

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE

DEI SISTEMI INDUSTRIALI

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**ANALISI NUMERICA DI SOLUZIONI
INNOVATIVE PER IL MIGLIORAMENTO
DELLE PRESTAZIONI DI ACCUMULI
TERMICI LATENTI**

Relatore: Prof. Mancin Simone

Correlatore: Prof. Zilio Claudio

Laureando: Guarda Dario

Matricola: 1205392

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

*A V.G.,
perché possa trovare riposo.*

RINGRAZIAMENTI

La conclusione di un percorso formativo porta sempre con sé una serie di riflessioni. Le conoscenze tecniche acquisite nel corso degli studi sono sicuramente un valore aggiunto che porterò sempre con me. Tuttavia, sono i rapporti interpersonali sviluppati la vera ricchezza che ho ricevuto in questi anni pieni di impegni e di passioni. Perciò vorrei ringraziare tutti coloro che mi sono stati accanto, mi hanno sostenuto, aiutato a migliorare e messo nelle condizioni di dare il meglio di me.

In primis la mia famiglia (papà Pietro, mamma Rosanna, mia sorella Silvia con Giulio, Nonni, Nonne, Zii, Cugini e Cuginetti). Un enorme ringraziamento va a Diletta, la mia ragazza, con la quale ho condiviso ogni mio pensiero, positivo o negativo, cosa che mi ha aiutato molto, specialmente nel superare tutte le ansie provate nel corso degli studi. Un ringraziamento a tutti coloro che mi hanno aiutato nei vari esami, nei lavori di tesi e in tutto il percorso universitario. Giulio, che mi ha sempre ispirato con “racconti” della sua esperienza e non solo; Michele, senza il quale il presente lavoro sarebbe stato una montagna insormontabile; Simone per la sua disponibilità; Ruggero, Erica e l’azienda CFD FEA Service s.r.l., la quale mi ha permesso di svolgere un tirocinio meraviglioso, venendo incontro ad ogni mia esigenza; tutto il personale universitario che mi ha permesso di vivere 5 anni speciali. Ultimi ma non per importanza, i compagni di studio e i miei amici con i quali ho condiviso moltissime esperienze indimenticabili.

NOMENCLATURA

β	[1/K]	Coefficiente di espansione termica
γ	[-]	Frazione liquida
ϵ	[-]	Costante
ε	[-]	Porosità
ρ	[kg/m ³]	Densità
ρ_0	[kg/m ³]	Densità di riferimento assegnata nell'approssimazione Boussinesq
$\bar{\tau}$	[Pa]	Tensore delle tensioni
A	[m ²]	Area
A_{mush}	[kg/m ³ s]	Costante relativa alla <i>mushy region</i> (<i>mushy zone constant</i>)
c	[kg/m ³ s]	Costante
c_p	[J/kg K]	Calore specifico a pressione costante
\bar{S}	[kg/m ² s ²]	Termine sorgente per l'equazione della quantità di moto
g (o \vec{g})	[m/s ²]	Accelerazione di gravità
h	[J/kg]	Entalpia specifica
h_{ref}	[J/kg]	Entalpia specifica di riferimento ad una certa T_{ref}
H	[J/kg]	Entalpia specifica totale (sensibile e latente)
ΔH	[J/kg]	Variazione di entalpia specifica latente
k	[W/m K]	Conduttività termica
L	[J/kg]	Calore latente di fusione
p	[Pa]	Pressione
q	[W]	Flusso termico
\bar{q}	[W/m ²]	Flusso termico specifico
t	[s]	Tempo
T	[°C] o [K]	Temperatura
T_j	[°C] o [K]	Temperatura di giunzione
T_0	[°C] o [K]	Temperatura operativa
T_{ref}	[°C] o [K]	Temperatura di riferimento

T_L	[°C] o [K]	Temperatura di liquidus o T _{liquidus}
T_S	[°C] o [K]	Temperatura di solidus o T _{solidus}
v (o \vec{v})	[m/s]	Velocità
x	[m]	Coordinata spaziale

HVAC *Heating Ventilation and Air Conditioning*

LTESS *Latent Thermal Energy Storages*

PCMs *Phase Change Materials*

PPI *Pores Per Inch*

UDFs *User Defined Functions*

INDICE

RINGRAZIAMENTI.....	v
NOMENCLATURA.....	vii
INDICE.....	ix
ELENCO DELLE TABELLE E DELLE FIGURE	xi
SOMMARIO	xv
1 INTRODUZIONE: PCMs IN LTESs	1
2 MODELLO NUMERICO	11
2.1 Modellazione della fusione/solidificazione in <i>Ansys-Fluent</i>	11
2.2 Materiali.....	17
2.3 Geometrie.....	23
2.4 Mesh e time step	29
2.5 Condizioni al contorno.....	37
3 RISULTATI	47
3.1 Validazione del caso di riferimento (provino vuoto)	48
3.2 Validazione delle strutture porose	63
3.3 Studio della costante A_{mush}	71
3.4 3D: <i>slab</i> e geometria completa	84
4 CONCLUSIONI.....	89
BIBLIOGRAFIA	93

ELENCO DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

TABELLE:

Tabella 1.1: Conversioni dimensione del poro di base-PPI dei provini studiati da Righetti et al. [1], [25].	7
Tabella 2.1: RT70, caratteristiche fornite da Rubitherm Technologies GmbH [32].	17
Tabella 2.2: Caratterizzazione di RT55 [3].	18
Tabella 2.3: Caratteristiche del PCM RT70 usate nelle simulazioni.	22
Tabella 2.4: Dimensioni delle mesh usate nel caso di riferimento.	29
Tabella 2.5: Sintesi delle mesh generate.	36
Tabella 2.6: Valori inseriti in Ansys-Fluent per la convezione naturale e l'irraggiamento.	40

FIGURE:

Figura 1.1: Geometrie studiate da Righetti et al. [25].	7
Figura 2.1: Andamento del calore specifico a pressione costante ipotizzato nella simulazione.	20
Figura 2.2: Provini studiati da Righetti et al. [1].	23
Figura 2.3: Sezione del caso di riferimento.	24
Figura 2.4: Dominio 2D caso di riferimento (senza aria).	24
Figura 2.5: 40 mm, sezione normale.	25
Figura 2.6: 20 mm, sezione normale.	25
Figura 2.7: 10 mm, sezione normale.	25
Figura 2.8: Sezione del caso 10 mm. L'aria sopra il PCM non è rappresentata.	26
Figura 2.9: 40 mm.	26
Figura 2.10: 20 mm.	26
Figura 2.11: 10 mm.	26
Figura 2.12: 10 mm, slab 3D.	27
Figura 2.13: 10 mm, slab 3D, vista in pianta.	27
Figura 2.14: 10 mm, slab 3D, vista frontale.	27

Figura 2.15: 10 mm slab 3D, vista da dietro.	27
Figura 2.16: 10 mm, geometria 3D completa.	28
Figura 2.17: Mesh 1.	30
Figura 2.18: Mesh 2.	30
Figura 2.19: Mesh 3.	30
Figura 2.20: Mesh 1, dettaglio.	30
Figura 2.21: Mesh 2, dettaglio.	30
Figura 2.22: Mesh 3, dettaglio.	30
Figura 2.23: 40 mm, mesh.	32
Figura 2.24: 40 mm, mesh, dettaglio.	32
Figura 2.25: 20 mm, mesh.	32
Figura 2.26: 20 mm, mesh, dettaglio.	32
Figura 2.27: 10 mm, mesh.	33
Figura 2.28: 10 mm, mesh, dettaglio.	33
Figura 2.29: 10 mm, slab 3D, mesh.	34
Figura 2.30: 10 mm, 3D completo, mesh, dettaglio.	34
Figura 2.31: 10 mm, 3D completo, mesh.	35
Figura 2.32: Spigolo denominato “down”.	37
Figura 2.33: Spigolo denominato “adiab”.	38
Figura 2.34: Spigolo denominato “side”.	39
Figura 2.35: Spigolo denominato “up”.	40
Figura 2.36: Spigolo denominato “symmetry”.	41
Figura 2.37: Dominio fluido denominato “pcm_fluid”.	42
Figura 2.38: Dominio solido denominato “al_solid”.	42
Figura 2.39: 40 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.	43
Figura 2.40: 20 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.	43
Figura 2.41: 10 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.	44
Figura 2.42: 10 mm, slab 3D, nomi di ogni patch.	44
Figura 2.43: 10 mm, 3D completo, nomi di ogni patch.	45
Figura 3.1: Caso di riferimento, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate. ...	48
Figura 3.2: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, time step 0.5 s.	49
Figura 3.3: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.5 s.	50

