



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano

SVILUPPO DI UN MODELLO NON STAZIONARIO PER LA SIMULAZIONE TERMO-FLUIDODINAMICA DI UN MODULO CILINDRICO PER L'ACCUMULO DEL FREDDO, CONTENENTE UN MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) CON E SENZA LA PRESENZA DI UNA SCHIUMA METALLICA IMMERSA NEL PCM ATTA A FAVORIRE LA TRASMISSIONE DI CALORE

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano
(Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.1 Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: B. Reti termiche distribuite

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore”*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Giorgio Graditi

Responsabile scientifico Università di Napoli Federico II: Prof. Nicola Bianco

Indice

SOMMARIO.....	4
NOMENCLATURA.....	6
1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	8
2 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE I.....	9
2.1 MODELLO DI UN MODULO CILINDRICO PER ACCUMULO TERMICO CONTENENTE UN MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE.....	9
2.1.1 <i>Modello puramente conduttivo</i>	9
2.1.2 <i>Modello con conduzione e convezione</i>	10
2.1.3 <i>Calcolo delle proprietà termofisiche del materiale a cambiamento di fase</i>	11
2.2 MODELLO DI UN MODULO CILINDRICO PER ACCUMULO TERMICO CONTENENTE UN MATERIALE A CAMBIAMENTO DI FASE IN PRESENZA DI UNA SCHIUMA METALLICA.....	14
2.2.1 <i>Modello puramente conduttivo</i>	14
2.2.2 <i>Modello con conduzione e convezione</i>	15
3 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE II.....	17
3.1 DATI DI INPUT.....	17
3.2 CONDIZIONI INIZIALI E CONDIZIONI AL CONTORNO.....	18
3.2.1 <i>Calcolo delle conduttanze convettive h_{LAT} e h_{SUP}</i>	19
3.3 APPLICATIVO DI ACCUMULO DEL FREDDO CON SOLO PCM.....	19
3.3.1 <i>Proprietà del materiale e caratteristiche geometriche del modulo di accumulo</i>	19
3.3.2 <i>Generazione della mesh e settaggio del solver di simulazione</i>	20
3.4 APPLICATIVO DI ACCUMULO DEL FREDDO CON SISTEMA COMBINATO PCM – SCHIUMA METALLICA.....	21
3.4.1 <i>Proprietà della schiuma metallica e caratteristiche geometriche del modulo di accumulo</i>	21
3.4.2 <i>Generazione della mesh e settaggio del solver di simulazione</i>	22
3.5 ANALISI DEI RISULTATI.....	22
3.5.1 <i>Indipendenza dei risultati dalla mesh</i>	23
3.5.1.1 Sistema di accumulo con solo PCM: modello puramente conduttivo.....	23
3.5.1.2 Sistema di accumulo con solo PCM: modello conduttivo - convettivo.....	23
3.5.1.3 Sistema di accumulo con PCM e schiuma metallica: modello puramente conduttivo.....	23
3.5.1.4 Sistema di accumulo con PCM e schiuma metallica: modello conduttivo - convettivo.....	23
3.5.2 <i>Parametri di prestazione</i>	23
3.5.3 <i>Risultati</i>	24
3.5.3.1 <i>Variazione di temperatura</i>	24
3.5.3.2 <i>Frazione solida/liquida e tempo di caricamento e scaricamento</i>	27
3.5.3.3 <i>Energia termica accumulata e rilasciata</i>	29
4 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE III.....	31
4.1 VALIDAZIONE DEI MODELLI NEL CASO DI SISTEMA DI ACCUMULO COMPOSTO DA SOLO PCM.....	32
4.2 VALIDAZIONE DEI MODELLI NEL CASO DI SISTEMA DI ACCUMULO COMPOSTO DA PCM E SCHIUMA METALLICA.....	33
5 CONCLUSIONI.....	34
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	36
CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	37

Sommario

Nel presente rapporto tecnico sono descritte le attività di ricerca svolte durante il secondo anno dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore”* stipulato tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Tali attività hanno riguardato la realizzazione di un modello dinamico per la simulazione del comportamento termo-fluidodinamico di un materiale a cambiamento di fase impiegato per l'accumulo del freddo, macro-incapsulato all'interno di un contenitore cilindrico di alluminio soggetto a flussi termici entranti e uscenti attraverso la sua superficie esterna, in caso di assenza e presenza di una schiuma metallica di alluminio, introdotta al fine di incrementare le performance di scambio termico del modulo di accumulo.

La scelta di utilizzare una schiuma metallica ai fini del miglioramento dello scambio termico del sistema di accumulo con PCM deriva dall'attenta analisi condotta nella precedente annualità, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *“Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo”* stipulato tra le medesime parti, riguardante le soluzioni tecniche più idonee all'incremento delle performance di scambio termico dei sistemi di accumulo termico a calore latente utilizzando i materiali a cambiamento di fase. Da tale rassegna è emerso, infatti, come l'utilizzo dei sistemi combinati PCM – schiume metalliche rappresentino una delle soluzioni tecniche più efficienti ai fini dell'incremento delle performance di scambio termico dei sistemi di accumulo a PCM, consentendo l'incremento della conducibilità termica dei materiali di accumulo fino a due ordini di grandezza.

L'attività di modellazione è stata svolta per due sistemi di accumulo del freddo differenti: uno composto da solo PCM, l'altro composto dal sistema combinato PCM - schiuma metallica. Tale modellazione è stata condotta prima ipotizzando che i processi fossero interessati da sola conduzione, successivamente considerando anche i fenomeni convettivi.

I due applicativi di accumulo del freddo analizzati sono stati realizzati in ambiente COMSOL Multiphysics, e ciascuno di essi è stato particolarizzato sia per il caso di modello puramente conduttivo, che per il caso di modello con conduzione e convezione. I dati di input necessari all'implementazione dei due casi sono stati, in parte, forniti da ENEA in base alle prove sperimentali svolte, riportate nel report *“Realizzazione di un impianto indoor per l'analisi sperimentale di un sistema di accumulo del freddo basato sull'impiego di materiale a cambiamento di fase (PCM)”* elaborato da ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, in parte sono stati definiti in seguito ad opportune analisi di letteratura e di sensibilità mirate all'individuazione dei valori più idonei alla descrizione dei fenomeni in gioco.

I parametri di prestazione analizzati, per entrambi i sistemi considerati sono stati: la frazione solida/liquida in fase di caricamento e scaricamento, la variazione di temperatura durante le suddette fasi, il tempo di caricamento e di scaricamento, e l'energia termica accumulata e rilasciata. Inoltre, è stata dimostrata, per ciascun caso analizzato, l'indipendenza dei risultati dal numero di elementi della *mesh*.

Infine, il lavoro ha previsto la validazione sperimentale dei risultati numerici, realizzata mediante il confronto con i dati sperimentali forniti da ENEA. A tale scopo, sono state analizzate diverse soluzioni, sia per quanto riguarda la correlazione relativa alla condizione al contorno, che per i coefficienti semi-empirici

all'interno delle equazioni del bilancio, al fine di ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra i risultati numerici e i dati sperimentali.

Nomenclatura

a_s	area di superficie specifica della schiuma metallica (m^{-1})
C	costante utilizzata nell'equazione (14)
C_F	coefficiente di Forchheimer
c_p	calore specifico a pressione costante (kJ/kg/K)
E	energia termica (Wh)
g	accelerazione di gravità (m/s^2)
h	conduttanza convettiva ($W/m^2/K$)
h_{sf}	coefficiente di scambio termico all'interfaccia PCM – schiuma metallica ($W/m^2/K$)
h_v	coefficiente di scambio termico volumetrico ($W/m^3/K$)
k	conducibilità termica ($W/m/K$)
K	permeabilità (m^2)
l	altezza del modulo di accumulo (m)
L_f	calore latente di fusione/solidificazione (J/kg)
p	pressione (Pa)
q	flusso termico (W/m^2)
r	raggio del modulo di accumulo (m)
T	temperatura ($^{\circ}C$)
t	tempo (s)

Simboli greci

α	parametro di smussamento utilizzato nell'equazione (12)
β	coefficiente di espansione termica (K^{-1})
δ	costante utilizzata nell'equazione (14)
Δ	intervallo
ε	porosità della schiuma
μ	viscosità dinamica (Pa s)
ρ	densità (kg/m^3)
φ	frazione liquida/solida

Simboli

∇	operatore differenziale
----------	-------------------------

Pedici

<i>amb</i>	ambiente
<i>c</i>	caricamento
<i>CENTR</i>	centrale
<i>cold</i>	freddo
<i>cond</i>	conduzione (riferito all'utilizzo del modello puramente conduttivo)
<i>conv</i>	convezione (riferito all'utilizzo del modello conduttivo - convettivo)
<i>d</i>	scaricamento
<i>fine</i>	fine della fase
<i>hot</i>	caldo
<i>INF</i>	inferiore
<i>iniz</i>	iniziale
<i>L</i>	liquido
<i>lat</i>	latente

<i>LAT</i>	laterale
<i>M</i>	fusione
<i>max</i>	massimo
<i>metà</i>	metà fase
<i>mod</i>	modulo di accumulo
<i>num</i>	numerico
<i>PCM</i>	riferito al PCM
<i>PCM-schiuma</i>	riferito all'insieme PCM – schiuma metallica
<i>r</i>	rampa
<i>ref</i>	valore di riferimento
<i>S</i>	solido
<i>schiuma</i>	riferito alla schiuma metallica
<i>sens</i>	sensibile
<i>sper</i>	sperimentale
<i>SUP</i>	superiore

Abbreviazioni

BDF	Backward Differentiation Formula
EHC	Effective Heat Capacity – Capacità Effettiva
PCM	Phase Change Material – Materiale a Cambiamento di Fase

1 Descrizione delle attività svolte

Di seguito sono descritte nel dettaglio le attività svolte nella seconda annualità dell'Accordo di Programma. Il lavoro di questo periodo è stato articolato in tre macrofasi, finalizzate allo sviluppo dei modelli computazionali, all'individuazione ed implementazione di due applicativi rappresentanti i sistemi di accumulo del freddo con solo PCM e con PCM e schiuma metallica, e alla relativa validazione sperimentale.

- I. Le attività del primo periodo hanno riguardato lo sviluppo dei modelli di simulazione relativi ai sistemi di accumulo del freddo a PCM e di accumulo del freddo con sistema combinato PCM – schiuma metallica. I modelli utilizzati per entrambe le applicazioni, sono stati scelti alla luce di quanto emerso dall'analisi condotta nella precedente annualità, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione tra ENEA e DII, relativo ai modelli e ai metodi utilizzati per la modellazione dei sistemi di accumulo a calore latente e del passaggio di fase. Per entrambi i sistemi di accumulo considerati, sono stati sviluppati due modelli: (i) sola conduzione e (ii) conduzione e convezione. Data la complessità dei casi in esame, le simulazioni numeriche non stazionarie del campo di temperature, di quello delle frazioni liquide, del campo di velocità nella frazione liquida, e dell'interfaccia solido-liquido all'interno del materiale a cambiamento di fase contenuto nel modulo di accumulo, in assenza e in presenza della schiuma metallica sono state effettuate mediante due modelli tridimensionali (3D). Le attività della fase I sono state, quindi, così suddivise:
 - a. sviluppo del modello non stazionario atto a simulare lo scambio termico del modulo cilindrico contenente solo un materiale a cambiamento di fase;
 - b. sviluppo del modello non stazionario atto a simulare lo scambio termico del modulo cilindrico contenente una schiuma metallica di alluminio con immerso un PCM.
- II. L'attività del secondo periodo ha riguardato la realizzazione in ambiente Comsol Multiphysics di due applicativi di accumulo del freddo differenti, uno per il caso di solo PCM all'interno del modulo cilindrico e uno per il caso di sistema combinato PCM – schiuma metallica, definiti in base ai dati sperimentali forniti da ENEA. In base a questi ultimi, sono state definite le condizioni iniziali e le condizioni al contorno del sistema di equazioni e, quindi, ai fini del calcolo del flusso termico attraverso le pareti esterne laterale e superiore del modulo cilindrico, sono state ricercate le correlazioni empiriche più idonee al fine di ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra i risultati numerici e i dati sperimentali. Le attività della fase II sono state, quindi, così suddivise:
 - a. realizzazione dell'applicativo relativo al sistema di accumulo del freddo con solo PCM;
 - b. realizzazione dell'applicativo relativo al sistema di accumulo combinato PCM – schiuma metallica;
 - c. analisi dei risultati.
- III. L'ultima fase ha previsto il confronto dei dati numerici ottenuti nelle fasi precedenti con quelli sperimentali forniti da ENEA, al fine della validazione dei modelli sviluppati.

2 Attività svolte nella Fase I

Le attività della prima fase hanno riguardato lo sviluppo dei modelli necessari alla simulazione dinamica dei due sistemi di accumulo del freddo in esame. In entrambi i casi, l'unità di accumulo simulata è stata considerata composta da un modulo cilindrico di alluminio contenente un materiale a cambiamento di fase che rilascia/assorbe calore per effetto dell'interazione con l'ambiente esterno. Si è proceduto dapprima con lo sviluppo del modello relativo al caso di unità di accumulo composta da solo PCM, e successivamente è stato sviluppato il modello relativo al caso di sistema combinato PCM – schiuma metallica. Per entrambi i sistemi, inoltre, sono stati sviluppati sia il modello puramente conduttivo, che il modello conduttivo – convettivo, al fine di effettuare un confronto tra tutti i casi analizzati. La figura 1 mostra il modello computazionale 3D del prototipo di accumulo considerato.

