

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Tesi di Laurea Triennale in:

OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO PER BATTERIE ELETTRICHE

Relatore:

Prof. Ing. Mancin Simone

Studenti:

Abalotti Sebastiano

Caffini Anna

Ly Phuoc Thien Emanuele

Quaranta Elena

Zaltron Mattia

INDICE:

1. Sommario	pag. 3
2. Introduzione	pag. 4
3. Modello teorico	pag. 7
4. Risultati di laboratorio	pag. 8
5. Geometry	pag. 9
5.1 Geometry per la validazione del modello	pag. 9
5.2 Geometry per l'ottimizzazione dello spessore	pag. 9
6. Analisi della mesh	pag. 9
7. Materiali	pag. 10
8. Timestep	pag. 11
8.1 Scelta timestep per l'ottimizzazione del modello	pag. 11
8.2 Automatizzazione del processo di simulazione	pag. 12
9. Validazione del modello	pag. 13
10. Ottimizzazione spessore PCM	pag. 16
10.1 Geometria alternativa	pag. 22
11. Considerazioni supplementari	pag. 26
11.1 Integrazione PCM con sistema attivo di raffreddamento	pag. 26
12. Conclusioni	pag. 27
13. Bibliografia	pag. 28

1. SOMMARIO

L'obiettivo di questa tesi è l'analisi del metodo di raffreddamento di batterie agli ioni di litio con l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase o *Phase-Changing Materials* (PCM).

La piattaforma utilizzata per lo studio è Ansys Fluent, software con il quale è stato sviluppato un modello numerico precedentemente validato mediante dati raccolti da una prova di laboratorio e in seguito ottimizzato per massimizzare l'effetto di raffreddamento della batteria, tramite la variazione di volume di PCM, imponendo un valore massimo di temperatura misurata dopo un determinato numero di cicli di carica e scarica della cella.

Simboli e unità di misura utilizzati:

Grandezza fisica	Simbolo	Unità di misura
Spessore	s	mm
Flusso termico	q	W/m ²
Temperatura	T	K
Calore specifico	c _p	J/kg*K
Densità	ρ	kg/m ³
Conducibilità termica	λ	W/m*K
Intervallo di fusione	ΔT	°C
Calore latente di fusione	r	J/kg
Coefficiente di espansione termica	β	K ⁻¹

Tab. 1. Nomenclatura delle grandezze utilizzate, simbolo corrispondente e unità di misura

Parole chiave:

- batterie
- cambiamento di fase
- raffreddamento
- fusione
- solidificazione
- PCM
- analisi sperimentale
- analisi statistica

2. INTRODUZIONE

Le batterie agli ioni di litio sono sempre più ampiamente utilizzate come accumulatori di energia per diverse applicazioni, come veicoli elettrici e ibridi, a fronte dell'aumento del costo del carburante e di una legislazione legata alle emissioni sempre più stringente, e nell'elettronica (smartphones, piccoli dispositivi mobili, etc..).

La batteria è composta da un certo numero di celle connesse tra di loro. Una cella è un componente completo e indipendente ed è composta da un elettrodo positivo e uno negativo divisi da un separatore e da un elettrolita. La conversione di energia avviene agli elettrodi che sono anche detti anodo (negativo) e catodo (positivo). Il catodo è l'elettrodo dove avviene la reazione di riduzione, all'anodo avviene invece la reazione di ossidazione. Quando la batteria è collegata ad un carico, cioè in fase di scarica, gli ioni litio positivi si muovono verso il catodo attraversando l'elettrolita. Il catodo, dopo aver accumulato al suo interno gli ioni litio, diventa carico positivamente rispetto all'anodo attirando gli elettroni attraverso il circuito elettrico. Il contrario avviene in fase di carica della batteria.

La temperatura di funzionamento della cella (distribuzione della temperatura nel tempo e differenza di temperatura all'interno della cella stessa) è un fattore cruciale per la durata di vita della cella e il controllo della temperatura massima risulta fondamentale per la sua operatività in condizioni di sicurezza.

Ogni batteria al litio dovrebbe avere un gradiente di temperatura alla superficie il più piccolo possibile per ottenere una condizione isoterma ideale evitando così il deterioramento degli elettrodi.

Le temperature ottimali fra cui fare funzionare una batteria agli ioni di litio vanno dai 20 °C ai 30 °C ma sono consentite anche temperature comprese fra i -40 °C e i 60 °C. Maggiore è la temperatura di lavoro della cella, maggiore è la sua velocità di invecchiamento. Se la temperatura diventa eccessivamente alta (oltre gli 80-100 °C) i materiali all'interno della cella possono diventare termicamente instabili. A temperature basse, invece, la resistenza al trasporto degli ioni di litio è molto alta limitando le reazioni elettrochimiche e dunque la potenza erogabile. Il controllo della temperatura è pertanto un fattore cruciale sia per le performance che per la vita della batteria.

Per questo motivo è necessario un sistema di controllo termico (Thermal Management System – TMS) progettato per garantire alle celle di operare in condizioni isoterme.

Allo scopo di regolare la temperatura di una batteria durante il suo esercizio vengono utilizzati spesso i PCM. Questi sono materiali di origine naturale che vengono utilizzati per accumulare e rilasciare energia durante il passaggio di fase tra lo stato solido e quello liquido, e viceversa. In particolare, in questo caso studio, servono ad ottimizzare le fluttuazioni date dalle condizioni di lavoro della batteria. Il materiale, nel passaggio da solido a liquido, assorbe energia termica, mentre nel passaggio da liquido a solido cede energia termica (calore latente). I più utilizzati in questo ambito sono i materiali a cambiamento di fase organici che si riferiscono principalmente ai composti PA (polimeri termoplastici), come paraffine e acidi grassi.

I PCM organici presentano alcuni vantaggi, quali: non sono corrosivi, né tossici per la sicurezza dell'ambiente e stabili. Tuttavia, presentano anche svantaggi come la scarsa conducibilità termica e la facilità di fuoriuscita durante il processo di cambiamento di fase.

Le regole di selezione del PCM includono i seguenti aspetti:

1. La temperatura di transizione di fase del PCM deve rientrare nell'ambito della normale temperatura di lavoro;
2. Forte capacità di assorbire e rilasciare il calore latente;
3. Buona conducibilità termica;
4. Buona stabilità e non corrosività;
5. Basso costo e facile da ottenere.

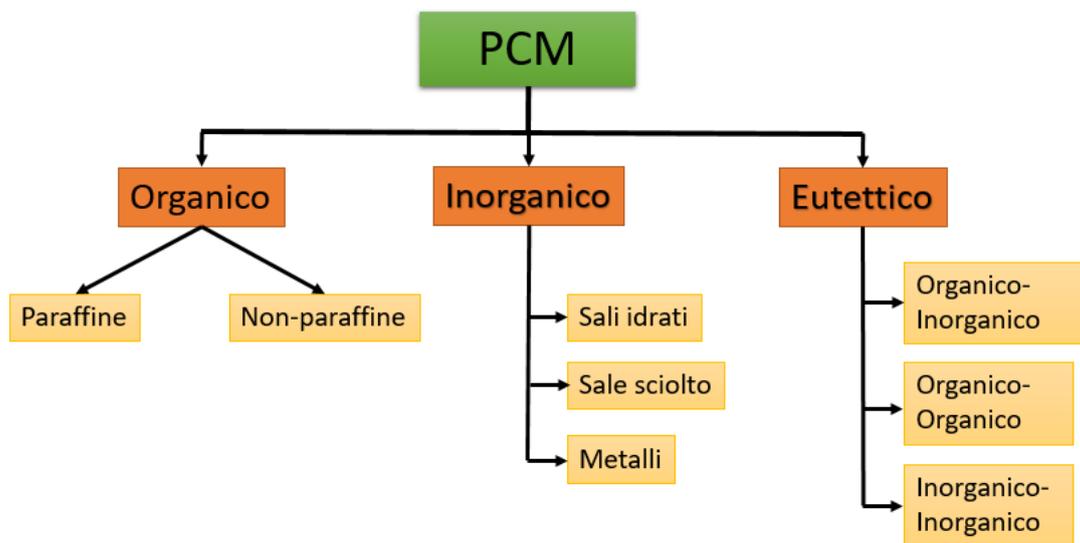


Fig.1 Classificazione dei PCM.

Per le nostre analisi è stato utilizzato un PCM sperimentale denominato CR29, materiale le cui proprietà sono descritte più avanti nella relazione.

Questo è stato esaminato all'interno di un contenitore riportato in (*Fig. 2*) con le relative dimensioni.

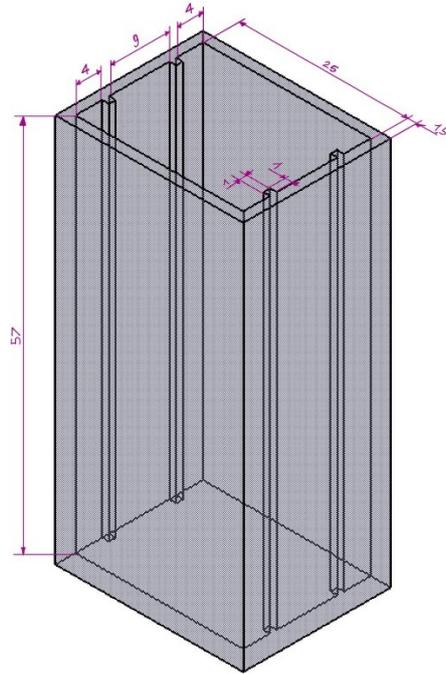


Fig.2 Modello 3D del contenitore per il PCM con le relative dimensioni.

Il contenitore è stato quindi realizzato grazie all'ausilio della tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM).

In seguito sono state condotte delle prove sperimentali per determinare, con l'ausilio di due termocoppie, le temperature rispettivamente alla parete della batteria e al centro del volume di PCM, durante un ciclo di carica e scarica della batteria. Tali dati vengono poi utilizzati per validare il modello in Ansys Fluent, permettendo così di ricavare i valori di flusso termico della batteria in esame. In questo modo è possibile simulare 10 cicli di carica e scarica ottimizzando lo spessore del PCM in maniera tale da mantenere la frazione liquida al di sotto di 1 (1 = PCM tutto liquido) e la temperatura massima in ogni punto del sistema al di sotto dei 40 °C.

3. MODELLO TEORICO

Le simulazioni del comportamento termico del PCM sono state svolte con l'utilizzo del Software Ansys Fluent, citato in precedenza, il quale basa le proprie formulazioni sulle equazioni differenziali della conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{eq. (1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad \text{eq. (2)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad \text{eq. (3)}$$

Il termine ρg in eq. (2) è calcolato grazie all'approssimazione di Boussinesq, dove la densità è funzione della differenza di temperatura:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad \text{eq. (4)}$$

Per le altre equazioni, la densità è assunta costante, ovvero $\rho = \rho_0$. Questa approssimazione è applicabile in presenza di differenze di temperatura (e densità) contenute, come nel caso in esame. Il termine S nell'equazione della quantità di moto - eq. (2) - è definito come:

$$\vec{S} = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + 0,001)} A_{mush} \vec{v} \quad \text{eq. (5)}$$

In eq. (5) compaiono due nuovi parametri: la frazione liquida γ e la costante A_{mush} (relativa alla "mushy zone"). Il primo è definito dalla eq. (6) e il secondo è una costante correlata alla frazione liquida del volume di PCM, ovvero la zona in cui γ varia tra 0 e 1.