Figura 3.4: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, time step 0.3 s.	51
Figura 3.5: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.3 s.	51
Figura 3.6: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, time step 0.1 s.	52
Figura 3.7: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.1 s.	52
Figura 3.8: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.1 s, dettaglio.	53
Figura 3.9: Posizione delle termocoppie disposte all'interno dei vari provini [1], [25].	54
Figura 3.10: t5, time step 0.5 s.	55
Figura 3.11: t5, time step 0.3 s.	55
Figura 3.12: t5, time step 0.1 s.	55
Figura 3.13: t6, time step 0.5 s.	56
Figura 3.14: t6, time step 0.3 s.	56
Figura 3.15: t6, time step 0.1 s.	56
Figura 3.16: t7, time step 0.5 s.	57
Figura 3.17: t7, time step 0.3 s.	57
Figura 3.18: t7, time step 0.1 s.	57
Figura 3.19: t8, time step 0.5 s.	58
Figura 3.20: t8, time step 0.3 s.	58
Figura 3.21: t8, time step 0.1 s.	58
Figura 3.22: t9, time step 0.5 s.	59
Figura 3.23: t9, time step 0.3 s.	59
Figura 3.24: t9, time step 0.1 s.	59
Figura 3.25: t10, time step 0.5 s.	60
Figura 3.26: t10, time step 0.3 s.	60
Figura 3.27: t10, time step 0.1 s.	60
Figura 3.28: 10 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.	63
Figura 3.29: 10 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).	64
Figura 3.30: 10 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).	64
Figura 3.31: 20 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.	65
Figura 3.32: 20 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).	66
Figura 3.33: 20 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).	66

Figura 3.34: 40 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.	67
Figura 3.35: 40 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).....	68
Figura 3.36: 40 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).....	69
Figura 3.37: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.	72
Figura 3.38: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.	72
Figura 3.39: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.	73
Figura 3.40: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.	74
Figura 3.41: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ulteriore ingrandimento.....	75
Figura 3.42: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.	76
Figura 3.43: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.	77
Figura 3.44: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.	77
Figura 3.45: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.	78
Figura 3.46: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.	79
Figura 3.47: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.	79
Figura 3.48: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.	80
Figura 3.49: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.	81
Figura 3.50: 10 mm, temperatura media del PCM confrontata con le analisi 3D (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).....	84
Figura 3.51: 10 mm, frazione liquida confrontata con le analisi 3D (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m ³ s).	85

SOMMARIO

L'oggetto del presente lavoro è lo studio, attraverso analisi numeriche, del comportamento di materiali a cambiamento di fase (PCMs, *Phase Change Materials*), durante il processo di liquefazione all'interno di accumuli termici latenti (LTESs, *Latent Thermal Energy Storages*). L'obiettivo è stato quello di sviluppare un modello di simulazione termo-fluidodinamico affidabile all'interno dell'ambiente *Ansys-Fluent* validato confrontando i risultati numerici con quelli sperimentali ottenuti presso il laboratorio di Nanofluidi del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (DTG) dell'Università degli Studi di Padova. I dati sperimentali di riferimento, recentemente pubblicati nel lavoro di Righetti et al. [1], riportano i profili di temperatura misurati durante la fusione e la solidificazione di una paraffina all'interno di strutture periodiche 3D realizzate in alluminio tramite *additive manufacturing*. I casi analizzati sono quattro: un provino di riferimento vuoto e tre geometrie contenenti le suddette strutture. Il modello di simulazione, opportunamente validato, può potenzialmente diventare uno strumento utile per valutare il comportamento di diversi materiali a cambiamento di fase all'interno di strutture periodiche di diverso tipo per varie applicazioni. Si è andati alla ricerca di un modello bidimensionale in ottica semplificativa, in quanto le simulazioni di fusione e solidificazione comportano un grande costo computazionale. Perciò sviluppare ragionevoli ipotesi semplificative e sfruttare le simmetrie geometriche diventa fondamentale nell'approccio a queste problematiche. È stata svolta un'analisi di sensibilità della *mesh* trovando un numero di elementi ottimale. Contemporaneamente, si sono studiati diversi *time step* al fine di trovarne uno che garantisse buoni risultati e durate delle simulazioni accettabili. Per i tre provini contenenti le strutture periodiche si è analizzata l'influenza della costante legata alla *mushy region*, la zona di interfaccia tra la fase solida e liquida che viene modellizzata dal *software Ansys-Fluent* come una zona porosa, con porosità pari alla frazione liquida. Infine, si sono svolte alcune simulazioni tridimensionali per valutare la discrepanza con i modelli bidimensionali precedenti e la ragionevolezza delle ipotesi semplificative fatte.

La struttura dell'elaborato risulta così suddivisa:

- Capitolo 1:
 - o introduzione ai PCMs usati in LTESs: problematiche e varie proposte di miglioramento;
 - o presentazione del presente studio.
- Capitolo 2:
 - o descrizione del modello numerico utilizzato, ipotesi semplificative, dominio, *mesh*, time step, condizioni al contorno.
- Capitolo 3:
 - o presentazione dei risultati ottenuti per ogni geometria studiata,
 - o analisi della *mesh* e del *time step*,
 - o analisi della *mushy zone constant*.
- Capitolo 4:
 - o conclusioni e sviluppi futuri.

1 INTRODUZIONE: PCMs IN LTESs

L'utilizzo dei combustibili fossili comporta circa il 95% delle emissioni totali di anidride carbonica rilasciata in atmosfera [2]. La ricerca di fonti energetiche rinnovabili e di metodi innovativi per lo sfruttamento e il recupero dell'energia sono di fondamentale importanza per tentare di ridurre tale valore. In quest'ottica i materiali a cambiamento di fase rappresentano una soluzione interessante.

Il termine "materiale a cambiamento di fase" o PCM (*Phase Change Material*) generalmente si riferisce a quei materiali che sfruttano il cambiamento di fase solido-liquido per assorbire e rilasciare calore. Come constatato da Colla et al. [3], i PCM possono essere usati in LTESs (*Latent Thermal Energy Storages*) poiché grazie al calore latente di fusione sono in grado di immagazzinare grandi quantità di energia in volumi ridotti, se confrontati con gli accumuli sensibili. Sharma et al. [4] affermano che i PCMs possono immagazzinare una quantità di calore per unità di volume che va dalle 5 alle 14 volte quello di un sistema sensibile, nello stesso intervallo di temperatura. Inoltre, il processo di cambiamento di fase è da considerarsi praticamente isoterma. Quest'ultima caratteristica permette di massimizzare lo scambio termico e di limitare i cicli termici a cui sarebbe sottoposto il sistema se la temperatura continuasse a variare. È anche importante sottolineare come l'impiego dei materiali a cambiamento di fase permetta il disaccoppiamento tra la domanda e l'offerta di energia [5], fondamentale, per esempio, dove si desidera sfruttare al meglio le fonti rinnovabili che, per definizione, sono discontinue.

Queste peculiarità dei PCMs possono trovare implementazione in una vasta gamma di applicazioni, come, per esempio:

- i. la conservazione di energia negli edifici [6];
- ii. sistemi HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) [7];
- iii. la generazione di energia elettrica [8];
- iv. il recupero del calore di scarto [9], [10];
- v. il raffreddamento di componenti elettronici [11];
- vi. il controllo delle fasi di carica delle batterie per gli autoveicoli a trazione elettrica [12];

- vii. il trasporto refrigerato [13];
- viii. la gestione efficiente di fonti energetiche rinnovabili.