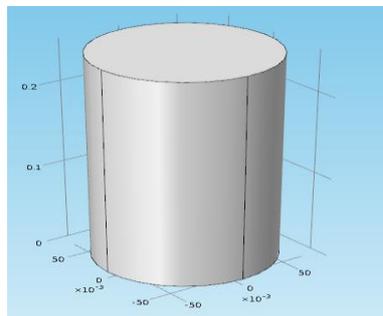


Figura 1. Modello computazionale del prototipo di accumulo considerato.

Di seguito, nel paragrafo 2.1 è riportata la modellazione del caso di unità di accumulo composta da solo PCM, mentre nel paragrafo 2.2 è riportata la modellazione del caso di unità di accumulo composta dal sistema combinato PCM – schiuma metallica.

2.1 *Modellazione di un modulo cilindrico per accumulo termico contenente un materiale a cambiamento di fase*

Nei paragrafi che seguono sono riportati i modelli sviluppati nel caso di unità di accumulo composta da solo PCM. Nel dettaglio, il paragrafo 2.1.1 riporta il modello puramente conduttivo, mentre il paragrafo 2.1.2 riporta il modello con conduzione e convezione. Infine, il paragrafo 2.1.3 mostra il calcolo delle proprietà termofisiche del materiale a cambiamento di fase in funzione della frazione solida/liquida.

2.1.1 *Modello puramente conduttivo*

Al fine di valutare i campi di temperatura e l'energia termica accumulata, è necessario risolvere l'equazione di conservazione dell'energia per il materiale a cambiamento di fase. In generale, per effetto dei gradienti di temperatura a cui è soggetto il materiale, al suo interno, possono instaurarsi dei moti convettivi nella parte fluida, considerati trascurabili nel modello puramente conduttivo.

Per tale motivo, le ipotesi formulate sono state le seguenti:

- (i) materiale di accumulo omogeneo ed isotropo;
- (ii) temperatura iniziale del PCM uniforme;

- (iii) moti convettivi interni al PCM trascurabili;
- (iv) passaggio di fase all'interno di un range di temperatura fissato.

La modellazione del PCM è stata, quindi, effettuata considerando la seguente equazione della conduzione (1), valida sia per la fase solida che per quella liquida.

$$\left(\rho c_p\right)_{PCM} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(k_{PCM} \nabla T\right) \quad (1)$$

dove, $(\rho c_p)_{PCM}$ è il prodotto tra la densità e il calore specifico a pressione costante del materiale, t il tempo, T la temperatura, e k_{PCM} la conducibilità termica del materiale di accumulo.

2.1.2 Modello con conduzione e convezione

Diversamente a quanto fatto nel modello puramente conduttivo, nel modello convettivo non è possibile trascurare i moti che si instaurano internamente al materiale per effetto del passaggio di fase. In questo caso, infatti, le ipotesi formulate sono state le seguenti:

- (i) materiale di accumulo omogeneo ed isotropo;
- (ii) flusso laminare;
- (iii) temperatura iniziale del PCM uniforme;
- (iv) passaggio di fase all'interno di un range di temperatura fissato.

La modellazione, quindi, è stata svolta mediante l'accoppiamento dell'equazione di conservazione dell'energia (2), alle equazioni di conservazione della massa (3) e della quantità di moto(4).

$$\left(\rho c_p\right)_{PCM} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T\right) = \nabla \cdot \left(k_{PCM} \nabla T\right) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (3)$$

$$\rho_{PCM} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \nabla \cdot \bar{v}\right) = -\nabla p + \mu_{PCM} \nabla^2 \bar{v} + \bar{F} \quad (4)$$

in cui, $(\rho c_p)_{PCM}$ è il prodotto tra la densità e il calore specifico a pressione costante del PCM, t il tempo, T la temperatura, k_{PCM} la conducibilità termica del PCM, p la pressione e μ_{PCM} la viscosità dinamica.

Al fine di includere l'effetto di galleggiamento e ridurre la complessità di risoluzione delle equazioni di Navier–Stokes, nell'equazione di conservazione della quantità di moto (4) è stato aggiunto il termine di Boussinesq (\bar{F}), valutato secondo l'equazione (5).

$$\bar{F} = \rho_{PCM} \bar{g} \beta (T - T_{ref}) \quad (5)$$

in cui, g è l'accelerazione gravitazionale, β la comprimibilità isobarica e T_{ref} la temperatura di riferimento, fissata uguale alla temperatura di fusione del PCM (T_M).

2.1.3 Calcolo delle proprietà termofisiche del materiale a cambiamento di fase

Per entrambi i modelli sviluppati, nel caso di unità di accumulo con solo PCM, le proprietà termofisiche del materiale durante il passaggio di fase sono state considerate variabili in funzione della frazione solida/liquida del materiale (φ). Per molti PCM, infatti, il passaggio di fase avviene in un intervallo di temperatura (ΔT_M) finito, al cui interno coesistono fase liquida e fase solida. Tale regione è comunemente definita *mushy zone*, e la frazione fusa φ ne quantifica la percentuale di materiale in fase liquida contenuta all'interno. La massima temperatura, alla quale il materiale si trova completamente in fase solida, è detta temperatura del solido (T_S); la più bassa temperatura alla quale il materiale si trova completamente in fase liquida, è detta temperatura del liquido (T_L). Queste sono state, quindi, valutate in funzione della temperatura di fusione del PCM, e del range di passaggio di fase dello stesso, rispettivamente secondo le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} T_S &= T_M - \Delta T_M \\ T_L &= T_M + \Delta T_M \end{aligned} \quad (6)$$

La frazione solida/liquida del materiale è stata, quindi, calcolata in funzione di T_S e T_L , o equivalentemente in funzione di T_M e ΔT_M , nel seguente modo:

$$\varphi = \frac{T - T_S}{T_L - T_S} = \frac{T - T_M + \Delta T_M}{2\Delta T_M} = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_S \\ 0-1 & \text{for } T_S \leq T \leq T_L \\ 1 & \text{for } T > T_L \end{cases} \quad (7)$$

Al fine di ridurre i problemi legati alla discontinuità di φ , questa è stata smussata mediante una funzione *Heaviside* alle derivate seconde continue (*flc2hs* del software Comsol Multiphysics), nel seguente modo:

$$\varphi_F = \varphi_S + (\varphi_L - \varphi_S) * flc2hs((T - T_M), \Delta T_M) \quad (8)$$

in cui φ_S è φ in fase solida, quindi uguale a 0, e φ_L è φ in fase liquida, quindi uguale a 1. La figura 2 mostra l'andamento di φ_F in funzione della temperatura, e del ΔT_M .

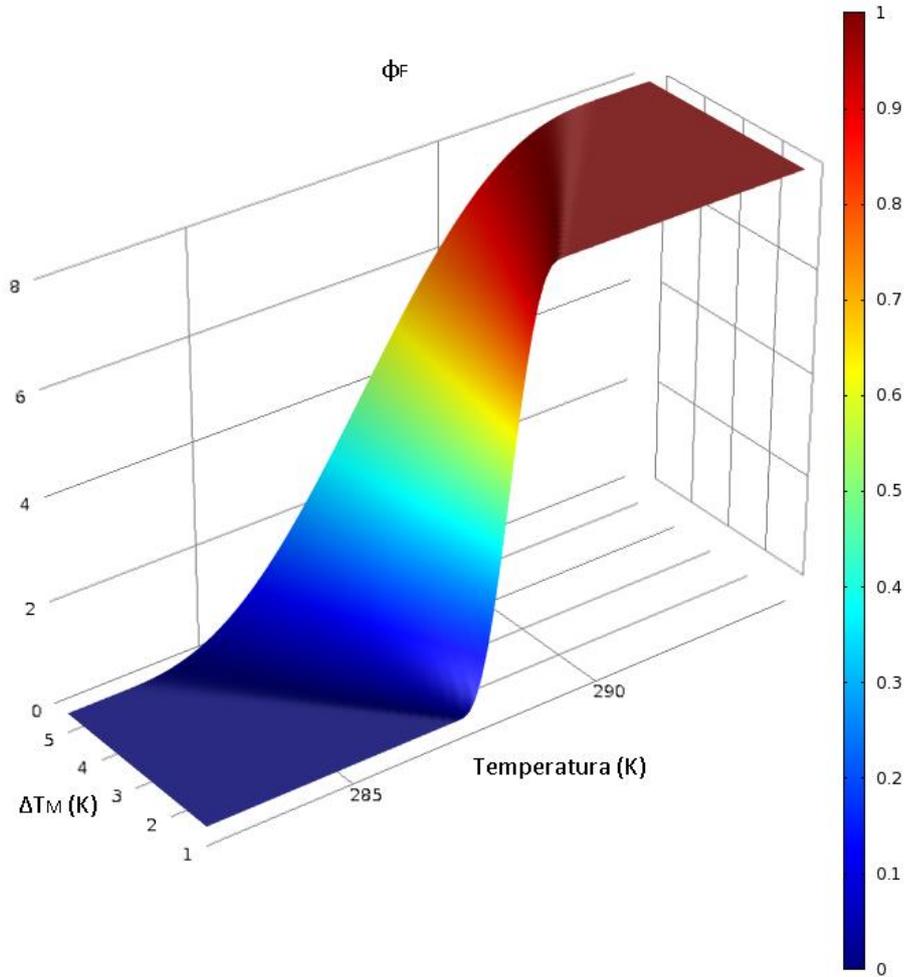


Figura 2. Andamento di ϕ_F al variare della temperatura e del ΔT_M .

La conducibilità termica (k_{PCM}) e la densità (ρ_{PCM}) del PCM sono state calcolate come riportato nelle equazioni (9):

$$\begin{aligned} k_{PCM} &= k_S + \phi_F(T) \cdot (k_L - k_S) \\ \rho_{PCM} &= \rho_S + \phi_F(T) \cdot (\rho_L - \rho_S) \end{aligned} \quad (9)$$

dove k_S e k_L sono rispettivamente la conducibilità termica del PCM solido e del PCM liquido, e ρ_S e ρ_L sono rispettivamente la densità del PCM solido e del PCM liquido.

Al fine di tener conto del passaggio di fase, e quindi di includere il calore latente richiesto per il passaggio di fase del PCM, è stato utilizzato il metodo della capacità effettiva (EHC – *Effective Heat Capacity*), secondo il quale il calore specifico del materiale (C_p) dipende dai calori specifici del PCM nelle fasi liquida e solida e dal calore latente di solidificazione/fusione (L_f) del materiale stesso. Il calore specifico è stato, quindi, valutato come segue:

$$C_p = \begin{cases} C_{p,S} & \text{per } T < T_S \\ C_{p,EFF} & \text{per } T_S \leq T \leq T_L \\ C_{p,L} & \text{per } T > T_L \end{cases} \quad (10)$$

dove $C_{p,EFF}$ è stata valutata in accordo all'equazione (11):

$$C_{p,EFF} = \frac{C_{p,S} + C_{p,L}}{2} + \frac{L_f}{T_L - T_S} \quad (11)$$

in cui $C_{p,S}$ è il calore specifico della frazione solida e $C_{p,L}$ è il calore specifico della frazione liquida.

Anche nel caso di C_p , per ridurre i problemi legati alle discontinuità espresse nell'equazione (10), è stata utilizzata un'espressione di smussamento [1]:

$$C_{p,PCM} = C_{p,S}(1 - \varphi_F) + C_{p,L}\varphi_F + L_f \frac{d\varphi_F}{dT} \quad (12)$$

in cui φ_F è calcolata come riportato nell'equazione (8). La figura 3 riporta l'andamento di $C_{p,PCM}$ in funzione della temperatura, e del ΔT_M .

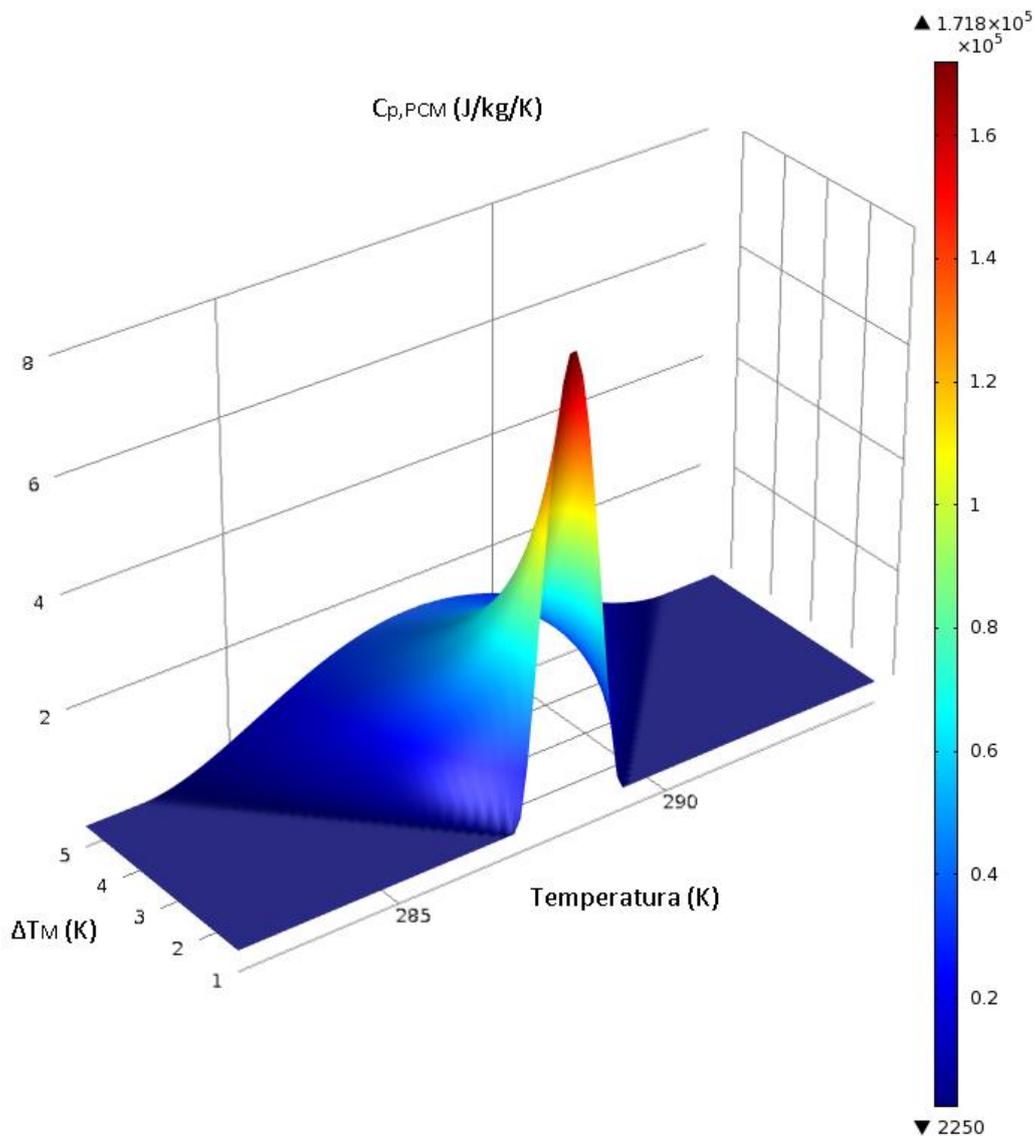


Figura 3. Andamento di $C_{p,PCM}$ al variare della temperatura e del ΔT_M .

