



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di metodi per l'aumento delle prestazioni dei sistemi di accumulo termico basati su materiali a cambiamento di fase

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

STUDIO DI METODI PER L'AUMENTO DELLE PRESTAZIONI DEI SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO BASATI SU MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

F. D'Annibale, G. Zummo (ENEA), C. Menale (Università di Roma "Sapienza")

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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	5
2.1 MATERIALI UTILIZZATI	5
2.1.1 <i>Phase Change Materials</i>	5
2.1.2 <i>Schiume solide conduttive</i>	9
2.1.3 <i>Proprietà fisiche dei provini compositi</i>	11
2.2 PROVE SPERIMENTALI.....	12
2.2.1 <i>L'impianto mini-PCM</i>	12
2.2.2 <i>Metodologia di esecuzione ed elaborazione</i>	13
2.2.3 <i>Risultati sperimentali, schiuma riempita con diversi PCM</i>	14
2.2.4 <i>Risultati sperimentali, PCM A46, diverse schiume</i>	16
2.2.5 <i>Elaborazione dei risultati sperimentali, valutazione delle potenze scambiate</i>	19
2.3 SIMULAZIONI CFD DELLE PROVE SPERIMENTALI CON MODELLO BIDIMENSIONALE	26
2.3.1 <i>Sensibilità della simulazione</i>	27
2.3.2 <i>Validazione con i dati sperimentali per PCM puro</i>	28
2.3.3 <i>Applicazione del modello al materiale composito</i>	28
2.4 SIMULAZIONI CFD DELLE PROVE SPERIMENTALI CON MODELLO TRIDIMENSIONALE	29
2.5 CONCLUSIONI SULLE PROVE SPERIMENTALI CON LE SCHIUME SOLIDE	32
2.6 MIGLIORAMENTI CON MODIFICHE DEI CONTENITORI DI PCM	33
2.6.1 <i>Risultati delle precedenti simulazioni</i>	33
2.6.2 <i>Nuove simulazioni con FLUENT</i>	35
3 CONCLUSIONI	43
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	44
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	44

Sommario

L'attività sperimentale in oggetto è finalizzata allo studio e alla verifica numerica e sperimentale di metodi per il miglioramento delle prestazioni dei materiali a cambiamento di fase (PCM) in sistemi di accumulo termico. Sulla base dei risultati ottenuti nella precedente ricerca (PAR 2013 [1]), sono stati eseguiti nuovi test sperimentali per verificare l'efficacia di metodi per l'aumento della conducibilità termica e quindi della potenza accumulabile attraverso il calore latente del PCM. Infatti la risposta molto lenta di tali materiali, a causa della bassa conducibilità termica, ritarda il trasferimento del calore dalla superficie in contatto con l'acqua verso gli strati più interni e quindi non permette di sfruttare completamente la grande quantità di energia accumulabile con il cambiamento di fase. Sono quindi state eseguite nuove simulazioni CFD e prove sperimentali con il PCM inserito in schiume ad alta conducibilità, per verificare i possibili miglioramenti ottenibili agendo sulla geometria e sulle caratteristiche della schiuma solida. Rispetto ai risultati che si erano ottenuti con la schiuma di carburo di silicio, il rame ha mostrato un aumento consistente delle prestazioni. Non si notano invece effetti apprezzabili con la riduzione delle dimensioni delle bolle, a parità di grado di vuoto. Infine, utilizzando simulazioni CFD, si è valutato l'effetto di interventi migliorativi intervenendo invece solo sulla geometria delle "candele" di PCM inserite nel serbatoio di accumulo, verificando quantitativamente l'efficacia di modifiche quali l'ottimizzazione del riempimento dei contenitori di PCM, l'utilizzo di tubi concentrici (PCM disposto in un anulo) e con pareti metalliche invece di quelle attuali in polietilene.

1 Introduzione

Nel precedente lavoro [1] 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 l'accumulo classico, sfruttando la capacità termica dell'acqua contenuta nel serbatoio, l'energia accumulata dipende dalla variazione di temperatura e dalla capacità termica totale. Sfruttando invece il calore latente di cambiamento di fase del PCM, 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 con una schiuma di carburo di silicio 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.

Per ottenere un ulteriore aumento della conducibilità si può ancora intervenire su altri parametri, come il materiale della schiuma conduttiva e la dimensione delle bolle, le caratteristiche dei contenitori del PCM e la loro geometria. Il presente studio ha indagato su tali modifiche, sia con prove sperimentali, sia con simulazioni CFD.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Materiali utilizzati

2.1.1 Phase Change Materials

Per le prove sperimentali sono stati utilizzati tre diversi PCM, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1, in cui in ultima riga sono riportate anche le caratteristiche dell'acqua.

Tabella 1 - Caratteristiche dei PCM utilizzati

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
A46	Organico	46	910	155	141	2.22	0.220	300	No
A43	Organico	43	780	165	129	2.37	0.180	300	tossico
acqua			1000			4.18	0.603	100	

Come si nota dalla tabella, il produttore fornisce le proprietà fisiche ad una sola temperatura, 20°C. Per poter valutare meglio i risultati sperimentali, l'A46 e l'A43 sono stati caratterizzati in laboratorio a varie temperature. In particolare è stata eseguita la misura della conducibilità termica con un misuratore di tipo "Transient Plane Source", modello "C-Therm TCi Thermal Conductivity Analyzer" della C-THERM Technologies, che permette la misura della conducibilità e della diffusività, descritto in [1].

In Figura 1 è mostrata la misura della conducibilità termica del PCM A46 durante il riscaldamento da 23 a 81.5 °C ("salita") e in due raffreddamenti. Il solido presenta un primo 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). Questo picco è giustificabile con una transizione solido-solido della struttura cristallina. Tra i 40 e i 50°C si ha un secondo picco dovuto alla fase di transizione solido-liquido, per poi scendere 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.

Per l'A43 il comportamento (Figura 2) è molto più regolare: la conducibilità rimane pressoché costante nelle due regioni monofase ed il picco del cambiamento di fase è molto più stretto intorno ai 43°C teorici (tutto avviene tra 41 e 44 °C). Questo comporta che la misura in questa zona fornisca valori di k molto più grandi, costringendo quindi all'uso della scala logaritmica.

Quindi una importante differenza tra i due materiali è nelle modalità di cambiamento di fase, che nell'A43 avviene effettivamente alla temperatura nominale mentre nella paraffina A46 avviene in un intervallo molto largo della temperatura. Vedremo in seguito che questo ha degli effetti molto evidenti sulla temperatura durante i transitori.

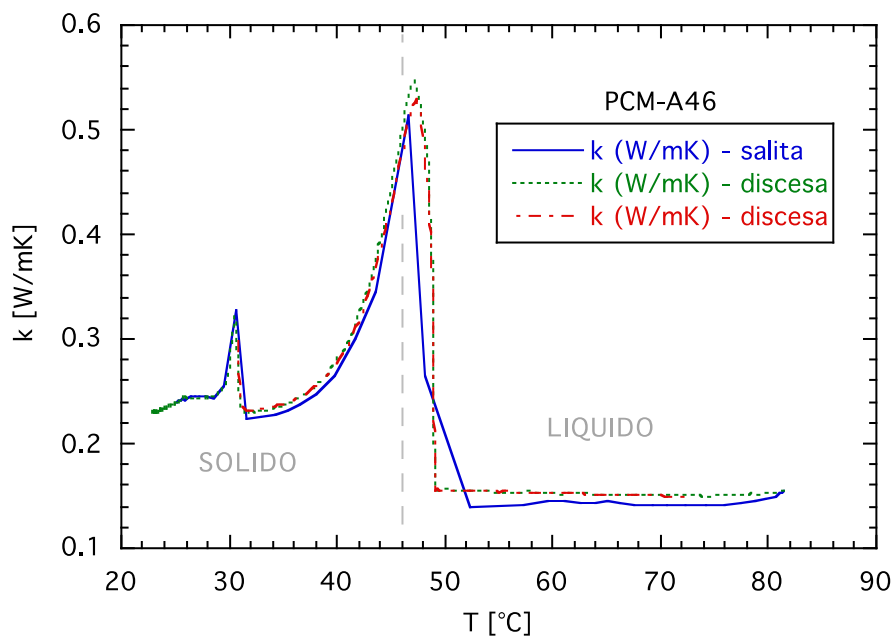


Figura 1 – Misura della conducibilità termica del PCM A-46 solido e liquido

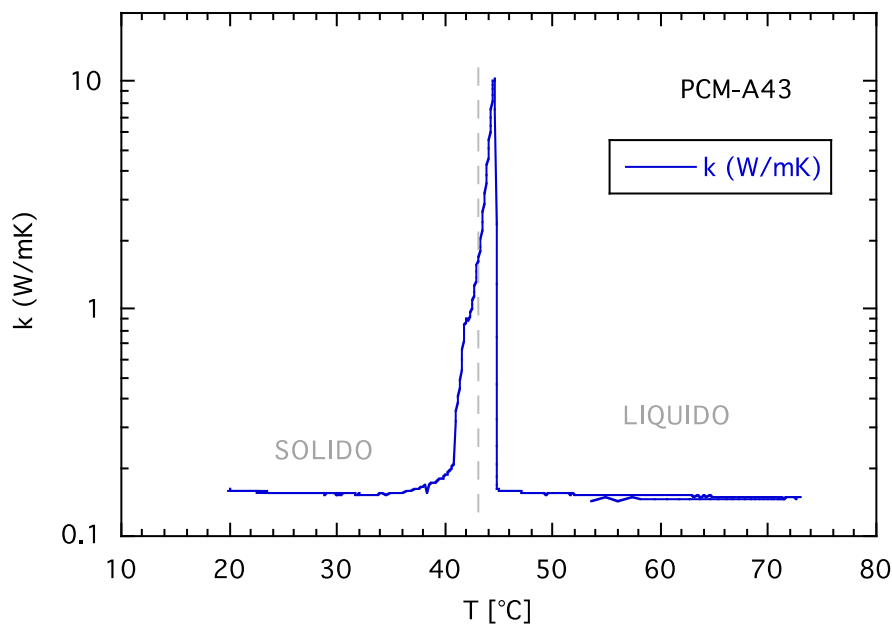


Figura 2 – Misura della conducibilità termica del PCM A-43 solido e liquido

Per i due PCM si è misurata anche la densità al variare della temperatura, utilizzando la variazione di volume ottenuta portando il materiale a diverse temperature nel bagno termostato. In Figura 3 si vede che la densità dell'A46 subisce una consistente variazione già nel solido, per poi diminuire notevolmente nella regione di cambiamento di fase, tra i 40 e i 50°C (in corrispondenza del picco di Figura 1). Questa variazione complessiva, da 900 a 760 kg/m³ in un range di temperatura di 60 gradi (da 20 a 80°C), deve essere tenuta in considerazione nel riempimento del contenitore per evitare possibili problemi meccanici durante il riscaldamento. Anche l'A43 subisce una notevole espansione termica, ma solo nel cambiamento di fase e poi nella fase liquida, mentre il solido rimane con densità pressoché costante. Inoltre viene confermato il diverso comportamento dei due materiali nel cambiamento di fase, già visti con la conducibilità termica in Figura 1 e Figura 2. La paraffina A46 subisce un rammollimento ed espansione

prima della temperatura nominale, e poi il cambio di fase continua oltre questa temperatura. L'A43 invece fonde improvvisamente alla temperatura prevista.

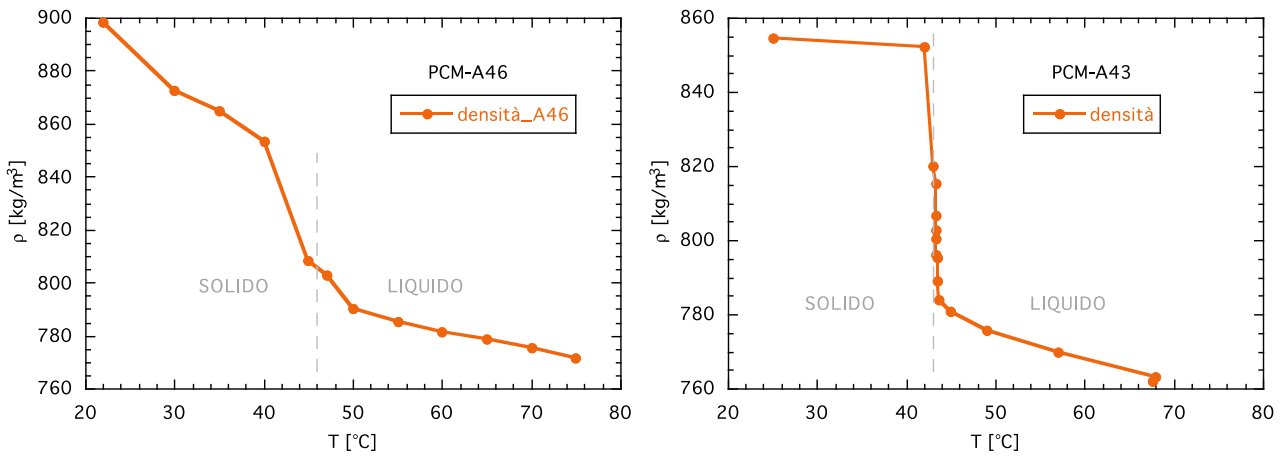


Figura 3 – Misura della densità dei PCM A-46 e A-43, solidi e liquidi

Il misuratore di conducibilità termica fornisce anche la Effusività (Eff) e questo permette di ottenere anche il calore specifico, se è nota la densità. Infatti dalla

$$Eff = \sqrt{\rho * k * c_p} \tag{1}$$

è possibile derivare il valore di c_p per ogni punto misurato :

$$c_p = \frac{Eff^2}{k * \rho} \tag{2}$$

Figura 4 mostra l'andamento del c_p for per la paraffina A46. Da queste curve dovrebbe essere possibile ottenere il calore latente di fusione come l'integrale del picco nella regione di cambiamento di fase. Il valore ottenuto, 66 kJ/kg, è troppo basso rispetto a quello di Tabella 1 e comunque molto minore ai valori tipici verificabili in letteratura, per cui durante il cambiamento di fase si è ritenuta non affidabile questa misura derivata.

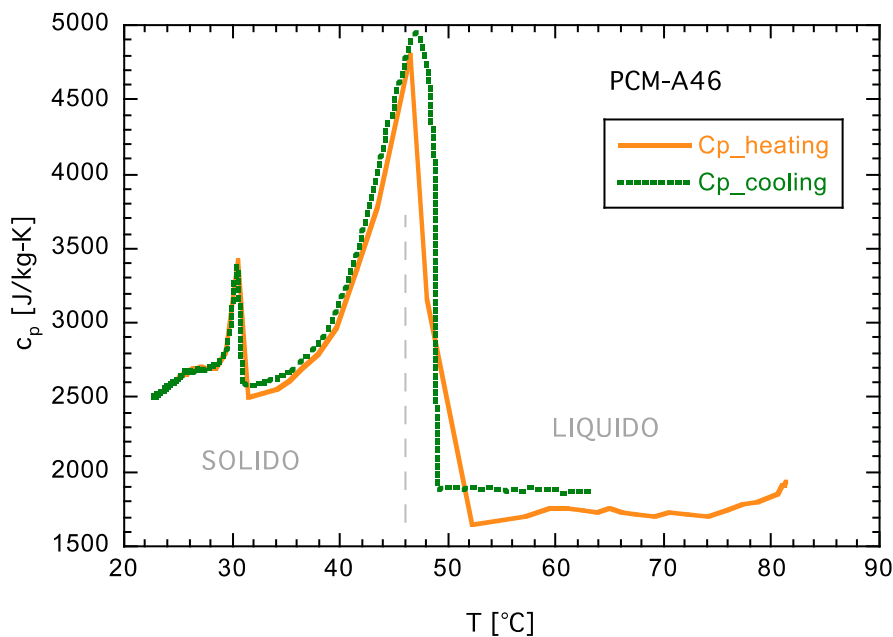


Figura 4 – Misura del calore specifico del PCM A-46 solido e liquido

2.1.2 Schiume solide conduttive

Per quanto riguarda le schiume solide ad alta conducibilità, ne sono state utilizzati tre tipi, con le caratteristiche principali riportate in Tabella 2: la prima, già testata in [1], è una schiuma di carburo di silicio con pori grandi (diametro 1.5 mm, 10 pori/inch); le altre due sono in rame ma con due porosità differenti, una con pori grandi simile a quella in SiC, l'altra con pori piccoli (diametro 0.4 mm, 50 pori/inch). Le due schiume di rame inoltre hanno un grado di vuoto maggiore.

Tabella 2 - Caratteristiche delle schiume solide conduttive

Nome	materiale	ρ kg/m ³	cp kJ/kg	k W/m K	PPI	D-pori mm	ρ_{foam} kg/m ³	grado di vuoto	spessore mm
SiC-10	Carburo di Silicio	2980	670	200	10	1.5	355	88.1%	25
Cu-10	Rame	8920	385	391	12	1.3	488	94.5%	10
Cu-50	Rame	8920	385	391	50	0.4	502	94.4%	2.5

Il grado di vuoto è stato calcolato rapportando alla densità del materiale quella ottenuta pesando il provino con una bilancia di precisione Gibertini Europe 500, con sensibilità di 0.001 g.

Per valutare l'incremento delle prestazioni del PCM indotte dalla schiuma solida, sono stati realizzati dei provini dei tre materiali, di dimensioni 40x40 mm e spessore 25.5 mm.

In Figura 5 sono mostrate le schiume utilizzate.



Figura 5 – Schiume di carburo di silicio; rame 10 ppi; rame 50 ppi

Sono inoltre stati costruiti dei contenitori delle stesse dimensioni, realizzati con un sottile foglio di cosiddetto “coffee bag”, 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 vapore d’acqua
- Strato interno di polietilene a bassa densità, che rende il laminato saldabile senza che ci sia degradazione dello strato di poliestere esterno.

Lo spessore del foglio è 0.1 mm, mentre la sua conducibilità termica è 0.31 W/m K, ottenuta con il misuratore di conducibilità termica già descritto per i PCM.

Il contenitore, con all’interno il blocchetto di schiuma e le termocoppie, viene riempito con il PCM liquido dopo essere stato anch’esso riscaldato per impedire che la solidificazione del PCM durante il versamento possa lasciare dei pori vuoti. Per questa operazione si è usato un bagno termostato Julabo EH-13, che permette di mantenere nella vasca di 13 litri temperature fino a 150°C, con notevole stabilità. Tutta l’operazione di fusione e riempimento è stata effettuata in una cappa aspirante Stroala GS800 dotata di filtro a carboni attivi e filtro HEPA H14. In Figura 6 sono mostrate la cappa con all’interno la vasca termostata, durante la fusione del materiale, e il blocchetto di schiuma di rame nel contenitore durante la pesatura prima del suo riempimento.

Infine in Figura 7 si può vedere la realizzazione del blocchetto di prova e tre provini di schiuma già riempiti di A46, di cui uno nel contenitore all’interno del coibente.