I materiali a cambiamento di fase si possono classificare come segue [4]:

1. ORGANICI

- 1.1. paraffine
- 1.2. non paraffine

2. INORGANICI

- 2.1. sali idrati
- 2.2. metalli

3. EUTETTICI

- 3.1. organico-organico
- 3.2. inorganico-inorganico
- 3.3. inorganico-organico

Tuttavia, molti di questi materiali non soddisfano i requisiti per poter essere utilizzati nella pratica. In particolare, come descritto da Sharma et al. [4], oltre ad una temperatura di fusione compatibile con l'applicazione, un PCM ideale dovrebbe presentare le seguenti caratteristiche:

- i. elevato calore latente per unità di massa;
- ii. alta densità;
- iii. ottima conducibilità termica;
- iv. minima variazione di volume nel processo di cambiamento di fase;
- v. assenza di sottoraffreddamento;
- vi. compatibilità coi materiali che costituiscono l'accumulo;
- vii. non tossico;
- viii. non pericoloso;
- ix. non infiammabile;

- x. abbondante;
- xi. economico.

Va sottolineato, tuttavia, che il PCM ideale non esiste. Ciononostante, per applicazioni a medio-bassa temperatura, le paraffine possono essere considerate degli ottimi materiali a cambiamento di fase anche se presentano due limiti principali: una grande variazione di volume nel processo di solidificazione-fusione e una bassa conducibilità termica ($0.2-0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) che limita il loro impiego in efficienti accumuli termici latenti. Quest'ultimo è un problema non solo per le paraffine ma per tutti i materiali a cambiamento di fase studiati, eccezion fatta per i metalli, i quali però, presentando alti punti di fusione, possono essere utilizzati come PCM unicamente in applicazioni ad elevate temperature.

I PCM considerati nella pratica sfruttano principalmente il cambiamento di fase solido-liquido in quanto la conseguente variazione di volume è minore rispetto ai passaggi di stato solido-vapore o liquido-vapore. Grandi cambiamenti di volume renderebbero nettamente problematica la progettazione di sistemi adeguati al contenimento dei PCM [4].

Molti ricercatori hanno rivolto la loro attenzione allo studio di tecniche atte a migliorare la conduttività termica dei PCM e, in generale, le prestazioni dei LTESs. Jegadheeswaran e Pohekar [14] e Fan and Khodadadi [15] hanno revisionato buona parte di questi lavori. Esempi di soluzioni per il miglioramento delle prestazioni di scambio dei PCM impiegati in LTESs sono: dispersioni di nano-particelle [3], [16], [17], [18], superfici alettate [18], [19], [20], [21], schiume metalliche [5], [21], [22], [23], [24] ecc. Tuttavia, uno studio sistematico per identificare una metodologia che permetta di dimensionare in modo efficace degli efficienti LTESs basati su PCM che risultino essere anche sufficientemente economici non è stato ancora condotto [25].

Colla et al. [3] hanno caratterizzato sperimentalmente alcuni *nano-PCMs* ottenuti disperdendo nanoparticelle di ossido di alluminio (Al_2O_3) all'interno di paraffine in varie concentrazioni. Sono state ricavate alcune proprietà termofisiche come calore specifico, calore latente e conduttività termica. Gli autori hanno inoltre realizzato delle analisi numeriche per valutare gli effetti delle nanoparticelle nel processo di transizione solido-liquido con riferimento a potenziali applicazioni nel raffreddamento di componenti elettronici. Dalla caratterizzazione di questi *nano-PCMs* si è osservato come il miglioramento

di conduttività termica dato dalla dispersione di nanoparticelle in termini relativi risulti essere buono. Tuttavia, in termini assoluti, il materiale ottenuto presenta ancora una bassa conducibilità termica, dell'ordine di $0.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Anche Wang et al. [16] hanno concentrato le loro ricerche sui *nano-PCMs*, analizzando delle nanoparticelle di TiO_2 inserite in diverse concentrazioni all'interno di paraffine. La conduttività termica dei materiali così ottenuti risulta essere migliore rispetto al PCM di partenza, ma comunque ancora molto bassa, in termini assoluti.

Ebadi et al. [17] hanno studiato numericamente la fusione di un *nano-PCM* all'interno di un accumulo termico cilindrico. Successivamente, gli autori hanno validato sperimentalmente i risultati ottenuti. Il *nano-PCM* considerato è formato da olio di cocco, entro il quale sono state disperse nanoparticelle di ossido di rame CuO in diverse concentrazioni. Si è osservato come la prima parte del processo di fusione risulti dominata dalla conduzione, mentre successivamente le forze di galleggiamento superino quelle viscosive e la convezione naturale diventi il meccanismo di scambio principale. Tuttavia, non esiste un regime completamente dominato dalla convezione naturale: è sempre presente il meccanismo della conduzione. È stato constatato come la presenza delle nanoparticelle di CuO non influenzi la velocità di fusione all'inizio del processo: ciò avviene in modo più marcato al passare del tempo. Si è riscontrato un buon accordo coi risultati sperimentali. I ricercatori si sono proposti di analizzare anche la solidificazione di questo *nano-PCM* in modo da avere una visione globale sull'effetto dell'aggiunta di nanoparticelle di CuO al PCM.

Il ridotto incremento di conduttività termica garantito dalle nanoparticelle può essere, però, ulteriormente migliorato grazie all'utilizzo di strutture appositamente progettate come, per esempio, le geometrie alettate. Singh et al. [18] hanno studiato numericamente il processo di fusione in un LTES formato da un *nano-PCM* con diverse concentrazioni di nanoparticelle di *nano-plates* di grafene disperso in un sistema alettato. Gli autori hanno analizzato diverse configurazioni di LTES: solamente alettato, senza alette ma con nanoparticelle e una combinazione delle due. È stato osservato come aumentare l'altezza dell'aletta porti ad una riduzione del tempo di fusione. Tuttavia, se l'aletta supera un certo limite si riduce lo scambio termico, in quanto le correnti convettive sono ostacolate. Inoltre, l'incremento della frazione di nanoparticelle porta ad un miglioramento prestazionale accompagnato però da una crescita della viscosità e quindi ad una riduzione

dello scambio termico convettivo. La configurazione alettata è da preferire rispetto a quella con nanoparticelle, sebbene sia la combinazione delle due a dare le migliori prestazioni.

Le superfici alettate sono state studiate anche con PCM privi di nanoparticelle. Gil et al. [19] hanno svolto delle analisi sperimentali per valutare l'incremento di conduttività termica in seguito all'utilizzo di alette per serbatoi ad alta temperatura. È stato constatato come la presenza delle alette abbia portato ad una conduttività termica effettiva maggiore e tempi di fusione minori.

Gürtürk e Kok [20] hanno recentemente studiato sperimentalmente e numericamente la fusione e solidificazione di un PCM all'interno di un LTES caratterizzato dalla presenza di alette. Inizialmente, si è analizzato il sistema liscio, successivamente sono state progettate appositamente delle alette al fine di portare il calore in zone del TES che non raggiungevano il cambiamento di fase. Poi, si sono analizzate fusione e solidificazione del sistema alettato. Gli autori affermano come la presenza di strutture appositamente progettate comporti un miglioramento delle prestazioni rispetto alla geometria avente alette classiche. La presenza delle alette inibisce le correnti convettive naturali, ma incrementa lo scambio termico durante le fasi di carica. Di conseguenza, la velocità di fusione aumenta con la superficie di scambio ma in alcuni casi può calare in quanto la convezione naturale si riduce. Gli studiosi non hanno riscontrato effetti rilevanti nella solidificazione del PCM, osservando come la motivazione potrebbe risiedere nel sotto-raffreddamento della paraffina utilizzata.

L'utilizzo di alette è stato confrontato anche con le prestazioni di LTESs basati su schiume metalliche. Nello studio di Zhao et al. [21] si è analizzata numericamente una struttura anulare formata da due tubi concentrici alettati. Gli Autori hanno confrontato diversi casi, variando diversi parametri geometrici, arrivando ad osservare la presenza di un numero ottimale di alette. Successivamente, i ricercatori hanno analizzato anche delle geometrie costituite da schiume metalliche di alluminio, rame e nichel. È stato verificato come una geometria alettata ben progettata possa dare risultati migliori rispetto a quelli che si osserverebbero in presenza di sole schiume metalliche.

Queste ultime sono state studiate anche da Alhusseney et al. [5]. Gli autori hanno simulato numericamente un fascio di tubi contenenti una paraffina dispersa tra le celle e i pori di una schiuma metallica di rame. Per caricare e scaricare il PCM si è usato come

fluido secondario dell'acqua. Si è osservato un grande miglioramento in termini di tempi di carica e scarica, i quali si sono ridotti per oltre il 50% rispetto al caso presentante la sola paraffina. Il modello numerico è stato validato grazie ai dati sperimentali riportati in [26].