Infine, solo nel caso di modello conduttivo – convettivo, al fine di imporre una velocità nulla nella regione solida, è stato considerato che la viscosità dinamica del solido fosse infinita. Nel dettaglio, la viscosità è stata valutata nel seguente modo:

$$\mu_{PCM} = \mu_L(1+S) \quad (13)$$

in cui μ_L è la viscosità dinamica del PCM liquido, e S è un gruppo adimensionale, dato da:

$$S = C \frac{(1-\varphi_F)^2}{\varphi_F^3 + \delta} \quad (14)$$

dove δ è una costante molto piccola, di solito uguale a 10^{-3} , e C è una costante che definisce la transizione di velocità nella *mushy zone*, ed è solitamente compresa tra 10^3 e 10^7 . All'aumentare di C , la viscosità dinamica del solido aumenta e tanto più rapidamente quanto maggiore è il valore di C .

2.2 Modellazione di un modulo cilindrico per accumulo termico contenente un materiale a cambiamento di fase in presenza di una schiuma metallica

I paragrafi che seguono riportano i modelli sviluppati nel caso di unità di accumulo composta dal sistema combinato PCM – schiuma metallica. Nel dettaglio, il paragrafo 2.2.1 riporta il modello conduttivo, mentre il paragrafo 2.2.2 riporta il modello con conduzione e convezione.

2.2.1 Modello puramente conduttivo

La modellazione del sistema combinato PCM – schiuma metallica, nel caso di sola conduzione, è del tutto analoga a quella del caso con solo PCM, ovvero può essere effettuata mediante la risoluzione dell'equazione di conservazione dell'energia (1), con le medesime ipotesi. Ovviamente, in tal caso, l'equazione (1) è stata modificata come segue:

$$(\rho c_p)_{PCM-schiuma} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{PCM-schiuma} \nabla T) \quad (15)$$

in cui, $(\rho c_p)_{PCM-schiuma}$ e $k_{PCM-schiuma}$ sono rispettivamente il prodotto tra la densità e il calore specifico a pressione costante, e la conducibilità termica dell'insieme PCM - schiuma.

Al fine del calcolo delle proprietà termofisiche del sistema PCM - schiuma metallica, quest'ultimo è stato considerato come un mezzo poroso isotropo e omogeneo. Per tale motivo, le sue proprietà sono state mediate sul dominio computazionale in funzione delle proprietà del PCM, delle proprietà della schiuma, e della sua porosità, nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \rho_{PCM-schiuma} &= \varepsilon \rho_{PCM} + (1-\varepsilon) \rho_{schiuma} \\ k_{PCM-schiuma} &= \varepsilon k_{PCM} + \frac{(1-\varepsilon)}{3} k_{schiuma} \\ C_{p,PCM-schiuma} &= \varepsilon C_{p,PCM} + (1-\varepsilon) C_{p,schiuma} \end{aligned} \quad (16)$$

in cui ε è la porosità della schiuma, k_{PCM} , ρ_{PCM} , e $C_{p,PCM}$ sono rispettivamente la conducibilità termica, la densità ed il calore specifico del PCM, valutati secondo le equazioni (9) e (10-12), $\rho_{schiuma}$, $k_{schiuma}$, e

$C_{p,schiuma}$ sono rispettivamente la densità, la conducibilità termica e il calore specifico della schiuma metallica.

2.2.2 Modello con conduzione e convezione

Il modello conduttivo – convettivo, nel caso di sistema composto da PCM e schiuma metallica, è stato implementato usando la *tecnica della media volumetrica*. Le variabili risolte nelle equazioni di bilancio sono state mediate su un elemento di volume rappresentativo, che può essere definito come il più piccolo volume di materiale poroso per cui l'assunzione del continuo è valida. Il sistema PCM – schiuma metallica è stato, quindi, ridotto ad un mezzo poroso isotropo e omogeneo, e sono stati risolti due campi di temperatura, uno per la schiuma metallica e uno per il PCM, usando il modello del *non equilibrio termico locale*. In tal caso, le assunzioni formulate sono state le seguenti:

- (i) il PCM è modellato usando il metodo della capacità effettiva come mostrato nel paragrafo 2.1.3;
- (ii) le proprietà termofisiche e la viscosità dinamica del PCM sono valutate come nel paragrafo 2.1.3;
- (iii) il PCM liquido è considerato incompressibile e newtoniano.

La modellazione è stata effettuata con le seguenti equazioni:

$$\frac{\partial \langle \rho_{PCM} \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \rho \bar{v} \rangle_{PCM} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\rho_{PCM}}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\langle \bar{v} \rangle \langle \bar{v} \rangle) \right) = -\nabla \langle p \rangle + \frac{\mu_{PCM}}{\varepsilon} \nabla \cdot (\nabla \langle \bar{v} \rangle) + \bar{F} - \frac{\mu_{PCM}}{\bar{K}} \langle \bar{v} \rangle - \frac{\rho_{PCM} C_F}{\sqrt{\bar{K}}} |\langle \bar{v} \rangle| \langle \bar{v} \rangle \quad (18)$$

$$\varepsilon (\rho C_p)_{PCM} \left(\frac{\partial \langle T \rangle_{PCM}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \langle T \rangle_{PCM} \right) = h_v (\langle T \rangle_{schiuma} - \langle T \rangle_{PCM}) + k_{eff,PCM} \nabla^2 \langle T \rangle_{PCM} \quad (19)$$

$$(1-\varepsilon) (\rho C_p)_{schiuma} \frac{\partial \langle T \rangle_{schiuma}}{\partial t} + k_{eff,schiuma} \nabla^2 \langle T \rangle_{schiuma} = -h_v (\langle T \rangle_{schiuma} - \langle T \rangle_{PCM}) \quad (20)$$

in cui la (17) è l'equazione di continuità, e la (18) l'equazione di conservazione della quantità di moto. In quest'ultima, \bar{F} è il termine di Boussinesq, valutato secondo l'equazione (5), in cui T_{ref} è stata fissata uguale alla temperatura di fusione del PCM, e gli ultimi due termini rappresentano i termini di Darcy e Forchheimer, in cui \bar{K} è il coefficiente di permeabilità, e C_F è il coefficiente di Forchheimer. Nelle equazioni di bilancio (19) e (20), $k_{eff,PCM}$ e $k_{eff,schiuma}$ sono le conducibilità termiche effettive del PCM e della schiuma metallica calcolate, in funzione della porosità della schiuma, secondo le equazioni (21), e h_v è il coefficiente di scambio termico volumetrico, definito secondo l'equazione (22).

$$k_{eff,PCM} = \varepsilon k_{PCM} \quad (21)$$

$$k_{eff,schiuma} = (1-\varepsilon) \frac{k_{schiuma}}{3}$$

$$h_v = h_{sf} a_s \quad (22)$$

In quest'ultima, h_{sf} è il coefficiente di scambio termico all'interfaccia PCM – schiuma metallica, e a_s rappresenta l'area di superficie specifica della schiuma metallica.

3 Attività svolte nella Fase II

Le attività del secondo periodo hanno riguardato la realizzazione in ambiente COMSOL Multiphysics di due applicativi di accumulo del freddo differenti, uno per il caso di solo PCM all'interno del modulo cilindrico e uno per il caso di sistema combinato PCM – schiuma metallica. Tali applicativi sono stati realizzati mediante l'implementazione dei modelli di simulazione sviluppati nel corso della Fase I delle attività, quindi, ciascun applicativo è stato particolarizzato per il caso di modello puramente conduttivo e per il caso di modello con conduzione e convezione.

I dati di input necessari all'implementazione dei due casi sono stati, in parte, forniti da ENEA in base alle prove sperimentali svolte, mentre gli altri fattori di input sono stati definiti in seguito ad opportune analisi di letteratura e di sensitività mirate all'individuazione dei valori più idonei alla descrizione dei fenomeni in gioco, e quindi alla sovrapposizione dei risultati numerici con quelli sperimentali.

I parametri di prestazione analizzati, ovvero i fattori di output sono stati: la frazione solida/liquida, le variazioni di temperatura dei moduli di accumulo durante le fasi di caricamento e scaricamento, il tempo di caricamento e di scaricamento dei moduli, e l'energia termica accumulata e rilasciata.

Di seguito, il paragrafo 3.1 riporta i dati di input utilizzati per l'implementazione dei modelli, mentre il paragrafo 3.2 mostra le condizioni iniziali e le condizioni al contorno utilizzate per entrambi i sistemi e per ciascun modello sviluppato. Il paragrafo 3.3 riporta l'applicativo relativo al caso di sistema di accumulo con solo PCM, mentre il paragrafo 3.4 riporta l'applicativo relativo al caso di sistema di accumulo con sistema combinato PCM – schiuma metallica. Infine, nel paragrafo 3.5 sono riportati e discussi i principali risultati delle simulazioni.

3.1 Dati di input

I dati di input forniti da ENEA sono stati:

- (i) proprietà del materiale a cambiamento di fase;
- (ii) proprietà della schiuma metallica;
- (iii) quantità del materiale a cambiamento di fase utilizzato;
- (iv) parametri geometrici della schiuma metallica;
- (v) parametri geometrici dei moduli di accumulo;
- (vi) valori misurati della temperatura ambiente (T_{amb});
- (vii) valori della temperatura per il settaggio delle condizioni iniziali, e delle condizioni al contorno;
- (viii) tempi di simulazione.

Gli altri fattori di input sono stati:

- (i) conduttanze convettive relative alla superficie superiore del modulo (h_{SUP});
- (ii) conduttanze convettive relative alla superficie laterale del modulo (h_{LAT});
- (iii) permeabilità della schiuma (K);

- (iv) coefficiente di Forchheimer (C_F);
- (v) coefficiente di scambio termico volumetrico (h_v);
- (vi) parametri temporali.

3.2 Condizioni iniziali e condizioni al contorno

Per entrambi i sistemi, sia nel caso di modello puramente conduttivo, che di modello con conduzione e convezione, la temperatura all'istante iniziale ($t=0$) è stata considerata costante sull'intero dominio computazionale. Nei modelli conduttivi – convettivi è stata, inoltre, impostata una condizione iniziale di fluido fermo in tutto il dominio computazionale.

Le condizioni iniziali sono state settate come segue:

$$\begin{aligned} \text{Modello puramente conduttivo } (t=0): \{ T_{iniz} = T_{amb} \\ \text{Modello conduttivo – convettivo } (t=0): \begin{cases} T_{iniz} = T_{amb} \\ \bar{v} = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

dove T_{amb} è stata misurata in fase sperimentale, ed è compresa tra 20°C e 25°C.

Per entrambi i modelli, le condizioni al contorno in fase di caricamento sono state settate come riportato nelle equazioni (24), mentre quelle relative alla fase di scaricamento, come riportato nelle equazioni (25):

$$(t > 0): \begin{cases} q_{LAT} = h_{LAT,c} (T - T_{cold}) \quad \text{per } r_{mod} = r_{mod,max}, 0 \leq l_{mod} \leq l_{mod,max} \\ q_{SUP} = h_{SUP,c} (T - T_{cold}) \quad \text{per } 0 \leq r_{mod} \leq r_{mod,max}, l_{mod} = l_{mod,max} \\ q_{INF} = 0 \quad \text{per } 0 \leq r_{mod} \leq r_{mod,max}, l_{mod} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$(t > 0): \begin{cases} q_{LAT} = h_{LAT,d} (T - T_{hot}) \quad \text{per } r_{mod} = r_{mod,max}, 0 \leq l_{mod} \leq l_{mod,max} \\ q_{SUP} = h_{SUP,d} (T - T_{hot}) \quad \text{per } 0 \leq r_{mod} \leq r_{mod,max}, l_{mod} = l_{mod,max} \\ q_{INF} = 0 \quad \text{per } 0 \leq r_{mod} \leq r_{mod,max}, l_{mod} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

In tali equazioni, T_{cold} è stata fissata a 7°C; $h_{LAT,c}$ e $h_{SUP,c}$ sono rispettivamente le conduttanze convettive della superficie laterale e superiore del modulo di accumulo, per la fase di caricamento, e $h_{LAT,d}$ e $h_{SUP,d}$ sono rispettivamente le conduttanze convettive della superficie laterale e superiore del modulo di accumulo, per la fase di scaricamento. Queste sono state valutate con le opportune correlazioni al fine di ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra i risultati numerici e i dati sperimentali. La temperatura T_{hot} , nell'equazione (25), è stata considerata variabile tra T_{cold} e 23°C nei primi 3600 s della fase di scaricamento, dopo di che è stata fissata a 23°C, al fine di simulare il reale aumento di temperatura a cui è stato soggetto il modulo di accumulo durante i test sperimentali. Infine, r_{mod} e l_{mod} sono rispettivamente il raggio e l'altezza del modulo di accumulo e $r_{mod,max}$ e $l_{mod,max}$ sono rispettivamente il raggio massimo e l'altezza massima del modulo di accumulo. La figura 4 mostra l'andamento di T_{hot} in funzione del tempo di simulazione.