Figura 6 – a) Cappa con all’interno il bagno termostato; b) blocchetto di schiuma nel contenitore in “coffee bag”, sulla bilancia

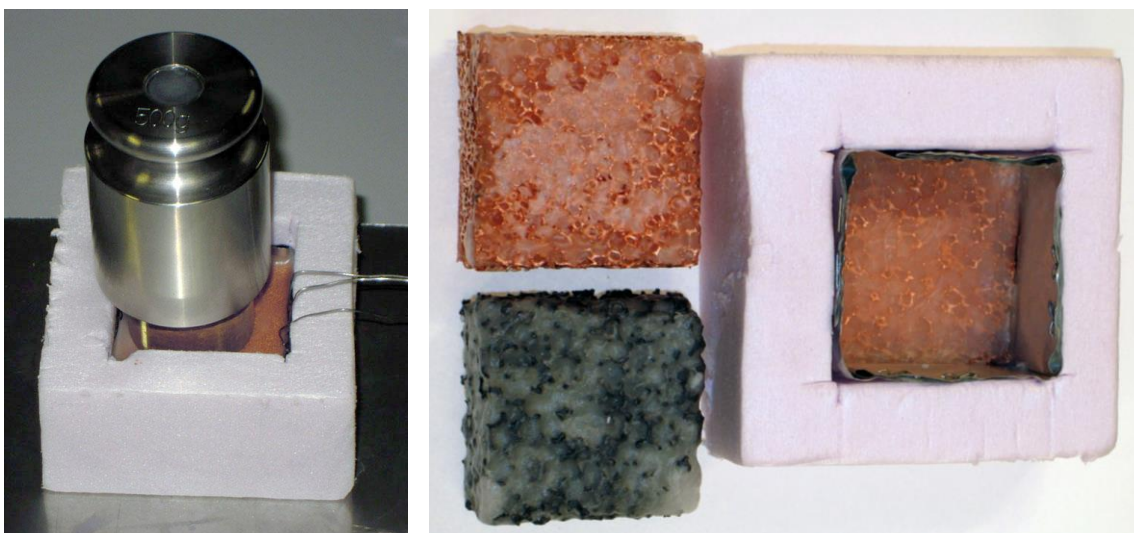


Figura 7 – a) blocchetto durante il raffreddamento dopo il riempimento con PCM; b) blocchetti di schiuma riempiti di PCM: in alto Cu-10, in basso SiC, a destra Cu-10 nel contenitore.

2.1.3 Proprietà fisiche dei provini compositi

Le caratteristiche teoriche del materiale composito “PCM + schiuma solida” possono essere calcolate come medie pesate con le frazioni dei rispettivi materiali, ad es. nel caso del SiC si ha

$$\bar{r} = r_{SiC}(1 - a) + r_{PCM}a; c_p = c_{p_SiC}(1 - a) + c_{p_PCM}a \quad (3)$$

Per la conducibilità si può utilizzare la seguente approssimazione

$$\bar{k} = \frac{k_{SiC}}{3}(1 - a) + k_{PCM}a \quad (4)$$

dove il fattore 1/3 utilizzato per il materiale costituente la schiuma deriva schematizzazione della schiuma come una matrice tridimensionale di sottili barrette ortogonali tra loro. in questo caso quindi la frazione di massa che contribuisce al passaggio del calore lungo una direzione è 1/3 del totale.

Per le schiume testate, riempite con paraffina A46, dai valori in Tabella 1 e Tabella 2 si ottengono le proprietà teoriche riportate in Tabella 3, dove le prime cinque righe riportano le proprietà del SiC e rame puri e quelle delle schiume non ancora riempite

Tabella 3 – proprietà fisiche nominali dei materiali usati

materiale	fraz. di solido	k [W/mK]	ρ [kg/mc]	cp [J/kg-K]	λ [kJ/kg]
SiC	1	200	2279	670	
Cu	1	391	8920	385	
schiuma SiC-10	0.119	7.95	355	79.9	
schiuma Cu-10	0.055	7.14	495	21.4	
schiuma Cu-50	0.056	7.34	502	21.7	
A46	0	0.22	910	2220	155
A46+SiC-10	0.119	8.14	1156	2035	137
A46+Cu-10	0.055	7.35	1354	2118	146
A46+Cu-50	0.056	7.55	1361	2116	146
A43	0	0.18	780	2370	165
A43+SiC	0.119	8.10	1042	2167	145

2.2 Prove sperimentali

2.2.1 L'impianto mini-PCM

Come già descritto in [1], l'impianto è finalizzato alla misura dei transienti 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 alla cui base si trova un riscaldatore. Sulla faccia superiore viene appoggiato il provino contenente il PCM da testare e 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
- Tensione dell'alimentatore: 0 – 90 V cc

Il blocco riscaldatore di rame e il contenitore del PCM sono isolati termicamente con pareti di polistirene estruso (k=0.029 W/mK).

In Figura 8a è mostrato lo schema del dispositivo, con l'indicazione della posizione delle termocoppie e delle tensioni acquisite nel partitore e nello shunt.

La tensione viene fornita con un alimentatore EUTRON BVT 350 (regolabile da 0 a 60 V).

L'acquisizione di dati è effettuato usando sistema National Instruments CompactDAQ con un 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), controllato da un programma sviluppato in Labview.

Il dispositivo in funzione, con un provino installato, è mostrato in Figura 8b, mentre in Figura 9 è mostrato tutto l'apparato durante un test.

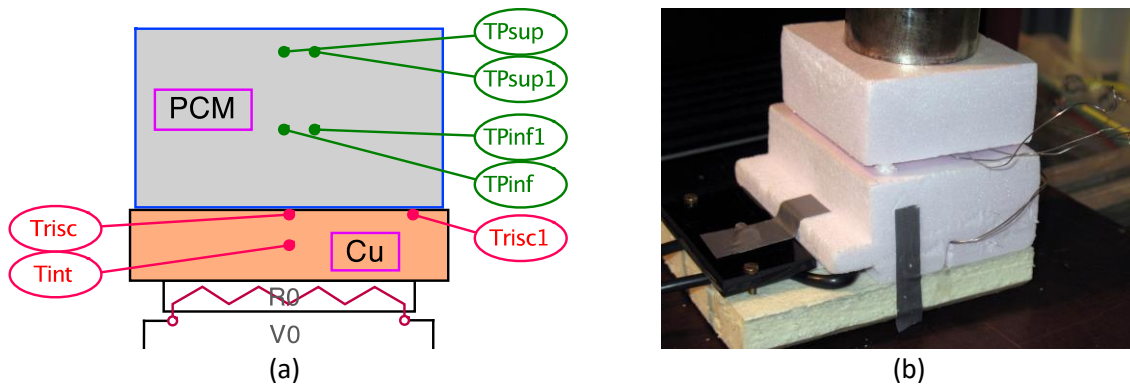


Figura 8 – a) schema del dispositivo per i test su volumetti di PCM; b) foto della sezione di prova



Figura 9 –foto dell'apparato sperimentale

2.2.2 Metodologia di esecuzione ed elaborazione

Le prove sperimentali sono state eseguite con lo scopo di confrontare il comportamento di PCM puri o inseriti in matrici solide conduttive, quando sottoposti su una faccia a un transitorio di temperatura tipico degli impianti solari termici. La temperatura viene portata ad un valore finale e poi mantenuta costante fino alla completa fusione del PCM, fornendo un flusso termico costante per generare la salita, e controllandolo poi per mantenere la temperatura costante. Sono stati eseguiti tre transitori che differiscono tra loro per il flusso termico che genera l'aumento di temperatura (1200 W/m^2 , 2726 W/m^2 , 10860 W/m^2 , ottenuti alimentando il riscaldatore con rispettivamente 20 V, 30 V, 60 V), mentre il valore finale della temperatura

è stato sempre 60°C. I PCM utilizzati sono stati l'A46 e l'A43, con la maggior parte delle prove effettuate con il primo per la sua semplicità di utilizzo (l'A46 non è tossico e non si degrada all'aria). Oltre a queste prove, sono stati effettuati test per valutare la potenza dispersa attraverso la coibentazione, e quindi il coefficiente di scambio termico verso l'esterno che sarà poi necessario sia per le elaborazioni dei dati sperimentali, sia per le simulazioni CFD. In [1] questa potenza era stata valutata dalla discesa della temperatura dopo la fine della prova, quando la potenza fornita è nulla. Per aumentare la precisione, la nuova misura è stata ottenuta dalla potenza necessaria a mantenere la sezione di prova a temperatura costante. I valori ottenuti per le varie temperature e il best-fit sono mostrati in Figura 10, dove:

$$\Delta T_a = (T_{risc} - T_a)$$

$$h = W / (S \Delta T)$$

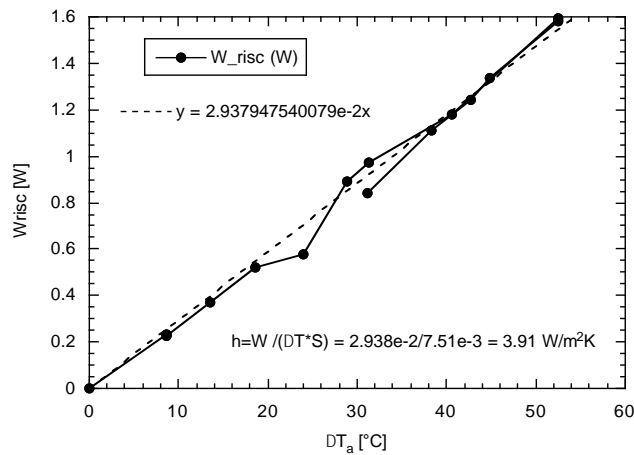
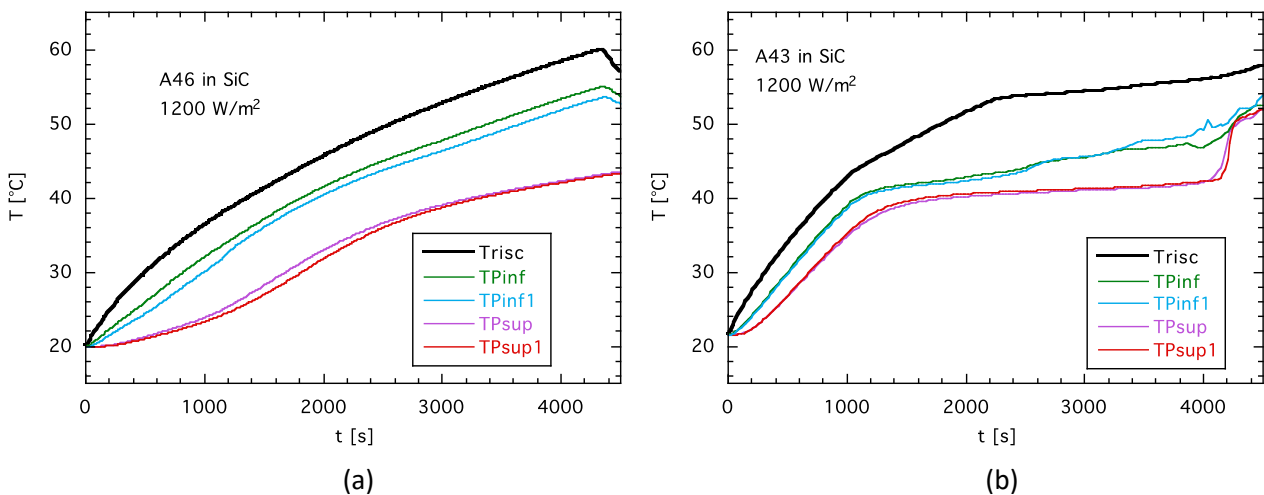


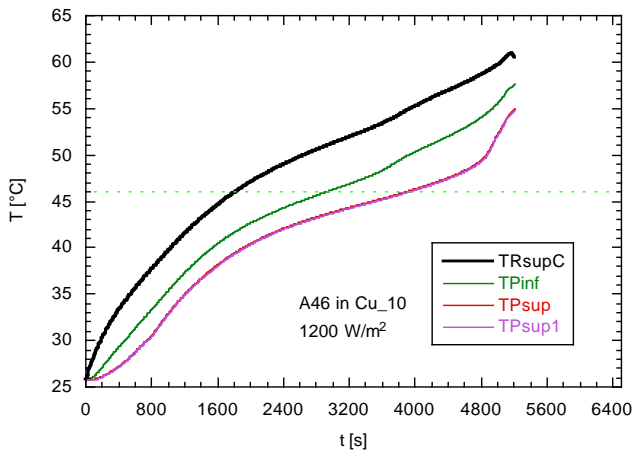
Figura 10 –potenza dispersa e coefficiente di scambio con l'esterno

2.2.3 Risultati sperimentali, schiuma riempita con diversi PCM

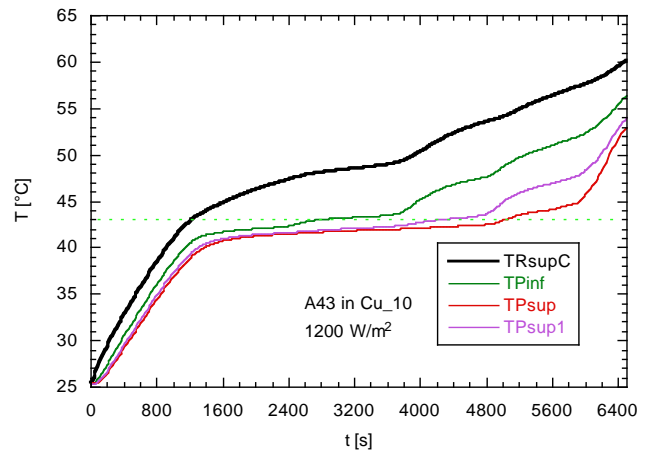
I risultati dei transitori lenti, con flusso 1200 W/m², sono mostrati in Figura 11 per il SiC e per il rame. Con l'A43 l'effetto del cambiamento di fase è molto più evidente, a causa della diversa modalità di fusione come visto in Figura 1 e Figura 2. Con l'A43 infatti si ha un pianerottolo nella temperatura nel blocchetto, appena il riscaldatore supera i 43°C, con entrambe le schiume solide.

Nel caso di transitorio più veloce il comportamento è simile, sia con flusso 2726 W/m² (Figura 12), sia con 10860 W/m² (Figura 14).



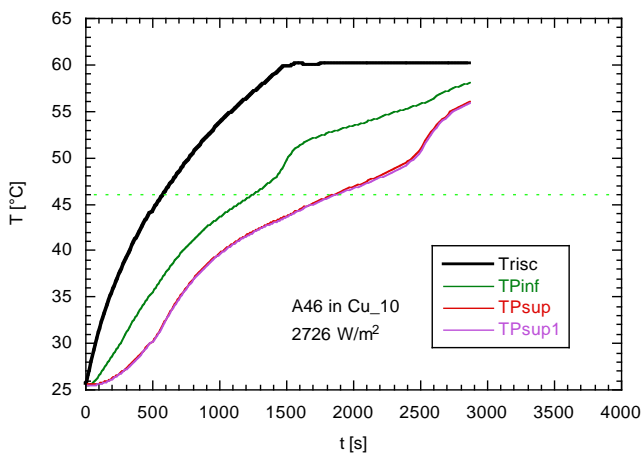


(c)

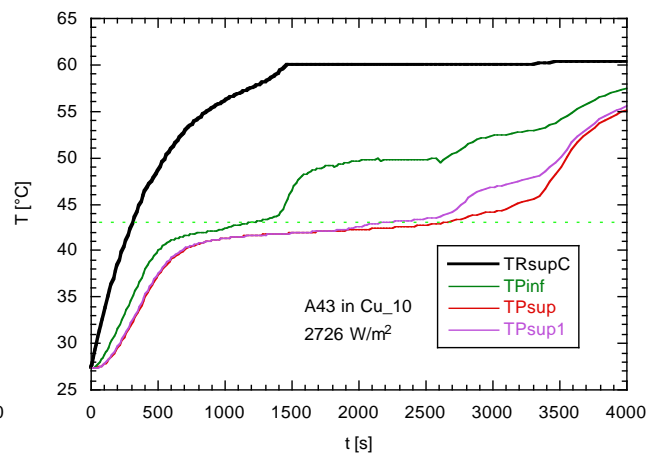


(d)

Figura 11 – Temperature nel blocchetto di schiuma di SiC riempita con: a) A46; b) A43, e di schiuma di rame riempita con: c) A46; d) A43. Transitorio lento

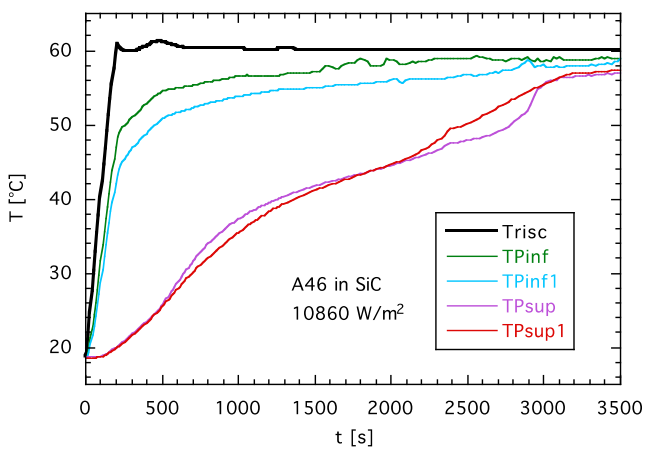


(a)

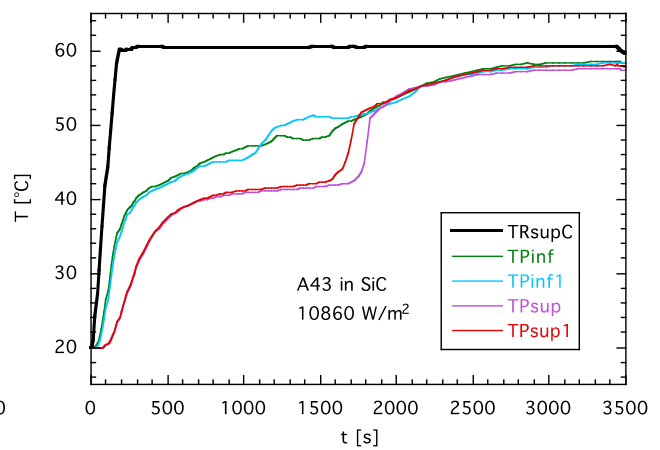


(b)

Figura 12 – Temperature nel blocchetto di schiuma di rame riempita con: a) A46; b) A43. Transitorio medio



(a)



(b)

Figura 13 – Temperature nel blocchetto di schiuma di rame riempita con: a) A46; b) A43. Transitorio veloce

Analizzando anche la fase di raffreddamento si vede un aspetto interessante, anche se non influente per l'applicazione pratica nell'accumulo termico: lo stretto intervallo di solidificazione dell'A43 provoca una piccola fase di inversione del gradiente di temperatura (Figura 14b, $t=19000s$). Questo avviene in quanto parte del materiale si raffredda sotto i $43^{\circ}C$ restando in uno stato di liquido metastabile. La sua solidificazione improvvisa provoca un rilascio di energia tale da far riaumentare la temperatura del blocchetto per alcuni minuti. In condizioni equivalenti da Figura 14a si vede che questo non si verifica con la paraffina A46, la cui solidificazione avviene gradualmente tra i 50 e i $40^{\circ}C$.

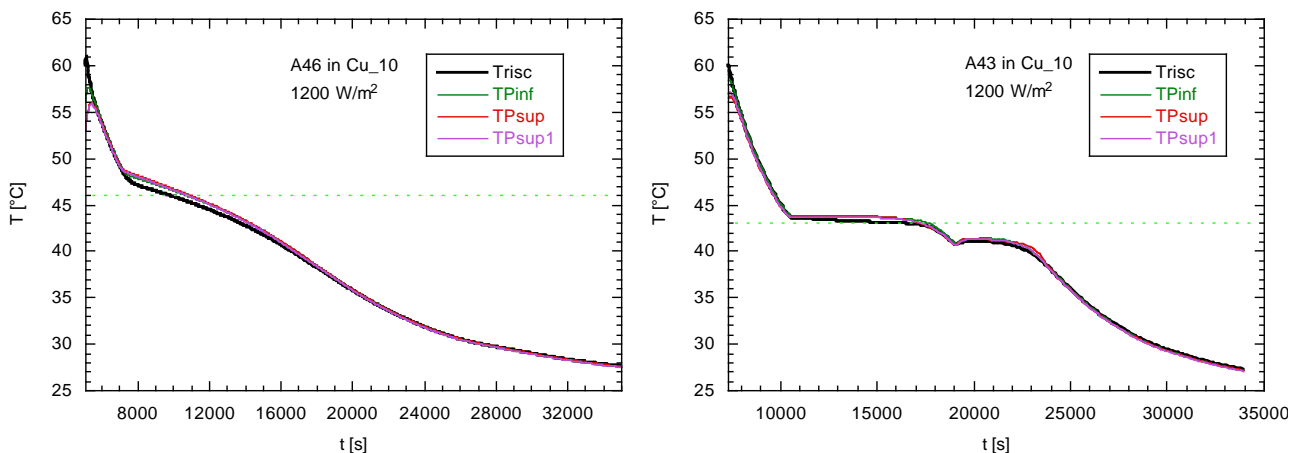


Figura 14 – Temperature nel blocchetto di schiuma di rame riempita con: a) A46; b) A43. Transitorio di raffreddamento da $60^{\circ}C$

2.2.4 Risultati sperimentali, PCM A46, diverse schiume

In Figura 15 gli andamenti delle temperature nelle prove effettuate con le tre schiume solide sono confrontati con quelle del caso con solo PCM. L'utilizzo della schiuma porta in tutti i casi un evidente miglioramento della conduzione termica verso l'interno. Infatti la maggiore potenza assorbita dal blocco di PCM provoca una crescita più lenta della temperatura del riscaldatore, mentre nel blocchetto sia le temperature al centro che quelle in alto salgono molto più velocemente. Per quanto riguarda il confronto tra le schiume, con le due di rame la conduzione è maggiore rispetto al SiC, nonostante la frazione di solido sia circa la metà e la conducibilità teorica del composito sia invece minore, come visto in Tabella 3. Tra le due schiume di rame l'effetto della porosità sembra molto piccolo, e comunque il comportamento migliore è dato dai pori grandi (Figura 15c).