Yang et al. [22] hanno investigato numericamente l'influenza delle caratteristiche geometriche (porosità e densità di pori) di una schiuma metallica sul processo di scambio termico per TESs (*Thermal Energy Storages*). È stato osservato come variando opportunamente la porosità si possa ottenere un campo di temperatura più uniforme.

Zhang et al. [23] hanno analizzato le performance di un LTES formato da un sale idrato all'interno di una schiuma di nichel per applicazioni nell'accumulo di energia solare. Gli autori hanno condotto prove sperimentali e analisi numeriche. Si sono studiate fasi di carica lente ad imitazione dell'energia solare. In ogni caso, la presenza della schiuma metallica ha dato migliori prestazioni a causa di un aumento della conduttività termica effettiva del sistema. Sono stati ottenuti risultati numerici in buon accordo con quelli sperimentali.

Un miglioramento prestazionale conseguente la presenza di schiume metalliche è stato sperimentalmente verificato anche da Mancin et al. [24]. Quest'ultimi hanno portato a fusione tre diverse paraffine sottoposte a tre diversi flussi termici. Le misurazioni sono state realizzate con e senza schiuma metallica. Sono state analizzate schiume in rame con porosità costante ($\epsilon=0.95$) ma diverso numero di pori per pollice lineare (PPI, *Pores Per Inch*). Gli autori hanno constatato, non solo una fusione del PCM più uniforme in presenza di schiuma metallica, ma anche una temperatura di giunzione inferiore rispetto al caso con la sola paraffina. Inoltre, la presenza della struttura porosa riduce la problematica legata alla variazione di volume del PCM durante il passaggio di fase. La produzione delle schiume metalliche tuttavia non è economica. È quindi necessario trovare nuove soluzioni per migliorare le prestazioni dei LTESs che si basano su PCMs.

In quest'ottica, e, cercando alternative alle più "tradizionali" superfici alettate e porose, Righetti et al. [1], [25], in due recenti studi, hanno analizzato sperimentalmente le fasi di carica e scarica di un PCM disperso all'interno di strutture periodiche realizzate mediante *additive manufacturing*. L'utilizzo di strutture metalliche permette una maggiore uniformità di dispersione del calore e di conseguenza minori tempi di fusione e solidificazione del PCM. Gli Autori hanno valutato tre diverse geometrie presentanti al

loro interno delle strutture periodiche piramidali con diverse dimensioni della cella di base (10, 20 e 40 mm), ma costante porosità (95%), Figura 1.1.

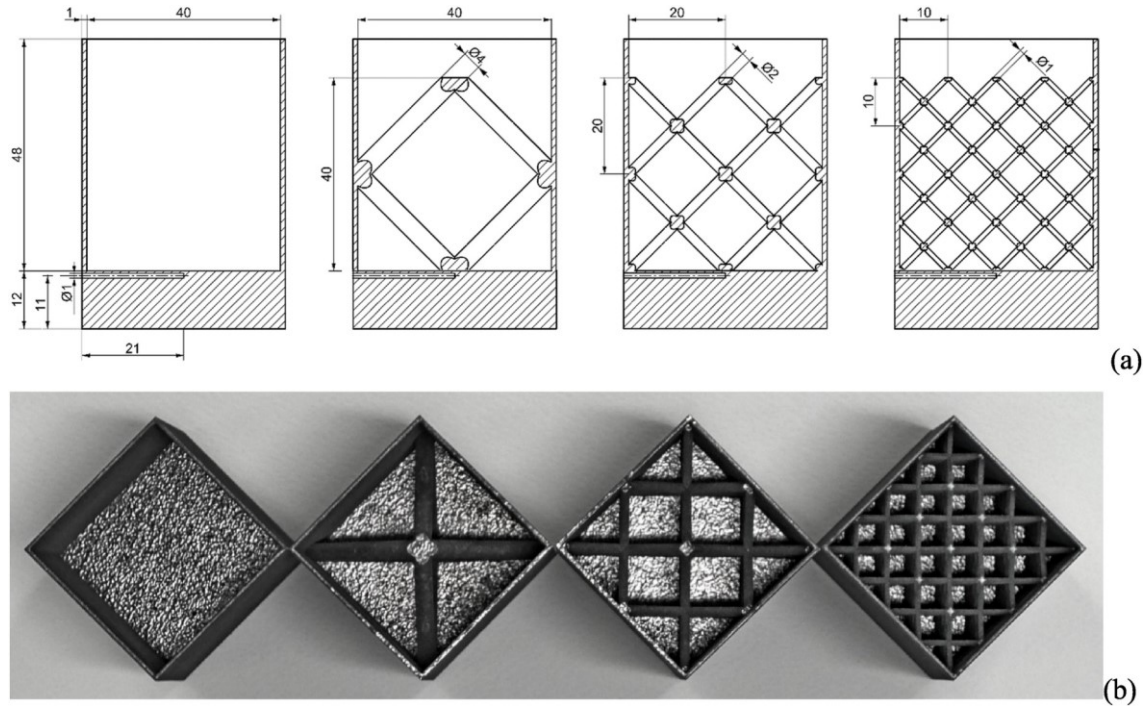


Figura 1.1: Geometrie studiate da Righetti et al. [25].

Dividendo il fattore di conversione 25.4 mm/inch per le dimensioni della cella di base, si ottengono le densità di pori presenti in un pollice lineare (PPI, *Pores Per Inch*). In Tabella 1.1 sono presentate le suddette conversioni.

Tabella 1.1: Conversioni dimensione del poro di base-PPI dei provini studiati da Righetti et al. [1], [25].

Dimensioni della cella di base [mm]	Pori per pollice lineare [PPI]
40	0.635
20	1.27
10	2.54

Semplicità e replicabilità sono stati i fattori dominanti nella scelta della forma piramidale di queste strutture. Si può notare la presenza di un provino senza reticolo interno: questo rappresenta il caso di riferimento rispetto al quale gli autori hanno confrontato

l'incremento prestazionale delle tre restanti strutture. Ci si aspetta che all'aumentare della densità dei pori (PPI), le prestazioni di carica e scarica di un PCM disperso entro queste strutture migliorino. Infatti, si sono osservate migliori prestazioni nel caso 10 mm (2.54 PPI): tempi di carica e scarica minori, distribuzione di temperatura più omogenea e T_j (*junction temperature*) ridotta. L'utilizzo di queste strutture rappresenta quindi una valida soluzione al problema della scarsa conducibilità termica dei PCM. Tuttavia, non avendo testato strutture con dimensione del poro inferiore a 10 mm (o maggiore densità di pori PPI), gli Autori non escludono la possibilità di ottenere migliori risultati andando a diminuire ulteriormente questo parametro. Ciò però non è immediato: realizzare tramite *additive manufacturing* filamenti con diametro inferiore ad 1 mm non è tecnologicamente semplice.

Gli ultimi due studi citati si differenziano per il tipo di PCM usato: si è prima testata una paraffina con temperatura di fusione di 55°C (RT55, [25]) e successivamente di 70°C (RT70, [1]). Il motivo che ha portato alla ripetizione delle misure con un diverso PCM risiede nella scarsità di dati presenti in letteratura riguardanti paraffine con una medio-alta temperatura di fusione. Inoltre, l'estensione dei risultati tra due diversi PCM con diversi punti di fusione non è ovvia [1]. Nel primo articolo [25] è stato inoltre proposto un modello per la stima del tempo necessario alla fusione del PCM inserito nella struttura periodica. Questo modello è stato validato anche grazie alle misure sperimentali del secondo articolo [1].

Opolot et al. [27] hanno realizzato delle simulazioni riguardanti la fusione e solidificazione di un PCM integrato in strutture metalliche periodiche, valutando l'influenza dei vari parametri geometrici. È stato osservato come la dimensione del poro di base critica (al di sotto della quale non si ha un miglioramento prestazionale) aumenti al diminuire della conduttività termica del materiale metallico utilizzato. Il modello numerico utilizzato è stato validato grazie ai dati sperimentali ricavati da Righetti et al. [25].