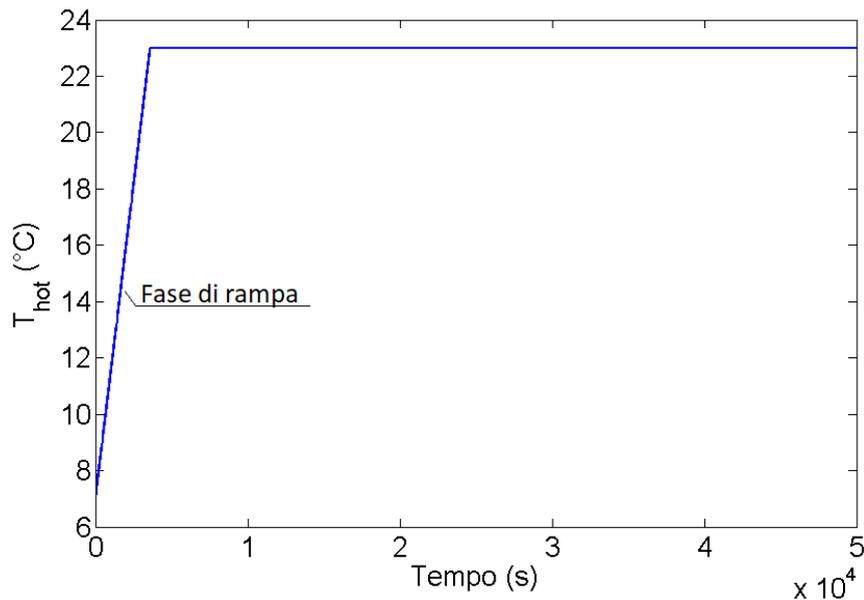


Figura 4. Andamento di T_{hot} per la condizione al contorno.

3.2.1 Calcolo delle conduttanze convettive h_{LAT} e h_{SUP}

Il calcolo delle conduttanze convettive $h_{LAT,c}$ e $h_{SUP,c}$, e $h_{LAT,d}$ e $h_{SUP,d}$, relative rispettivamente alle superfici superiore e laterale dei moduli di accumulo in fase di caricamento e scaricamento, è stato effettuato considerando varie correlazioni presenti in letteratura, al fine di individuare quelle più idonee alla descrizione dei fenomeni in gioco, e, quindi, a garantire la migliore sovrapposizione tra i risultati numerici e quelli sperimentali.

Alla luce di tale analisi, i valori di $h_{SUP,c}$ e $h_{SUP,d}$, sono stati fissati a $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, considerando un tipico valore della conduttanza convettiva in caso di convezione naturale, mentre $h_{LAT,c}$ e $h_{LAT,d}$ sono state fissate a $21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tali valori sono stati valutati utilizzando la seguente correlazione empirica per cilindro verticale soggetto a flusso trasversale in condizioni di convezione forzata [2]:

$$Nu_m = c Re^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^p \quad (26)$$

in cui Nu_m è il numero di *Nusselt*, Pr è il numero di *Prandtl* valutato alla temperatura del flusso e Pr_0 è il numero di *Prandtl* valutato alla temperatura di parete. Il numero di *Reynolds* (Re) è stato calcolato considerando una velocità del flusso pari a 2 m/s , e tutte le proprietà sono state valutate alla temperatura del flusso. In fase di caricamento la temperatura del flusso è stata impostata pari a T_{cold} , mentre in fase di scaricamento a T_{hot} .

3.3 Applicativo di accumulo del freddo con solo PCM

3.3.1 Proprietà del materiale e caratteristiche geometriche del modulo di accumulo

La tabella 1 mostra le proprietà del PCM utilizzato. Le proprietà termofisiche riportate in tabella 1 sono riferite al PCM in fase solida e/o in fase liquida, non tengono cioè conto del passaggio di fase. Le proprietà

termofisiche effettive del materiale sono state, quindi, calcolate a partire dai valori mostrati in tabella, secondo quanto riportato nel paragrafo 2.1.3. L'intervallo di solidificazione/fusione ΔT_M è stato impostato a 1 K.

Le prove sperimentali sono state condotte utilizzando circa 2,4 kg di materiale a cambiamento di fase, introdotto allo stato liquido all'interno di un modulo cilindrico di raggio ($r_{mod,max}$) uguale a 6,9 cm. Da tali dati è stato, quindi, possibile calcolare l'altezza del modulo di accumulo ($l_{mod,max}$) da simulare, uguale a 18,72 cm.

Tabella 1. Proprietà termofisiche del PCM.

Proprietà	Valori
Temperatura di fusione/solidificazione [T_M (°C)]	15
Calore latente di fusione [L_f (kJ kg ⁻¹)]	182
Conducibilità termica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	
Solido [k_S]	0,25
Liquido [k_L]	0,15
Densità (kg/m ³)	
Solido [ρ_S]	950
Liquido [ρ_L]	860
Calore specifico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	
Solido [$C_{p,S}$]	2250
Liquido [$C_{p,L}$]	2560
Viscosità dinamica [μ_L (Pa s)]	0,004
Coefficiente di espansione termica [β (K ⁻¹)]	$9 \cdot 10^{-4}$

3.3.2 Generazione della *mesh* e settaggio del *solver* di simulazione

Le *mesh* utilizzate sull'intero dominio computazionale e sui bordi, per entrambi i casi, ovvero di unità di accumulo con solo PCM nel caso di utilizzo del modello puramente conduttivo e unità di accumulo con solo PCM nel caso di utilizzo del modello conduttivo - convettivo, sono state del tipo *physics-controlled mesh*. Per ciascuno dei due casi, è stata dimostrata l'indipendenza dei risultati dal numero di elementi della *mesh*, come mostrato successivamente nella sezione 3.5 relativa alla presentazione e discussione dei risultati. La figura 5 mostra il prototipo utilizzato con un esempio di *mesh*.

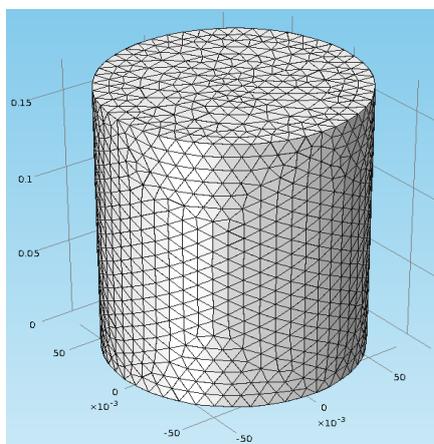


Figura 5. Prototipo di accumulo con *mesh* in evidenza.

Le equazioni su cui si basano i modelli presentati nella sezione 2, relativa alle attività svolte della Fase I, sono state risolte mediante il software di simulazione agli elementi finiti COMSOL Multiphysics. Il metodo di discretizzazione primario agli elementi finiti utilizzato dal COMSOL è il Galerkin, e data la non linearità del problema, dovuto all'utilizzo del metodo EHC (Effective Heat Capacity - metodo della capacità effettiva), come solver di simulazione è stato utilizzato il PARDISO, ovvero un solver diretto per la risoluzione dei problemi transitori non lineari.

Il settaggio dei parametri temporali è stato basato sull'utilizzo della BDF (*Backward Differentiation Formula*), sia per la fase di caricamento che di scaricamento, la quale consente il settaggio di un time step iniziale e di un time step massimo. Essa consente, inoltre, di avere un time step dinamico, valutato dal solver ad ogni iterazione in funzione del valore dell'errore all'iterazione precedente. Nei casi esaminati, sono stati utilizzati un time step iniziale uguale a 10^{-4} s, ed un time step massimo variabile. La scelta di utilizzare un time step massimo non fissato deriva dalla necessità di ottenere una massimizzazione automatica del time step, effettuata dal solver stesso, al fine di ridurre il più possibile i tempi computazionali necessari alla risoluzione del problema.

Il tempo di simulazione è stato fissato in base ai dati sperimentali forniti da ENEA a 472 min in fase di caricamento, e 660 min in fase di rampa e scaricamento, essendo questi i tempi imposti per il caricamento e lo scaricamento dell'unità di accumulo in fase sperimentale.

Le simulazioni sono state effettuate con una workstation Dell Precision T7610, equipaggiata con due processori Intel Xeon E5-2687 w2 e una memoria RAM di 64 GB e 1866 MHz.

3.4 Applicativo di accumulo del freddo con sistema combinato PCM – schiuma metallica

3.4.1 Proprietà della schiuma metallica e caratteristiche geometriche del modulo di accumulo

La tabella 2 mostra le caratteristiche della schiuma di alluminio utilizzata. In questo caso, la geometria del sistema di accumulo è stata definita in funzione dell'altezza della schiuma, in modo tale che essa risultasse completamente immersa nel PCM. La quantità di PCM utilizzato in fase sperimentale è stata la medesima del caso con sistema di accumulo con solo PCM, e le dimensioni del modulo d'accumulo sono state quindi le seguenti: raggio del modulo ($r_{mod,max}$) uguale a 6,9 cm, e altezza ($l_{mod,max}$) uguale a 20 cm, corrispondente ad una quantità di PCM utilizzata pari a circa 2,4 kg.

Tabella 2. Caratteristiche della schiuma.

Proprietà	Valori
Schiuma metallica di Alluminio 6101	
PPI	10
Densità relativa	4,5-6,5

In base ai dati riportati in tabella, è stata calcolata la porosità della schiuma metallica (ϵ), uguale a 0,94, e sono stati, quindi, fissati i valori della permeabilità (K) e del coefficiente di Forchheimer (C_f), rispettivamente uguali a $1,037 \cdot 10^{-7}$ m², e 0,0153, in base a quanto riportato nel riferimento [3]. Il coefficiente di scambio termico volumetrico (h_v), presentato nell'equazione (22), è stato valutato con la seguente relazione:

$$h_v = h_{v,S} + (h_{v,L} - h_{v,S}) * flc2hs((T - T_M), \Delta T_M) \quad (27)$$

in cui $h_{v,S}$ e $h_{v,L}$ sono rispettivamente il coefficiente di scambio termico volumetrico nel caso di scambio termico tra schiuma metallica e PCM solido e il coefficiente di scambio termico volumetrico nel caso di scambio termico tra schiuma metallica e PCM liquido. I valori di $h_{v,S}$ e $h_{v,L}$ sono stati, quindi, settati rispettivamente a $1,61 \cdot 10^5$ e $1,88 \cdot 10^5$ W/m³, in base a quanto riportato nel riferimento [3].

3.4.2 Generazione della *mesh* e settaggio del *solver* di simulazione

Le *mesh* utilizzate sull'intero dominio computazionale e sui bordi, per entrambi i casi, ovvero di unità di accumulo con sistema combinato PCM – schiuma metallica con modello puramente conduttivo e unità di accumulo con sistema combinato PCM - schiuma metallica con modello conduttivo - convettivo, sono state del tipo *physics-controlled mesh*. Anche in questo caso, per entrambi i modelli sviluppati, è stata dimostrata l'indipendenza dei risultati dal numero di elementi della *mesh*, come mostrato nella sezione 3.5 relativa alla presentazione e discussione dei risultati.

Analogamente al caso di unità di accumulo con solo PCM, le equazioni su cui si basano i modelli presentati nella sezione 2, sono state risolte mediante il software di simulazione agli elementi finiti COMSOL Multiphysics. Il metodo di discretizzazione primario agli elementi finiti utilizzato è stato, quindi, il Galerkin, e data la non linearità del problema, dovuto all'utilizzo del metodo EHC (Effective Heat Capacity - metodo della capacità effettiva), come solver di simulazione, anche per questi casi, è stato utilizzato il PARDISO.

Il settaggio dei parametri temporali è stato, quindi, basato sull'utilizzo della BDF (*Backward Differentiation Formula*), sia per la fase di caricamento che di scaricamento. Anche nel caso di sistema combinato PCM – schiuma metallica, sono stati utilizzati un time step iniziale uguale a 10^{-4} s, ed un time step massimo variabile, al fine di ridurre il più possibile i tempi computazionali necessari alla risoluzione del problema.

Il tempo di simulazione è stato fissato in base ai dati sperimentali forniti da ENEA a 495 min in fase di caricamento, e 660 min in fase di rampa e scaricamento, essendo questi i tempi imposti per il caricamento e lo scaricamento dell'unità di accumulo in fase sperimentale.

Anche in tal caso, le simulazioni sono state effettuate con una workstation Dell Precision T7610, equipaggiata con due processori Intel Xeon E5-2687 w2 e una memoria RAM di 64 GB e 1866 MHz.

3.5 Analisi dei risultati

Nei paragrafi che seguono sono riportati i principali risultati delle simulazioni. Nel dettaglio, il paragrafo 3.5.1 riporta l'analisi relativa all'indipendenza dei risultati dal numero di elementi della *mesh* per entrambi i sistemi di accumulo analizzati e per ciascun modello, mentre il paragrafo 3.5.2 introduce i parametri prestazionali analizzati.

Dalla validazione dei modelli sviluppati, mostrata nella sezione 4 del presente report, si evince chiaramente che i modelli puramente conduttivi non sono idonei a descrivere i fenomeni in gioco. Per tale motivo, nel paragrafo 3.5.3, sono riportati solo i principali risultati ottenuti nel caso di utilizzo dei modelli conduttivi – convettivi.