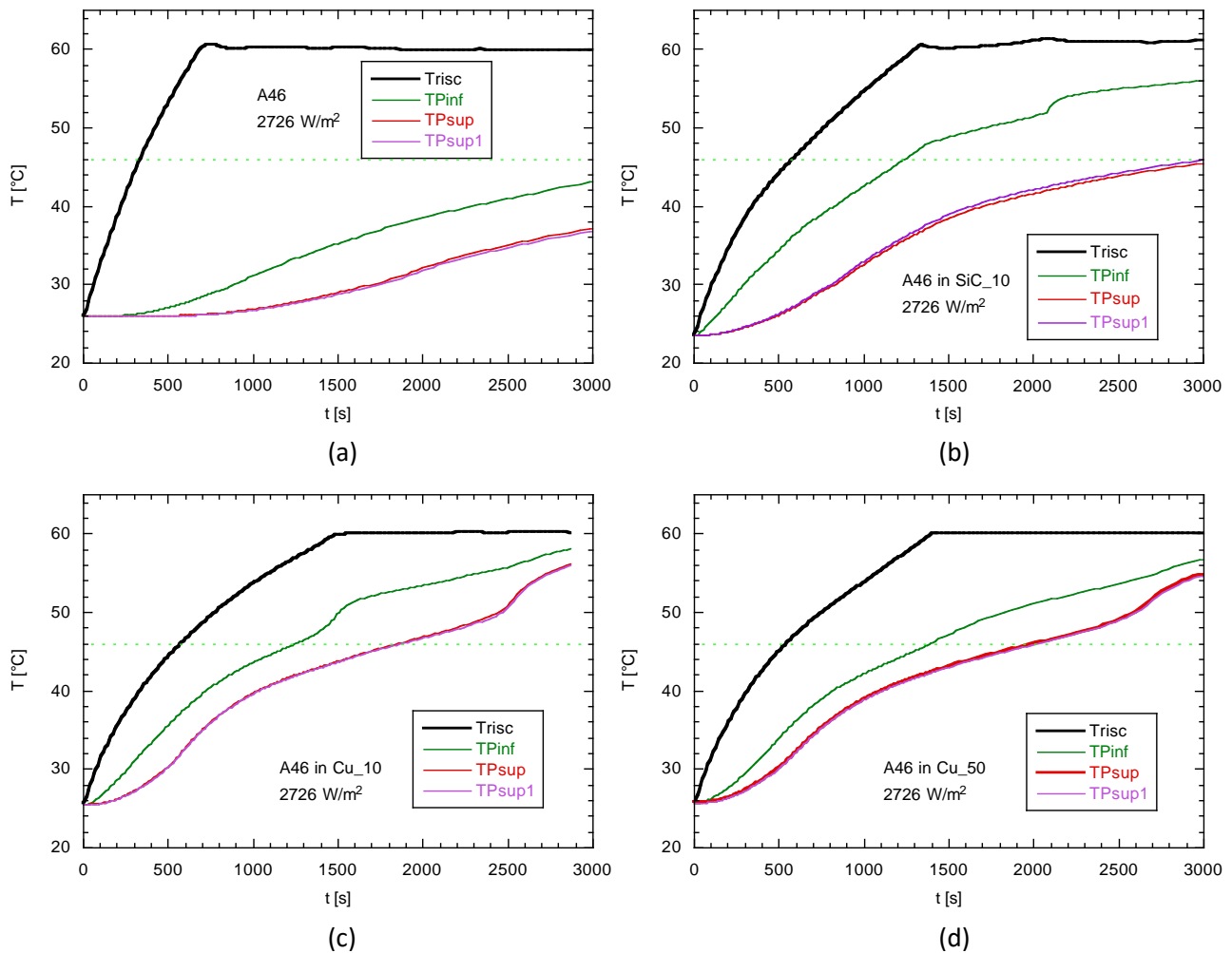


Figura 15 – Andamenti delle temperature nel blocchetto di PCM A46 nei quattro casi: a) solo PCM; b) Inserito in schiuma di SiC; c) in schiuma di rame a porosità grande; d) in schiuma di rame a porosità piccola

Una visualizzazione migliore dei risultati si può ottenere dal confronto degli andamenti relativi alle stesse posizioni. In Figura 16 è mostrato il confronto delle temperature del riscaldatore, mentre in Figura 17 sono mostrate le temperature nella parte alta del blocchetto di prova (posizione equivalente alla zona interna del volume di PCM immerso nel serbatoio). L'effetto visto nei grafici precedenti risulta molto evidente: il riscaldatore si scalda più lentamente già a temperature basse per la maggiore potenza assorbita dal PCM solido, ma superata la temperatura di fusione l'effetto aumenta notevolmente facendo incurvare le curve di Figura 16 dopo circa 200 s. Anche le temperature in alto subiscono questo effetto, infatti con il solo PCM la diffusione del calore è limitato dalla bassa conducibilità e dal fatto che nella zona di fusione (più in basso) temperatura si mantiene intorno ai 46°C . La presenza della schiuma conduttiva invece porta ad un incremento della temperatura in alto molto più rapidamente, arrivando alla fusione completa in circa 2000 s. Il miglior comportamento del rame a porosità grande è ancora più evidente in questo grafico.

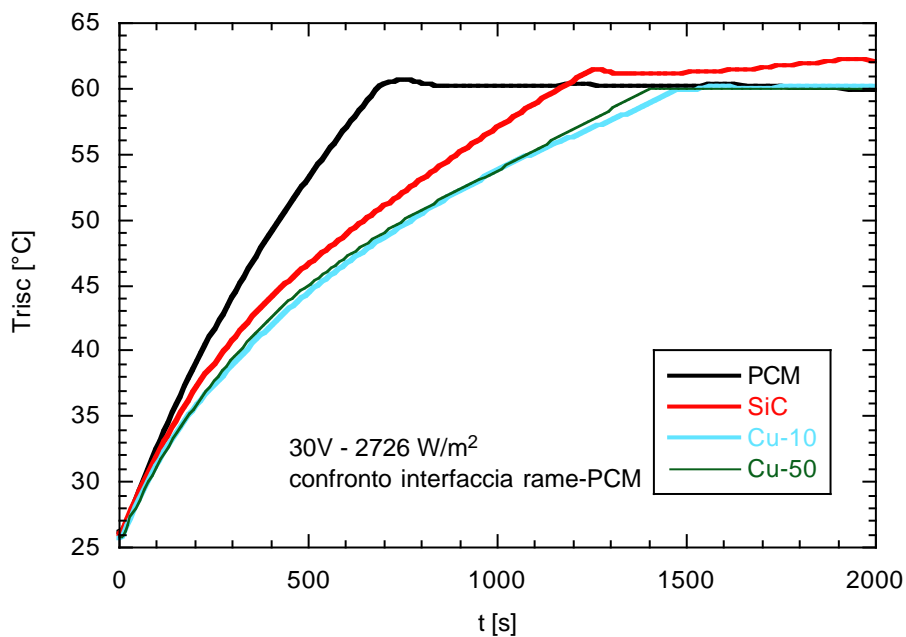


Figura 16 – Effetto delle schiume sull’andamento della temperatura del riscaldatore, per transitorio con flusso 2726 W/m² fino a Trisc=60°C e poi Trisc=cost.

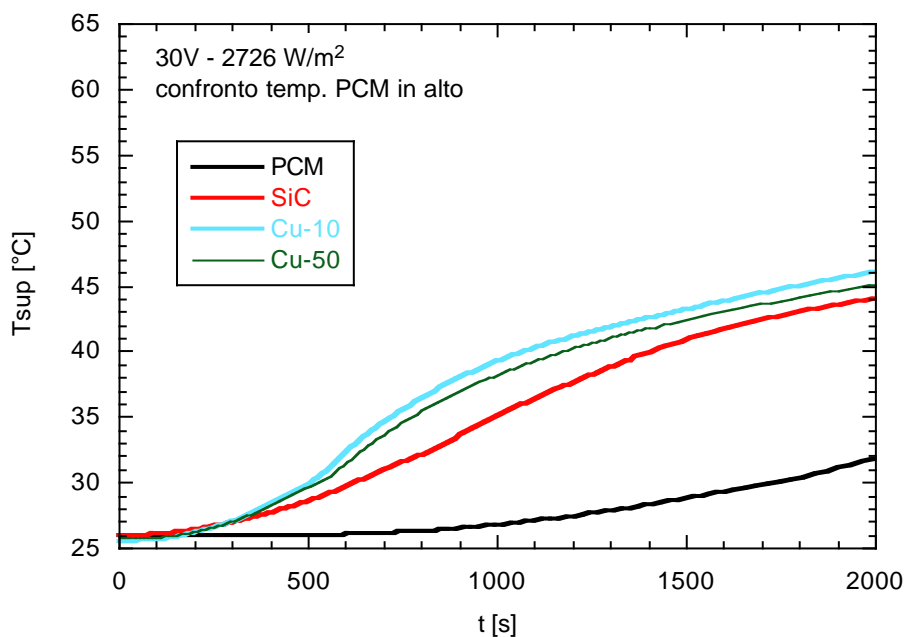


Figura 17 – Effetto delle schiume sull’andamento della temperatura della parte alta del blocco di PCM, per transitorio con flusso 2726 W/m² fino a Trisc=60°C e poi Trisc=cost.

In Figura 18 e Figura 19 sono riportati gli stessi andamenti, ma per le prove con transitorio lento (flusso 1200 W/m²), nelle quali il lungo tempo impiegato dal riscaldatore a salire fino a 60°C è sufficiente ad ottenere la fusione di tutto il blocchetto. Le differenze quindi sono meno evidenti, ma l’effetto delle varie schiume è simile a quello visto in precedenza. Bisogna tenere presente in questo caso che, come già notato in [1], la temperatura del solo PCM nella parte superiore può avere comportamento anomalo causato dallo spostamento verso il basso della parte solida a causa della minore densità del liquido. Questo movimento provoca un trasporto di calore aggiuntivo verso la zona alta, cosa che non si verifica, invece, quando la schiuma solida impedisce i moti convettivi.

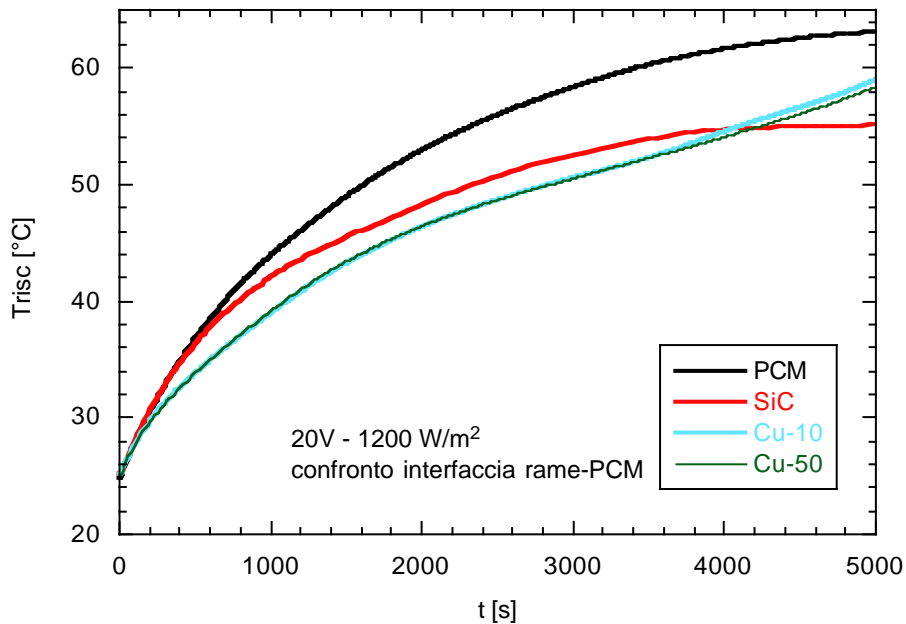


Figura 18 – Effetto delle schiume sull’andamento della temperatura del riscaldatore, per transitorio con flusso 1200 W/m² fino a Trisc=60°C e poi Trisc=cost.

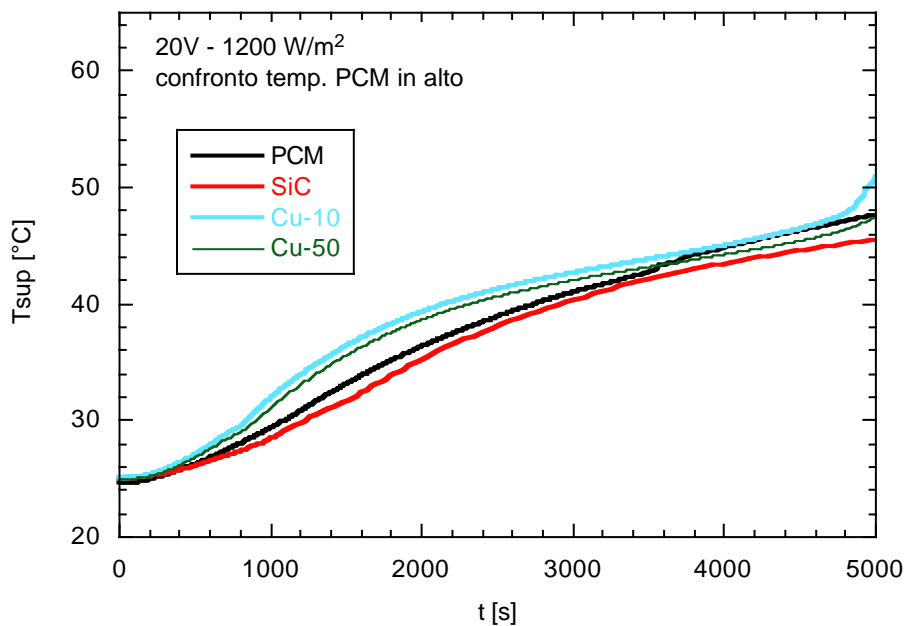


Figura 19 – Effetto delle schiume sull’andamento della temperatura della parte alta del blocco di PCM, per transitorio con flusso 1200 W/m² fino a Trisc=60°C e poi Trisc=cost.

2.2.5 Elaborazione dei risultati sperimentali, valutazione delle potenze scambiate

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 mostrata in Figura 10) genera l'aumento della temperatura sia del rame che del blocchetto di PCM (o la sua fusione), si ha:

$$W_T = W_{tot} - W_{disp} = \left(M c_p \frac{dT}{dt} \right)_{Cu} + W_{PCM} \quad (5)$$

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

$$W_w = \left(M c_p \frac{dT}{dt} \right)_w \quad (6)$$

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

$$W_w = \frac{\left(r V c_p \right)_w W_T}{\left(r V c_p \right)_{Cu} + \left(r V c_p \right)_w} \quad (7)$$

TRANSITORI LENTI

In Figura 20 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.

Dai grafici 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. Infatti nella fase in cui il riscaldatore ha ancora temperature inferiori a quella di fusione del PCM, l'acqua assorbe una potenza maggiore grazie al suo calore specifico quasi doppio rispetto al PCM solido ed una conducibilità anch'essa maggiore (Tabella 1).

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 della schiuma 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. L'effetto della schiuma di il rame è simile, con un tempo intorno a 1100 s.

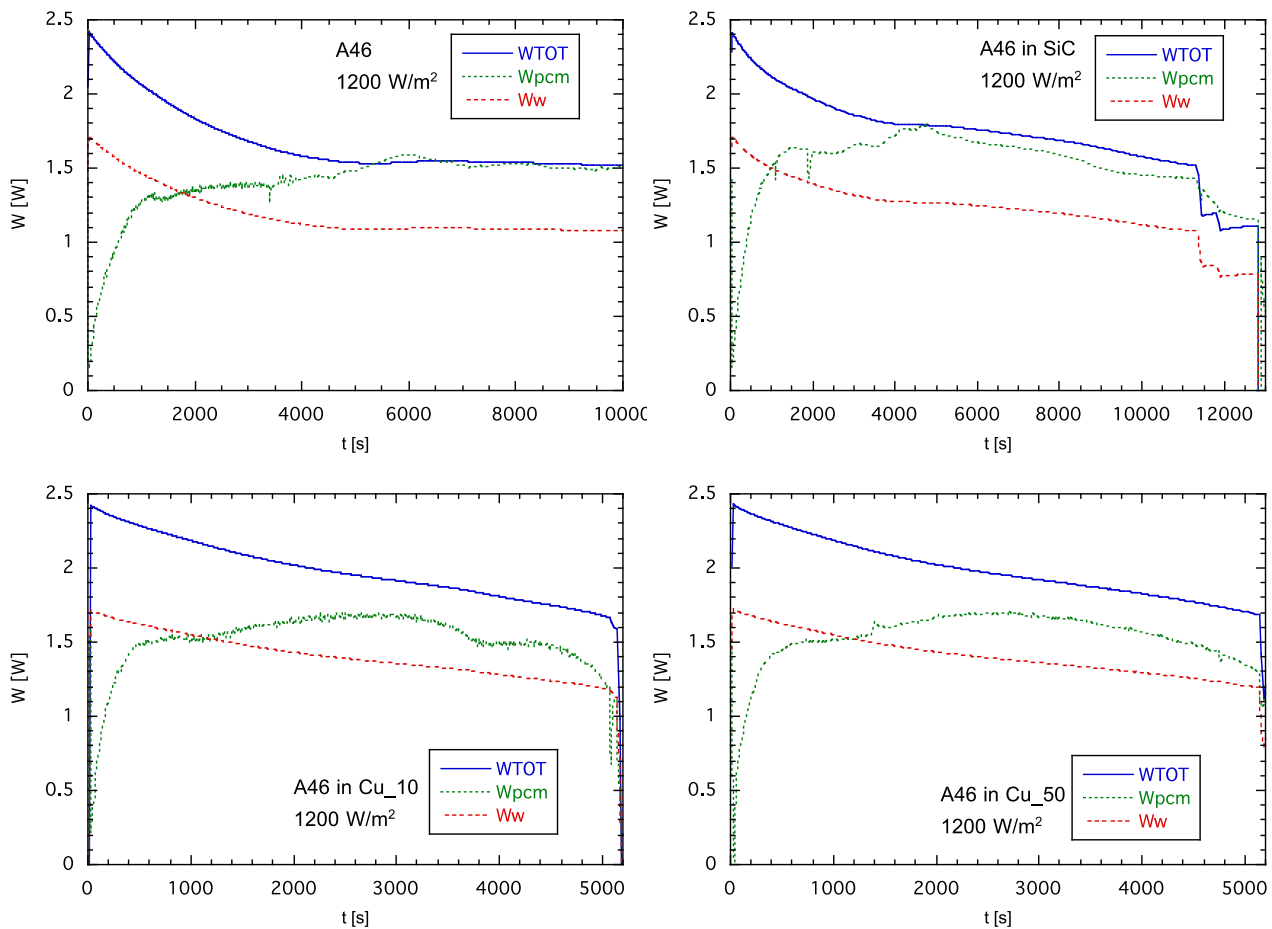


Figura 20 – Potenze scambiate nel caso solo PCM, in quello con PCM+SiC ed in quelli PCM+rame con due porosità. Prova con flusso 1200 W/m²

Ancora più interessante, per una valutazione del comportamento reale nell'accumulo termico, è il confronto tra le energie assorbite dal PCM e quella teoricamente assorbita dallo stesso volume di acqua. Questa energia può essere ottenuta dall'integrale nel tempo delle potenze calcolate con le Eq. (5) e (7). Da Figura 21 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, che diventa 2700 s con le due schiume di rame, indipendentemente dalla dimensione dei pori.