Nel presente studio ci si è posti l'obiettivo di creare un modello numerico che vada a replicare i dati sperimentali ottenuti da Righetti et al. [1]. Tramite il *software Ansys-Fluent* si sono andate a simulare le fasi di carica della paraffina RT70 inglobata all'interno delle strutture riportate in Figura 1.1. Si è optato per non simulare le fasi di scarica del

PCM: la solidificazione della paraffina sottoposta solamente alla convezione naturale richiede un ampio intervallo di tempo. Per questo motivo, anche le analisi numeriche avrebbero richiesto un'ingente quantità di tempo, non compatibile con i mezzi e le risorse disponibili per questo lavoro di tesi. Si è analizzato un flusso termico di 30 W applicato alla base dei provini. Successivamente sarebbe interessante testare il modello validato in questa sede anche coi flussi termici di 10 W e 20 W studiati dagli autori [1].

Le simulazioni di fusione e solidificazione sono tempo-varianti e richiedono un grande sforzo computazionale. Per questo motivo si è cercato di sviluppare un modello semplificato che permetta di raggiungere un giusto *trade-off* tra vicinanza ai risultati sperimentali e tempi ragionevoli di calcolo.

A livello numerico si è utilizzata la formulazione *enthalpy-porosity* di *Ansys-Fluent*: la variazione di volume del PCM è stata trascurata e non si è considerata la dipendenza delle perdite di calore verso l'ambiente dalla temperatura media del sistema. Nel presente studio queste ultime si sono assunte costanti.

Nell'ottica di semplificazione sono state realizzate delle sezioni dei provini in Figura 1.1, cercando di ottenere delle geometrie bidimensionali rappresentative del fenomeno fisico. Si è partiti dal caso di riferimento, il quale non presenta alcuna struttura periodica. Su questo dominio è stata fatta un'analisi di sensitività della *mesh* in modo da ottenere un numero di elementi ottimale che possa essere indicativo anche per i tre casi presentanti le strutture periodiche. Sempre sul dominio di riferimento si sono analizzati diversi *time step* con lo scopo, analogamente all'analisi della *mesh*, di trovare quello ottimale da utilizzare nelle simulazioni successive. Per valutare la bontà di *mesh* e *time step* si sono sfruttati i risultati sperimentali [1] a disposizione. Validato il caso di riferimento si è passati a realizzare delle sezioni dei tre provini aventi al loro interno le strutture periodiche. A causa della forma di queste strutture non si è riusciti a ricavare una sezione integralmente rappresentativa dei fenomeni che si instaurano durante la carica del PCM. Tuttavia, si sono comunque ottenuti dei domini bidimensionali realistici. Nelle sezioni considerate sono, però, presenti dei compartimenti stagni di paraffina RT70 i quali inibiscono i moti di galleggiamento che vengono ad innescarsi durante la fusione del materiale. Le simulazioni di tutti e tre i casi con le strutture porose hanno portato ad una sottostima dei tempi di fusione rispetto quelli misurati sperimentalmente. Per questi tre provini è stata analizzata l'influenza della cosiddetta *mushy zone constant* A_{mush} , una costante

legata alla *mushy region*. L'analisi è partita dalla geometria caratterizzata dalla struttura con dimensione del poro di base pari a 10 mm. Sono poi state analizzate le altre due strutture periodiche. È risultata una scarsa influenza del parametro A_{mush} sui risultati, in contrasto con quanto affermato da Shmueli et al. [28], i quali però non avevano alcuna struttura reticolare all'interno della geometria.

Vista la difficoltà di trovare adeguate sezioni bidimensionali, sono state condotte anche delle analisi tridimensionali. In ottica semplificativa si è andati a ricavare uno *slab* di provino: si è estratto un parallelepipedo contenente una parte di reticolo poroso rappresentativo del sistema. La simulazione di questo dominio ha portato a risultati leggermente diversi dai modelli bidimensionali e più vicini ai dati sperimentali [1]. Dato che gli autori dell'articolo alla base di questo studio [1] hanno osservato come il provino presentante una struttura periodica porosa con dimensione del poro di base di 10 mm dia migliori risultati rispetto le altre geometrie analizzate, si è scelto di simulare uno *slab* 3D solo per questo caso.

Infine, si è realizzata una simulazione tridimensionale completa del provino con dimensione del poro di base di 10 mm. Per la motivazione descritta in precedenza per lo *slab* e per motivi di tempo, questa simulazione 3D è stata realizzata solamente sul provino più prestazionale. I risultati ottenuti si sono ulteriormente avvicinati ai dati sperimentali rispetto alle simulazioni bidimensionali e alla modellizzazione dello *slab*.

2 MODELLO NUMERICO

2.1 Modellazione della fusione/solidificazione in *Ansys-Fluent*

Per risolvere i problemi di solidificazione e fusione, *Ansys-Fluent* sfrutta la formulazione “*enthalpy-porosity*”.

Enthalpy.

Il metodo entalpico utilizzato per modellizzare il cambiamento di fase solido-liquido è descritto da Voller et al. [29] per casi in cui il calore viene trasmesso sia tramite conduzione che per convezione. Il metodo consiste nell'introduzione di un termine che tiene conto degli effetti dovuti al calore latente. Questa formulazione può essere utilizzata sia per materiali con un unico punto di fusione, sia se il cambiamento di fase avviene in un *range* di temperature. L'approccio entalpico per problemi di cambiamento di fase non ha bisogno di condizioni all'interfaccia solido-liquido e quindi permette di utilizzare soluzioni con una *mesh* fissa (*fixed grid solutions*).

Porosity.

Per l'utilizzo della formulazione entalpica è necessario assicurarsi che la velocità nelle regioni solidificate sia nulla. Come descritto da Voller et al. [29], ci sono diversi approcci per garantire questa condizione. *Ansys-Fluent* [30] assimila il dominio ad un mezzo poroso in cui viene utilizzata la legge di Darcy [29]. Questa afferma che la velocità in un mezzo poroso è proporzionale al gradiente di pressione, vedi equazione (2.1). Il termine “*porosity*” si riferisce appunto a questo approccio.

$$\frac{c}{\varepsilon} v = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.1)$$

c = costante [kg/m³ s]

ε = porosità [-]

v = velocità [m/s]

- p = pressione [Pa]
x = coordinata spaziale [m]

La porosità viene assunta pari alla frazione liquida [30]. Quest'ultima rappresenta la frazione di volume in fase liquida di una cella. La (2.2) rappresenta la definizione matematica di questo parametro, che si rifà alla regola della leva.

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{se } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & \text{se } T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (2.2)$$

- γ = frazione liquida [-]
T = temperatura [K]
 $T_{solidus}$ = temperatura di solidus [K]
 $T_{liquidus}$ = temperatura di liquidus [K]

Ad ogni iterazione viene calcolata la frazione liquida per tutte le celle sulla base di un bilancio entalpico. La zona di interfaccia solido-liquido, dove la frazione liquida cresce da 0 a 1 durante la fusione del materiale viene detta *mushy region*. Per tener conto di questa zona porosa, vengono aggiunti dei termini alle equazioni della quantità di moto (2.3) ed ai modelli di turbolenza per rappresentare le perdite di carico dovute alla presenza del materiale solido. Nelle celle totalmente solidificate, la velocità si riduce a zero. Non si riporta il termine legato ai modelli di turbolenza in quanto nelle simulazioni svolte nel presente studio il moto della paraffina è laminare.

$$\vec{S} = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \epsilon)} A_{mush} \vec{v} \quad (2.3)$$

- γ = frazione liquida [-]
 ϵ = numero molto piccolo (0.001) per prevenire la divisione per 0 [-]
 A_{mush} = costante relativa alla *mushy region* (*mushy zone constant*) [kg/m³ s]
 \vec{v} = velocità [m/s]

L'entalpia del materiale è calcolata come la somma del termine sensibile (2.4) e di quello latente (2.5), come si osserva nell'equazione (2.6).