3.5.1 Indipendenza dei risultati dalla *mesh*

Al fine di avere risultati validi, è necessario che questi siano indipendenti dal numero di elementi di cui si compone la *mesh*. È fondamentale, infatti, in problemi come quelli analizzati nel presente report, dimostrare tale indipendenza, mediante simulazione di più casi caratterizzati da *mesh* di diversa densità. A tal proposito, per ciascun caso, sono state svolte tre simulazioni, ognuna caratterizzata da una *mesh* con diverso numero di elementi.

3.5.1.1 Sistema di accumulo con solo PCM: modello puramente conduttivo

Nel caso di sistema di accumulo del freddo composto da solo PCM e utilizzo del modello puramente conduttivo, le tre *mesh* utilizzate sono state di tipo *coarse*, *normal*, e *fine*, corrispondenti, per il particolare sistema in esame, rispettivamente, ad un numero di elementi pari a 1957, 6076, e 11799. L'indipendenza dei risultati dalla *mesh*, in questo caso, è stata ottenuta per un numero di elementi pari a 6076.

3.5.1.2 Sistema di accumulo con solo PCM: modello conduttivo - convettivo

Nel caso di sistema di accumulo del freddo composto da solo PCM e utilizzo del modello conduttivo - convettivo, sono state utilizzate *mesh* differenti per le fasi di caricamento e scaricamento del materiale. Nel dettaglio, le tre *mesh* utilizzate, in fase di caricamento, sono state di tipo *extra coarse*, *coarser*, e *coarse*, corrispondenti, per il particolare sistema in esame, rispettivamente, ad un numero di elementi pari a 5550, 11143, e 31216. Per tale fase, l'indipendenza dei risultati dalla *mesh* è stata ottenuta per un numero di elementi pari a 11143. A causa dei problemi di instabilità riscontrati in fase di scaricamento, dovuti essenzialmente agli elevati moti convettivi instauratisi nel PCM in fase di fusione, l'unica *mesh* con cui è stato possibile raggiungere la convergenza è stata di tipo *extremely coarse*, caratterizzata, nel presente caso, da 2355 elementi.

3.5.1.3 Sistema di accumulo con PCM e schiuma metallica: modello puramente conduttivo

Nel caso di sistema di accumulo del freddo composto da PCM e schiuma metallica e utilizzo del modello puramente conduttivo, le tre *mesh* utilizzate sono state di tipo *normal*, *fine*, e *finer*, corrispondenti, per il particolare sistema in esame, rispettivamente, ad un numero di elementi pari a 6076, 11799, e 37185. L'indipendenza dei risultati dalla *mesh*, in questo caso, è stata ottenuta per un numero di elementi pari a 11799.

3.5.1.4 Sistema di accumulo con PCM e schiuma metallica: modello conduttivo - convettivo

Nel caso di sistema di accumulo del freddo composto da PCM e schiuma metallica e utilizzo del modello conduttivo - convettivo, le tre *mesh* utilizzate sono state di tipo *extra coarse*, *coarser*, e *coarse*, corrispondenti, per il particolare sistema in esame, rispettivamente, ad un numero di elementi pari a 6413, 13482 e 35975. L'indipendenza dei risultati dalla *mesh*, in questo caso, è stata ottenuta per un numero di elementi pari a 13482.

3.5.2 Parametri di prestazione

I parametri di prestazione analizzati sono stati la frazione solida/liquida del materiale dopo un certo tempo, le variazioni di temperatura dei moduli di accumulo durante le fasi di caricamento e scaricamento, il tempo di caricamento e di scaricamento dei moduli, e l'energia termica accumulata e rilasciata.

Nel presente report, per frazione solida/liquida di PCM dopo un certo tempo si intende la quantità di materiale che dopo un certo periodo ha subito il passaggio di fase: che ha cioè solidificato durante la fase di caricamento, e che si è fuso durante la fase di scaricamento. I tempi di caricamento e scaricamento (t_c e t_d) sono definiti in funzione della variazione di temperatura a cui è soggetto il materiale. Nel dettaglio, la fase di caricamento, nel caso di accumulo del freddo, avviene per effetto dell'abbassamento di temperatura del materiale. Il materiale, quindi, è detto completamente carico quando tutto il PCM ha solidificato, ovvero quando la frazione solida/liquida, indicata con φ , è zero in ogni punto. Viceversa, la fase di scaricamento, nel caso di accumulo del freddo, avviene per effetto dell'aumento di temperatura del materiale. In questo caso, il materiale è detto completamente scarico quando si è completamente fuso, ovvero quando φ è uguale a 1 in ogni punto. Più velocemente avvengono le due fasi, migliore è lo scambio termico dell'unità di accumulo.

L'energia termica accumulata dal materiale durante la fase di caricamento si divide in due frazioni: sensibile e latente. Inizialmente, quando il materiale è in fase liquida, per effetto della riduzione di temperatura cui esso è soggetto, l'aliquota sensibile accumulata ($E_{sens,c}$) è nettamente maggiore rispetto all'aliquota latente ($E_{lat,c}$), la quale inizia ad innalzarsi per effetto del passaggio di fase cui è sottoposto il materiale. Analogamente, accade per la fase di scaricamento: inizialmente, quando il materiale è in fase solida, per effetto dell'aumento di temperatura l'aliquota rilasciata sotto forma di calore sensibile ($E_{sens,d}$) è nettamente superiore rispetto all'aliquota latente ($E_{lat,d}$), che si innalza durante il passaggio di fase. La valutazione dell'energia termica totalmente accumulata (E_c) e rilasciata (E_d), e dei relativi contributi sensibile e latente, è fondamentale al fine della valutazione delle performance di scambio termico delle unità di accumulo, e può essere svolta come segue:

$$\begin{aligned} E_c &= E_{sens,c} + E_{lat,c} = mC_{p,PCM} (T - T_{iniz}) + mL_f \varphi \\ E_d &= E_{sens,c} + E_{lat,c} = mC_{p,PCM} (T_{iniz} - T) + mL_f (1 - \varphi) \end{aligned} \quad (28)$$

3.5.3 Risultati

Di seguito, nel paragrafo 3.5.3.1 sono riportati i risultati delle simulazioni in termini di variazione della temperatura dei moduli di accumulo. Nel paragrafo 3.5.3.2 è riportato l'andamento della frazione solida/liquida del materiale durante le fasi di caricamento e scaricamento, mentre nel paragrafo 3.5.3.3 è riportato l'andamento dell'energia frigorifera accumulata e rilasciata dai due sistemi di accumulo considerati.

3.5.3.1 Variazione di temperatura

La figura 6 mostra la variazione della temperatura media del prototipo di accumulo, valutata come la media volumetrica della temperatura su tutti gli elementi della *mesh*, per entrambi i sistemi di accumulo del freddo analizzati. In entrambi i casi, la temperatura del modulo di accumulo all'istante iniziale è stata fissata in base ai dati ottenuti dalle prove sperimentali, e quindi a 22,6°C per l'unità di accumulo con solo PCM e a 23,2°C per l'unità di accumulo composta da PCM e schiuma metallica. Successivamente, per effetto delle condizioni al contorno, espresse dalle equazioni (24) e (25), per entrambi i moduli si susseguono rispettivamente le fasi di caricamento, rampa e scaricamento.

Dalla figura 6, si evince come entrambi i sistemi di accumulo considerati siano interessati da una rapida riduzione della temperatura fino al raggiungimento del range di fusione ($T_M \pm \Delta T_M$), nel tratto iniziale del caricamento fino a 3000s, istante, in corrispondenza del quale, inizia, quindi, il passaggio di fase del PCM

contenuto all'interno dei moduli. In tale intervallo temporale, si nota come i profili di temperatura, ottenuti nei due casi, presentino una forte sovrapposizione: il meccanismo di scambio termico predominante, in tale intervallo risulta essere, infatti, quello convettivo, ciò implica che l'aggiunta della schiuma metallica, la cui presenza occorre a favorire lo scambio termico conduttivo, non provochi differenze apprezzabili.

Col proseguire del caricamento, il PCM inizia a solidificare, ed il meccanismo di scambio termico predominante inizia ad essere quello conduttivo. In questo range, come risulta chiaramente dall'analisi dei profili di temperatura, la presenza della schiuma, per effetto della maggior conducibilità termica, garantisce che una quantità maggiore di PCM riesca a solidificare, rispetto al caso in cui la stessa è assente.

Terminata la fase di caricamento, lo scaricamento del modulo composto da solo PCM avviene molto più rapidamente rispetto a quello del modulo caratterizzato dalla presenza della schiuma metallica: i moti convettivi che, infatti, si instaurano nel PCM liquido, e che nel caso di presenza della schiuma metallica risultano in parte ostacolati dalla matrice solida della schiuma stessa, sono tali da favorire un più rapido passaggio di fase del materiale.

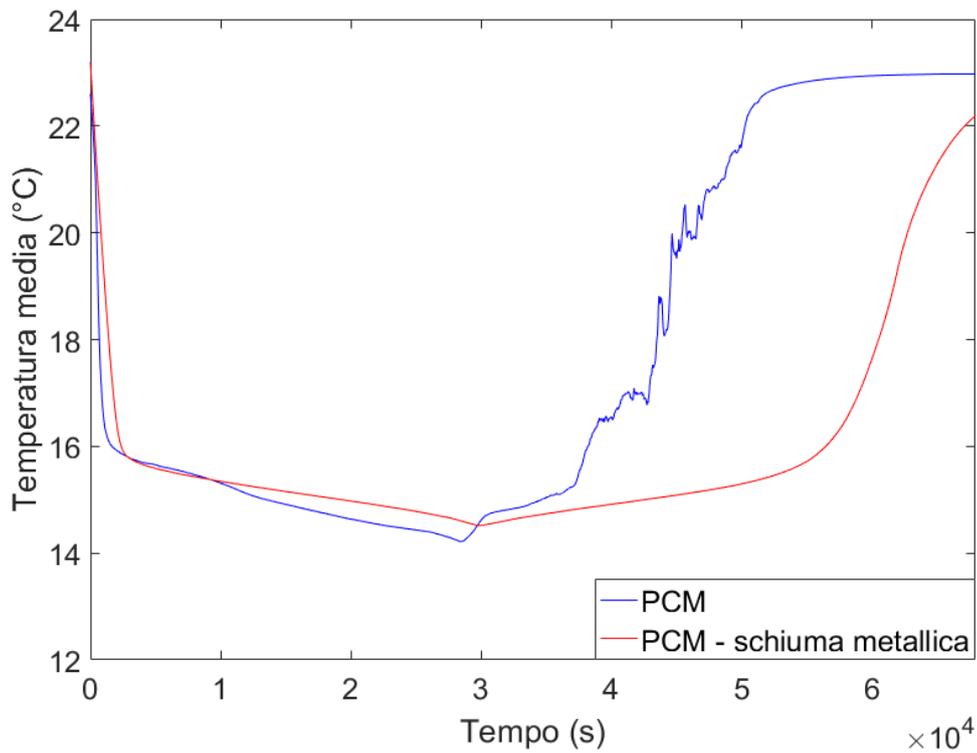


Figura 6. Andamento della temperatura media nei moduli di accumulo.

Le figure 7 e 8 mostrano rispettivamente gli *slice* di temperatura del modulo di accumulo composto da solo PCM e del modulo di accumulo composto da PCM e schiuma metallica per quattro istanti temporali differenti, rappresentativi rispettivamente degli istanti: iniziale (t_{iniz}), di fine caricamento ($t_{fine,c}$), di fine rampa ($t_{fine,r}$), e di fine scaricamento ($t_{fine,d}$). Da tali figure risulta chiaro come il contributo convettivo sia predominante nel caso di sistema di accumulo composto da solo PCM. In tale caso, infatti, i profili di temperatura osservati nei quattro differenti istanti temporali, mostrano un mescolamento maggiore rispetto al caso di presenza della schiuma. Questa, infatti, favorendo lo scambio termico conduttivo, fa sì che i profili di temperatura del modulo siano più omogenei.