Quindi la schiuma di rame, anche se ha una frazione di solido metà di quella di SiC, riesce a rendere conveniente il PCM per l'accumulo di energia termica quando i tempi caratteristici sono dell'ordine dell'ora.

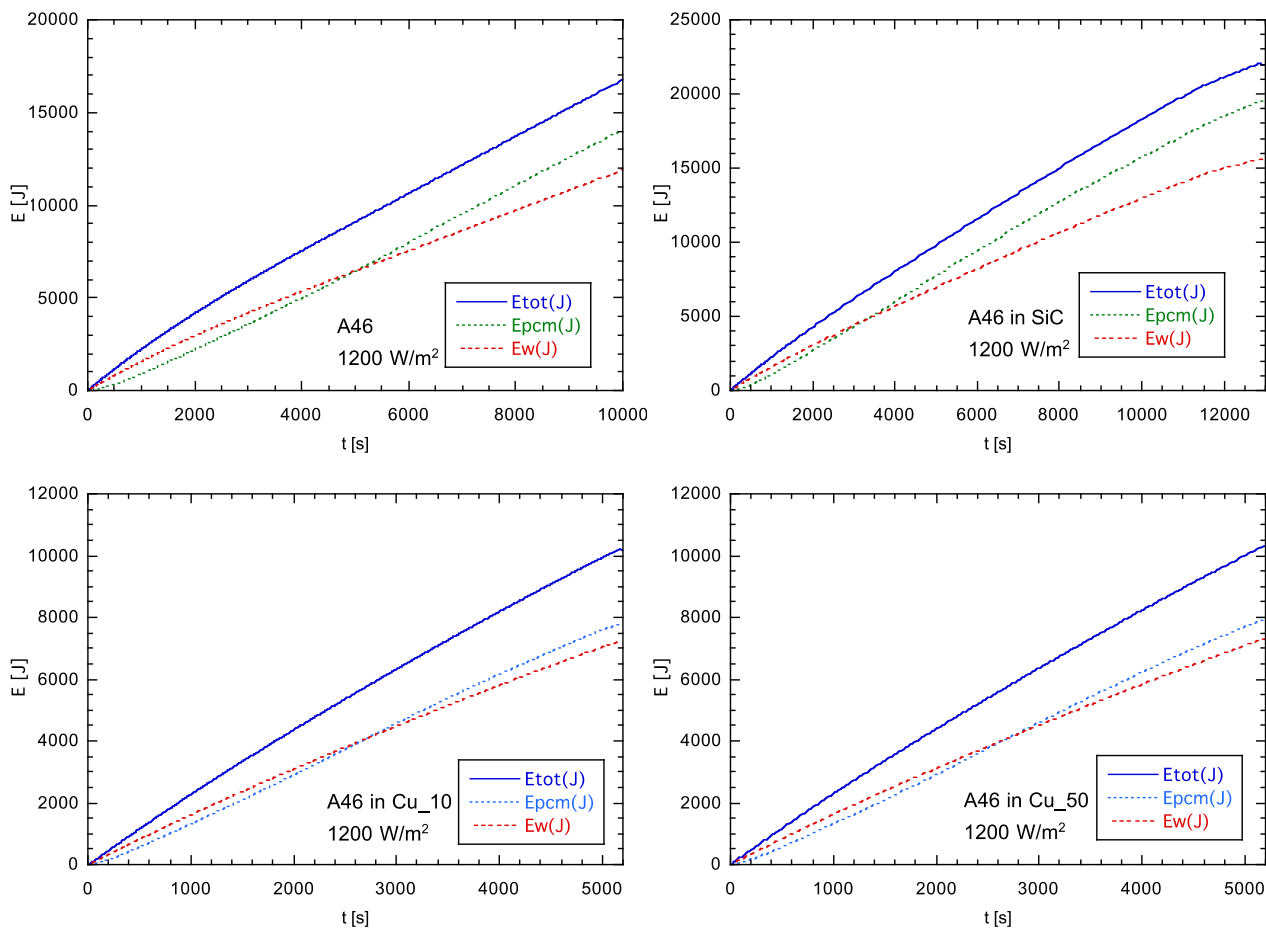


Figura 21 – Energie scambiate nel caso solo PCM, in quello con PCM+SiC ed in quelli PCM+rame con due porosità. Prova con flusso 1200 W/m²

Per un confronto immediato delle prestazioni delle schiume conduttive, in Figura 22 si mostrano le potenze assorbite dal PCM ed in Figura 23 le energie, E' evidente il notevole miglioramento ottenuto nella prima fase del transitorio termico, quando la variazione di temperatura avviene per tempi dell'ordine delle decine di minuti, e che è il tipo di variazione caratteristica dell'irraggiamento solare per il quale l'accumulo termico può portare a aumenti consistenti del rendimento.

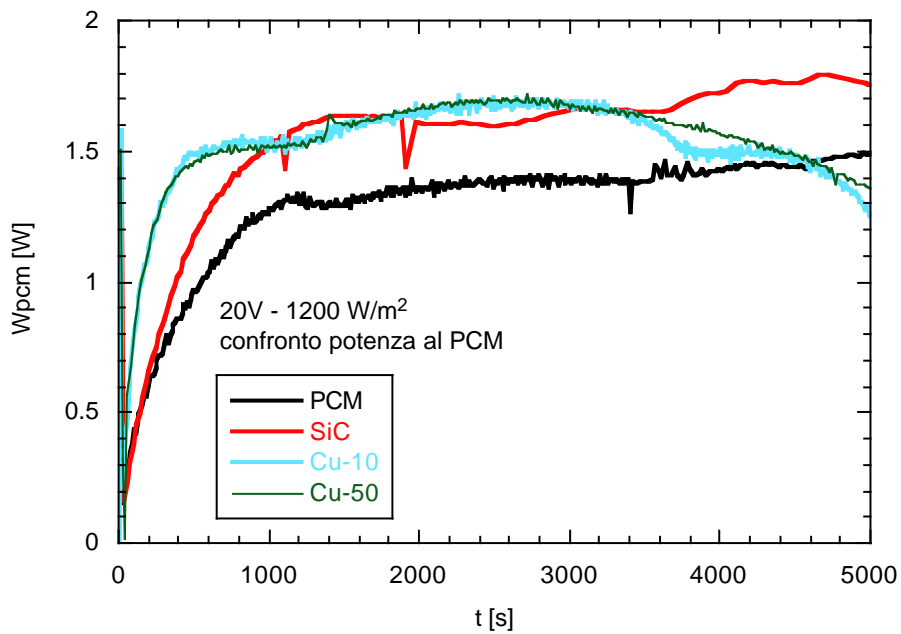


Figura 22 – Confronto tra le potenze al PCM nei quattro casi. Prova con flusso 1200 W/m²

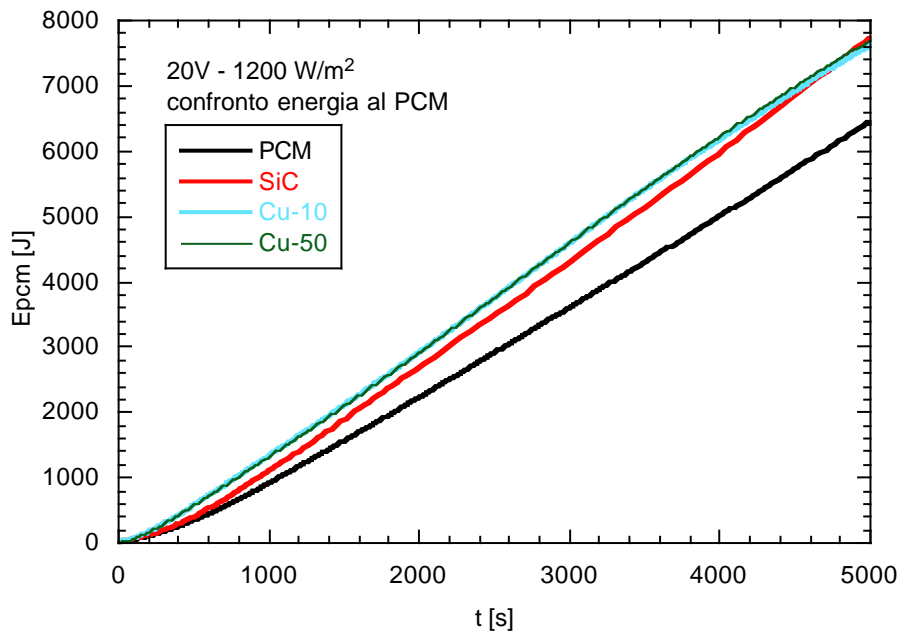


Figura 23 – Confronto tra le energie al PCM nei quattro casi. Prova con flusso 1200 W/m²

In Figura 24 lo stesso confronto è mostrato per i due PCM, l'A46 e l'A43, sia senza che con schiuma conduttiva. In entrambi i casi si vede che le differenze di comportamento, a parità di configurazione, sono molto minori di quelle precedenti.

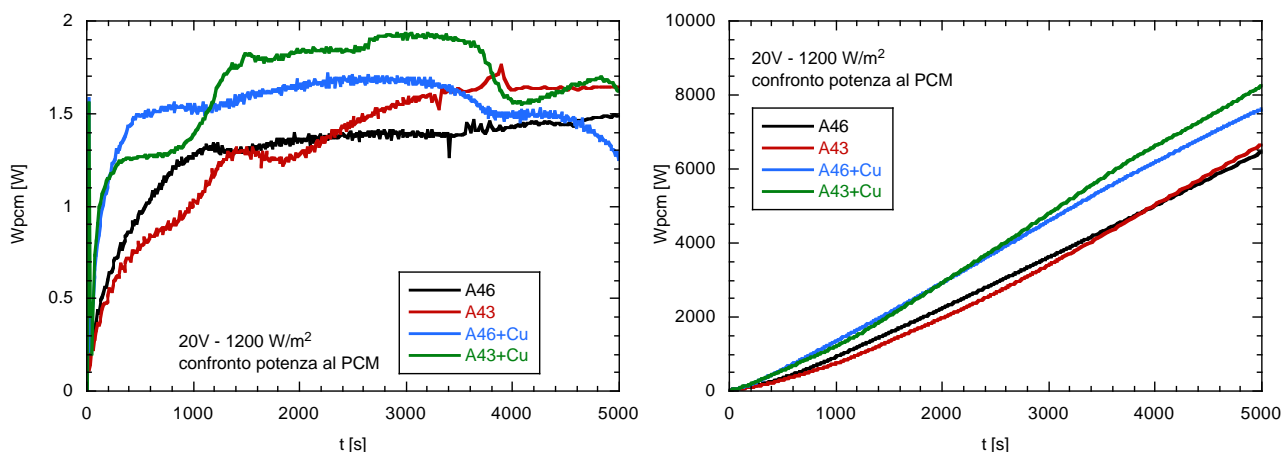


Figura 24 – Confronto tra i due PCM dal punto di vista delle potenze e energie. Prova con flusso 1200 W/m²

TRANSITORI VELOCI

Analogamente alle prove precedenti, anche per i transitori più veloci si sono calcolate le componenti della potenza e dell’energia assorbite dal PCM e quelle teoriche assorbite dall’acqua nelle stesse condizioni, calcolate dalle Eq. (5) e (7).

Bisogna considerare però che queste valutazioni sono meno affidabili di quelle ottenute con il transitorio lento, in quanto la potenza fornita viene diminuita una volta raggiunti i 60°C nel riscaldatore, e questo avviene spesso in tempi troppo brevi per il confronto.

Nel caso con solo A46 (Figura 25a) la potenza al PCM non riesce a superare quella all’acqua nel tempo di riscaldamento fino a 60°C in cui il flusso fornito è costante, ma da una estrapolazione grossolana si può valutare che sarebbe avvenuto sicuramente dopo i 1500 s. Con la schiuma di SiC invece questo avviene durante il riscaldamento a un tempo intorno ai 700 s. Infine con il rame si anticipa ancora a circa 560 s.

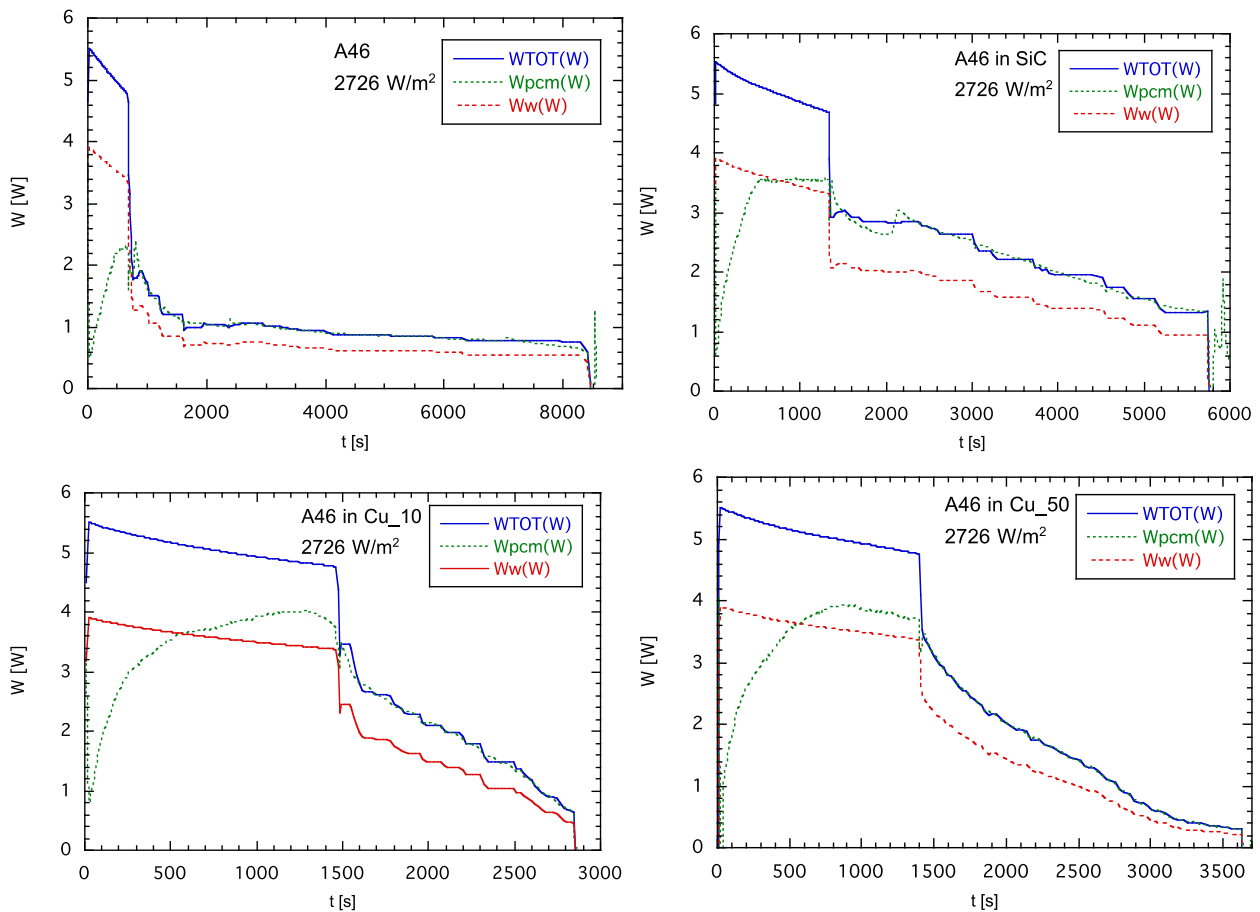


Figura 25 – Potenze scambiate nel caso solo PCM, in quello con PCM+SiC ed in quelli PCM+rame con due porosità. Prova con flusso 2726 W/m²

Per quanto riguarda il confronto dell'energia, da Figura 26 si vede che l'energia assorbita dal PCM rimane minore di quella assorbita dall'acqua fino a circa 4800 s, per poi superarla. Anche relativamente alle energie la presenza delle schiume conduttive aumenta la capacità di assorbimento del PCM in tempi brevi: nel caso del SiC l'energia assorbita dall'acqua viene superata ad un tempo pari a 2000 s, che scende a circa 1700 s con il rame a pori grandi, e leggermente dopo, a 1750 s, con quello a pori piccoli. Come già detto poco sopra, bisogna tenere presente che per questi transitori più rapidi il flusso al riscaldatore viene diminuito sempre prima dell'istante di superamento (sui grafici è il punto in cui la pendenza della E_{tot} diminuisce improvvisamente), per il raggiungimento dei 60°C.

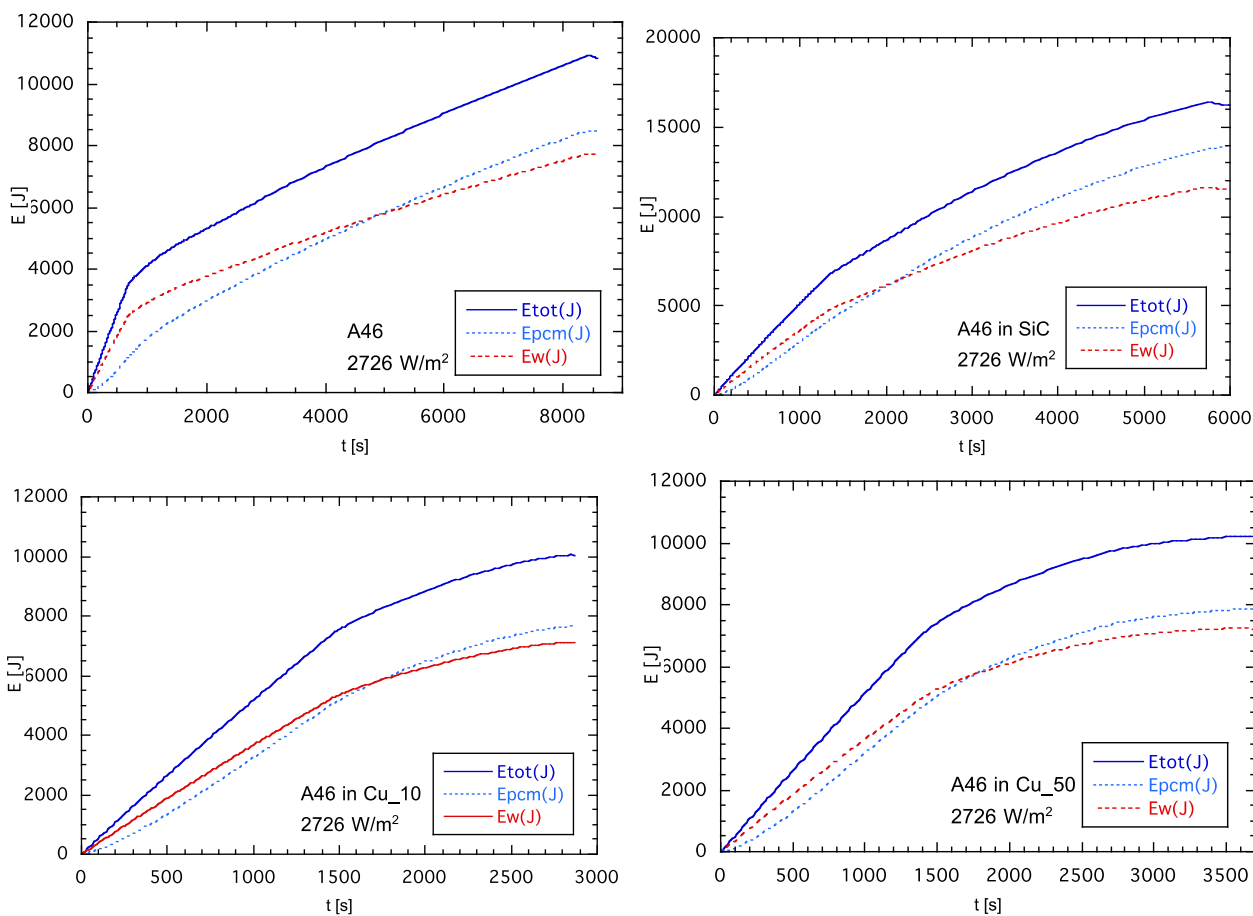


Figura 26 – Energie scambiate nel caso solo PCM, in quello con PCM+SiC ed in quelli PCM+rame con due porosità. Prova con flusso 2726 W/m^2

2.3 Simulazioni CFD delle prove sperimentali con modello bidimensionale

Il modello 2-D del dispositivo di Figura 8a, descritto in [1] e schematizzato in Figura 27, è stato utilizzato per verificare le previsioni di FLUENT nel caso in cui la presenza della schiuma conduttiva nel PCM sia considerata in modo omogeneo attraverso la variazione delle proprietà fisiche ottenute dalle (3) e (4).