Il parametro γ è fondamentale nell'approccio entalpia-porosità: tale metodo prevede che il dominio fluido sia assimilato a un mezzo poroso, in cui la frazione liquida γ viene associata alla porosità, per assicurare che la velocità in corrispondenza delle regioni solide risulti nulla.

I valori di $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ sono stati fissati agli estremi dell'intervallo di fusione del PCM, rispettivamente 28,5 °C e 29,5 °C.

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & T < T_{liquidus} \end{cases} \quad \text{eq. (6)}$$

L'entalpia H nell'equazione relativa all'energia - eq. (3) - è la somma di un termine sensibile e un termine latente:

$$H = \left(h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \right) + (\gamma L) \quad \text{eq. (7)}$$

4. RISULTATI DI LABORATORIO

Dalle analisi in laboratorio si sono ottenuti sperimentalmente dei valori di temperatura in funzione del tempo alla parete della batteria e al centro del PCM (*Fig.3*), mediante l'uso di termocoppie di tipo T con un'incertezza di ± 0.05 K.

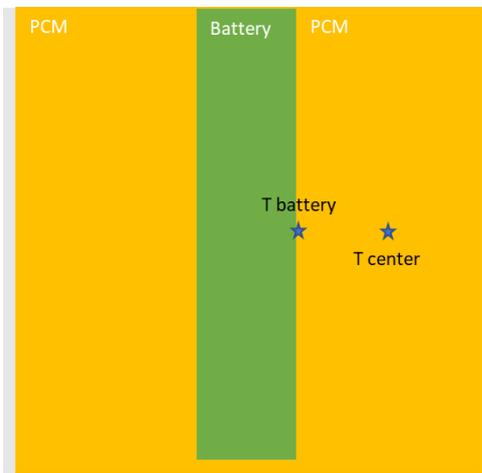


Fig.3 Schema rilevamento temperature.

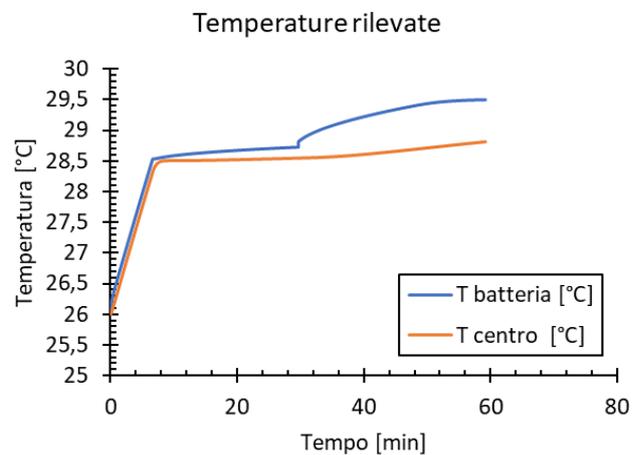


Fig.4 Schema sperimentale.

Lo scopo è quello di determinare il valore del flusso termico generato dalla batteria, che permette di ottenere i valori sperimentali di temperatura riportati in *Fig.4*. Per fare ciò si è inserito tale modello in Ansys Fluent e, di conseguenza, si sono potuti determinare i valori di flusso termico simulando l'intero ciclo di carica e scarica grazie a una serie di iterazioni.

5. GEOMETRY

5.1 GEOMETRY PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO

Mediante la funzione *Design Modeler* è stata sviluppata una geometria di semplice definizione ma che permette di rappresentare lo spessore del PCM.

Tale geometria è stata concepita partendo da un modello 2D rappresentante lo spessore del PCM, pari a quello utilizzato nella prova in laboratorio (4 mm).

Lo spessore del *case* non è stato considerato in quanto il sistema è ipotizzato adiabatico.

Per quanto riguarda la batteria, la parete sinistra è a contatto con il PCM, di conseguenza il flusso termico imposto parte proprio da quel lato. Le altre tre pareti: superiore, inferiore e destra, corrispondono rispettivamente alla parte superiore, inferiore e al lato del *case* rivolto verso l'esterno.

Inoltre, per semplificare e sveltire il processo di calcolo è stata studiata solamente una parte del sistema (processo di *Intelligent Meshing*). Tale processo sfrutta la simmetria della *mesh* e consente di studiarne solamente una parte, evitando così di dover lavorare una geometria più complessa che comporta un maggior dispendio di tempo di calcolo, ai fini di un risultato identico.

5.2 GEOMETRY PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLO SPESSORE

Per quanto concerne l'ottimizzazione dello spessore, esso è stato modificato di volta in volta fino ad un valore che consentisse di ottenere risultati soddisfacenti.

La prova è volta ad ottenere una temperatura massima inferiore (in ogni punto del materiale) a 40 °C ed una *liquid fraction* (frazione liquida) inferiore a 1.

6. ANALISI DELLA MESH

Per un risultato più accurato è stata eseguita un'analisi della *mesh*.

Sono state svolte varie simulazioni, senza variare i parametri di *time step size*, *number of time steps*, iterazioni per *time step*, aumentando man mano il numero di nodi.

È stato notato che non vi è un aumento significativo del tempo all'aumentare del numero di nodi, motivo probabile è la semplicità della forma geometrica analizzata (un rettangolo) unito al valore di *minimum orthogonal quality* delle varie *mesh*, sempre unitario.

7. MATERIALI

Considerando adiabatica la parete del *case*, il suo spessore e il materiale di cui è fatta sono ininfluenti ai fini della prova.

Il PCM utilizzato è il CR29, caratterizzato dalle seguenti proprietà:

Melting range [°C]	28,5	29,5
β [1/K]	0,0033	
r [J/Kg]	233800	

	Solido		Liquido
ρ [Kg/m ³]	856	ρ [Kg/m ³]	772
λ [W/m K]	0,402	μ [Kg/ m s]	0,0037
C_p [J/Kg K]	2250	C_p [J/Kg K]	2483

In *Setup*, nella creazione del PCM, la densità, impostata con l'approssimazione di *Boussinesq*, viene inserita con un valore pari alla media aritmetica tra la densità del solido e quella del liquido (814 Kg/m³).

Per quanto riguarda il calore specifico, invece, è stata usata la funzione *piecewise-linear* che mette in relazione lineare tale parametro con la relativa temperatura di solidificazione e fusione del PCM.

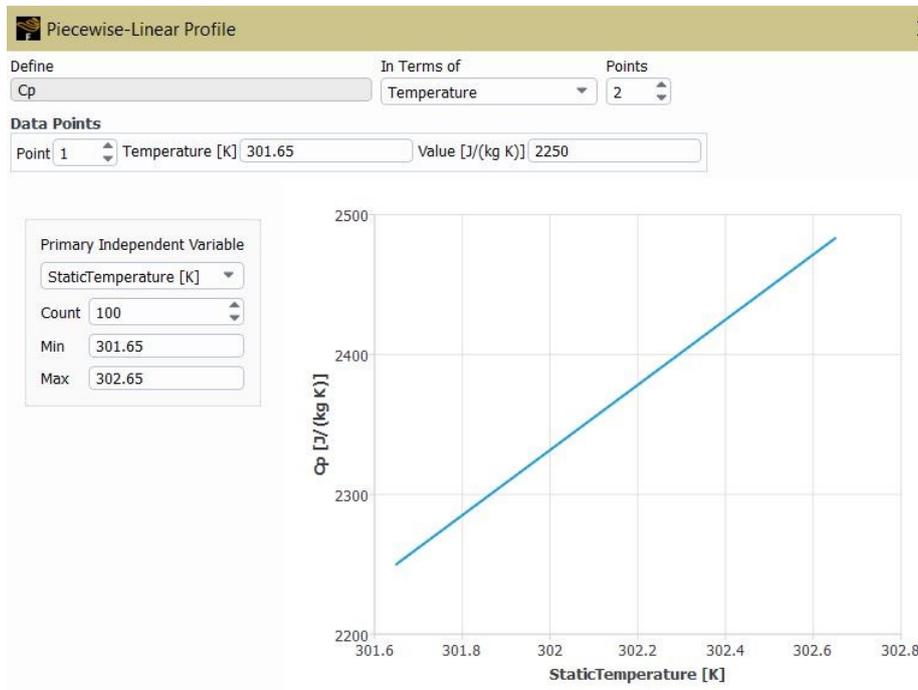


Fig.5 Impostazione della funzione *piecewise-linear*.

8. TIMESTEP

Un problema riscontrato durante la simulazione è stato l'elevata durata della stessa.

Per far fronte a ciò è utile adottare delle soluzioni che consentano di arrivare al risultato voluto nel minor tempo possibile.

8.1 SCELTA TIMESTEP PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO

Si è optato per un numero di *timestep* pari a 1800 ed un *timestep size* pari a 1 s poiché, utilizzando valori più bassi, come rispettivamente 1200 e 1,5 o 900 e 2, la procedura, sebbene più veloce, nel corso dei vari cicli di carica e scarica presenta degli errori di calcolo che rendono impossibile comparare i risultati della simulazione con quelli sperimentali.

È stata condotta successivamente una comparazione tra il *numero di iterazioni/timestep*: in ordine 5, 10, 15 e 20. Tale analisi ha portato ad una sostanziale indifferenza tra i risultati ottenuti, nonostante aumenti di molto il tempo delle simulazioni all'aumentare di questo parametro.

Infine è stato deciso di proseguire il lavoro con un *numero di iterazioni/timestep* pari a 10.

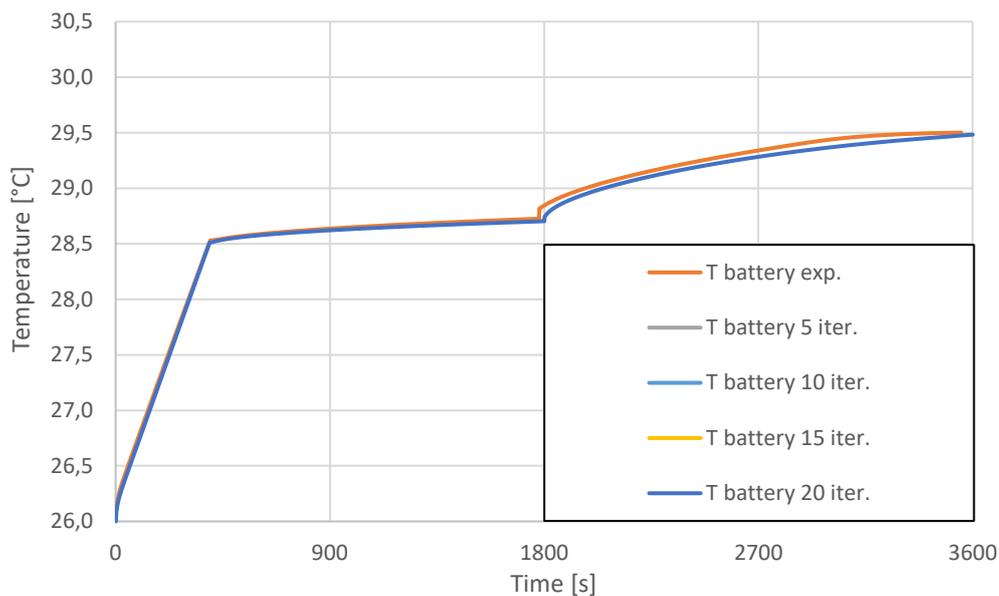


Fig.6 Comparazione dei profili di temperatura al variare del numero di iterazioni/timestep.