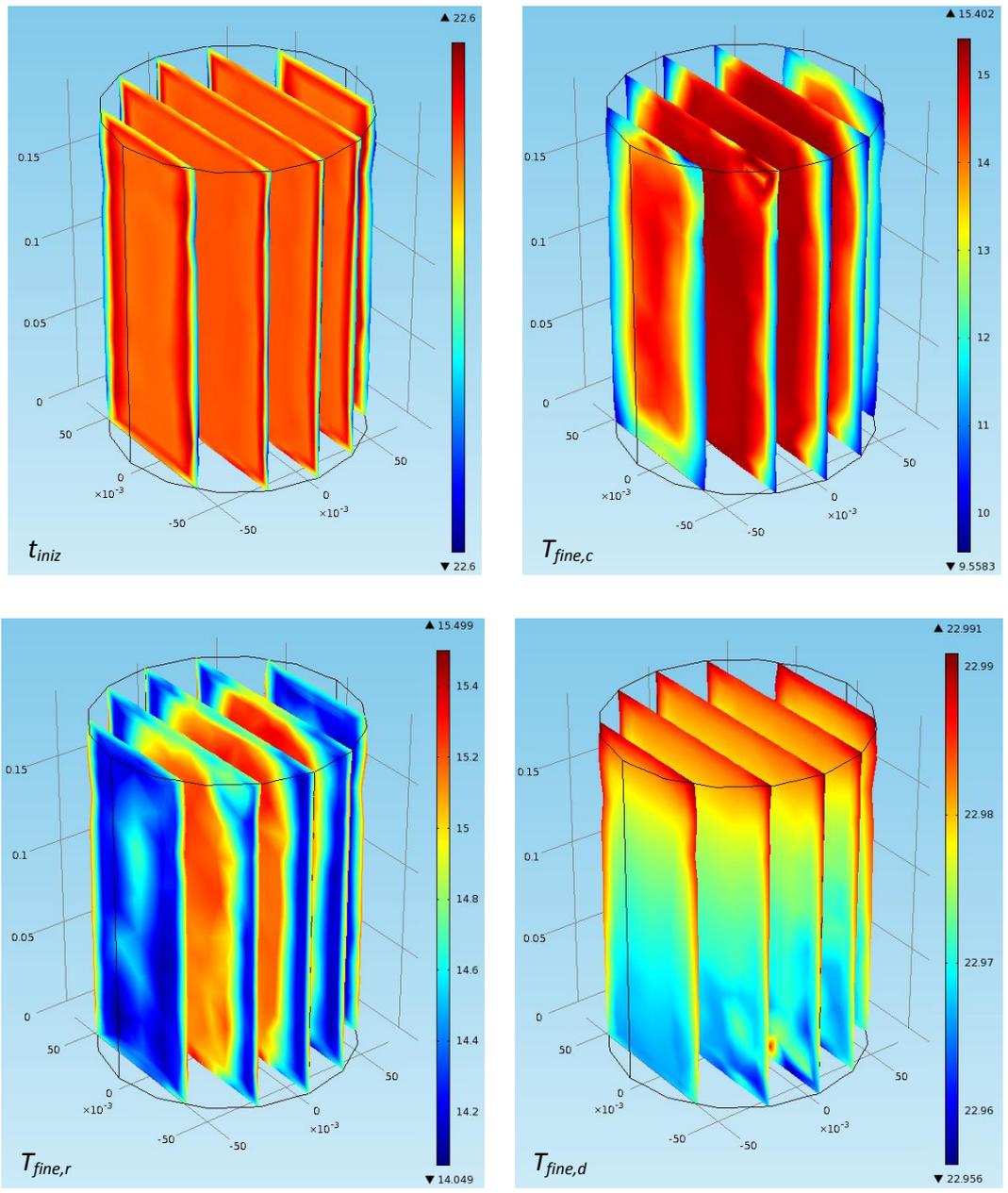


Figura 7. Slice di temperatura del sistema di accumulo composto da solo PCM per quattro differenti istanti temporali.

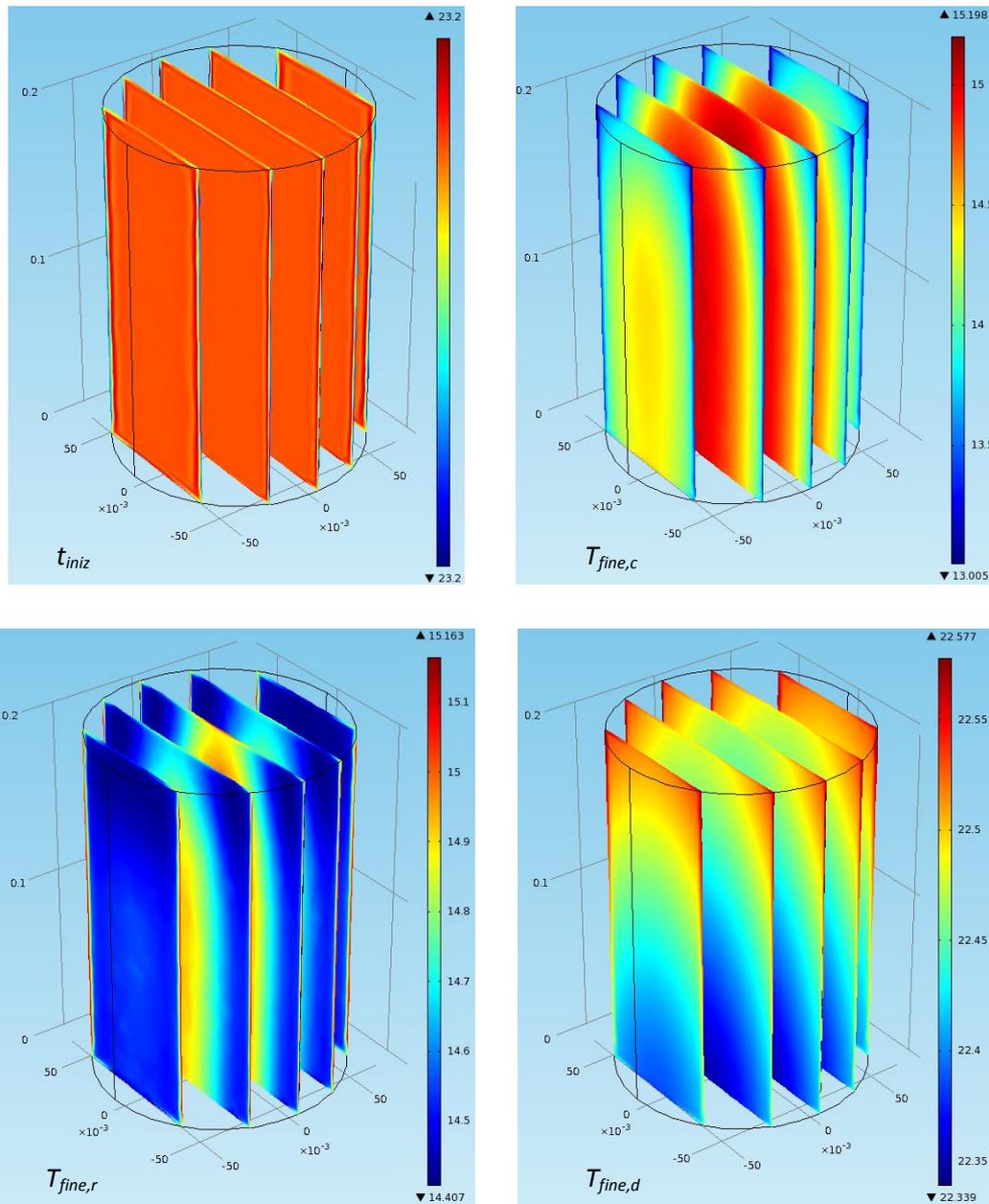


Figura 8. Slice di temperatura del sistema di accumulo composto da PCM e schiuma metallica per quattro differenti istanti temporali.

3.5.3.2 Frazione solida/liquida e tempo di caricamento e scaricamento

La figura 9 mostra la variazione della frazione solida/liquida media del modulo di accumulo, per entrambi i sistemi analizzati. Come per la temperatura media, la frazione solida/liquida media è calcolata come la media volumetrica della frazione solida/liquida su tutti gli elementi della *mesh*. Come già accennato nei paragrafi precedenti, la frazione solida e/o liquida del materiale di accumulo rappresenta un parametro chiave ai fini dell'osservazione e comprensione del passaggio di fase del materiale stesso e della quantificazione del calore latente accumulato e/o rilasciato. Inoltre, la velocità con cui tale parametro varia in funzione della temperatura, fornisce informazioni circa la velocità e, quindi, l'efficacia delle fasi di caricamento e scaricamento del PCM. Dalla figura si nota come, all'istante iniziale il ϕ medio sia uguale a 1. Man mano che la fase di caricamento del materiale prosegue, ϕ decresce fino al suo valore minimo. Nel

caso di sistema composto da solo PCM, tale valore pari a 0,34 è raggiunto in 30000s, mentre nel caso di sistema combinato PCM – schiuma metallica, tale valore pari a 0,20 è raggiunto in 31340s. Ciò indica che, per entrambi i sistemi, alla fine del caricamento effettivo del materiale, questo non risulta completamente solidificato, e che nel caso di sistema composto da PCM e schiuma metallica, una maggior quantità di materiale ha subito il passaggio di fase.

Raggiunto il suo valore minimo, φ inizia ad aumentare in fase di scaricamento, fino a raggiungere il suo valore massimo in 51160s nel caso di unità di accumulo composta da solo PCM e in 61900s nel caso di sistema combinato PCM - schiuma metallica.

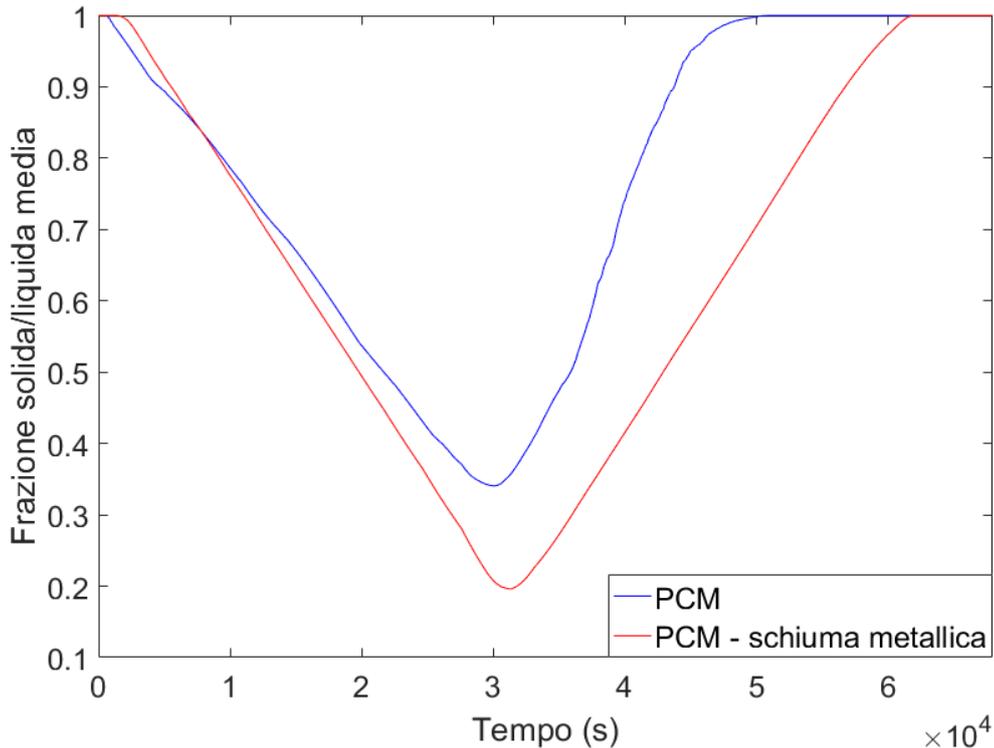


Figura 9. Andamento della frazione solida/liquida media nei moduli di accumulo.

Le figure 10 e 11 mostrano rispettivamente gli *slice* della frazione solida/liquida del modulo di accumulo composto da solo PCM e del modulo di accumulo composto da PCM e schiuma metallica per sei istanti temporali differenti, rappresentativi rispettivamente degli istanti: iniziale (t_{iniz}), di metà caricamento ($t_{metà,c}$), di fine caricamento ($t_{fine,c}$), di fine rampa ($t_{fine,r}$), di metà scaricamento ($t_{metà,d}$), e di fine scaricamento ($t_{fine,d}$). Tali figure mostrano chiaramente come alla fine del caricamento dei moduli, il sistema di accumulo composto dal sistema combinato PCM - schiuma metallica sia caratterizzato da una maggior quantità di materiale in fase solida. Da tali figure, e soprattutto da quella relativa al quinto istante temporale, $t_{metà,d}$, è, inoltre, evidente come la fase di scaricamento del sistema composto da solo PCM avvenga molto più rapidamente rispetto a quello del sistema caratterizzato dalla presenza della schiuma metallica.

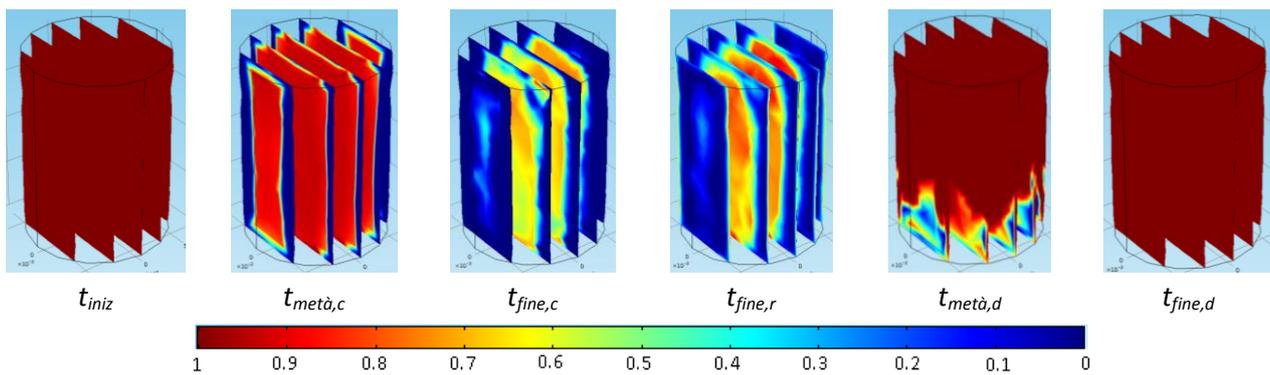


Figura 10. Slice della frazione solida/liquida del sistema di accumulo composto da solo PCM per sei differenti istanti temporali.