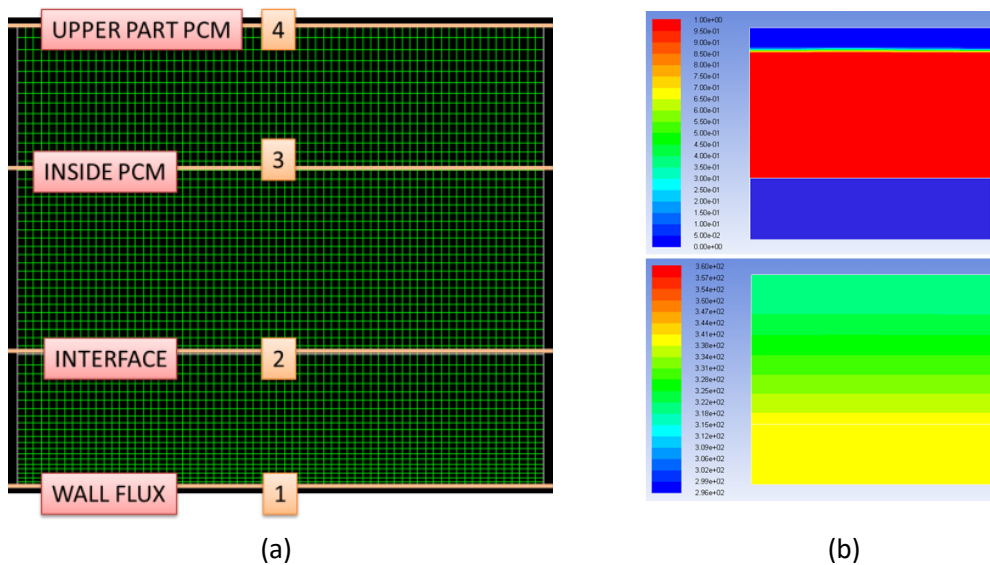


Figura 27 – a) Nodalizzazione e linee monitorate; b) esempio di colormap di frazione di liquido e temperatura

2.3.1 Sensibilità della simulazione

Il modello è stato testato variando alcuni parametri, per verificare l'influenza di eventuali approssimazioni o delle discretizzazioni sul risultato della simulazione. Per quanto riguarda la discretizzazione, la nodalizzazione mostrata in Figura 27a si è dimostrata sufficiente, come pure uno step temporale di 1 s. I risultati ottenuti utilizzando densità e conducibilità costanti, rispetto ai valori reali di Figura 1 e Figura 3, ha portato a differenze trascurabili. Abbastanza importante è invece, nel caso dell'A46, la scelta del campo di temperature in cui avviene il cambiamento di fase, che da Figura 1 si è visto essere abbastanza largo. La scelta di un range da 40 a 48°C, invece del nominale 46°C, porta ad un consistente miglioramento della simulazione, come si vede dagli andamenti della temperatura in basso ed in alto mostrati in Figura 28.

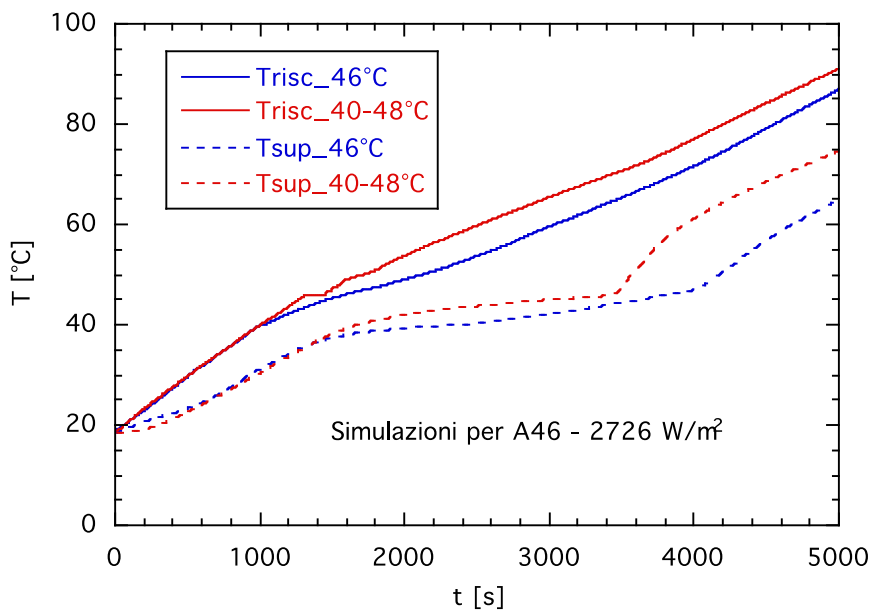


Figura 28 – confronto delle simulazioni con diversi range di temperatura di fusione

2.3.2 Validazione con i dati sperimentali per PCM puro

Una prima validazione era stata già riportata in [1]. Si sono effettuate altre simulazioni, ottenendo risultati come quelli di Figura 29. La temperatura dell'interfaccia tra riscaldatore e PCM ha lo stesso andamento fino a circa 2500 s, mentre in seguito la temperatura simulata aumenta di più di quella sperimentale. La temperatura della parte superiore del PCM invece risulta sempre minore di quella sperimentale. La giustificazione, come già visto in Figura 18, può essere trovata nello spostamento verso il basso del PCM ancora solido, che aumenta quindi la potenza asportata in basso, mentre il liquido risalito aumenta la temperatura della parte alta del provino.

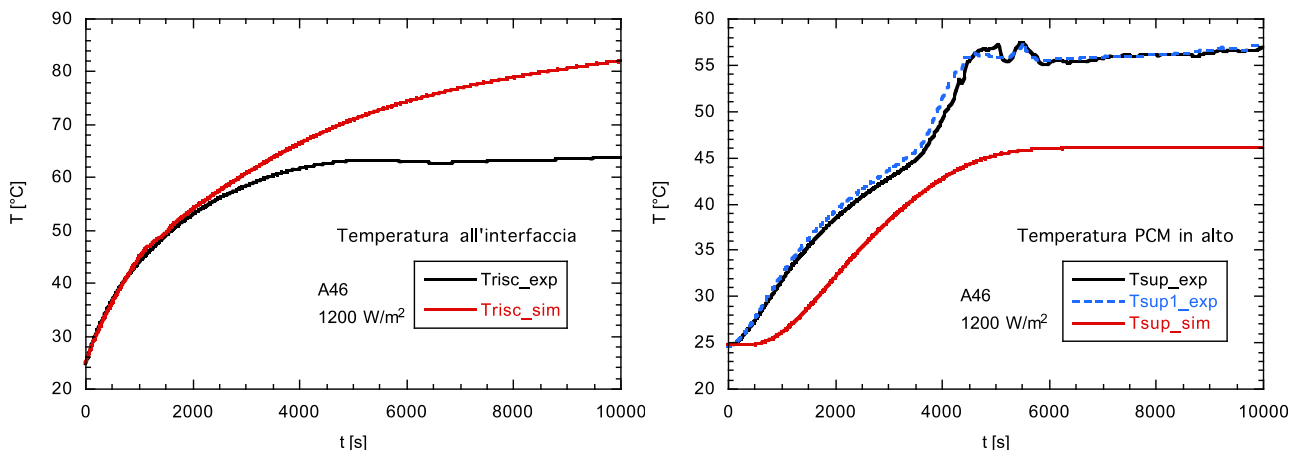


Figura 29 – confronto delle simulazioni con i dati sperimentali di una prova con solo PCM

2.3.3 Applicazione del modello al materiale composito

Si è effettuata la simulazione del PCM inserito nella schiuma conduttiva, considerandolo come un materiale omogeneo con le proprietà fisiche medie date dalle equazioni (3) e (4). Per l'A46 nella schiuma di SiC, da queste si ottiene in particolare una conducibilità $K=8.14 \text{ W/m K}$, come visto in Tabella 3. Con questi valori gli andamenti delle temperature simulate sono molto diversi dalle sperimentali, mentre diventano simili con $k=1 \text{ W/m K}$, come mostrato in Figura 30 per quanto riguarda le temperature dell'interfaccia riscaldatore-PCM per il caso con flusso alto, e in Figura 31 per il caso a flusso minore. Quindi nel comportamento reale la conducibilità termica media del PCM aumenta se inserito nella schiuma conduttiva, ma meno di quanto previsto.

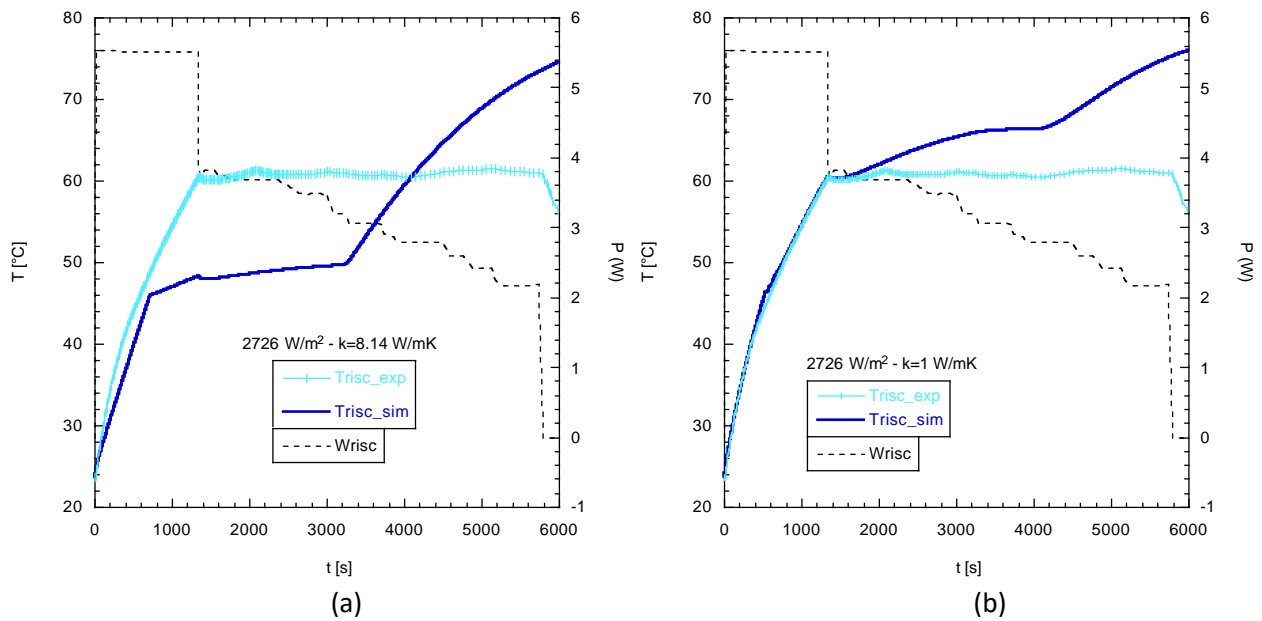


Figura 30 – Confronto tra prova sperimentale e simulata all’interfaccia riscaldatore-PCM con flusso 2726 W/m²: a) k=8.14 W/mK; b) k=1 W/mK

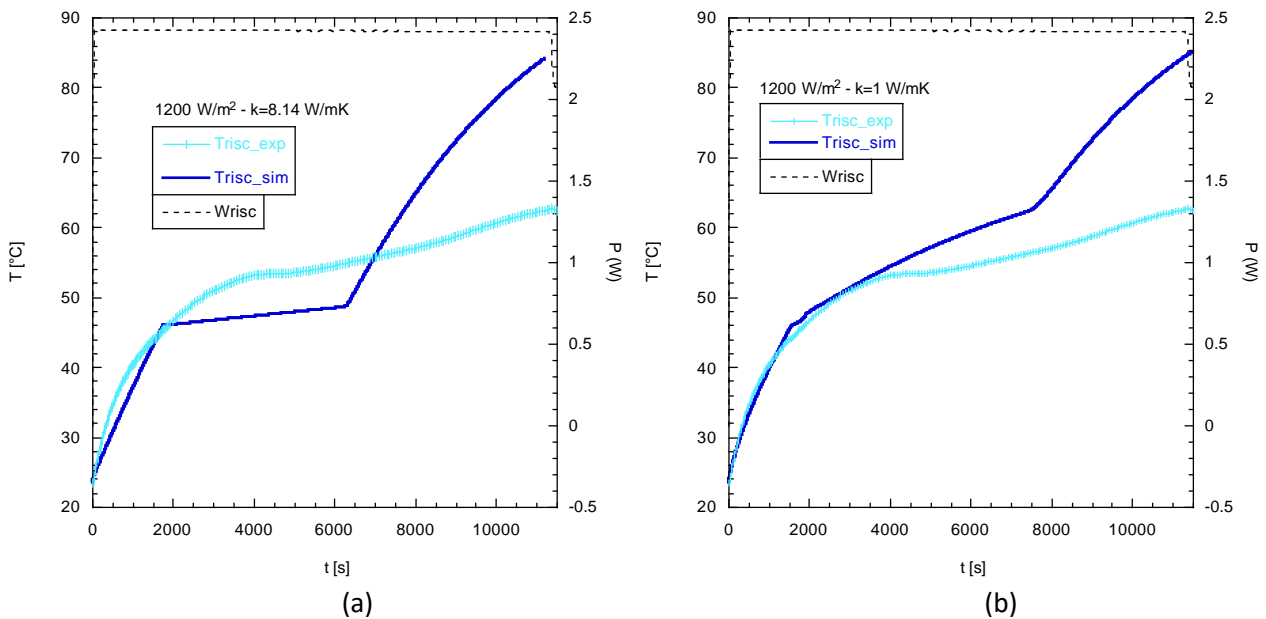


Figura 31 – Confronto tra prova sperimentale e simulata all’interfaccia riscaldatore-PCM con flusso 1200 W/m²: a) k=8.14 W/mK; b) k=1 W/mK

2.4 Simulazioni CFD delle prove sperimentali con modello tridimensionale

Considerando che la simulazione bidimensionale descritta in precedenza presuppone la conoscenza delle proprietà fisiche medie del materiale composito, e che queste non sono calcolabili in modo affidabile dalle equazioni (3) e (4), per confrontare le previsioni dei modelli CFD in caso di variazione della dimensione dei pori o del materiale della schiuma solida, si procede con il modello 3-D la cui impostazione era già stata descritta in [1].

Sono stati realizzati tre modelli CFD usando FLUENT:

- schiuma con pori grandi, schematizzata come struttura reticolare di barrette rettangolari, tali che la frazione di solido e la dimensione dei pori sia la stessa del caso reale della schiuma di SiC con 10 ppi;
- schiuma con pori piccoli, con la stessa struttura della precedente ma con dimensioni a metà scala;
- alette piane verticali, per verificare la convenienza di questo tipo di struttura rispetto alla schiuma solida.

Il modello con pori grandi era stato già descritto in [1] ed in Figura 32 è mostrata la nodalizzazione e due viste della distribuzione di liquido e temperature in una simulazione. 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 di schiuma più 10 mm del riscaldatore), ma di base quadrata 0.8x0.8 mm

La geometria utilizzata per simulare la porosità più piccola è stata ottenuta nello stesso modo, mantenendo la stessa altezza (cioè lo spessore della schiuma e del riscaldatore) ma raddoppiando il numero di elementi in questa direzione e dimezzandone le dimensioni, in modo da mantenere la stessa frazione di solido. La base del prisma diventa quindi 0.4x0.4 mm, come mostrato in Figura 33.

Infine per simulare lo stesso spessore ma con alette invece di schiuma, si sono usate le dimensioni della prima geometria (base 0.8x0.8 mm)

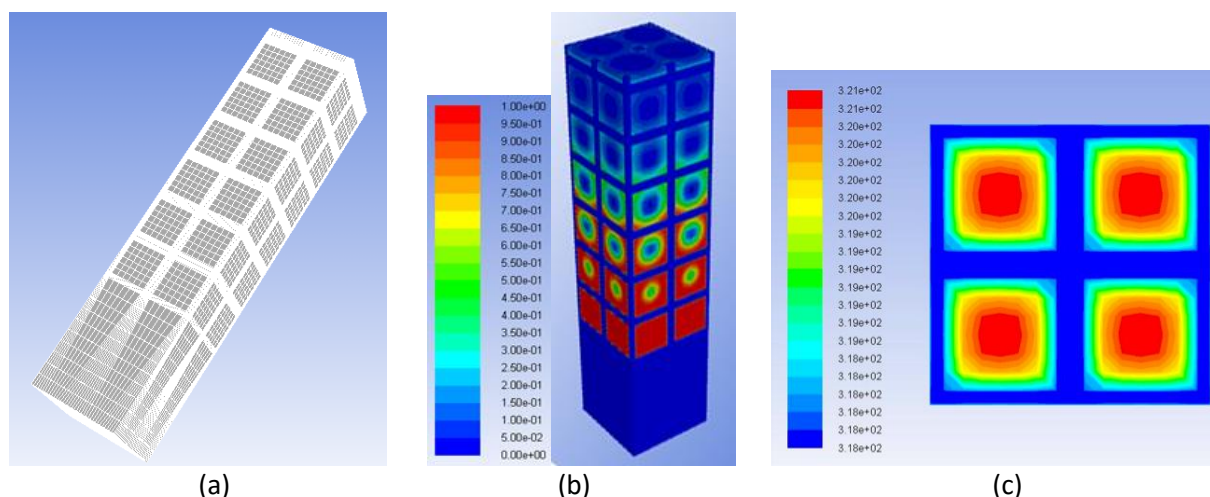


Figura 32 – nodalizzazione e tipiche mappe di colore del modello 3D (a) della schiuma solida con PCM (b e c)

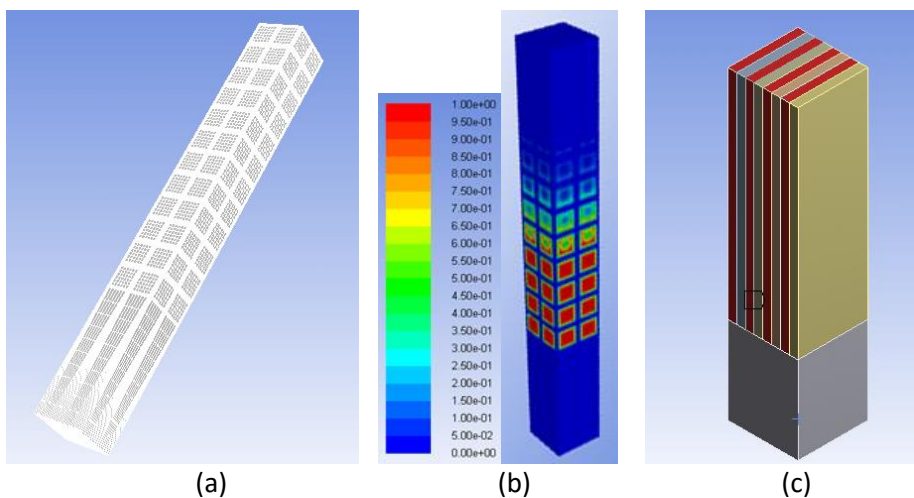


Figura 33 – a) nodalizzazione e tipiche mappe di colore della schiuma a pori piccoli ; b) struttura della simulazione con alette (in rosso il PCM)

I risultati delle simulazioni mostrano che anche in questo caso il calore sembra assorbito più rapidamente di quanto non accada nella realtà, con quindi una conducibilità media del materiale composito più alta di quella reale. L'andamento delle temperature è molto simile a quello ottenuto con il modello 2D e la conducibilità $k=8.14 \text{ W/mK}$ data dalla equazione (4), come si può vedere confrontando rispettivamente Figura 34a con Figura 30a per la prova con flusso maggiore, e Figura 34b con Figura 31a per quella con flusso minore.