8.2 AUTOMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI SIMULAZIONE

Per facilitare la procedura di calcolo si è fatto uso di una *transient table*: un semplice documento di testo in cui sono stati inseriti i valori che deve avere il flusso termico al variare del numero di timestep.

Tale sistema ha permesso di evitare l'intervento umano ogni qualvolta fosse necessario intervenire per modificare il valore di flusso termico da una fase di carica ad una di scarica e viceversa.

```
transienttable 2 39 0
time heat_value
0 44
1800 44
1800 185
3600 185
3600 44
5400 44
5400 185
7200 185
7200 44
9000 44
9000 185
10800 185
10800 44
12600 44
12600 185
14400 185
14400 44
16200 44
16200 185
18000 185
18000 44
19800 44
19800 185
21600 185
21600 44
23400 44
23400 185
25200 185
25200 44
27000 44
27000 185
28800 185
28800 44
30600 44
30600 185
32400 185
32400 44
34200 44
34200 185
```

Fig.7 Transient table utilizzata per la simulazione.

9. VALIDAZIONE DEL MODELLO

La determinazione del flusso termico generato dalla batteria durante il ciclo di carica e scarica è stato determinato con una procedura iterativa tramite l'inserimento di un primo valore di carica in *Boundary Conditions* del lato del PCM a contatto con la batteria, segue poi lo stesso procedimento con un altro valore di flusso termico per la scarica.

Notare che in *Setup -> Solution -> Methods -> Pressure* è stato impostato lo schema *PRESTO!*, che sta per *PREssure STaggered Option*, funzione di discretizzazione di (2).

In funzione dei risultati ottenuti si prosegue iterativamente, aggiustando i valori di flusso termico fino all'ottenimento dei profili di temperatura che riducano al minimo i valori di Δ , corrispondenti alla media della differenza tra la temperatura misurata in laboratorio e quella ottenuta dalla simulazione per ogni *timestep*. Questa operazione è stata fatta sia per la temperatura dal lato batteria (*T battery*) sia per quella al centro del PCM (*T center*), in modo tale da ottenere delle curve di temperatura che rispecchino il più possibile quelle ottenute dalla prova sperimentale.

La temperatura iniziale è stata impostata a 299,15 K (26 °C) compatibilmente alle condizioni di prova durante la sperimentazione in laboratorio.

La prima prova è stata effettuata scegliendo per la carica un flusso termico pari a 100 W/m² e per la scarica 200 W/m².

Per le prove successive sono stati scelti dei valori di flusso che si avvicinassero e talvolta coincidessero nel miglior modo possibile alla curva sperimentale.

Seguono i risultati delle prove effettuate, in ordine di iterazione, con i relativi valori di Δ :

prima iterazione:

q (carica)	q (scarica)	Δ
W/m ²	W/m ²	°C
100	200	0,2403

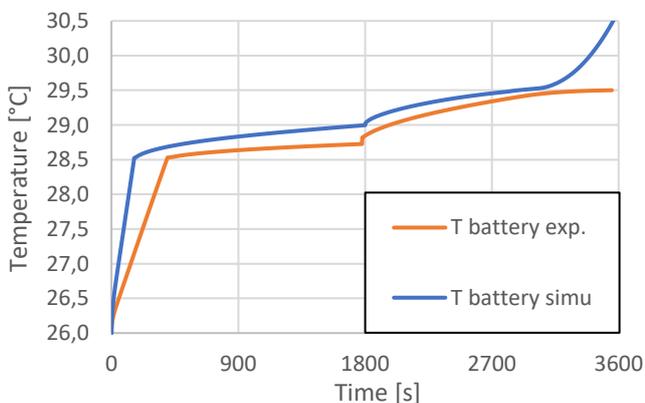


Grafico all'interfaccia con la batteria

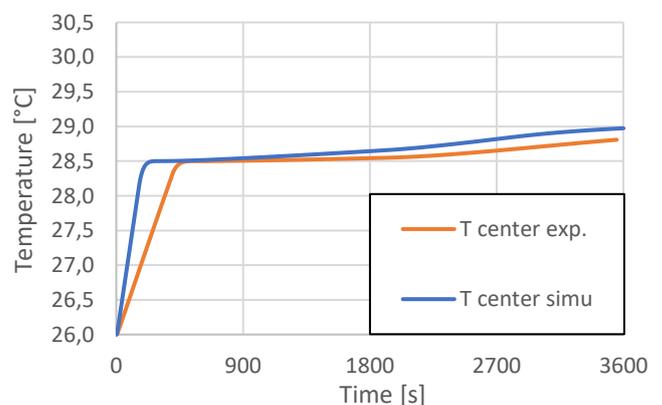


Grafico al centro del PCM

seconda iterazione:

q (carica)	q (scarica)	Δ
W/m ²	W/m ²	°C
50	160	0,0454

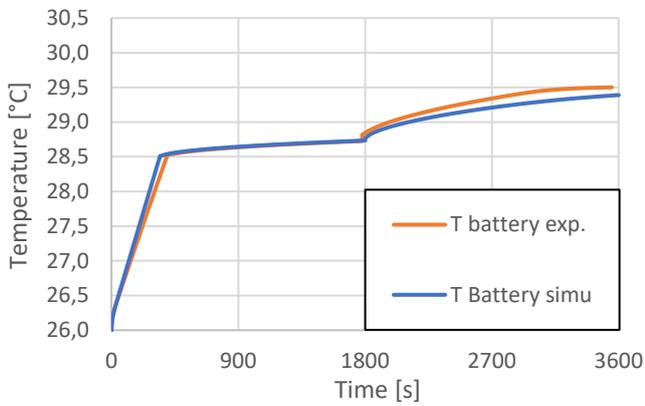


Grafico all'interfaccia con la batteria

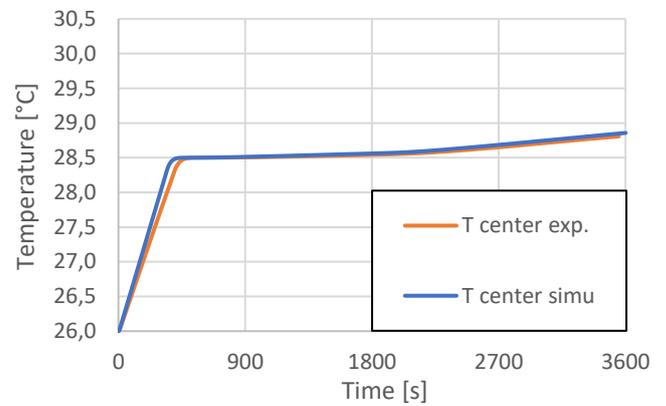


Grafico al centro del PCM

terza iterazione:

q (carica)	q (scarica)	Δ
W/m ²	W/m ²	°C
45	170	0,0235

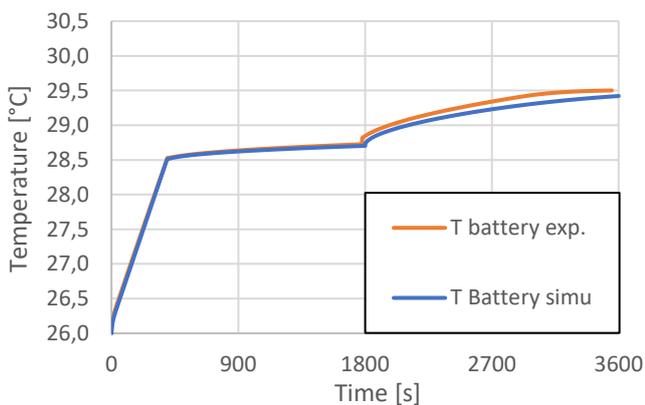


Grafico all'interfaccia con la batteria

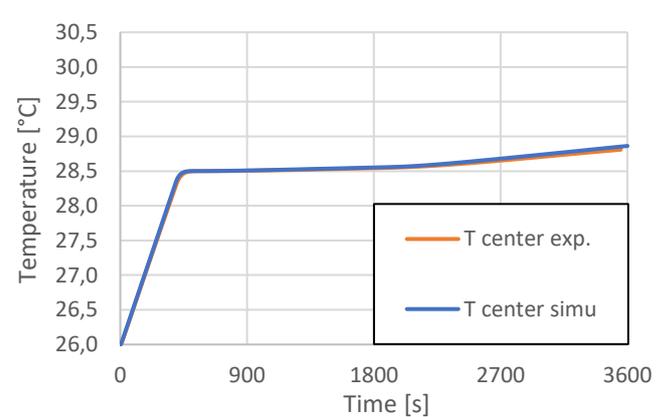


Grafico al centro del PCM

quarta iterazione:

q (carica)	q (scarica)	Δ
W/m ²	W/m ²	°C
44	180	0,0211

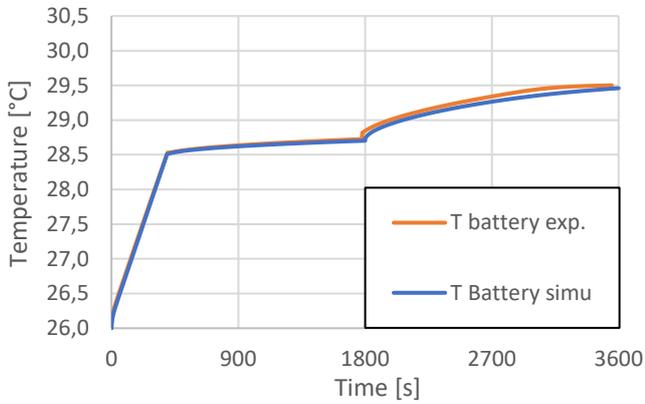


Grafico all'interfaccia con la batteria

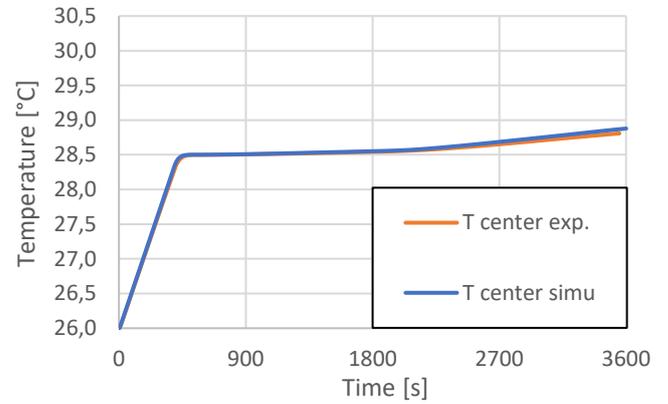


Grafico al centro del PCM

quinta iterazione

q (carica)	q (scarica)	Δ
W/m ²	W/m ²	°C
44	185	0,0198

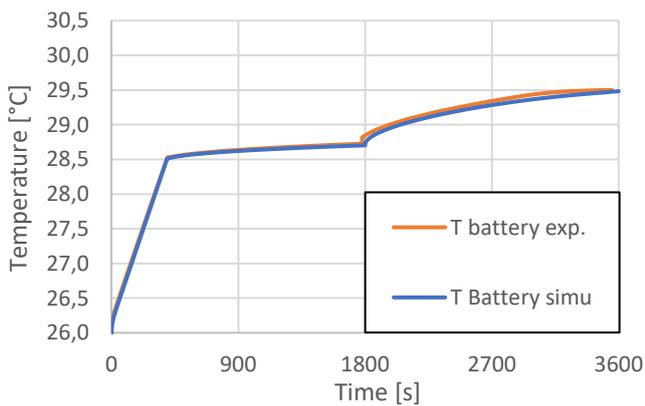


Grafico all'interfaccia con la batteria

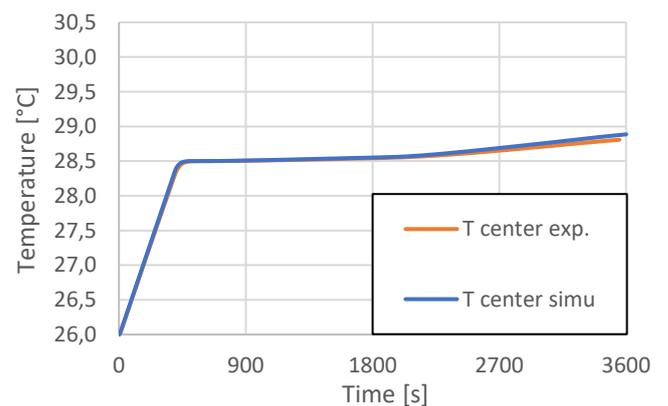


Grafico al centro del PCM

I flussi termici definitivi sono quelli corrispondenti all'ultima prova:

- carica 44 W/m²
- scarica 185 W/m²

10. OTTIMIZZAZIONE SPESSORE PCM

Successivamente alla validazione del modello, si procede a simulare il caso di una batteria sottoposta a 10 cicli carica/scarica consecutivi, determinando, sempre tramite una procedura iterativa, lo spessore minimo di PCM necessario a soddisfare i seguenti parametri:

- Temperatura massima < 313,15 K (40 °C)
- $L_f < 1$

dove L_f è la liquid fraction, cioè il rapporto tra il volume in fase liquida e il volume totale di PCM.

Si riportano dunque, in ordine crescente, i risultati ottenuti:

Spessore PCM [mm]	Temperatura massima [K]	Liquid fraction
20	326,68	1
23	314,18	0,827
24	313,05	0,797
25	312,15	0,768
26	311,29	0,739

Segue la comparazione dei risultati a spessori diversi, attraverso una serie di grafici:

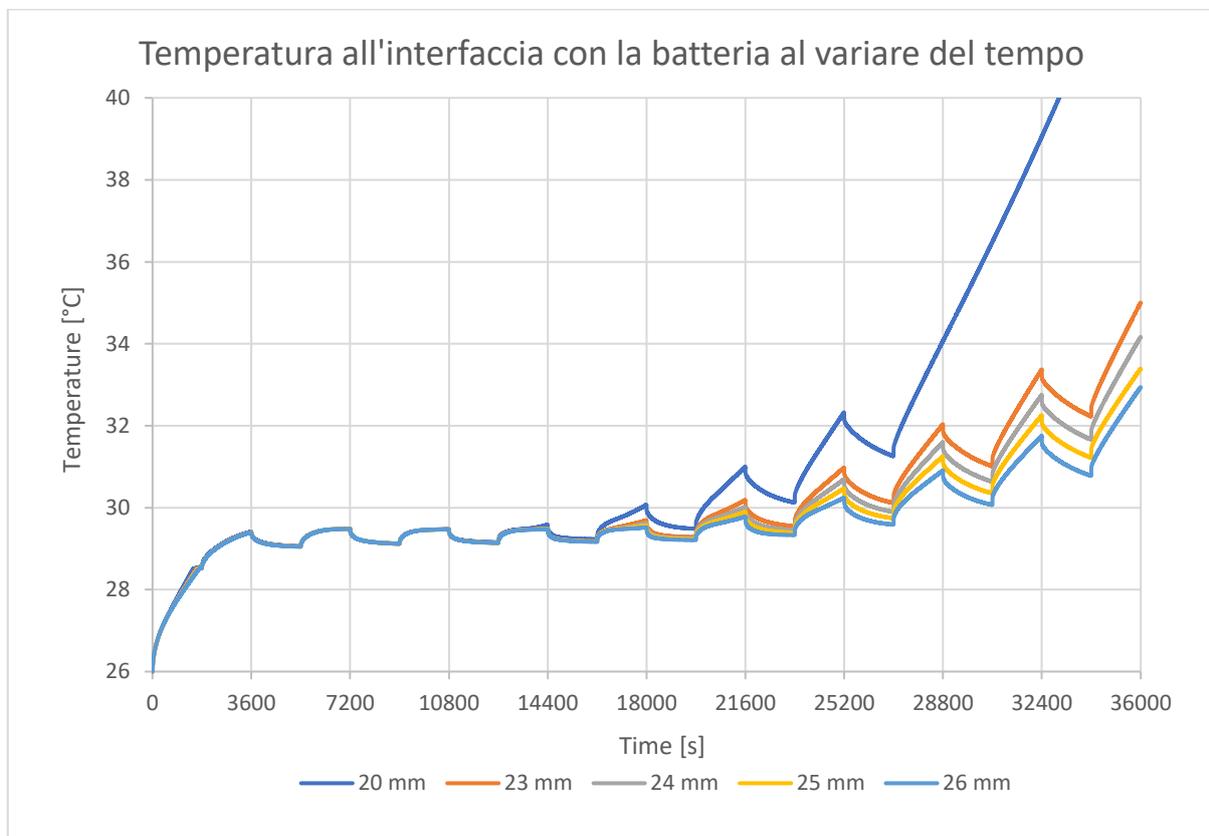


Fig.8 Grafico di comparazione della temperatura all'interfaccia con la batteria, a diversi spessori, durante i 10 cicli.

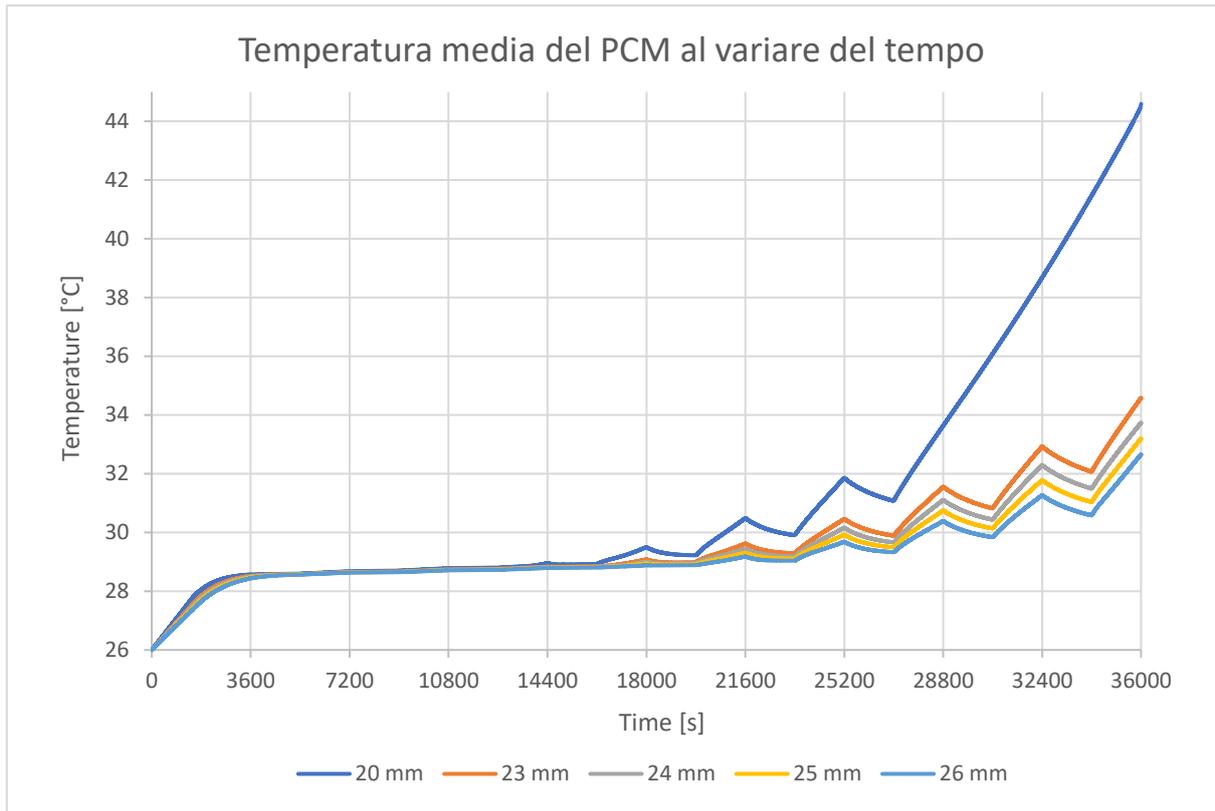


Fig.9 Grafico di comparazione della temperatura media del PCM, a diversi spessori, durante i 10 cicli.

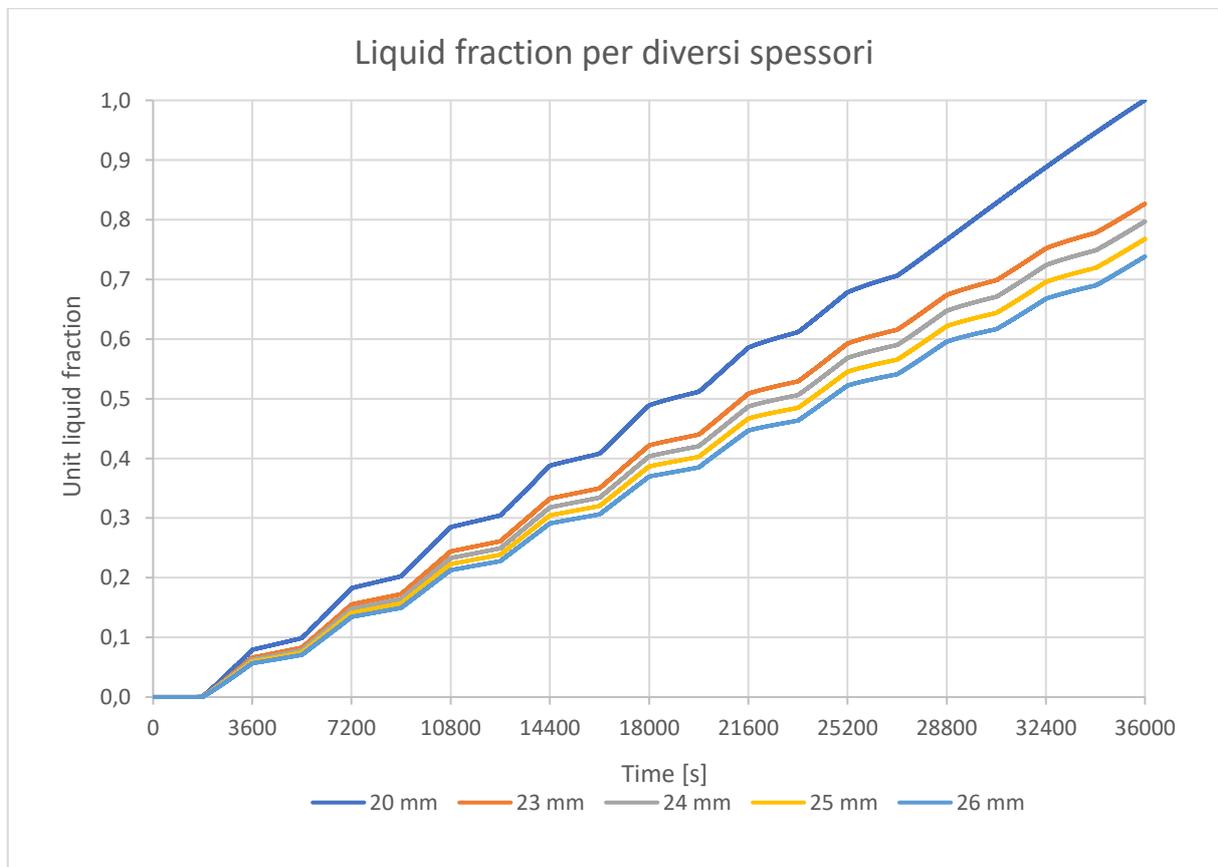


Fig.10 Grafico di comparazione del liquid fraction, a diversi spessori, durante i 10 cicli.