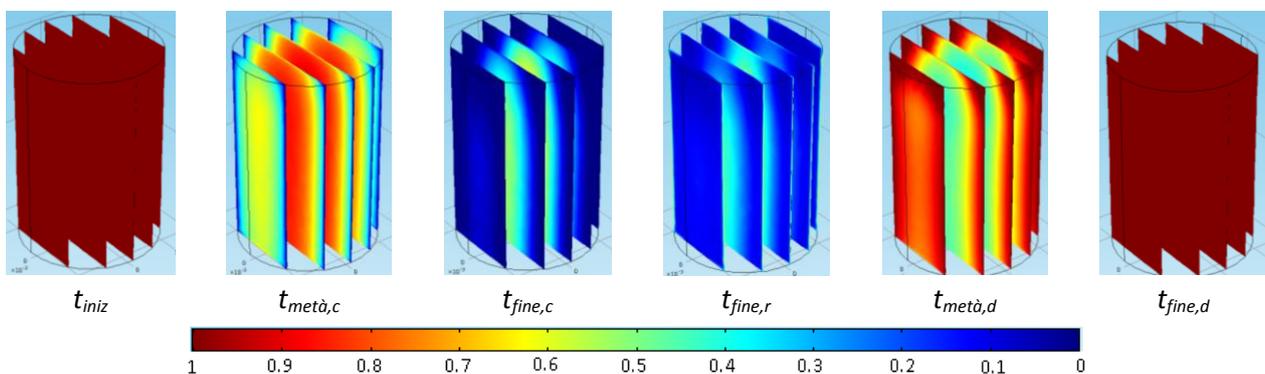


Figura 11. Slice della frazione solida/liquida del sistema di accumulo composto da PCM e schiuma metallica per sei differenti istanti temporali.

3.5.3.3 Energia termica accumulata e rilasciata

La figura 12 mostra l'energia frigorifera accumulata e rilasciata dai due sistemi di accumulo analizzati durante le fasi di caricamento, rampa e scaricamento. In accordo con i profili di temperatura, mostrati in figura 6, nella prima parte del caricamento, i due moduli accumulano energia termica sotto forma di calore sensibile; quando il PCM raggiunge la sua temperatura di fusione, $15 \pm 1^\circ\text{C}$, esso inizia ad accumulare energia termica sotto forma di calore latente. Analogamente durante la fase di scaricamento, per effetto del passaggio di fase da solido a liquido, il PCM, contenuto nei moduli, inizia a rilasciare gran parte dell'energia termica accumulata sotto forma di calore latente. Come già visto nei paragrafi precedenti, lo scaricamento avviene molto più rapidamente nel caso di sistema di accumulo con solo PCM per effetto dei maggiori moti convettivi che interessano il PCM liquido in assenza della schiuma metallica; quando il passaggio di fase è ormai completato, l'ultima parte dello scaricamento avviene per effetto dell'aumento di temperatura del modulo, che quindi rilascia la restante parte di energia termica accumulata sotto forma di calore sensibile. Come ci si attendeva, e come mostrato dalla figura 12, l'energia accumulata e scaricata dal modulo di accumulo composto da PCM e schiuma metallica risulta essere nettamente superiore rispetto all'energia accumulata e scaricata dal sistema composto da solo PCM. Nel dettaglio, infatti, l'energia termica totalmente accumulata, e rilasciata nel caso di sistema di accumulo composto da solo PCM è rispettivamente pari a 274,15 kJ e 157,49 kJ, mentre nel caso di sistema di accumulo composto da PCM e

schiuma metallica, essa è, rispettivamente pari a 502,81 kJ e 458,57 kJ. La tabella 3 riporta i contributi sensibili e latenti relativi all'energia accumulata e rilasciata per entrambi i sistemi di accumulo analizzati.

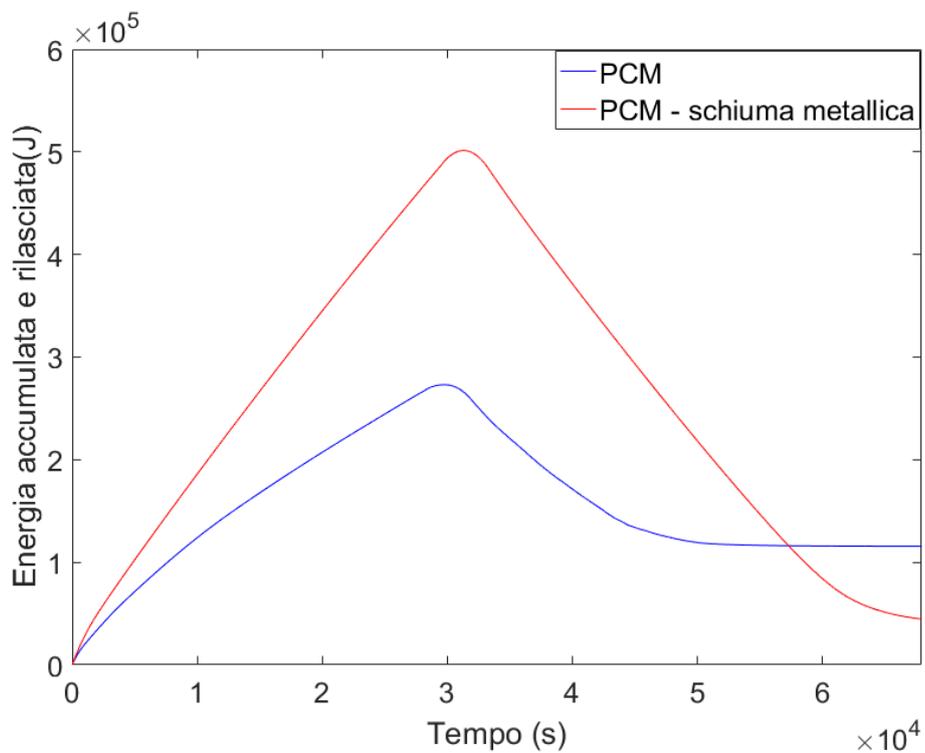


Figura 12. Andamento dell'energia accumulata e rilasciata dai moduli di accumulo.

Tabella 3. Contributi sensibili e latenti dell'energia accumulata e rilasciata dai sistemi di accumulo analizzati.

	Sistema con solo PCM	Sistema con PCM e schiuma metallica
Energia accumulata (kJ)		
Aliquota sensibile	13,07	34,18
Aliquota latente	261,08	468,63
Energia rilasciata (kJ)		
Aliquota sensibile	2,46	24,06
Aliquota latente	155,03	434,51

4 Attività svolte nella Fase III

Le attività della terza fase sono state svolte parallelamente a quelle della seconda, e hanno riguardato la validazione sperimentale dei modelli sviluppati. Come già accennato nei paragrafi precedenti, le prove sperimentali sono state svolte da ENEA, e nel dettaglio dal laboratorio di accumulo termico del Dipartimento Tecnologie Energetiche, Laboratorio Sistemi Fotovoltaici e Smart Grid (DTE-FSE-FOSG), del centro ricerche ENEA di Portici. Tale attività sperimentale, riportata nel Report *“Realizzazione di un impianto indoor per l’analisi sperimentale di un sistema di accumulo del freddo basato sull’impiego di materiale a cambiamento di fase (PCM)”* elaborato da ENEA nell’ambito dell’Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ha permesso la definizione dei fattori di input, introdotti nel paragrafo 3.1, necessari all’implementazione degli applicativi relativi ai due sistemi di accumulo del freddo analizzati, e ha fornito i profili di temperatura necessari alla validazione dei modelli sviluppati.

I profili di temperatura ottenuti mediante i test sperimentali, e mostrati nei paragrafi successivi, mostrano chiaramente che il PCM utilizzato è soggetto al fenomeno del sottoraffreddamento: il reale passaggio di fase del materiale, in fase di solidificazione, infatti, non avviene alla temperatura di passaggio di fase dichiarata, ovvero 15°C, bensì intorno ai 13,7°C. Ad ogni modo, le prove numeriche sono state effettuate considerando i dati del PCM dal *datasheet* della casa produttrice, ovvero, con una temperatura di fusione/solidificazione pari a 15°C.

Le misurazioni di temperatura in fase sperimentale sono state eseguite mediante delle termocoppie di tipo T classe 1, caratterizzate da un’incertezza di misura pari a $\pm 0,5^\circ\text{C}$, ad un’altezza di 9 cm dal fondo dei recipienti. Nel caso di sistema di accumulo composto da solo PCM, tali misurazioni sono state eseguite in più punti, mentre nel caso di sistema caratterizzato da PCM e schiuma metallica, in un unico punto centrale. Ai fini della validazione dei modelli, quindi, per il caso di sistema di accumulo con solo PCM, sono stati plottati i profili di temperatura in due differenti punti del dominio, mentre nel caso di sistema composto da PCM e schiuma metallica nell’unico punto centrale. La figura 13 mostra la posizione delle termocoppie in fase sperimentale per entrambi i sistemi.

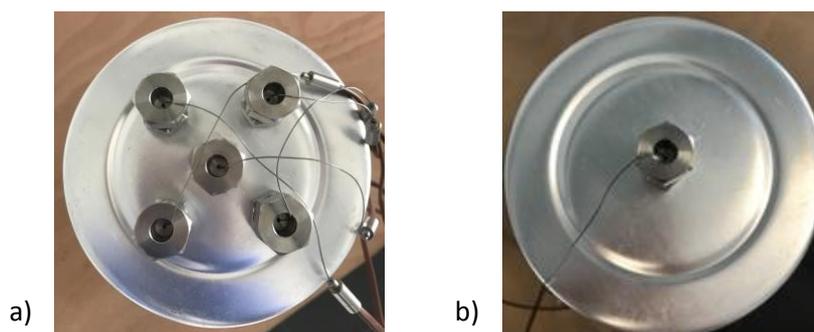


Figura 13. Posizione delle termocoppie in fase sperimentale: a) unità di accumulo con solo PCM; b) unità di accumulo con PCM e schiuma metallica.

Di seguito è riportato il confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici ottenuti per entrambi i sistemi di accumulo del freddo analizzati, sia con i modelli puramente conduttivi, che con i modelli conduttivi – convettivi. Nel dettaglio, il paragrafo 4.1 è relativo al caso di unità di accumulo composta da solo PCM, mentre il paragrafo 4.2 al caso di sistema di accumulo caratterizzato da PCM e schiuma metallica.

4.1 Validazione dei modelli nel caso di sistema di accumulo composto da solo PCM

La figura 14 mostra il confronto tra i risultati sperimentali e i risultati numerici ottenuti nel caso di sistema di accumulo composto da solo PCM, per entrambi i modelli sviluppati, in due differenti punti del dominio. La figura, inoltre, evidenzia le fasi di caricamento, di rampa e di scaricamento a cui è stato sottoposto il PCM durante le prove.

Da tale figura emerge una buona sovrapposizione tra i dati sperimentali e i dati numerici ottenuti nel caso di modello conduttivo – convettivo, soprattutto nella parte iniziale del caricamento. Per tale modello, infatti, la massima sovrapposizione dei risultati è ottenuta fino a circa 2000s, in cui la massima deviazione misurata è di circa 2°C. Durante il passaggio di fase, tra circa 2000s e 50000s, a causa del sottoraffreddamento cui è soggetto il materiale di accumulo, si osserva una deviazione massima di circa 3°C, così come, durante la fase di scaricamento, da 50000s in poi.

Osservando, invece, il profilo di temperatura ottenuto nel caso di utilizzo del modello conduttivo, è evidente come questo non sia idoneo alla descrizione dei fenomeni in gioco. L’omissione dello scambio termico convettivo fa sì che il passaggio di fase del materiale inizi quasi 10000s dopo quello del caso sperimentale e del caso numerico con modello conduttivo - convettivo; inoltre, in fase di scaricamento, la temperatura del materiale inizia ad aumentare solo intorno a 60000s. In tal caso, la massima deviazione misurata di circa 9°C, è ottenuta in fase di caricamento.

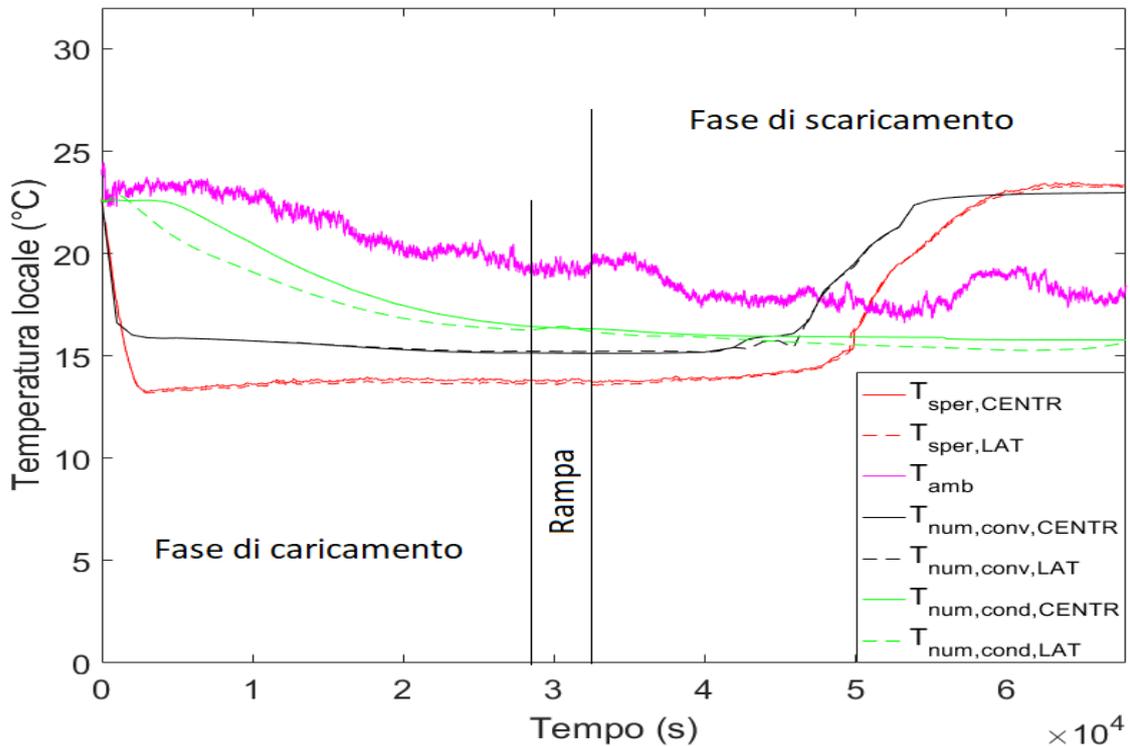


Figura 14. Confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali nel caso di unità di accumulo composta da solo PCM.