Per quanto riguarda la dimensione dei pori, da Figura 35 si vede che il comportamento è molto simile, con un leggero anticipo del tempo di fusione completa nel caso di pori più piccoli.

In Figura 36 sono mostrate le temperature all'interfaccia per schiuma e alette piane. Con queste ultime la fusione completa si raggiunge ancora prima, ma bisogna tenere presente che in questo caso la quantità di PCM contenuto nel volume è minore (circa la metà) di quello nelle schiume, in quanto la frazione di solido in questo caso è molto maggiore di quella delle schiume.

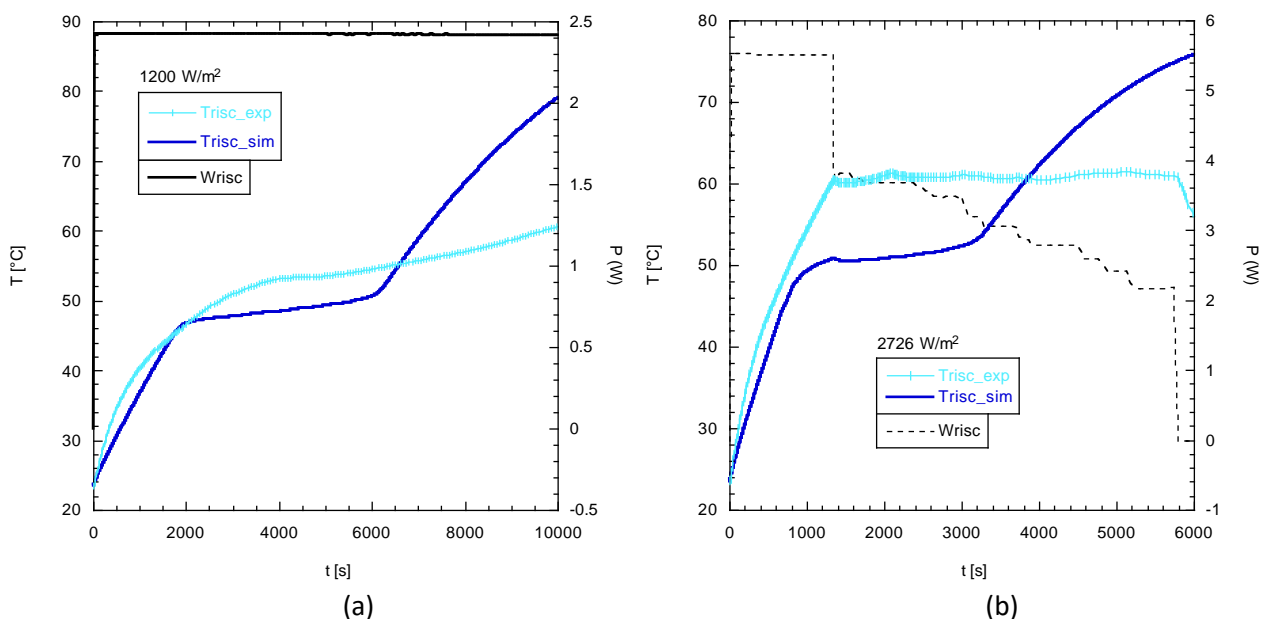


Figura 34 – Confronto tra prova sperimentale e simulata all'interfaccia riscaldatore-PCM con: a) flusso 2726 W/m^2 ; b) flusso 1200 W

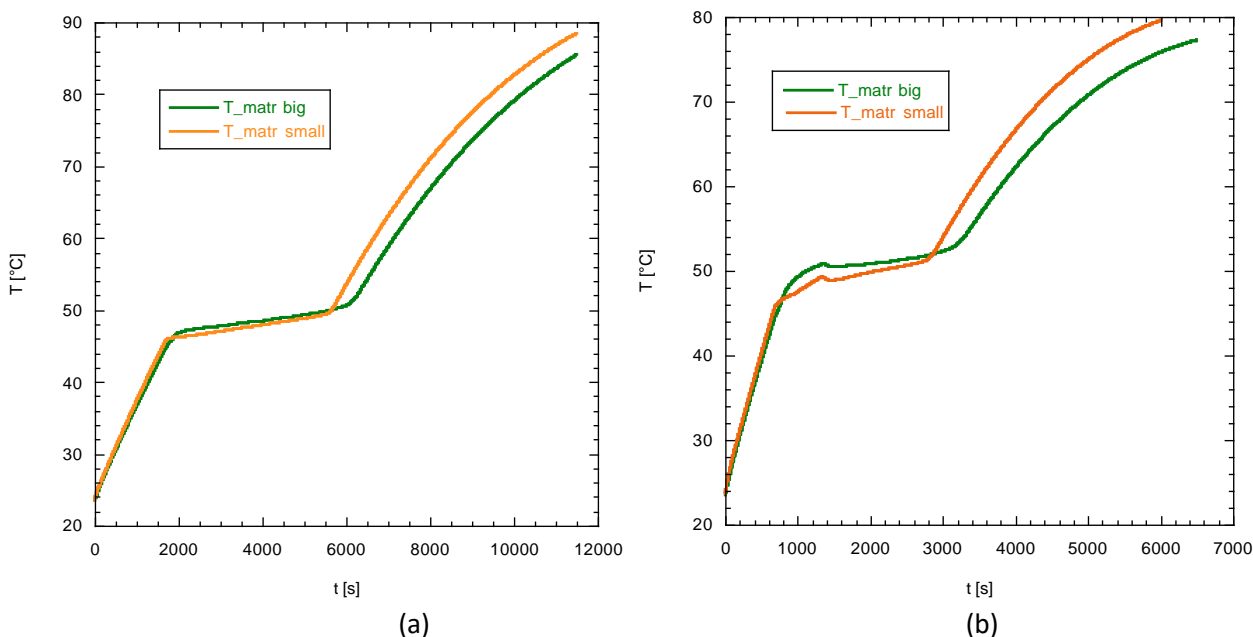


Figura 35 – Confronto della temperatura dell’interfaccia tra matrice con pori grandi e piccoli: a) flusso 2726 W/m²; b) 1200 W/m²

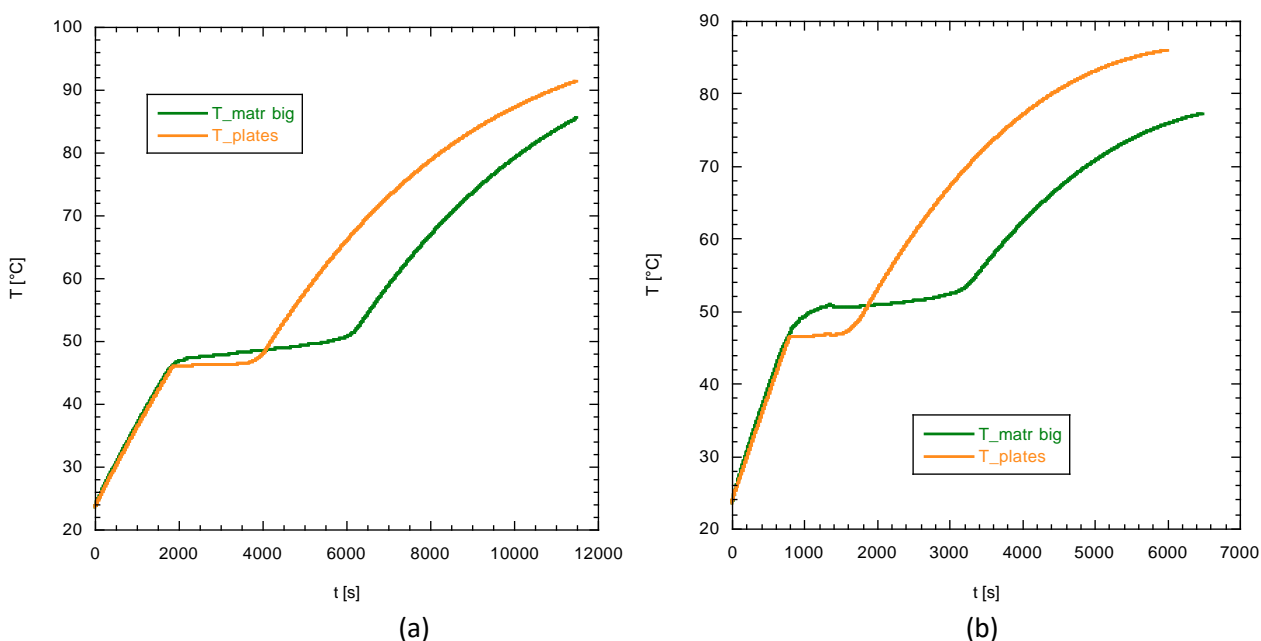


Figura 36 – Confronto della temperatura dell’interfaccia tra matrice con pori grandi e alette: a) flusso 2726 W/m²; b) 1200 W/m²

2.5 Conclusioni sulle prove sperimentali con le schiume solide

Sono stati eseguiti test sperimentali su un blocchetto di PCM verificando il miglioramento delle prestazioni, quale mezzo di accumulo termico, quando se ne aumenta la conducibilità attraverso l’utilizzo di schiume solide conduttive. Tale miglioramento era già stato verificato in [1] per una schiuma di carburo di silicio (SiC), ma si era dimostrato insufficiente per rendere il sistema conveniente per l’accumulo termico del calore in eccesso durante le fasi di alto irraggiamento dei pannelli solari. Nel presente lavoro sono state provate nuove schiume conduttive di rame (la cui conducibilità è il doppio di quella del SiC), e con due

diverse porosità per valutare l'effetto di questo parametro. I test hanno dimostrato che il rame porta un ulteriore miglioramento, mentre la riduzione della dimensione dei pori non provoca effetti apprezzabili. Considerando per il confronto il tempo dopo il quale l'energia accumulata dal PCM supera quella dello stesso volume di acqua, questo miglioramento si ha soprattutto per transitori di temperatura veloci, nei quali nel caso provato si passa da 4800 s per il PCM puro a 2000 s con il SiC e a 1700 s con il rame. Attraverso la simulazione con due modelli CFD dei sistemi testati, si è ottenuto anche dal punto di vista teorico la conferma delle piccole variazioni indotte dalla porosità, verificando però che i modelli prevedono in tutti i casi un assorbimento di calore più rapido e quindi prestazioni migliori di quelle reali.

2.6 Miglioramenti con modifiche dei contenitori di PCM

2.6.1 Risultati delle precedenti simulazioni

In [1] era stata riportata la sperimentazione e la simulazione del tubo contenitore del PCM reale con il volume di acqua ad esso associato nel serbatoio di accumulo (Figura 37) eseguita usando il codice fluidodinamico FLUENT.

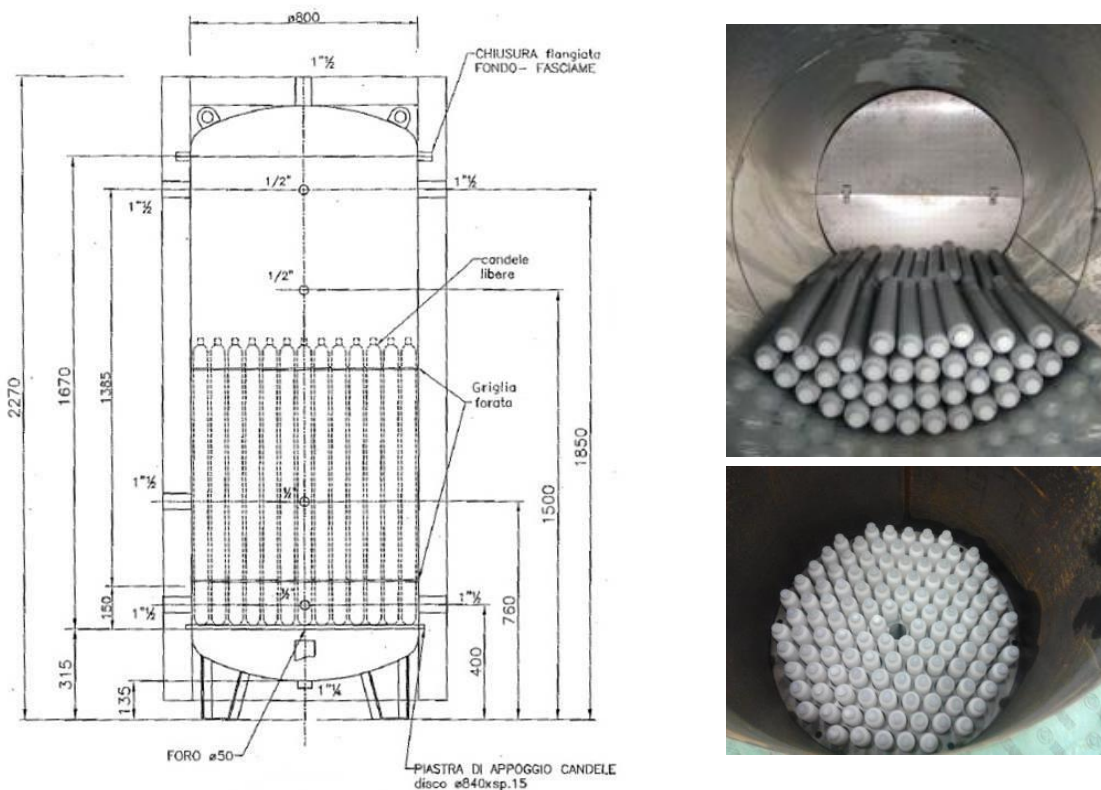


Figura 37 – Serbatoio di accumulo e i contenitori di PCM inseriti in esso.

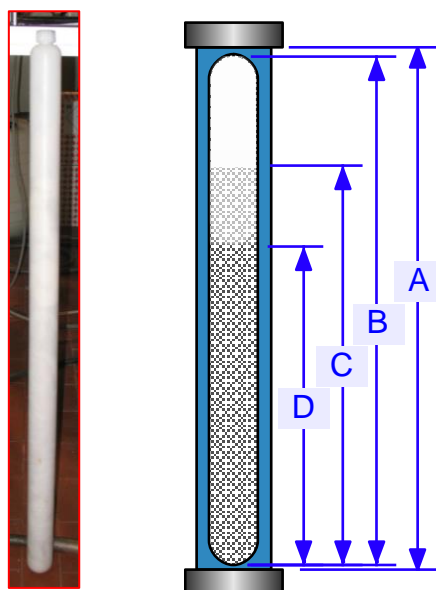


Figura 38 – foto di un contenitore di PCM e, destra, le altezze della sezione di prova utilizzata in [1]: A=1000 mm (vessel); B=970 mm (tubo PCM); C=825 mm (sale granulare prima dell’uso); D=660 mm (sale dopo la fusione);

In Figura 38 è mostrato il singolo contenitore di PCM e lo schema della sezione di prova sperimentale, usato anche nella simulazione.

Il vessel contenente la candela del PCM S46, con il passaggio anulare di area uguale a quella del sottocanale associato a una candela nel serbatoio reale, ha le seguenti dimensioni:

- 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

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

La sezione di prova è stata schematizzata in geometria cilindrica con la nodalizzazione mostrata in Figura 39, in cui la dimensione verticale è stata espansa (dopo essere stato ruotato di 90°). In Figura 40 il tubo è mostrato intero con l’asse di simmetria (il volume del PCM è in blue, l’acqua è nell’anulo rosso e si muove da sinistra a destra).

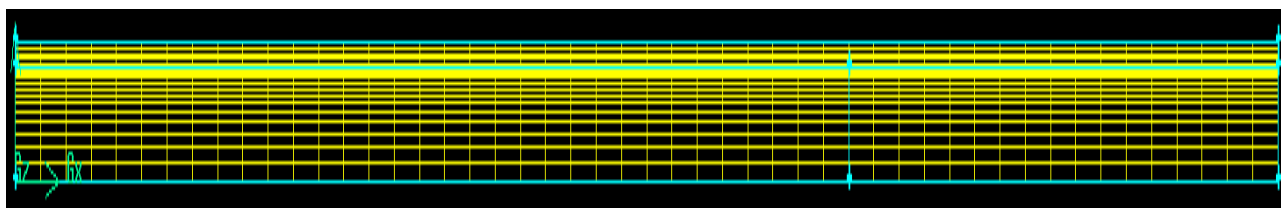


Figura 39 – nodalizzazione (scala y non proporzionale)

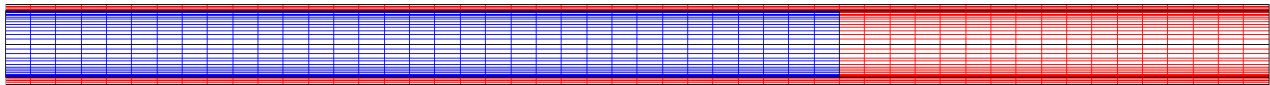


Figura 40 – visualizzazione dei volumi (anulo con acqua, PCM, aria)

Dall'analisi dei dati sperimentali e delle relative simulazioni, le conclusioni principali erano state: nella configurazione attuale 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. Quindi con le loro caratteristiche nominali tutti i PCM valutati hanno una risposta troppo 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.

Aumentando la conducibilità a 1 W/mK il miglioramento delle prestazioni è modesto, mentre diventa notevole con $k=10$ W/mK, permettendo di ottenere l'accumulo o il rilascio di gran parte del calore latente di fusione in tempi minori di un'ora, rendendolo quindi molto più efficiente durante le variazioni dovute ad effetti meteorologici.

Anche la conducibilità della parete del contenitore risulta abbastanza importante. 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.

2.6.2 Nuove simulazioni con FLUENT

Considerando che per aumentare la velocità della fusione del PCM bisogna aumentare la potenza verso la zona di cambiamento di fase, dalle

$$W = h S D T \quad \text{per l'interfaccia acqua-contenitore}$$

$$W = k \frac{S}{s} D T \quad \text{per il PCM e per la parete del contenitore}$$

trascurando la prima in quanto il ritardo è soprattutto nella diffusione nel contenitore, i parametri su cui agire sono:

1. Aumento della conducibilità termica del PCM
2. Diminuzione della resistenza delle pareti, aumentandone la conducibilità e diminuendo lo spessore
3. Aumento dell'area di contatto acqua-PCM e/o diminuzione dello spessore del PCM

Per il punto 1, abbiamo visto nei paragrafi precedenti che l'aumento ottenuto con le schiume conduttive non è ancora sufficiente.

Il punto 2 è stato già valutato e si è dimostrato importante sostituendo la plastica con il metallo, ma ulteriori miglioramenti intervenendo sul tipo di metallo e sullo spessore diventano trascurabili, essendo a questo punto tutta la resistenza concentrata nel PCM.

Gli unici parametri su cui intervenire rimangono quindi quelli del punto 3, superficie e spessore, per cui una soluzione può essere quella di sostituire al contenitore cilindrico uno a sezione anulare ed ottimizzare la quantità di PCM in esso, come mostrato in Figura 41. L'aggiunta del passaggio dell'acqua anche al centro porta a un aumento della superficie di scambio e soprattutto a una notevole diminuzione dello spessore, senza però diminuire troppo la quantità di PCM. Inoltre rispetto ai contenitori attuali di Figura 38 il riempimento completo, lasciando solo il volume necessario all'espansione del liquido, porta ad un ulteriore

aumento della superficie e compensa la diminuzione di massa di PCM dovuta al foro centrale. Un vantaggio aggiuntivo è la diminuzione delle perdite di carico dell'acqua.