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (2.4)$$

$$\Delta H = \gamma L \quad (2.5)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2.6)$$

- h = entalpia specifica sensibile [J/kg]
- h_{ref} = entalpia specifica di riferimento ad una certa T_{ref} [J/kg]
- T_{ref} = temperatura di riferimento [K]
- T = temperatura [K]
- c_p = calore specifico a pressione costante [J/kg K]
- ΔH = variazione di entalpia specifica latente [J/kg]
- γ = frazione liquida [-]
- L = calore latente di fusione [J/kg]

In sintesi, le equazioni che vengono risolte numericamente sono le seguenti (vedi manuale *Ansys-Fluent* [30]).

i. Continuità (2.7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.7)$$

- ρ = densità [kg/m³]
- t = tempo [s]
- \vec{v} = velocità [m/s]

ii. Quantità di moto (2.8)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2.8)$$

ρ = densità [kg/m³]

\vec{v} = velocità [m/s]

p = pressione statica [Pa]

$\bar{\tau}$ = tensore delle tensioni [Pa]

\vec{g} = accelerazione di gravità [m/s²]

\vec{S} = altre forze esterne (contiene anche termini legati a modelli) [kg/m² s²]

Nell'equazione (2.8), si osservano a primo membro i seguenti termini (da sinistra verso destra):

1. transitorio,
2. inerziale (o convettivo).

Invece, a secondo membro dell'equazione (2.8), si evidenziano (da sinistra verso destra) le forze:

1. di pressione,
2. viscosi,
3. gravitazionali.
4. L'ultimo termine è legato ad altre eventuali forze esterne o alla modellizzazione di alcuni fenomeni fisici. Nel presente studio, questo termine, legato alla modellizzazione della zona porosa descritta in precedenza è presentato nell'equazione (2.3).

iii. Energia (2.9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.9)$$

ρ	=	densità [kg/m ³]
H	=	entalpia [J/kg], vedi la (2.6)
\vec{v}	=	velocità [m/s]
k	=	conduttività termica [W/m K]
T	=	temperatura [K]

Nell'equazione (2.9), si possono osservare nell'ordine i termini:

1. legato alla variazione locale dell'energia (o transitorio),
2. il termine convettivo,
3. conduttivo.

Per l'impostazione dei metodi risolutivi delle equazioni descritte precedentemente, si è considerato il lavoro di Shmueli et al. [28], i quali hanno studiato numericamente la fusione di un PCM in un tubo verticale e confrontato i risultati con dei dati sperimentali a loro disposizione. Gli Autori hanno investigato l'influenza di alcuni parametri legati alla modellizzazione di problemi di fusione e solidificazione in *Ansys-Fluent*. È stata analizzata la *mushy zone constant* (A_{mush}), gli schemi di accoppiamento pressione-velocità PISO vs SIMPLE e di discretizzazione della pressione PRESTO! vs *Body-Force-Weighted*. È stato constatato come non vi sia differenza tra PISO e SIMPLE, mentre PRESTO! dia risultati leggermente migliori rispetto *Body-Force-Weighted*.

Nel presente studio si è quindi utilizzato il metodo PRESTO! (Pressure Staggering Option), insieme all'algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) per risolvere l'accoppiamento pressione-velocità.

Come ogni tipo di modellizzazione, anche le simulazioni di solidificazione e fusione svolte tramite il *software Ansys-Fluent* presentano dei limiti. Questi sono [30]:

1. l'impossibilità di usare risolutori *density-based*;
2. il vincolo a considerare solamente fluidi comprimibili,
3. tra i vari modelli multifase è permesso solo il VOF (*Volume Of Fluid*) e non è possibile specificare le proprietà del materiale in modo separato per la fase solida e liquida.

È importante osservare che le simulazioni di fusione e solidificazione sono temporvarianti. Ciò implica un maggiore costo computazionale che si traduce in lunghi tempi di calcolo.

2.2 Materiali

Alluminio

I provini stampati tramite *additive manufacturing* sono stati realizzati in alluminio [1], [25]. La lega utilizzata è la AlSi10Mg-0403. L'azienda fornitrice è la Renishaw® [31]. Questa lega di alluminio presenta al suo interno una quantità di silicio compresa nel range 9% - 11% in massa. Il magnesio è a sua volta presente con una concentrazione in massa tra lo 0.25% e lo 0.45 %. La presenza di questi due elementi porta alla formazione di precipitati di Mg_2Si , i quali aumentano la durezza e riducono la corrosione grazie al meccanismo della passivazione. Tuttavia, le proprietà termiche sono inferiori a quelle di altre leghe a base alluminio. Righetti et al. [25] hanno sperimentalmente ricavato la conduttività termica di questo materiale, stimando il valore di 96 ± 2 W/m K, molto basso considerato che si tratta di una lega a base alluminio. Nel codice *Ansys-Fluent* si è usata quindi una conduttività termica di 96 W/m K.

PCM: paraffina RT70

Il PCM utilizzato [1] è una paraffina con temperatura di fusione di 70°C. L'azienda fornitrice è la Rubitherm Technologies GmbH [32] (Berlino, Germania) e la paraffina utilizzata è la RUBITHERM® RT70. Le caratteristiche di questo materiale, ricavate dalla scheda tecnica fornita dall'azienda, sono riportate in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: RT70, caratteristiche fornite da Rubitherm Technologies GmbH [32].

Temperatura di fusione	69-71	[°C]
Calore latente di fusione	260	[kJ/kg]
Calore specifico	2	[kJ/kg K]
Densità (solido a 15°C)	880	[kg/m ³]
Densità (liquido a 80°C)	770	[kg/m ³]
Conduttività termica (entrambe le fasi)	0.2	[W/m K]
Espansione volumetrica	12.5	[%]
Flash point	227	[°C]
Massima temperatura operativa	100	[°C]

Confrontando le schede tecniche di questo materiale e di una paraffina della stessa famiglia con temperatura di fusione di 55°C, la RUBITHERM ® RT55, si nota come densità, calore specifico e conduttività termica siano le stesse. La paraffina RT55 è stata caratterizzata da Colla et al. [3]. In Tabella 2.2 sono riportati alcuni parametri misurati dagli Autori. Data la similitudine tra le paraffine RT55 e RT70 e in mancanza di una adeguata caratterizzazione del secondo PCM, si sono utilizzati prioritariamente i dati in Tabella 2.2.

Tabella 2.2: Caratterizzazione di RT55 [3].

Densità (solido)	880	[kg/m ³]
Densità (liquido)	770	[kg/m ³]
Calore specifico a pressione costante (solido)	3951	[J/kg K]
Calore specifico a pressione costante (liquido)	2307	[J/kg K]
Conduttività termica (entrambe le fasi)	0.3336	[W/m K]
Viscosità dinamica	0.0256	[kg/m s]
Coefficiente di espansione termica	0.000125	[1/K]

In *Ansys-Fluent* si sono inserite le seguenti grandezze.

- i. Densità (ρ): nella modellazione dei moti di convezione naturale all'interno di un dominio chiuso la soluzione dipende dalla massa, la quale è a sua volta legata alla densità. Un possibile approccio si basa sul modello “*Boussinesq*”, il quale permette di specificare un unico valore di densità. Inoltre, così facendo si avrà una più rapida convergenza rispetto a descrivere la densità come funzione della temperatura. Il modello considera costante la densità in tutte le equazioni eccezion fatta per la legge della quantità di moto. In questa equazione, il termine legato al galleggiamento (2.10) viene scritto come nella (2.11).

$$(\rho - \rho_0)g \quad (2.10)$$

$$-\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (2.11)$$

- ρ = densità [kg/m³]
- ρ_0 = densità costante assegnata [kg/m³]
- g = accelerazione di gravità [m/s²]
- β = coefficiente di espansione termica [1/K]
- T = temperatura [K]
- T_0 = temperatura operativa [K]

La (2.11) consegue dall'approssimazione *Boussinesq* vera e propria che consiste nella (2.12) e permette di eliminare ρ dalla (2.10). In questo modo è la variazione di temperatura che regola i moti di convezione naturale, in quanto ρ_0 e β sono delle costanti definite inizialmente.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T) \quad (2.12)$$

- ρ = densità [kg/m³]
- ρ_0 = densità costante assegnata [kg/m³]
- β = coefficiente di espansione termica [1/K]
- ΔT = differenza di temperatura (T-T₀) [K]

Questa approssimazione è ragionevole solo quando le differenze di temperatura e quindi di densità sono ridotte, cioè quando vale la (2.13).

$$\beta(T - T_0) \ll 1 \quad (2.13)$$

- β = coefficiente di espansione termica [1/K]
- T = temperatura [K]
- T_0 = temperatura operativa [K]

La trattazione appena descritta è riferita al manuale *Ansys-Fluent* [30]. Si è considerata come densità la media tra quella delle fasi solida e liquida, riportate nella scheda tecnica del materiale e presentate in Tabella 2.1. Si osserva come la densità

dichiarata dall'azienda fornitrice (Tabella 2.1) e quella misurata sperimentalmente (Tabella 2.2, [3]) coincidano.