4.2 Validazione dei modelli nel caso di sistema di accumulo composto da PCM e schiuma metallica

La figura 15 mostra il confronto tra i risultati sperimentali e i risultati numerici ottenuti nel caso di sistema di accumulo composto da PCM e schiuma metallica, per entrambi i modelli sviluppati. La figura, inoltre, evidenzia le fasi di caricamento, di rampa e di scaricamento a cui è stato sottoposto il PCM durante le prove.

Da tale figura emerge una buona sovrapposizione tra i dati sperimentali e i dati numerici ottenuti nel caso di modello conduttivo – convettivo. Per tale modello, la massima sovrapposizione dei risultati è ottenuta nella parte iniziale del caricamento, fino a circa 2000s, e nella parte finale dello scaricamento, da 47600s in poi; a causa del sottoraffreddamento cui è soggetto il materiale di accumulo, la sovrapposizione dei risultati, durante parte del passaggio di fase del materiale, tra circa 2500s e 47600s, non risulta, invece, completa. La massima deviazione misurata risulta comunque essere molto contenuta, e nel dettaglio pari a circa 1°C nella fase di caricamento fino a 2000s, così come nella fase di scaricamento da 47600s in poi; infine, essa è pari a circa 2°C durante il passaggio di fase nell'intervallo compreso tra 2500 e 47600s.

Osservando, invece, il profilo di temperatura ottenuto nel caso di utilizzo del modello conduttivo, è evidente, anche in questo caso, come questo non sia idoneo alla descrizione dei fenomeni in gioco. L'omissione dello scambio termico convettivo fa sì che il passaggio di fase del materiale inizi circa 1400s dopo quello del caso sperimentale e del caso numerico con modello conduttivo - convettivo; inoltre, in fase di scaricamento, la temperatura del materiale inizia ad aumentare solo intorno a 69000s. In tal caso, la massima deviazione misurata di circa 8°C, è ottenuta in fase di scaricamento.

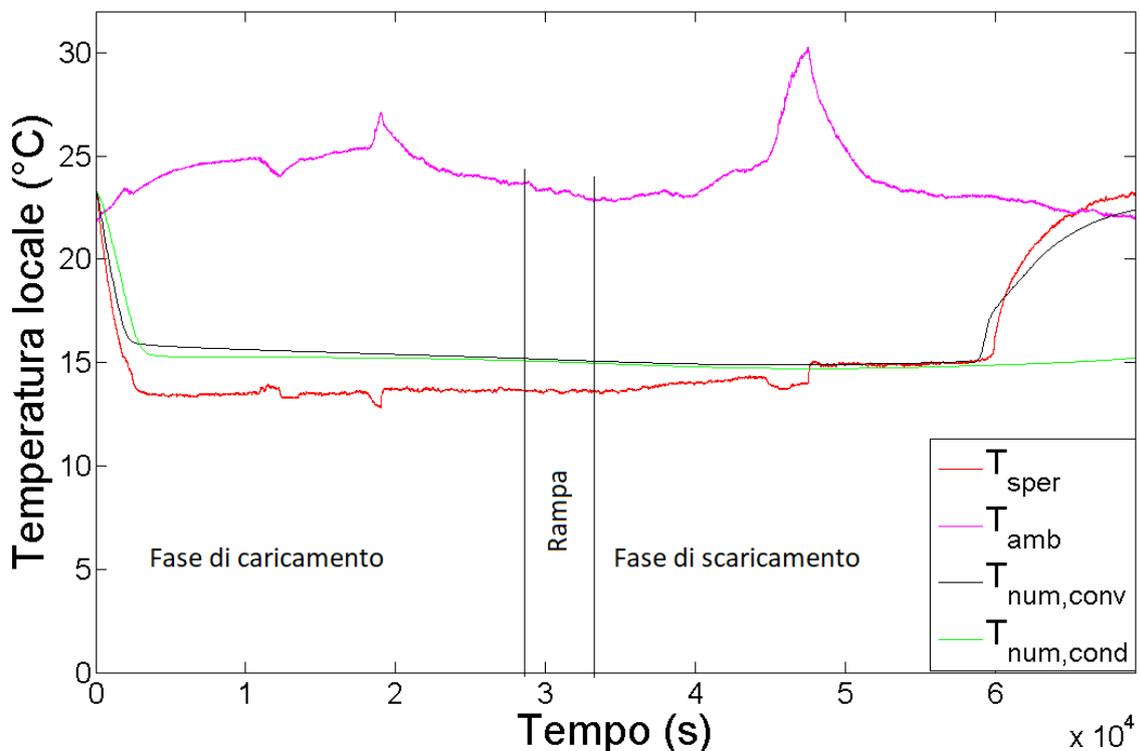


Figura 15. Confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali nel caso di unità di accumulo composta da PCM e schiuma metallica.

5 Conclusioni

Nel presente documento sono descritte le attività di ricerca svolte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II nel corso del secondo anno dell'Accordo di Programma 2015-2017 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione: *“Sviluppo di un modello non stazionario per la simulazione termo-fluidodinamica di un modulo cilindrico per l'accumulo del freddo, contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM – phase change material), con e senza la presenza di una schiuma metallica immersa nel PCM atta a favorire la trasmissione del calore”* stipulato tra ENEA e DII. Tale attività ha riguardato lo sviluppo e la validazione sperimentale di opportuni modelli analitici necessari alla simulazione numerica di due differenti sistemi di accumulo del freddo a PCM, di cui uno composto da solo PCM, l'altro caratterizzato dal sistema combinato PCM – schiuma metallica.

Il lavoro svolto è stato articolato in tre macrofasi, finalizzate allo sviluppo dei modelli computazionali, all'individuazione ed implementazione di due applicativi rappresentanti i sistemi di accumulo del freddo con solo PCM e con PCM e schiuma metallica, e alla relativa validazione sperimentale.

Le attività della prima fase, riportate nel capitolo 2, hanno riguardato lo sviluppo dei modelli necessari alla simulazione dinamica dei due sistemi di accumulo del freddo considerati. Nel dettaglio, per entrambi i sistemi, sono stati sviluppati il modello puramente conduttivo ed il modello con conduzione e convezione. In tutti i casi, le proprietà termofisiche del materiale durante il passaggio di fase sono state considerate variabili in funzione della frazione solida/liquida del materiale, e al fine di tener conto del passaggio di fase, e quindi di includere il calore latente richiesto per il passaggio di fase del PCM, è stato utilizzato il metodo della capacità effettiva.

Le attività della seconda fase, descritte nel capitolo 3, hanno riguardato la realizzazione in ambiente COMSOL Multiphysics dei due applicativi di accumulo del freddo considerati. Tali applicativi sono stati realizzati mediante l'implementazione dei modelli di simulazione sviluppati nel corso della Fase I delle attività e, quindi, ciascun applicativo è stato particolarizzato per ciascun modello sviluppato. In base ai dati sperimentali ottenuti da ENEA, si è proceduto, quindi, con la definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno; il calcolo delle conduttanze convettive relative alle superfici superiore e laterale dei moduli di accumulo, la permeabilità della schiuma metallica, il coefficiente di Forchheimer, e il coefficiente di scambio termico volumetrico all'interfaccia PCM – schiuma metallica sono stati, invece, fissati in seguito ad attente analisi di sensitività mirate ad ottenere la migliore sovrapposizione possibile tra i risultati numerici e i risultati delle prove sperimentali svolte da ENEA. Nel medesimo capitolo, sono, inoltre, riportati e discussi i principali risultati delle simulazioni numeriche, in termini di variazione della temperatura media dei moduli di accumulo; variazione della frazione solida media dei moduli di accumulo, in fase di caricamento, e di quella liquida media degli stessi, in fase di scaricamento; e di energia frigorifera accumulata e rilasciata dai moduli di accumulo rispettivamente nelle fasi di caricamento e scaricamento del materiale.

L'ultima fase, descritta nel capitolo 4, riporta, infine, le attività relative alla validazione sperimentale dei modelli sviluppati. Sebbene il PCM utilizzato per condurre i test sperimentali sia caratterizzato dal fenomeno del sottoraffreddamento, i risultati numerici ottenuti, nel caso di utilizzo dei modelli conduttivi – convettivi, sono in buona sovrapposizione con quelli ottenuti dall'attività sperimentale.

Alla luce delle analisi condotte e dei risultati ottenuti, per la prossima annualità, si prevede l'integrazione dei modelli sviluppati, e validati, ad un modello per la simulazione numerica di un intero sistema di accumulo del freddo. Tale sistema di accumulo sarà caratterizzato dalla presenza di un serbatoio

ad acqua, contenete al suo interno i moduli cilindrici per l'accumulo del freddo analizzati nella presente annualità. A valle di una validazione sperimentale del modello di serbatoio di accumulo del freddo completo, tale attività consentirà, tra l'altro, lo svolgimento di opportune analisi parametriche volte all'ottimizzazione delle caratteristiche dell'intero sistema di accumulo del freddo considerato.

Riferimenti bibliografici

- [1] Phase Change: Cooling and Solidification of Metal. Manuale COMSOL Multiphysics. Disponibile alla pagina web: <https://www.comsol.com/blogs/phase-change-cooling-solidification-metal/>.
- [2] H.D. Baehr, K. Stephan. Heat and Mass Transfer, second edition, 2006. Casa editrice: Springer.
- [3] P. Di Giorgio, M. Iasiello, A. Viglione, M. Mameli, S. Filippeschi, P. Di Marco, A. Andreozzi, N. Bianco. Numerical analysis of a paraffin/Metal foam composite for thermal storage. Journal of Physics, 2017. Conference Series 796 012032.

Curricula del gruppo di lavoro

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Nicola Bianco è Professore Associato di Fisica Tecnica Industriale (SSD ING-IND/10) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, presso la quale si è laureato in Ingegneria Meccanica, con lode. Precedentemente, presso il medesimo Ateneo ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei sistemi termo-meccanici ed ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato. E' coordinatore del corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente.

E' stato Responsabile Scientifico o componente del gruppo di lavoro nell'ambito di convenzioni di Ricerca Scientifica con l'ENEA, il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, la Regione Campania, il Ministero della Giustizia.

Relativamente alle tematiche di ricerca, negli anni scorsi ed attualmente è coinvolto in studi di Trasmissione del Calore (convezione naturale e mista in canali e cavità, conduzione termica in solidi con variabile generazione interna), Energia Solare (progettazione termo-energetica di sistemi solari), Termo-fisica dell'involucro edilizio (sistemi solari passivi e soluzioni di architettura bioclimatica). Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali e conferenze internazionali. E' autore di oltre 130 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

GRUPPO DI LAVORO

Assunta Andreozzi è Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale (SSD ING-IND/11) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. Si è laureata in Ingegneria Aerospaziale con voto 110/110 e lode presso la Seconda Università degli Studi di Napoli, presso cui ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in "Scienze e Tecnologie Aerospaziali" e le è stato conferito un assegno per la collaborazione ad attività di ricerca, cofinanziato dal Fondo Sociale Europeo per la Regione Campania sul P.O. "Ricerca, Sviluppo Tecnologico ed Alta Formazione 1994/99" e inquadrato nel progetto di ricerca dal titolo: "Metodologie di ottimizzazione strutturale basato su tecniche avanzate, orientate ad un uso razionale dell'energia" – settore disciplinare I02B.

Ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II dal 2002 al 2011.

Svolge attività di ricerca in Trasmissione del calore, in particolare nella convezione naturale e mista in canali e cavità, scambio termico in mezzi porosi, termofluidodinamica dell'incendio e bio heat transfer. È autore di circa 100 lavori scientifici la maggior parte dei quali pubblicati su riviste internazionali o su atti di congressi internazionali. È stato ed è inserito in progetti di ricerca nazionali finanziati dal Ministero dell'Università e convenzioni di ricerca con enti pubblici e privati.

È stato responsabile scientifico del progetto di Ricerca: "Analisi e progetto termofluidodinamico dei processi di lavorazione continui dei materiali" finanziato dalla Regione Campania.

Fabrizio Ascione è Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale, in servizio presso il Dipartimento di ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico. Ha conseguito, con lode e dignità di stampa, la laurea in Architettura presso la Facoltà di Architettura dello stesso ateneo. Nel Dicembre del 2009 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. Da Marzo 2010 a Giugno 2012 è stato Assegnista di Ricerca presso l'Università degli Studi del Sannio in Benevento. Ad oggi, svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnica del Controllo Ambientale, con particolare riferimento alle tematiche del "passive and low-energy heating and cooling" per il settore civile.

E' docente in supplenza di insegnamenti afferenti al SSD ING-IND/11. Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali. E' autore di circa 80 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

Martina Caliano è titolare di un Assegno di Ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, i cui campi di ricerca riguardano: l'analisi CFD e analisi

sperimentali di sistemi di accumulo termico; lo scambio termico in sistemi di accumulo termico a calore sensibile e a calore latente; lo scambio termico in sistemi combinati PCM-mezzi porosi. Presso la medesima Università, nel Giugno 2017, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Industriale, e precedentemente, nel Luglio 2013, ha conseguito con lode, la laurea in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente. Da Novembre 2013 a Ottobre 2014 è stata Assegnista di ricerca presso l'Università della Calabria, nell'ambito dell'AR – "CONDIZIONAMENTO INNOVATIVO, MATERIALI DI INVOLUCRO ED USO DEI PCM" del progetto nazionale RES NOVAE. Collabora con il centro ricerche ENEA di Portici dal 2012, nell'ambito delle tematiche di ricerca relative ai sistemi di accumulo dell'energia termica (a calore sensibile e con materiali a cambiamento di fase), a sistemi per l'efficientamento di infrastrutture energetiche e all'ottimizzazione di sistemi di poligenerazione distribuita.