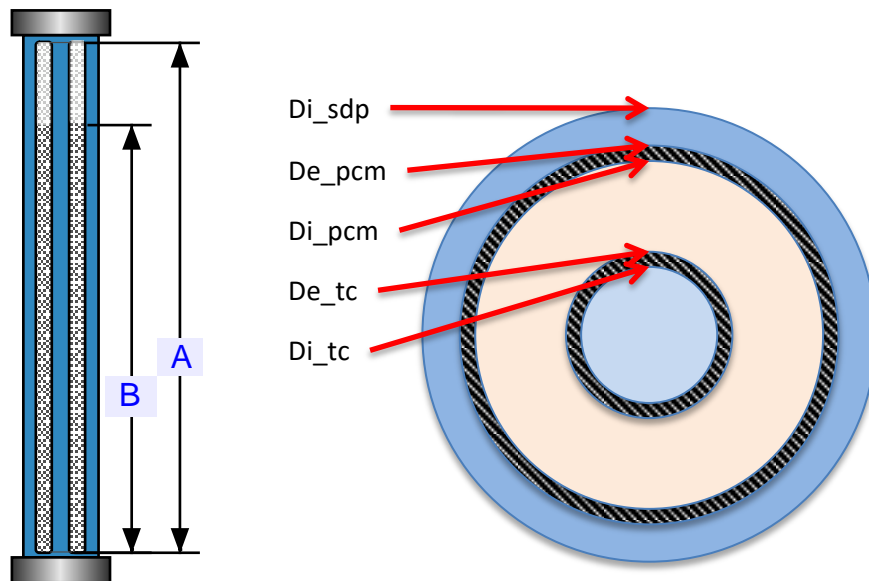


Figura 41 –a) Schema con contenitore anulare e ottimizzazione dei volumi: A=vessel; B=PCM solido; b) sezione della nuova configurazione

Per valutare l'effetto modifiche geometriche sul contenitore di PCM, in aggiunta al modello CFD di Figura 40 ne sono state realizzate due varianti, una con la configurazione appena descritta ed una senza PCM e tutto il volume occupato dall'acqua, per avere un confronto diretto con il serbatoio di accumulo classico. Le tre configurazioni sono mostrate in Figura 42, dove è riportata anche la velocità dell'acqua essendo la portata in ingresso la stessa. In figura sono riportati anche i volumi di acqua e di PCM. Il terzo caso, con PCM anulare, è mostrato con riempimento di PCM uguale all'attuale (per un confronto diretto), ma è stato provato anche con riempimento completo.



Figura 42 –Schema delle tre configurazioni simulate

Con riferimento a Figura 41, nel caso anulare le dimensioni del sistema simulato sono:

- Di-vessel (mm) 60
- De-PCM (mm) 50
- Di-PCM (mm) 44
- De-tc (mm) 22

- Di-tc (mm) 20
- L-vessel (m) 1.0000
- L-PCM (m) 0.6600
- L-aria (m) 0.3400

In Figura 43 sono mostrati gli andamenti delle temperature di uscita dell'acqua dopo un gradino in ingresso di 45°C, ottenuto con una salita rapida da 22 a 67°C per le prove in riscaldamento, o una discesa equivalente per quelle con raffreddamento. I tre casi confrontati sono relativi al tubo attuale (Tu-PCM), a quello anulare con riempimento parziale (Tu-anul) e a quello con solo acqua (Tu-vuoto). I tempi sono riportati in minuti per fornire una visione più intuitiva delle prestazioni.

I risultati delle simulazioni mostrano che con il PCM anulare il tempo di cambiamento di fase diminuisce di oltre il 50%, migliorando la risposta per transitori dell'ordine dell'ora. Questo miglioramento è notevole, considerando che è analogo al risultato ottenuto in [1] con l'aumento di conducibilità a $k=10$ W/mK, mostrato in Figura 44.

Passando poi alla parete in alluminio, Figura 45, le prestazioni del contenitore anulare rispetto all'attuale migliorano ulteriormente, con la fusione completa a $t=70$ min dagli 80 precedenti. I transitori in discesa, con l'energia accumulata che viene ceduta all'acqua durante la solidificazione del PCM, sono analoghi a quelli in salita.

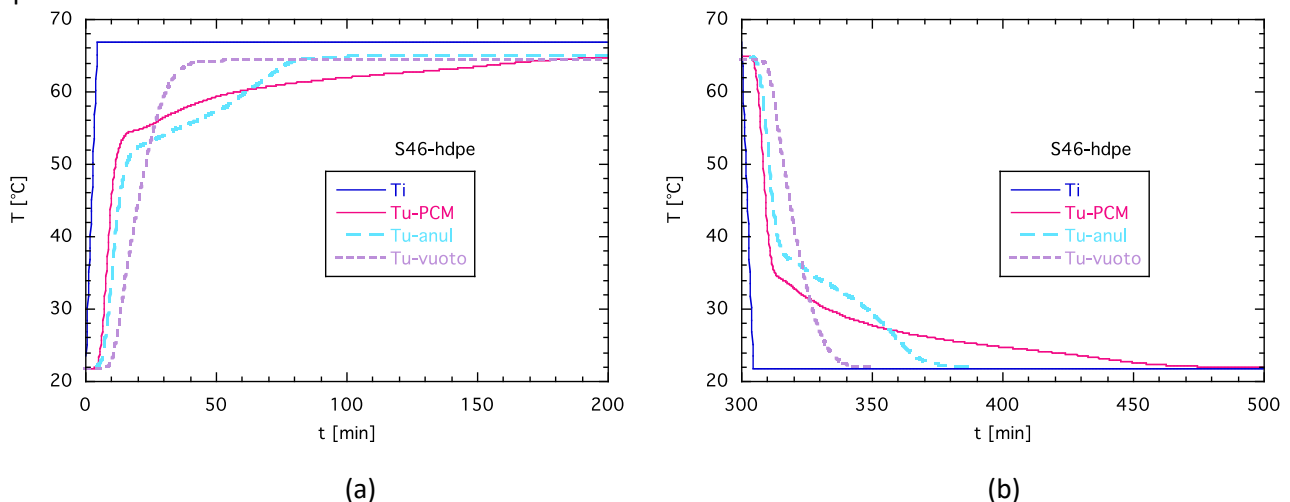


Figura 43 – confronto delle temperature in uscita per le tre configurazioni, nel transitorio con a) salita della temperatura in ingresso da 22 a 67°C; b) discesa da 67 a 22°C, con parete di plastica

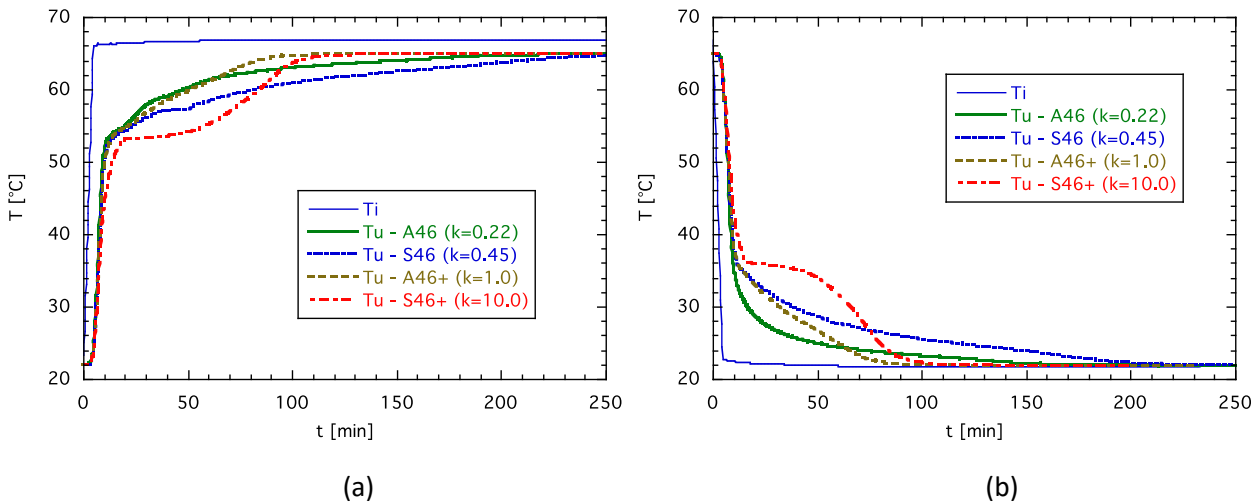


Figura 44 – confronto delle temperature in uscita per PCM simulati con diversa conducibilità, nel transitorio con salita (a) e discesa (b) della temperatura in ingresso, con parete di plastica

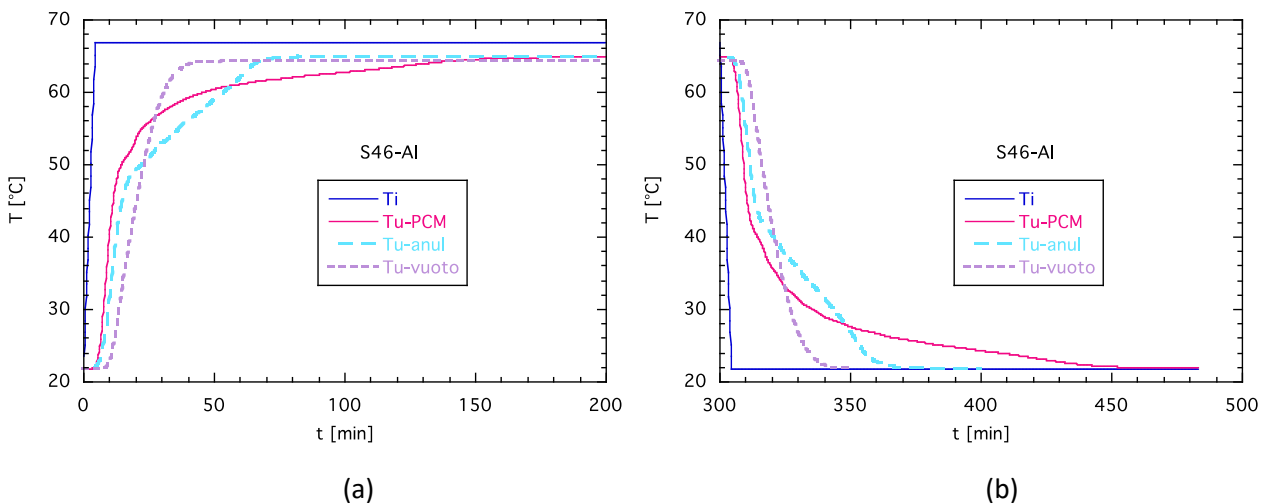


Figura 45 – confronto delle temperature in uscita per le tre configurazioni, nel transitorio con salita (a) e discesa (b) della temperatura in ingresso, con parete di alluminio

In Figura 46 il confronto tra il contenitore cilindrico e quello anulare viene mostrato in termini di potenza scambiata con l'acqua dopo il gradino. Si può vedere che nell'anulo il contributo della parete interna è poco meno della metà di quello dall'esterno nella prima fase, ma poi diventa equivalente permettendo di sfruttare rapidamente anche gli strati più interni del PCM, cosa che invece avviene in tempi molto lunghi con il cilindro pieno. Con le pareti di alluminio, Figura 47, la differenza è minore nei primi 15 min, mentre la fusione avviene molto vicino alla parete, quando ma poi cresce quando il fronte di cambiamento di fase si allontana e quindi il contributo della seconda parete diventa più importante. In entrambi i casi la potenza scambiata dall'anulo è sempre maggiore di quella del cilindro nella prima ora, per poi annullarsi rapidamente a fusione completata, mentre nel cilindro la fusione degli strati interni continua molto lentamente e con potenze sempre più ridotte a causa della piccola massa dei cilindri con raggio piccolo.

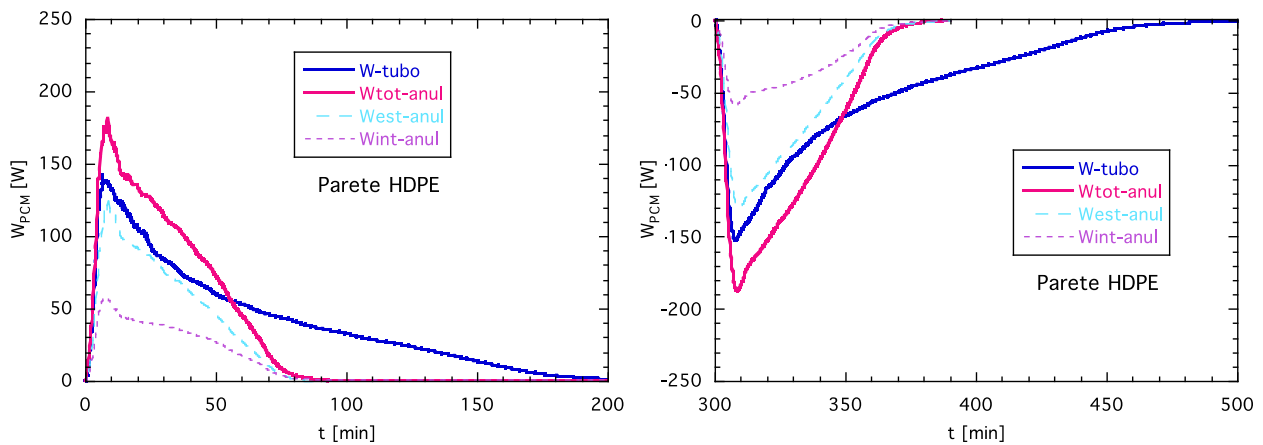


Figura 46 – Potenza scambiata tra acqua e PCM nel caso attuale e in quello anulare, per il quale sono anche mostrate le frazioni sulla parete esterna e su quella interna, con parete di plastica

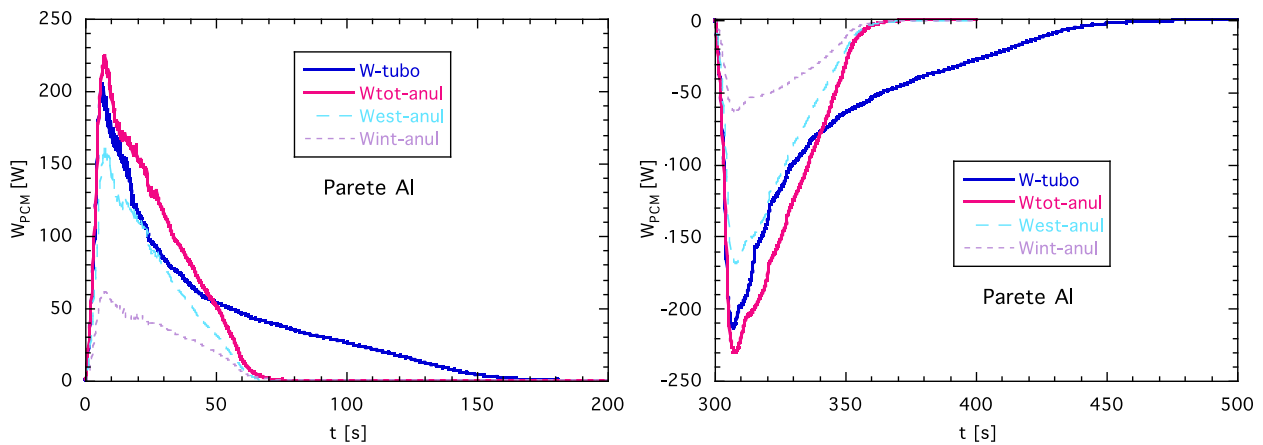


Figura 47 – Potenza scambiata tra acqua e PCM nel caso attuale e in quello anulare, per il quale sono anche mostrate le frazioni sulla parete esterna e su quella interna, con parete di alluminio

Il riepilogo dei miglioramenti ottenuti con i successivi interventi (attuale contenitore cilindrico con parete di HDPE – contenitore anulare sempre di plastica – anulo con pareti di alluminio – anulo in alluminio riempito completamente) è mostrato in Figura 48 per le temperature in uscita. Il caso migliore, cioè l’anulo di alluminio completamente pieno di PCM, ha prestazioni molto migliori del contenitore attuale (“tubo_hdpe”), con la temperatura che tende effettivamente ad appiattirsi poco dopo il superamento della temperatura di cambiamento di fase del PCM. Questo è ancora più evidente in Figura 49 per le potenze scambiate tra acqua e PCM, dove si vede che la potenza massima viene quasi triplicata dagli interventi proposti, ed in generale la potenza, nei primi 30’, aumenta notevolmente con la combinazione PCM anulare + parete di alluminio e soprattutto con il riempimento completo.

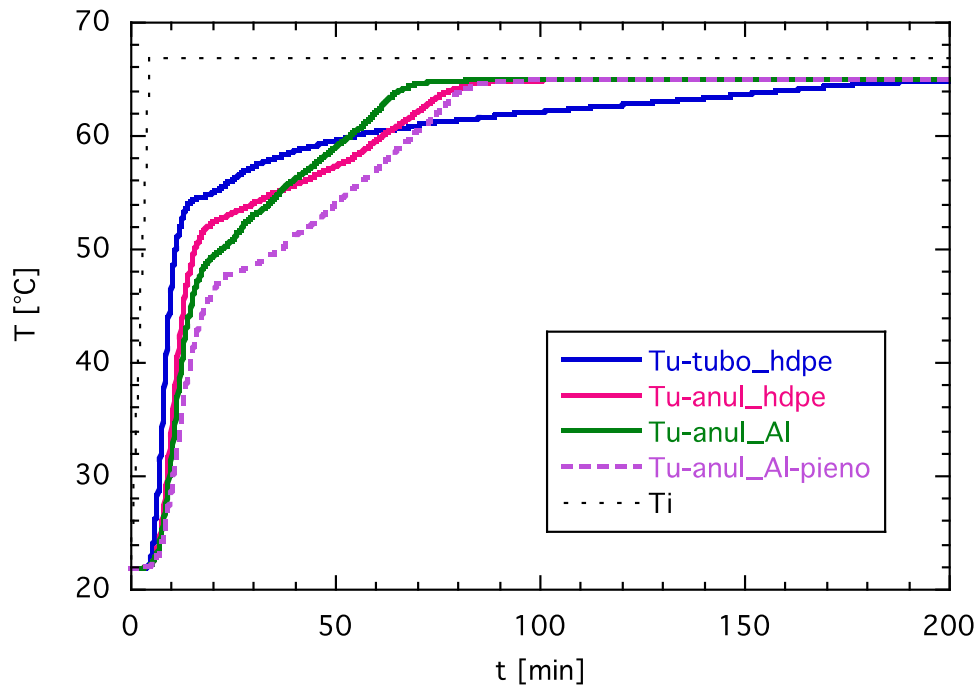


Figura 48 – confronto delle temperature in uscita nel transitorio con salita passando dal caso attuale all’anulo di plastica, a quello di alluminio e infine al riempimento completo.