L'approssimazione *Boussinesq* si accoppia bene con il metodo numerico PRESTO! di *Ansys-Fluent* per la discretizzazione della pressione [30].

- ii. Calore specifico a pressione costante (c_p): nell'intorno dell'intervallo di solidificazione si è considerato un andamento lineare del c_p . Questa ipotesi si traduce nel linguaggio di *Ansys-Fluent* con l'opzione "*piecewise-linear*" che necessita in *input* di due punti del tipo (temperatura; c_p). Nella zona in cui il materiale è solido (o liquido) il calore specifico a pressione costante viene assunto costante. L'andamento di c_p considerato nelle simulazioni è riportato in Figura 2.1.

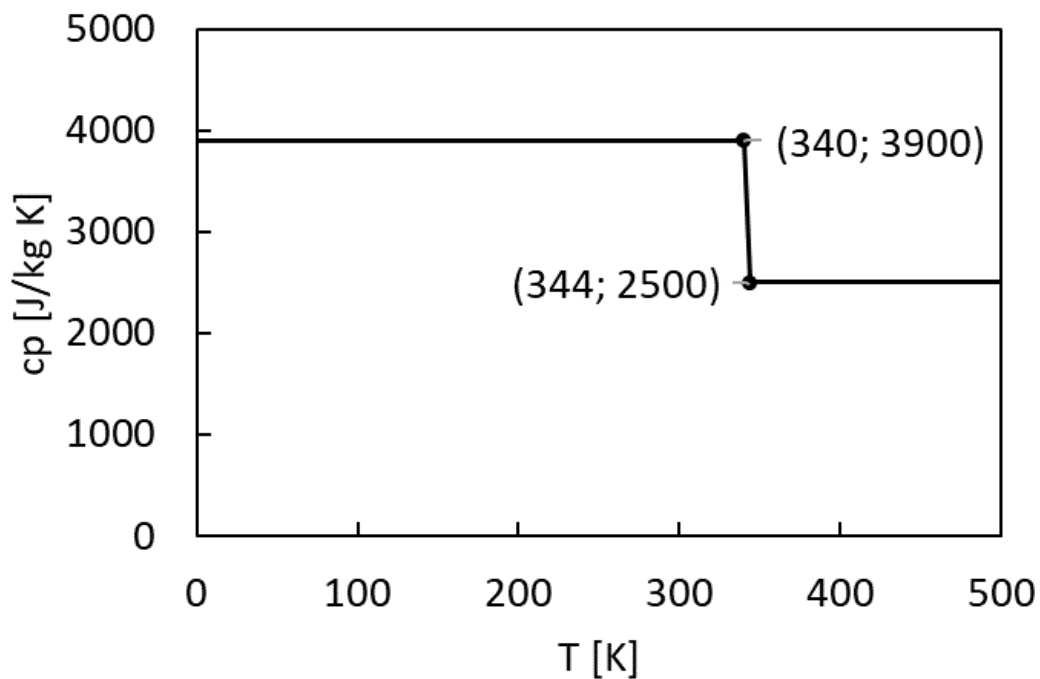


Figura 2.1: Andamento del calore specifico a pressione costante ipotizzato nella simulazione.

Come descritto in precedenza, nelle schede tecniche di questi due PCM, essi presentano lo stesso calore specifico a pressione costante. In mancanza di dati attendibili di RT70, si sono utilizzati i c_p del solido e del liquido del PCM RT55, caratterizzato da Colla et al. [3] e riportati in Tabella 2.2. Questi valori sono stati approssimati come segue:

c_p solido [J/ kg K] 3900 (a 340 K)

c_p liquido [J/ kg K] 2500 (a 344 K)

iii. Conducibilità termica: questo dato è stato considerato pari a quello della paraffina RT55 [3], Tabella 2.2.

iv. Viscosità: in mancanza di un valore dichiarato dall'azienda fornitrice della paraffina RT70, si è utilizzata la viscosità del PCM RT55 [3], Tabella 2.2.

v. Coefficiente di espansione termica: si è utilizzato il valore misurato per il PCM RT55 da Colla et al. [3], Tabella 2.2.

vi. Calore latente di fusione: valore preso dalla scheda tecnica del materiale Tabella 2.1.

vii. Temperature di solidus e liquidus: questi valori sono stati assunti pari ai limiti del *range* temperatura di cambiamento di fase forniti nella scheda tecnica, Tabella 2.1, cioè:

T_s [K] 342

T_L [K] 344

In sintesi, in Tabella 2.3, vengono riportati i dati utilizzati in *Ansys-Fluent* per la creazione nel modello del materiale RT70.

Tabella 2.3: Caratteristiche del PCM RT70 usate nelle simulazioni.

Densità (“ <i>boussinesq</i> ”)	825	[kg/m ³]
Calore specifico a pressione costante (“ <i>piecewise-linear</i> ”)	3900 J/kg K	a T=340 K
	2500 J/kg K	a T=344 K
Conduktività termica (entrambe le fasi)	0.33	[W/m K]
Viscosità dinamica	0.0256	[kg/m s]
Coefficiente di espansione termica	0.000125	[1/K]
Calore latente di fusione	260000	[J/kg]
T _S	342	[K]
T _L	344	[K]

2.3 Geometrie

In linea con l'obiettivo di validare un modello semplificato che ben rappresenti la situazione fisica in esame, si sono studiate delle sezioni bidimensionali dei provini usati da Righetti et al. [1]. In Figura 2.2 viene riportata una foto dei quattro provini stampati tramite *additive manufacturing* e usati dagli autori per analizzare le fasi di carica e scarica di una paraffina. È possibile osservare in alto a destra in Figura 2.2 un provino usato come caso di riferimento, il quale ha permesso agli autori di confrontare l'incremento prestazionale delle restanti tre strutture. Nel presente studio si è analizzato in primo luogo questo provino senza struttura periodica, per poi passare alla modellazione del caso con la struttura porosa più fitta ed infine, si sono studiate le due restanti geometrie.



Figura 2.2: Provini studiati da Righetti et al. [1].

Per il provino di riferimento, si è scelta come geometria bidimensionale rappresentativa, una sezione normale ad una faccia laterale del provino, Figura 2.3. La sezione è stata realizzata tagliando a metà il modello 3D e proiettando su un piano di riferimento ciò che è stato ottenuto. Sempre nell’ottica di semplificazione del modello, non si è considerata l’aria sovrastante il PCM. La variazione volumetrica conseguente il passaggio di fase della paraffina è così stata trascurata. La proiezione della sezione ottenuta come descritto è stata ulteriormente semplificata, dividendola a metà, per la simmetria geometrica. Il dominio bidimensionale ottenuto è riportato in Figura 2.4.

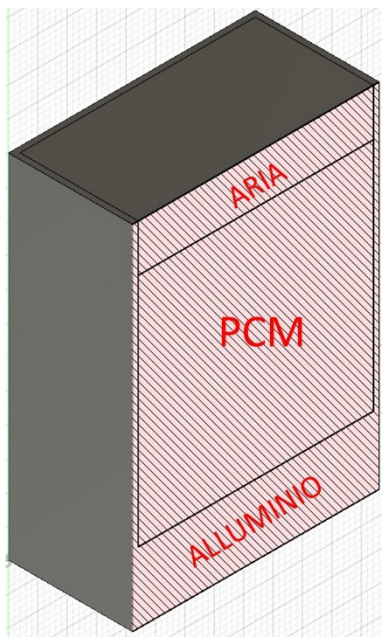


Figura 2.3: Sezione del caso di riferimento.



Figura 2.4: Dominio 2D caso di riferimento (senza aria).