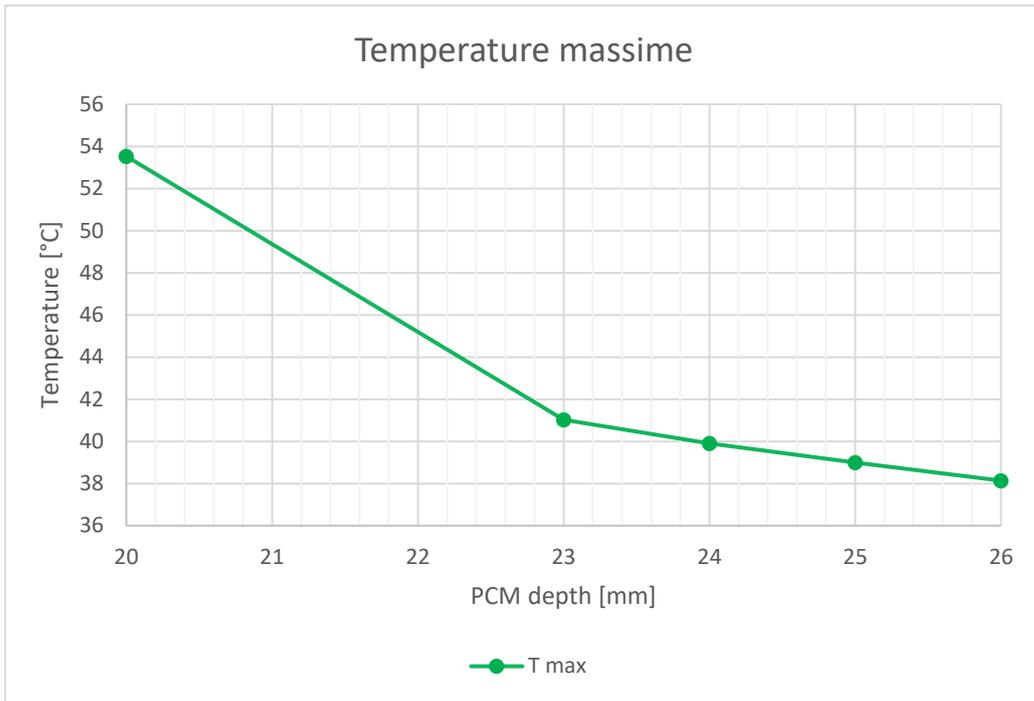


Fig.11 Relazione tra la temperatura massima di ogni prova e il relativo spessore.

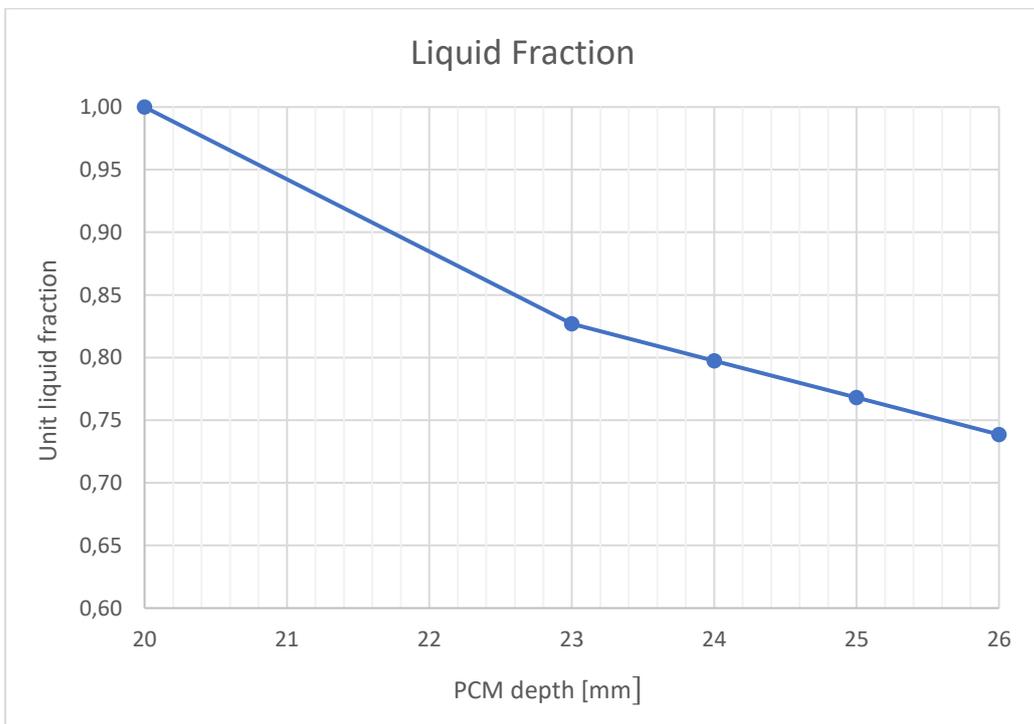


Fig.12 Relazione tra la frazione di liquido unitaria e il relativo spessore ad ogni prova.

Dalle prove effettuate emerge che lo spessore che meglio combacia con le esigenze iniziali, ossia un liquid fraction finale inferiore a 1 e una temperatura ovunque inferiore a 40 °C, è $s = 24$ mm.

Di seguito si mostrano i grafici relativi a tale spessore:

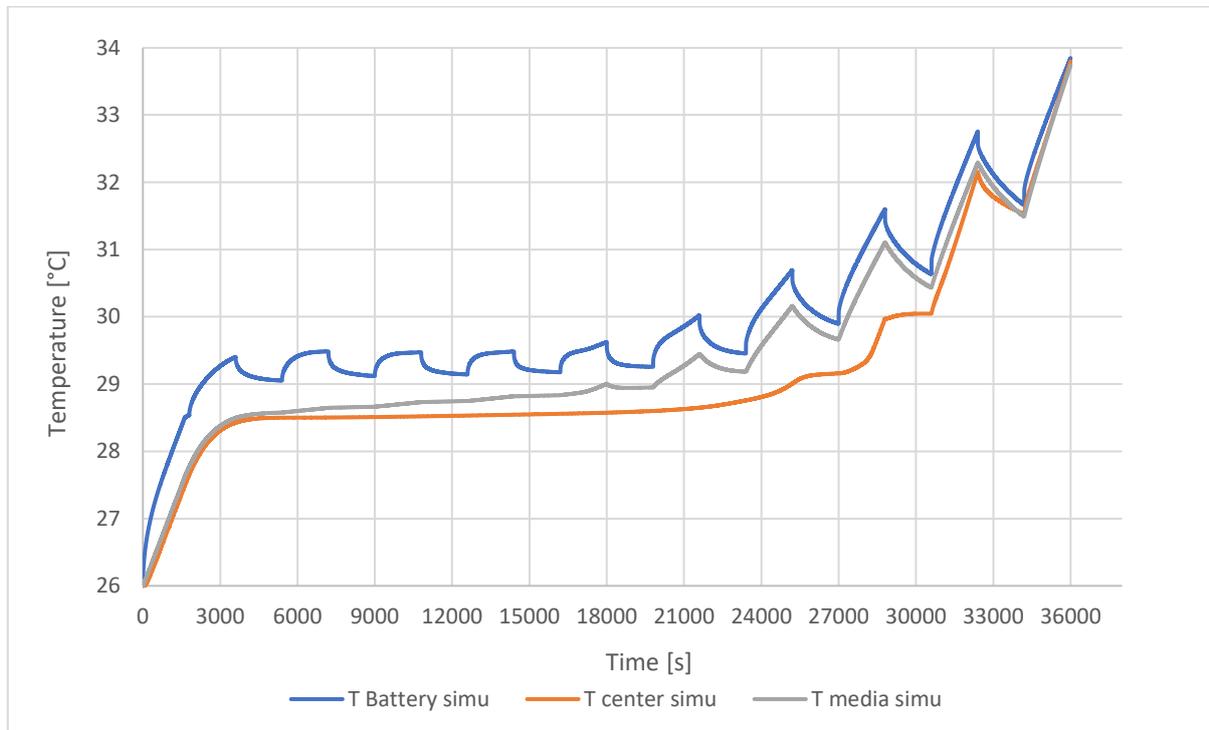


Fig.13 Comparazione tra le tre diverse temperature durante i 10 cicli per $s = 24$ mm.

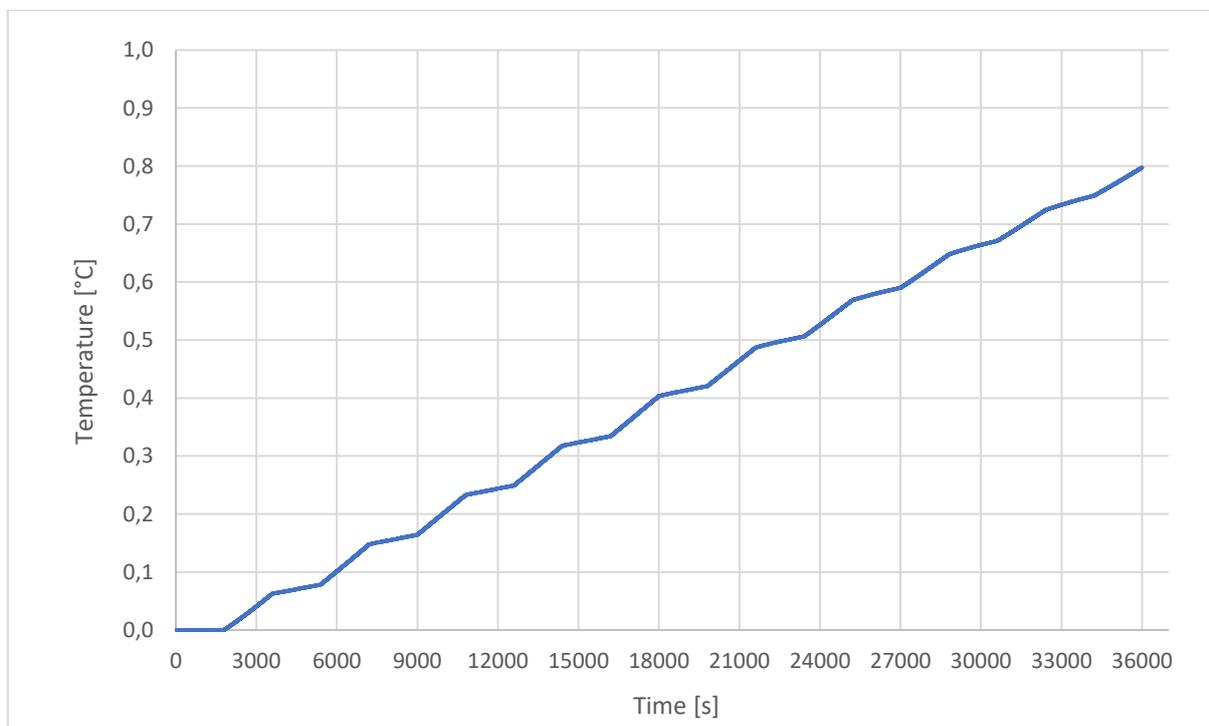


Fig.14 Grafico indicante l'andamento del liquid fraction durante i 10 cicli per $s = 24$ mm.