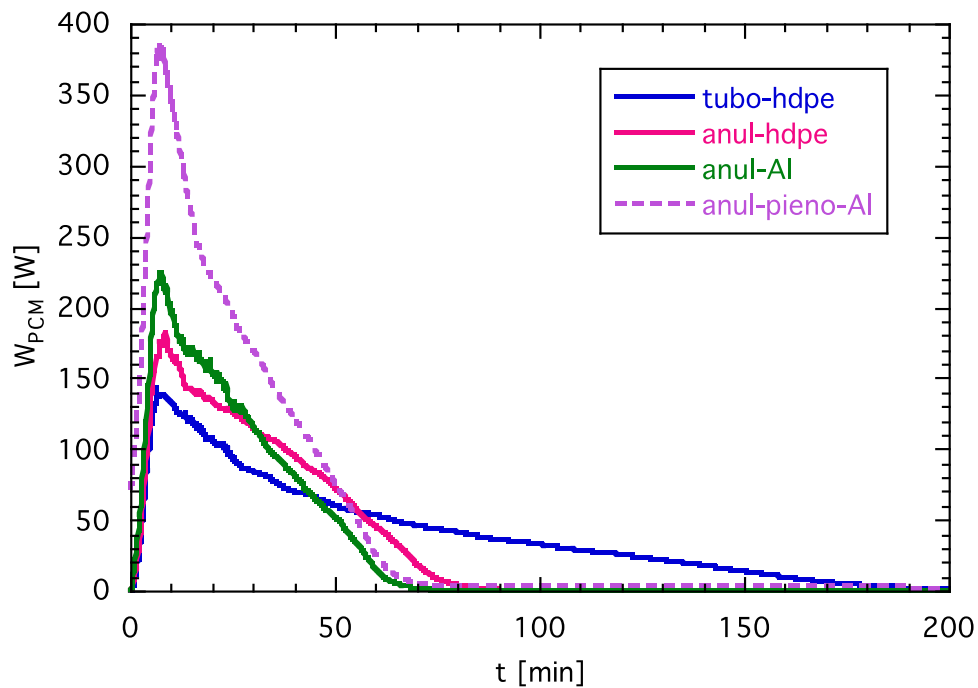


Figura 49 – confronto della potenza nel transitorio in salita, passando dal caso attuale all’anulo di plastica, a quello di alluminio e infine al riempimento completo.

Per fornire una visione più immediata della differente evoluzione del transitorio, nelle prossime figure verranno confrontate le “color map” delle temperature e della frazione di liquido ottenute dalle precedenti

simulazioni dei due casi estremi (contenitore cilindrico in plastica con parte alta vuota, contenitore anulare in alluminio completamente pieno), per tre istanti (25, 50 e 150 min) dall’inizio del transitorio. In ogni figura le prime due immagini in alto sono relative alla temperatura, la prima per il tubo cilindrico e la seconda per quello anulare, le due in basso mostrano le corrispondenti frazioni di liquido.

Da Figura 50 a Figura 52 è mostrata la fase di riscaldamento, e si vede come la presenza del foro centrale, oltre alle pareti conduttive, porti al riscaldamento e alla fusione del PCM molto più rapidamente, mentre nel cilindro dopo 150’ ancora c’è del solido. La stessa cosa avviene per la solidificazione durante il raffreddamento, mostrato da Figura 53 a Figura 55.

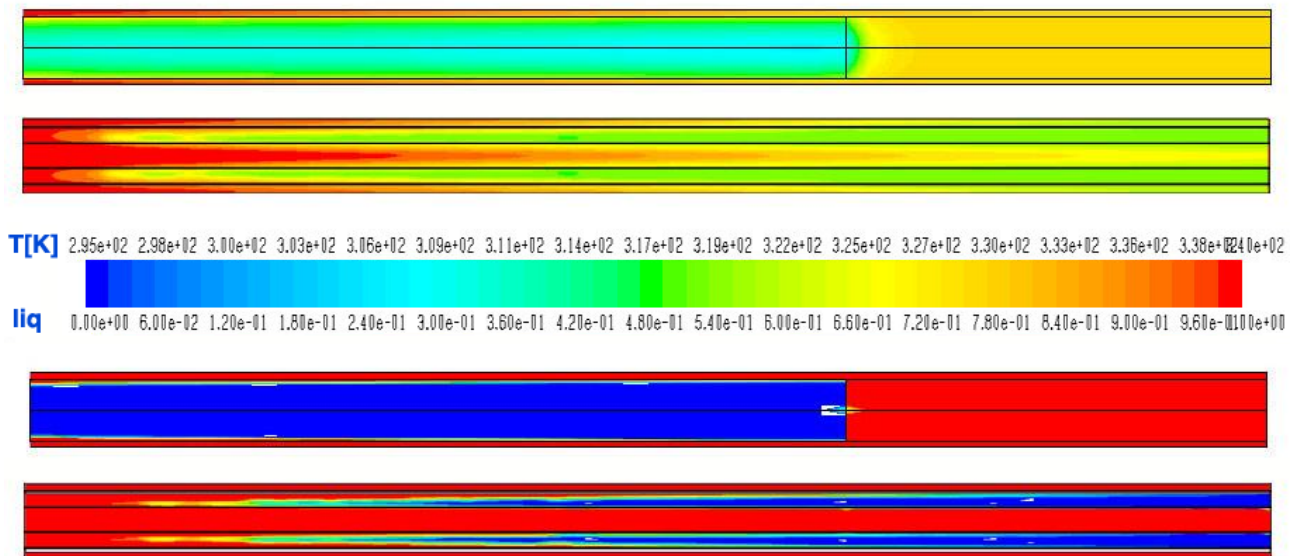


Figura 50 – riscaldamento, t=25 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

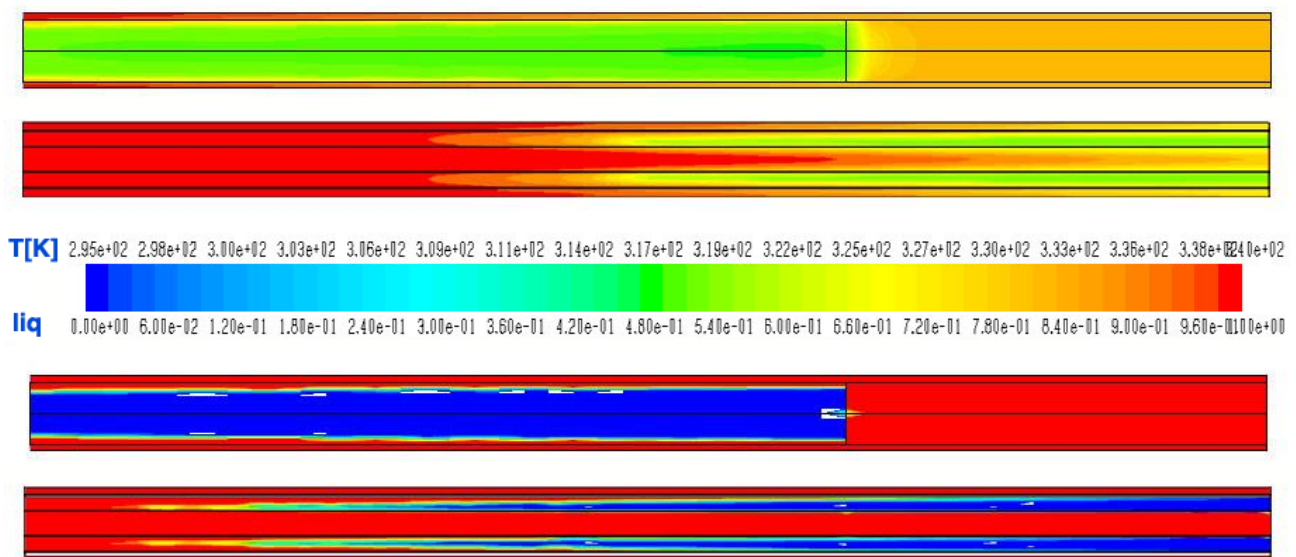


Figura 51 – riscaldamento, t=50 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

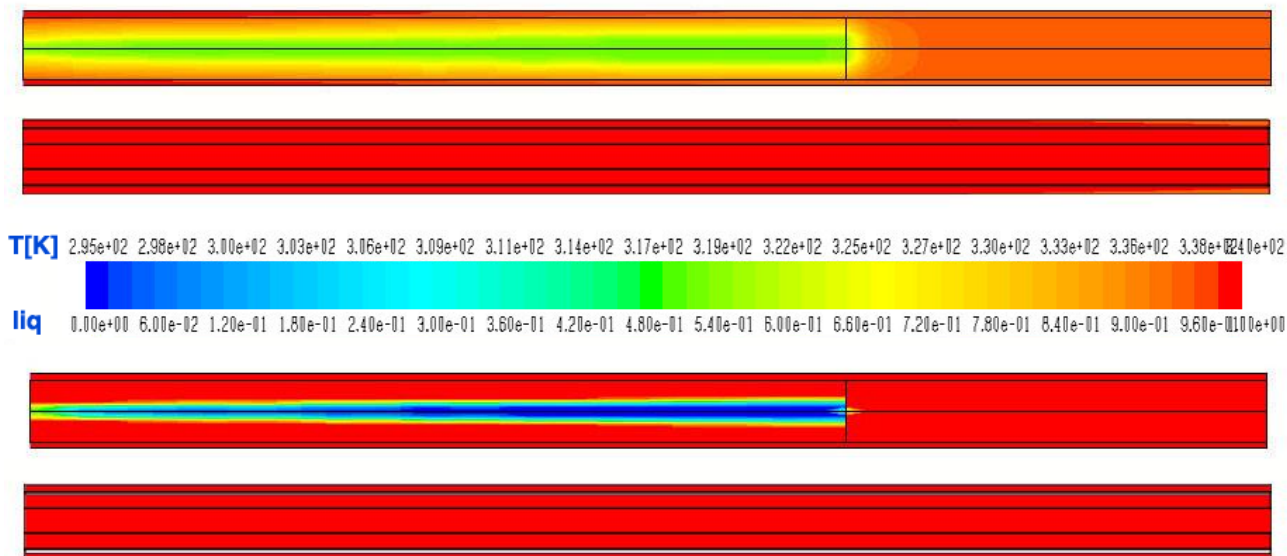


Figura 52 – riscaldamento, t=150 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

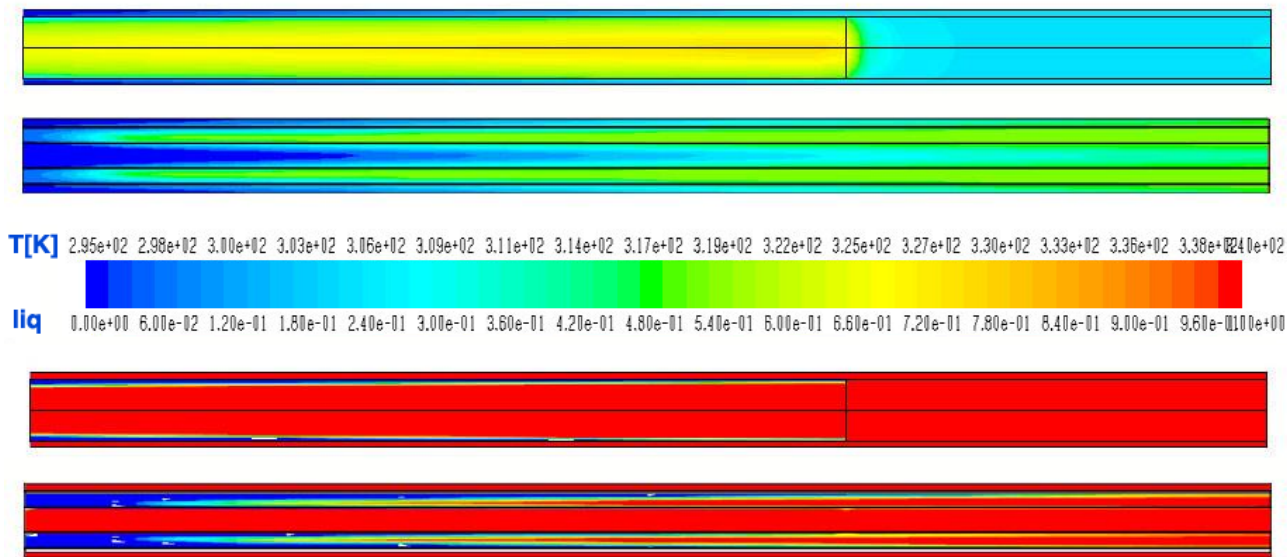


Figura 53 – raffreddamento, t=25 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

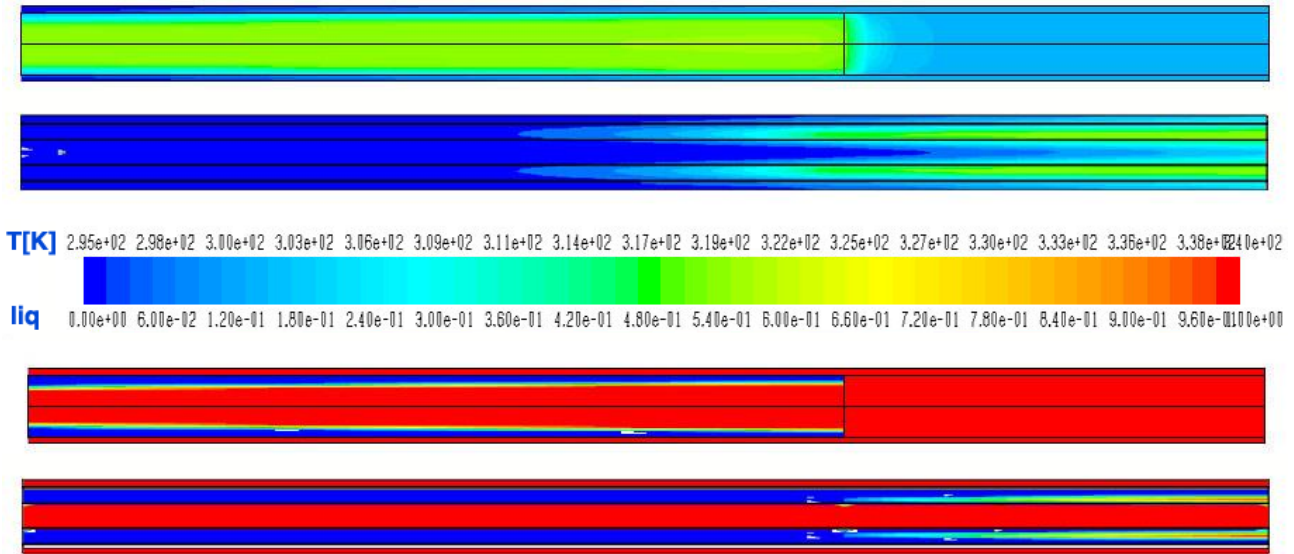


Figura 54 – raffreddamento, t=50 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

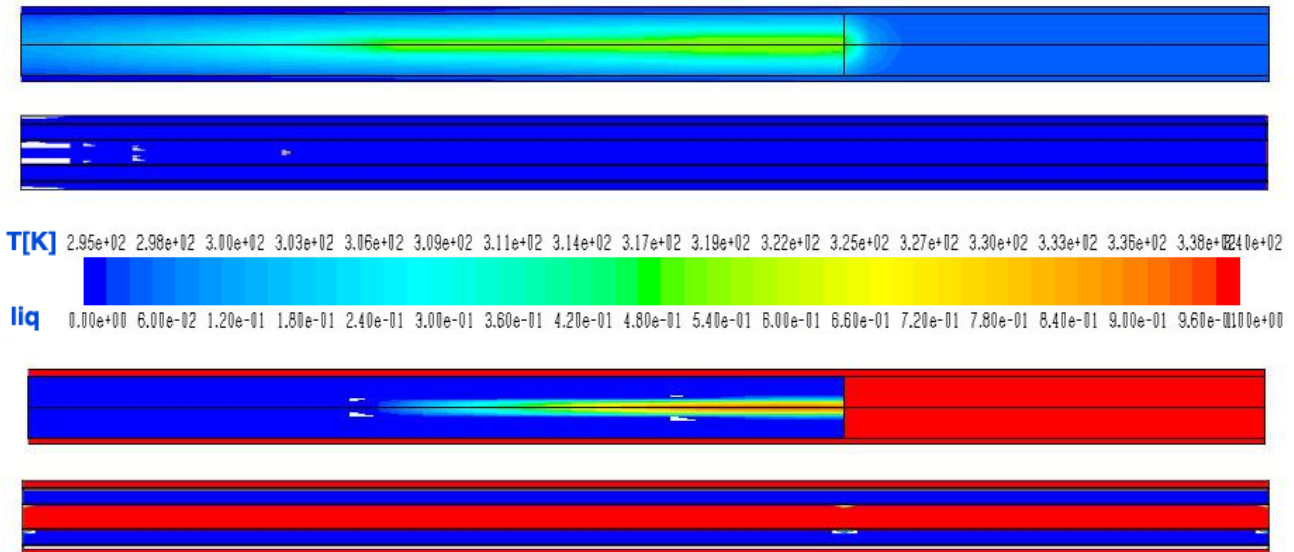


Figura 55 – raffreddamento, t=150 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio.

3 Conclusioni

Per aumentare le prestazioni di un serbatoio per l'accumulo termico con l'utilizzo di PCM, è necessario l'alternarsi di periodi di fusione (accumulo di energia in eccesso come calore latente di fusione) e di solidificazione (rilascio dell'energia accumulata). Questo si verifica solo se le variazioni di temperatura in ingresso avvengano in un campo abbastanza largo a cavallo di quella di cambio di fase del PCM, ma è anche 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.

Le prove sperimentali e le relative simulazioni eseguite sul tubo di PCM reale hanno dimostrato che, a causa della bassa conducibilità, i tempi necessari avere miglioramenti consistenti sull'accumulo di energia possono essere troppo lunghi, spesso molte ore.

Nel presente lavoro sono riportate le verifiche numeriche e sperimentali di metodi per la diminuzione del tempo di risposta:

- l'aumento della conducibilità del materiale inserendolo in una matrice solida molto più conduttiva;
- la modifica dei contenitori di PCM per aumentarne lo scambio termico con il fluido primario.

Riguardo il primo punto la schiuma di carburo di silicio (SiC) nei precedenti test aveva mostrato un buon aumento della conducibilità, ma non sufficiente ad assicurare una risposta tale da compensare la perdita di rendimento dell'accumulo alle altre temperature, quando il cambiamento di fase non avviene. Nel presente lavoro sono stati eseguite prove sperimentali con due nuove schiume di rame, una con porosità simile a quella del SiC e l'altra con pori molto più piccoli (ma stessa frazione di vuoto). I risultati hanno mostrato che il rame migliora ulteriormente le prestazioni, ma ancora non abbastanza per rendere sicuramente conveniente il sistema. Dato che la riduzione della dimensione dei pori non ha portato a differenze apprezzabili, queste prove hanno permesso di verificare il limite superiore del miglioramento con le schiume, avendo il rame una conducibilità termica tra le più alte tra i materiali convenzionali utilizzabili come schiume solide.

Sono stati allora valutati interventi sulla forma e sui materiali dei contenitori di PCM, fermo restando la filosofia generale di un facile utilizzo all'interno dei serbatoi esistenti, che era stata ottenuta con "candele" cilindriche verticali. Le modifiche proposte sono; l'adozione di un contenitore anulari (due tubi concentrici con passaggio dell'acqua anche all'interno); la sostituzione delle pareti di plastica con metallo (molto più conduttivo); l'ottimizzazione del riempimento (attualmente il 30% della candela è vuoto dopo la prima fusione). Ciascuno di questi tre interventi porta a un incremento delle prestazioni e il miglioramento ottenuto dal sistema completo supera abbondantemente quello massimo raggiungibile con le schiume, rendendo il sistema conveniente per transitori di temperatura con tempi minori di un'ora.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] 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", Report Rds/2014/156 - PAR2013

5 Abbreviazioni ed acronimi

A	Area [m ²]
A43	PCM organico con T _{pc} =43°C
A46	PCM paraffina con T _{pc} =46°C
c _p	Calore specifico [J/kg K]
D	Diametro [m]
E	Energia [J]
Eff	Effusività [W s ^{1/2} /m ² K]
h	Coefficiente di scambio termico, [W/m ² K]
k	Conducibilità termica [W/m K]
L	Lunghezza [m]
M	Massa [kg]
PCM	Phase change material
q''	Flusso di calore [W/m ²]
S	Superficie, [m ²]
S46	PCM sale idrato con T _{pc} =46°C

T	Temperatura [°C]
TP	Temperatura del PCM (Figura 8)
T_{pc}	Temperatura di cambiamento di fase [°C]
u	velocità [m/s]
VHC	Capacità termica volumetrica [J/m ³]
W	Potenza [W]

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
foam	relativo alla schiuma solida
int	interno
i	iniziale
max	massimo
par	relativo alla parete
pc	phase change
PCM	relativo al PCM
risc	riscaldatore
SiC	carburo di silicio
sup	superiore, parte alta del PCM
tot	totale
w	acqua