-Hallaj, J.R. Selman, “A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material”, *J. Electrochem. Soc.*, 147 (2000), 3231-323
- [9] R. Sabbah, R. Kizilel, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, “Active (air-cooled) vs. passive (PCM) thermal management of high power Li-ion packs: limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution”, *J. Power Sources*, 182 (2008), 630–638.
- [10] N. Calabrese, F. D’Annibale, P. Rovella, L. Zamboni, R. Lazzarin, M. Noro, “Gli accumuli termici a cambiamento di fase integrati in impianti di solar heating and cooling: prove sperimentali”, *RdS/2013/088*
- [11] G.P. Celata, F. D’Annibale, A. Chiaradia, M. Cumo, “Upflow turbulent mixed convection heat transfer in vertical pipes”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41(24) (1998), 4037 – 4054.
- [12] G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, “Internal Flow: Heat Transfer”, *Process Heat Transfer*, (1994), 98-108, CRC Press, Begell House
- [13] T. Aicher, H. Martin, “New correlations for mixed turbulent natural and forced convection heat transfer in vertical tubes”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40(15) (1997), 3617-3626 .

5 Abbreviazioni ed acronimi

A	Area [m ²]
c _p	Calore specifico [J/kg K]
D	Diametro [m]
E	Energia [J]
Eff	Effusività [W s ^{1/2} /m ² K]
G	portata specifica di massa, [kg/m ² s]
Gr	N. di Grashof, definito in (6)
Gr _T	N. di Grashof per temperature imposte
h	Coefficiente di scambio termico, [W/m ² K]
k	Conducibilità termica [W/m K]
L	Lunghezza [m]

M	Massa [kg]
Nu	N. di Nusselt, hD/k
PCM	Phase change material
Pr	N. di Prandtl, $c_p\mu/k$
q''	Flusso di calore [W/m^2]
q'''	Flusso di calore volumetrico [W/m^3]
Ra	N. di Rayleigh, $Gr Pr$
Re	N. di Reynolds, GD/μ
S	Superficie, [m^2]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
T_{pc}	Temperatura di cambiamento di fase [$^{\circ}C$]
u	velocità [m/s]
VHC	Capacità termica volumetrica [J/m^3]
W	Potenza [W]
wt%	percentuale in peso

Simboli Greci

β	Coefficiente di espansione termica [K^{-1}]
Γ	portata [kg/s]
λ	Calore latente di fusione [J/kg]
μ	viscosità dinamica [kg/m s]
ρ	Densità [kg/m^3]

Pedici

a	ambiente
cal	calcolato
Cu	relativo al rame
disp	dispersa
e	esterno
exp	sperimentale
i	interno
max	massimo
par	relativo alla parete
pc	phase change
PCM	relativo al PCM
w	acqua