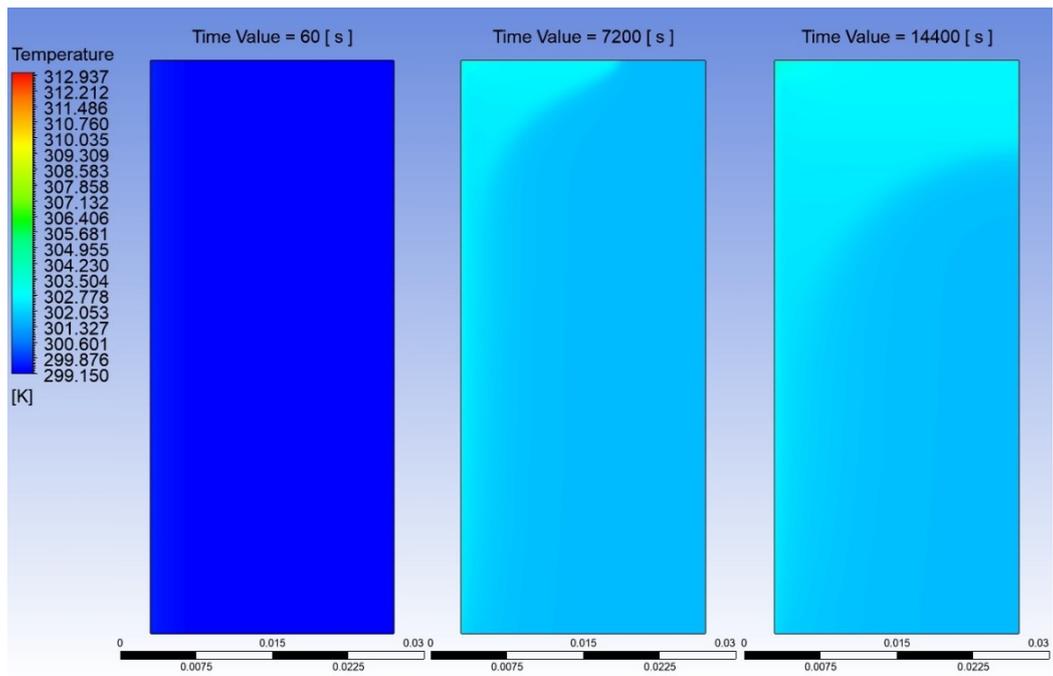


Fig.15 Contour della temperatura a diversi timestep, caso con $s = 24$ mm.

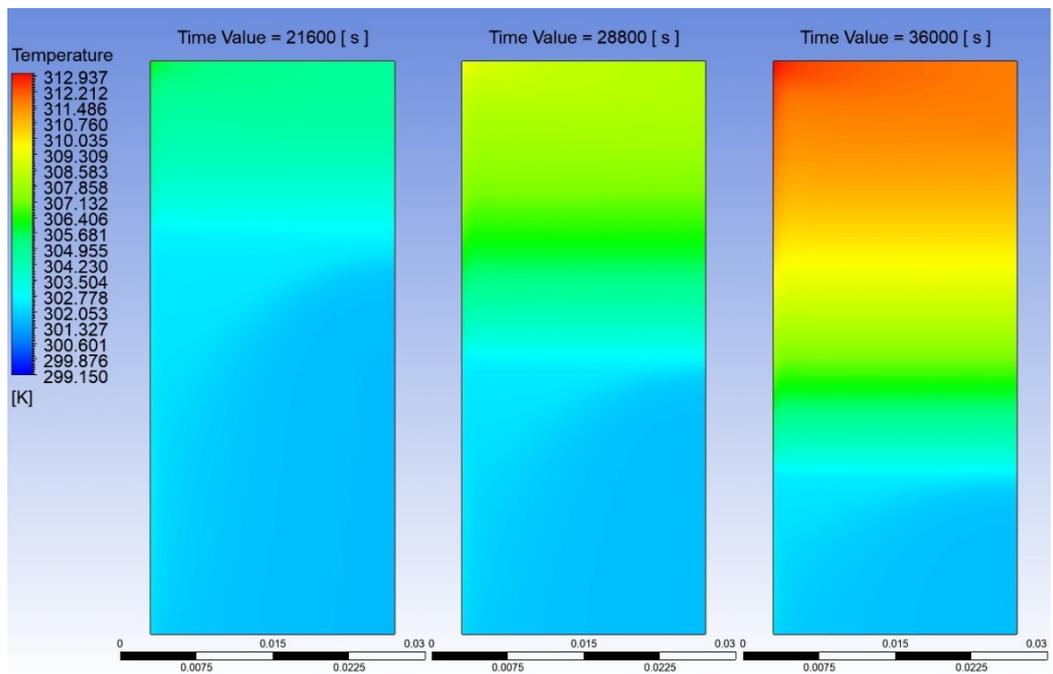


Fig.16 Contour della temperatura a diversi timestep, caso con $s = 24$ mm.

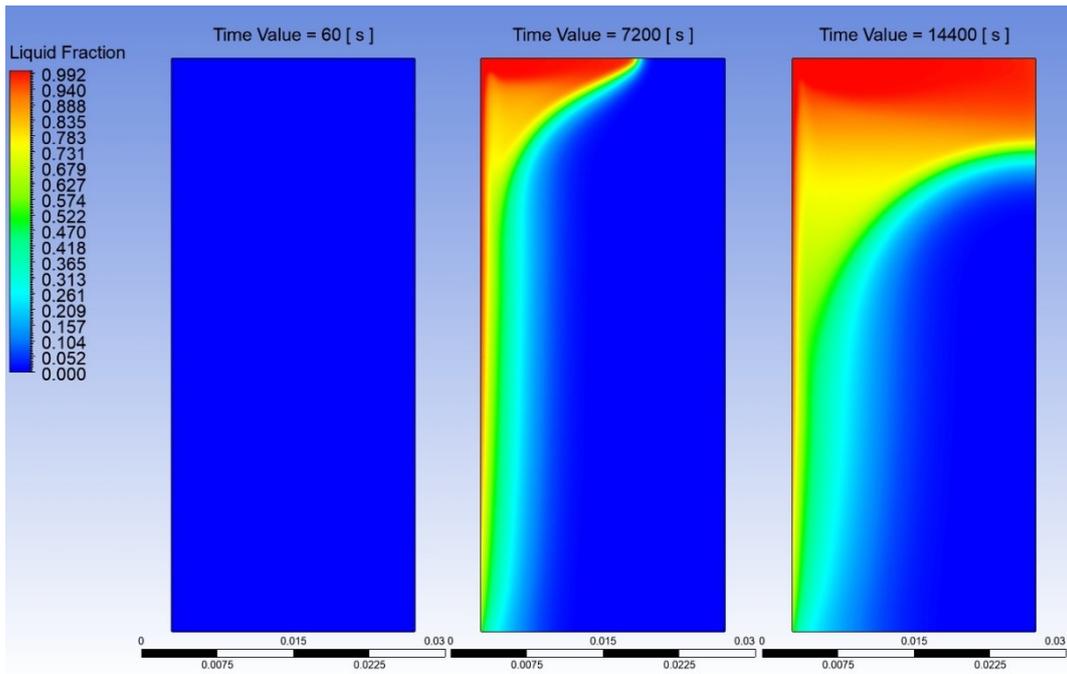


Fig.17 Contour del liquid fraction a diversi timestep, caso con $s = 24$ mm.

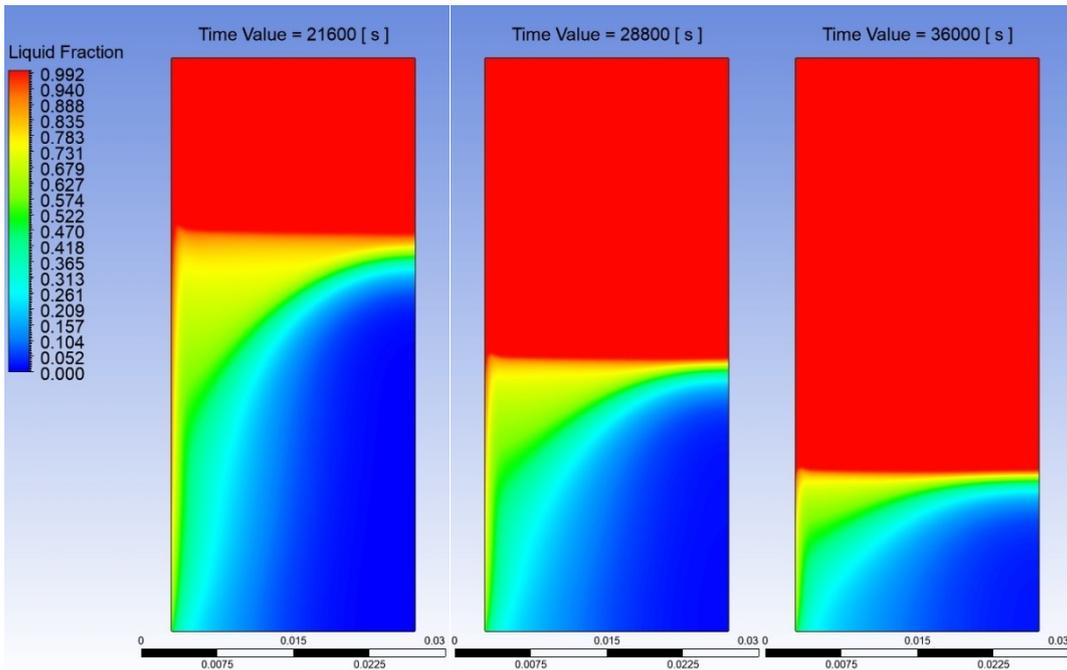


Fig.18 Contour del liquid fraction a diversi timestep, caso con $s = 24$ mm.

10.1 GEOMETRIA ALTERNATIVA

È stata studiata una geometria alternativa che consentisse, a parità di area di PCM impiegato, una migliore dissipazione di calore.

Considerando l'area del rettangolo di PCM con lo spessore di 24 mm, quindi di area $24 \times 57 = 1368 \text{ mm}^2$, è stata pensata una sezione di egual superficie che consentisse di asportare maggior calore dalla parte superiore del sistema, zona nota per essere più calda rispetto a quella inferiore (questo è stato notato dalle prove dei diversi spessori fatte precedentemente)

Case 3D della geometria alternativa:

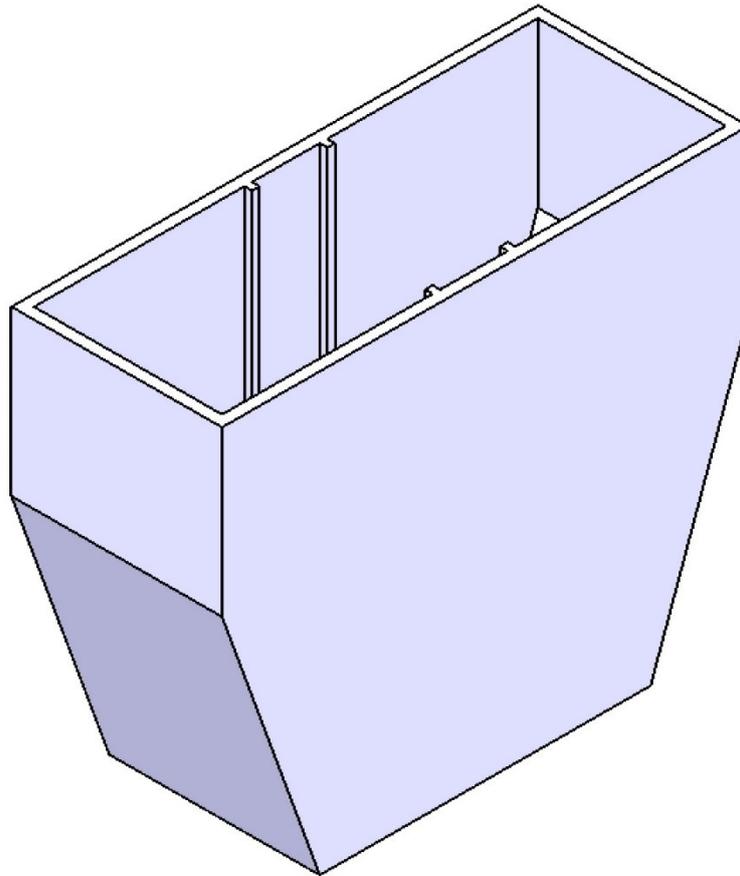


Fig.15 Disegno della geometria alternativa.

Tale geometria, rispetto alla prova con lo spessore di 24 mm, migliora la performance diminuendo globalmente ogni temperatura, compresa quella massima.

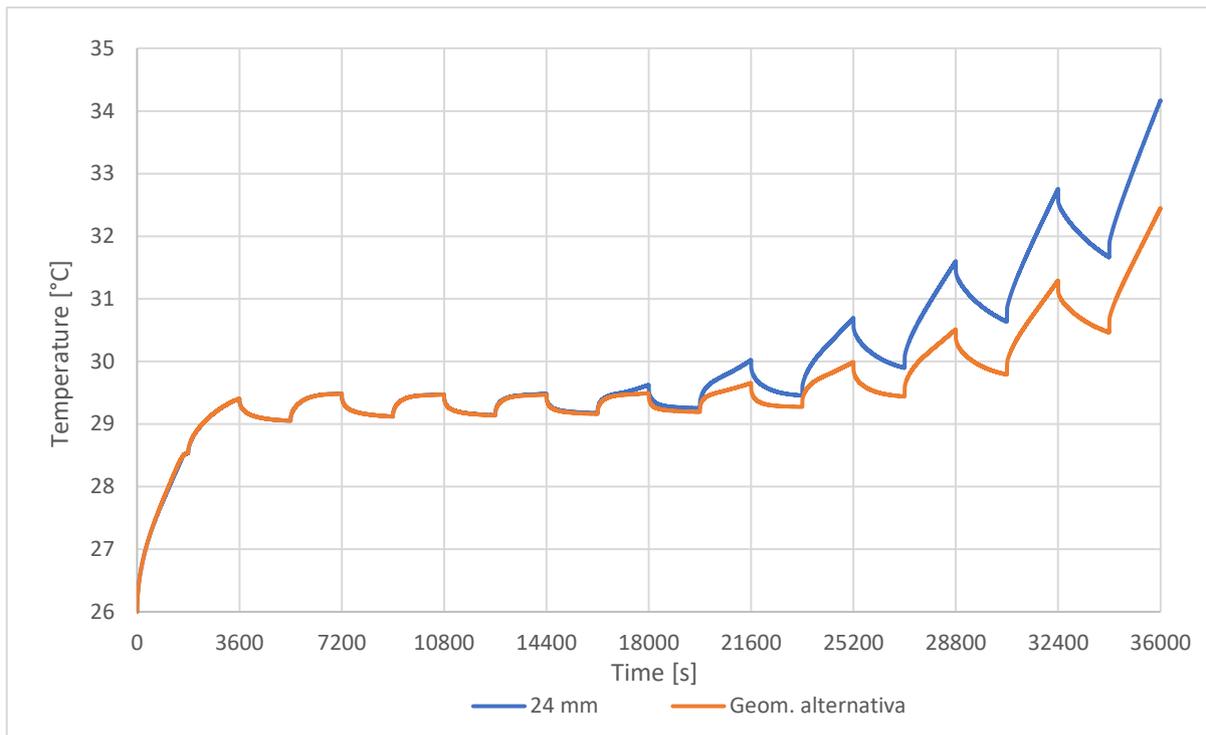


Fig.16 Grafico di comparazione della temperatura all'interfaccia con la batteria, nei due casi, a parità di area.

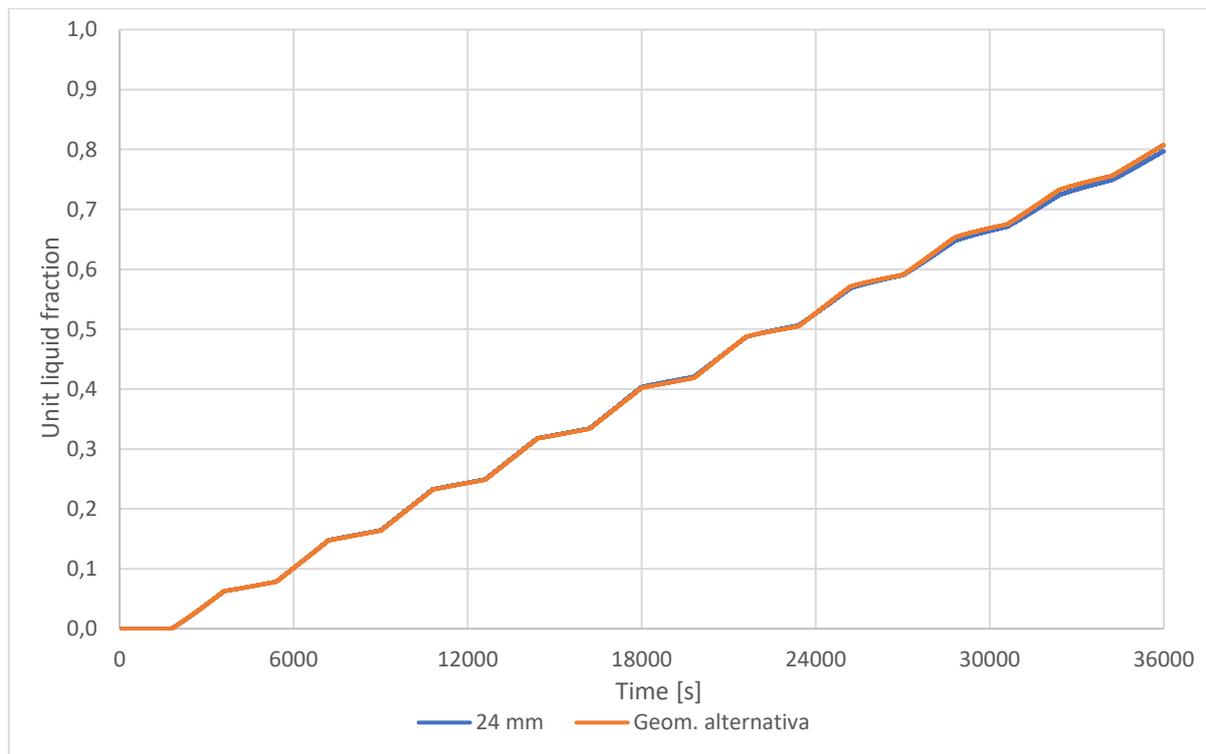


Fig.17 Grafico di comparazione del liquid fraction, nei due casi, a parità di area.

È facile notare come sia leggermente maggiore la frazione di liquido finale nel caso alternativo, questo perché si vuole ottimizzare la dissipazione di calore e di conseguenza, per fare ciò, è necessario una maggior fusione di PCM.

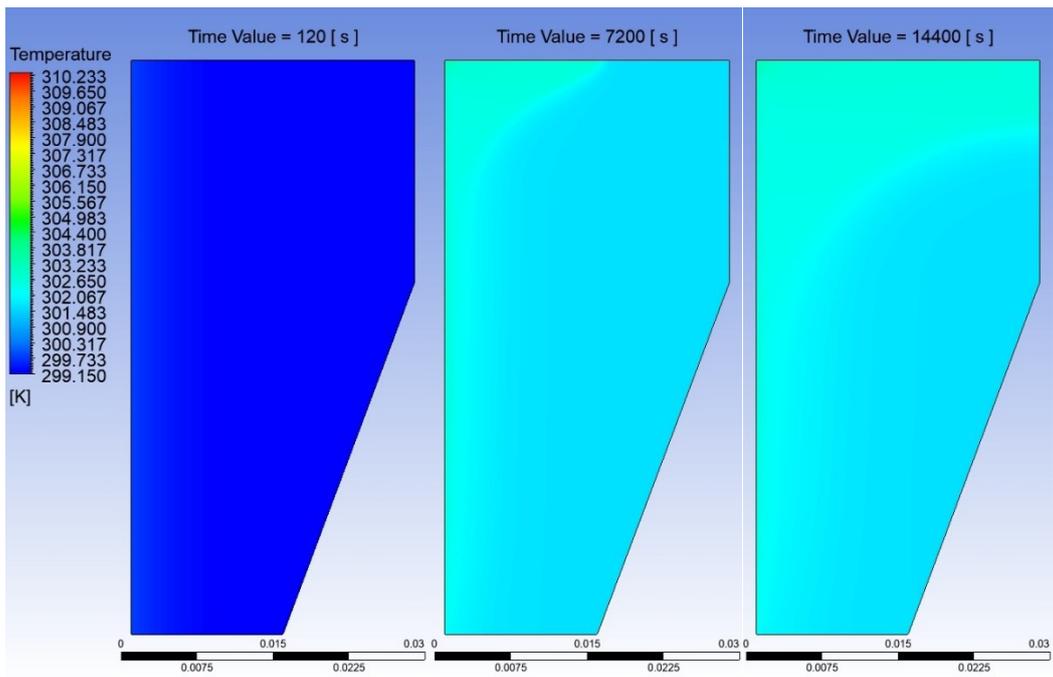


Fig.20 Contour della temperatura a diversi timestep, caso geometria alternativa.

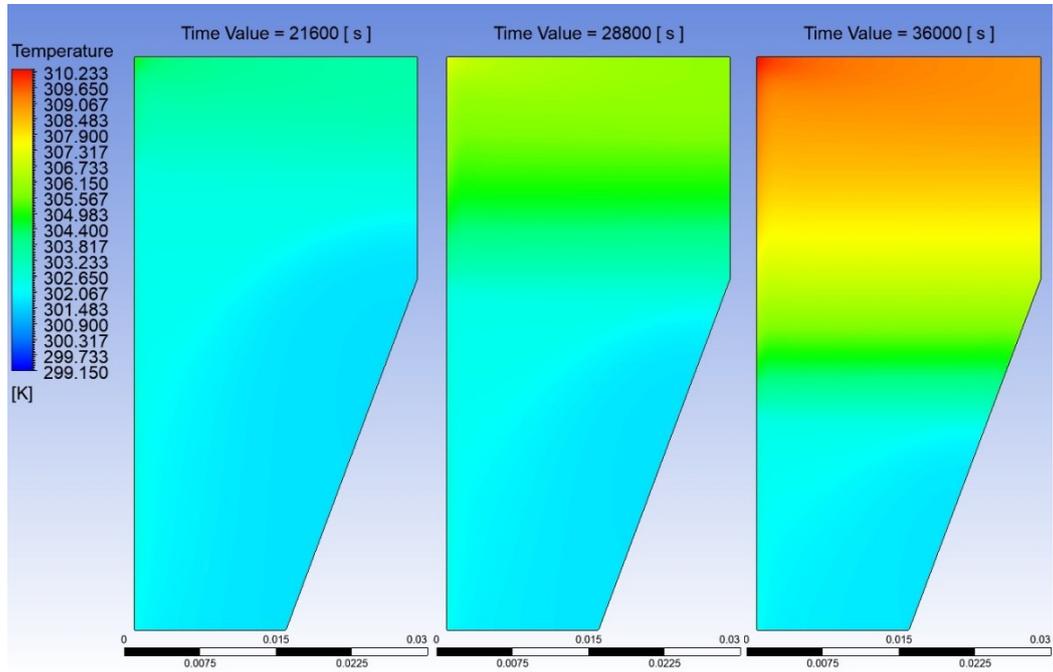


Fig.21 Contour della temperatura a diversi timestep, caso geometria alternativa.

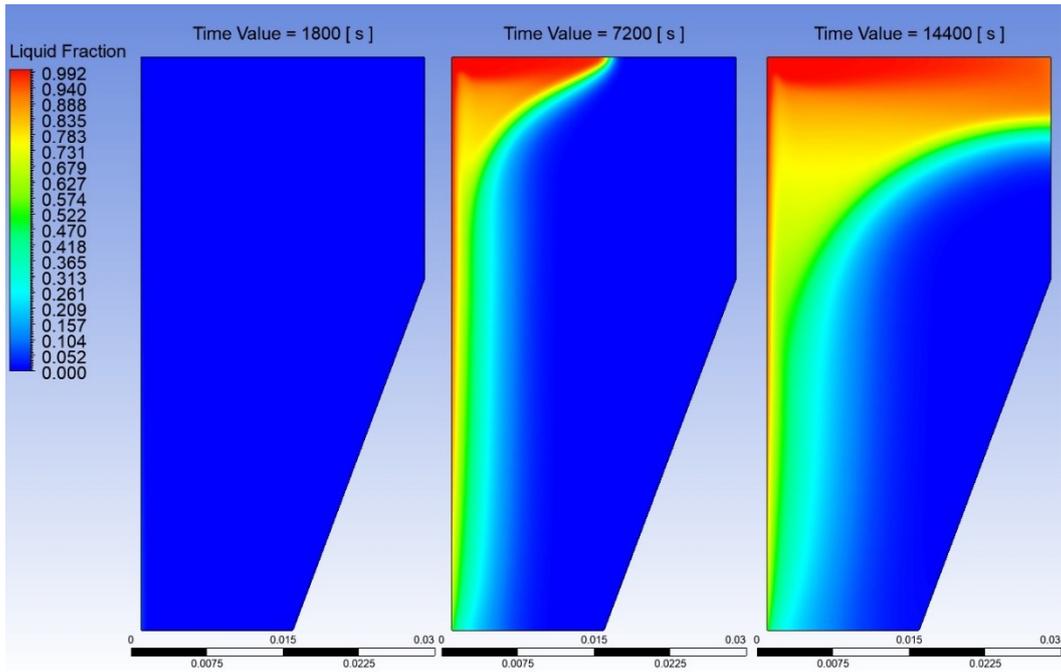


Fig.18 Contour del liquid fraction a diversi timestep, caso geometria alternativa.

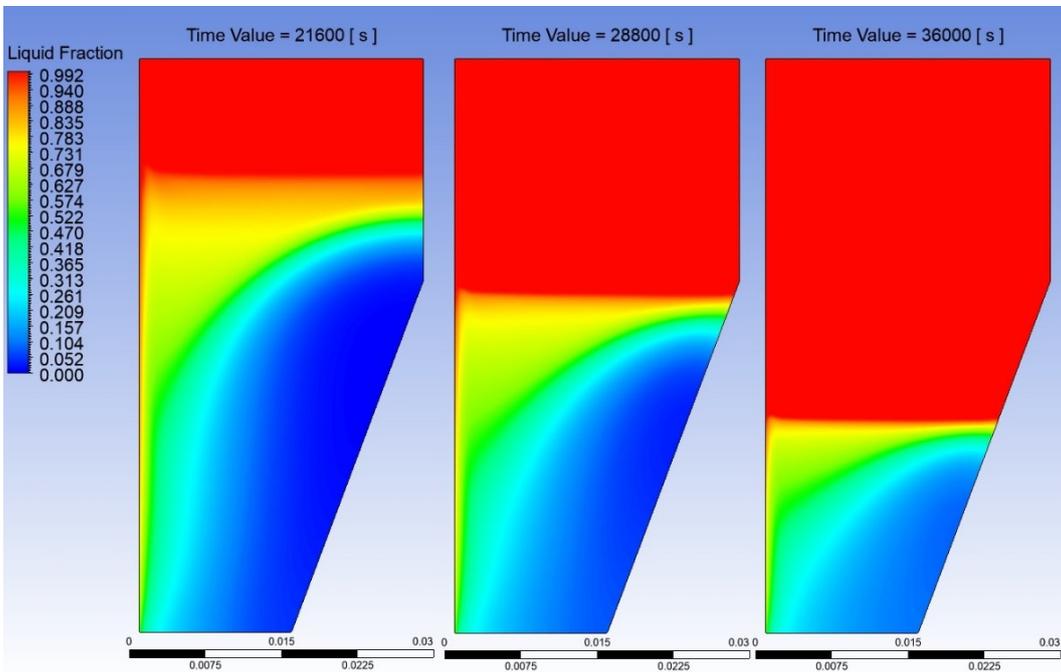


Fig.19 Contour del liquid fraction a diversi timestep, caso geometria alternativa.

11. CONSIDERAZIONI SUPPLEMENTARI

Come precedentemente mostrato, sono state effettuate delle prove aggiuntive apportando soluzioni derivate dall'analisi dei risultati delle prove con 10 cicli di carica e scarica. Dai contour del *case* originario si può osservare un profilo di temperatura crescente lungo l'asse verticale Z e temperature più basse avvicinandosi alla base del PCM, dovute alla variazione di densità del materiale a cambiamento di fase. Per migliorare quindi il raffreddamento della cella si è pensata una geometria alternativa per il *case* tale da integrare maggiori quantità di PCM mano a mano che si sale di quota. Questa soluzione infatti ha dato risultati migliori nelle simulazioni.

Ulteriori miglioramenti potrebbero essere realizzati riprogettando lo stack di batterie in modo da ottimizzare l'impacchettamento e diminuire il più possibile gli ingombri. Un problema legato allo stack, dove un terminale scalda sensibilmente di più dell'altro, viene riportato ad esempio nell'articolo *Thermal Management of Lithium-Ion Pouch Cell with Indirect Liquid Cooling using Dual Cold Plates Approach*. In questo caso anche lo spessore potrà essere variabile anche lungo la larghezza della cella, in modo da raffreddare con più efficienza la tab che genera più calore.

11.1 INTEGRAZIONE PCM CON SISTEMA ATTIVO DI RAFFREDDAMENTO

Il PCM è un sistema di raffreddamento passivo non adatto a smaltire verso l'esterno in maniera efficiente il calore assorbito. Per questo motivo è stato pensato un *case* comprensivo di un sistema di dissipazione termica attraverso un fluido (acqua) e con l'ausilio di alette per aumentare la superficie di scambio con l'ambiente esterno, come quello riportato in *Fig. 20*.

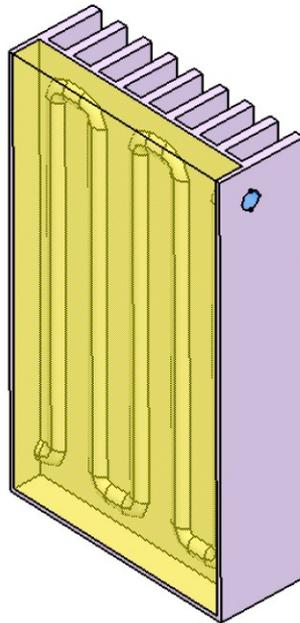


Fig.20 Esempio di un *case* dotato di serpentina di raffreddamento ad acqua e di alette esterne.

Il tubo a serpentina dove scorre l'acqua percorre la parete in direzione verticale per distribuire il calore assorbito dal PCM in modo più omogeneo, diminuendo il gradiente di temperatura lungo tale direzione dovuto alla variazione di densità.

12. CONCLUSIONI

Lo scopo di ottenere, dopo 10 cicli di carica e scarica, una temperatura in ogni punto del materiale inferiore a 40 °C e una frazione di liquido finale inferiore a 1 è stato raggiunto per le prove con uno spessore pari a 24 mm. Inoltre, un contenitore con uno spessore più grande sarebbe sovradimensionato, necessitando un maggior volume di PCM e di materiale per costruire il *case* stesso, con conseguente aumento degli ingombri e del costo di produzione.

Un eventuale modello software per la validazione, più simile al caso reale, avrebbe dovuto considerare le pareti non adiabatiche, presentando così uno scambio termico tra il PCM e il *case*, quindi tra il *case* e l'ambiente esterno. Tale dissipazione termica avrebbe probabilmente portato, oltre a un flusso di carica e di scarica più blandi, anche uno spessore finale inferiore a 24 mm.

L'andamento dei cicli di carica e scarica, riproposto nelle simulazioni tramite l'utilizzo della transient table con passaggi istantanei di flusso termico costante non rispecchia un caso reale in quanto il passaggio tra un flusso e l'altro avviene in un intervallo finito. Questa discrepanza si può comunque ritenere trascurabile.

È stata studiata anche una geometria alternativa per il *case*, con la sezione della parte inferiore minore di quella superiore, che da analisi preliminari sul profilo di temperatura sembrerebbe dare risultati migliori nello smaltimento del calore.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] Changcheng Liu , Dengji Xu , Jingwen Weng , Shujia Zhou , Wenjuan Li , Yongqing Wan, Shuaijun Jiang, Dechuang Zhou , Jian Wang and Que Huang, “Phase Change Materials Application in Battery Thermal Management System: A Review”,
- [2] Dario GUARDA, Michele CALATI, William DELGADO, Stefano LANDINI, Remo WASE, Anastasia STAMATIOU, Tadhg , O’ Donovan, Simone MANCIN - Numerical study of PCM based TMS for Li-Ion cells (PAPER ID: 2116 DOI: 10.18462/iir.PCM.2021.2116).