Passando ai provini contenenti le strutture metalliche, è stato molto più complesso trovare una sezione adeguatamente rappresentativa del fenomeno fisico. Infatti, l’approccio usato nel caso di riferimento ha portato alla formazione di zone di alluminio non comunicanti con la base riscaldata, Figura 2.5, Figura 2.6 e Figura 2.7. Ciò è dovuto alla geometria della struttura porosa: la cella piramidale si interseca con un piano di taglio in modo diverso a seconda dell’orientamento di quest’ultimo. Le “isole” di alluminio così formatesi si portano in equilibrio termico con la paraffina e fungono solamente da siti di nucleazione nelle fasi di scarica del PCM (non trattata nel presente studio). Si è deciso di

non simulare i domini così ottenuti e si sono cercate di ricavare delle nuove sezioni che potessero essere maggiormente rappresentative.

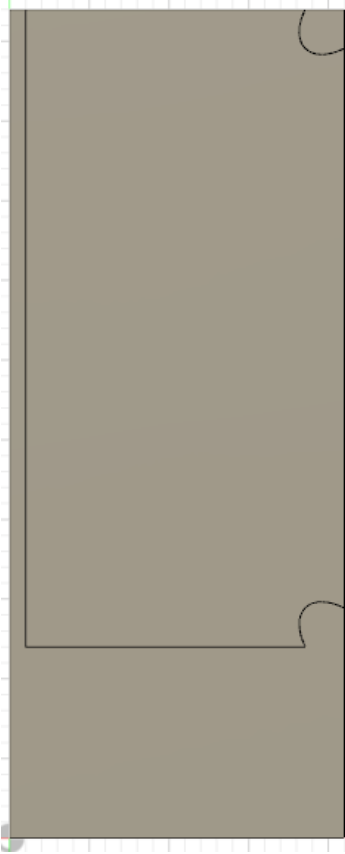


Figura 2.5: 40 mm, sezione normale.

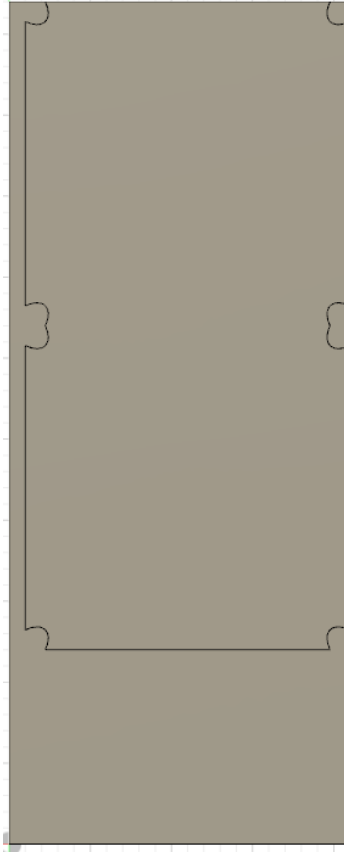


Figura 2.6: 20 mm, sezione normale.

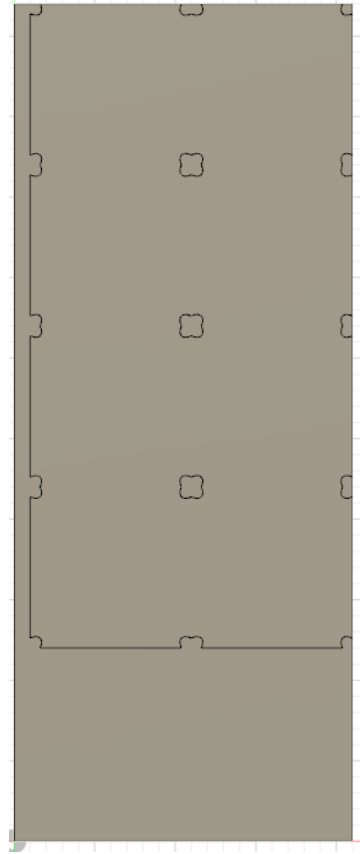


Figura 2.7: 10 mm, sezione normale.

Si è pensato di sezionare il provino con un piano che, nella vista in pianta, tagliasse il sistema diagonalmente, come si può osservare in Figura 2.8, relativa al provino con struttura periodica con dimensione del poro di base di 10 mm. I domini così ottenuti nei tre casi aventi una struttura porosa sono riportati in Figura 2.9, Figura 2.10 e Figura 2.11. Si osserva tuttavia, che anche in questi casi si corre il rischio di allontanarsi leggermente da una corretta rappresentazione del fenomeno fisico: sono presenti dei compartimenti stagni di PCM che limitano i moti convettivi naturali che si innescano durante la fusione della paraffina. Andando a ridurre la dimensione della cella di base, si riduce anche la grandezza delle zone isolate di PCM, limitando sempre più i moti convettivi. Si è deciso comunque di procedere a simulare le sezioni così ottenute per valutare la discrepanza dai

dati sperimentali e osservare quanto il moto della fase liquida influenzi il tempo di carica del PCM.

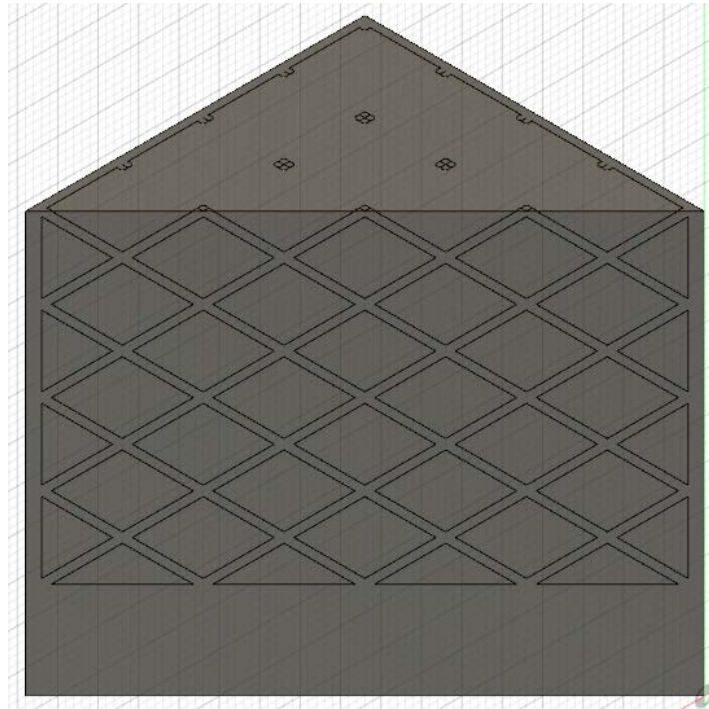


Figura 2.8: Sezione del caso 10 mm. L'aria sopra il PCM non è rappresentata.

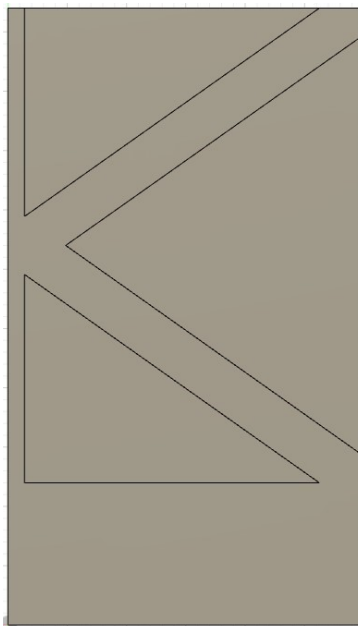


Figura 2.9: 40 mm.

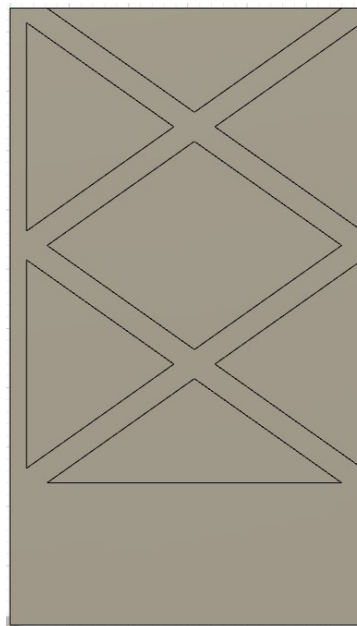


Figura 2.10: 20 mm.

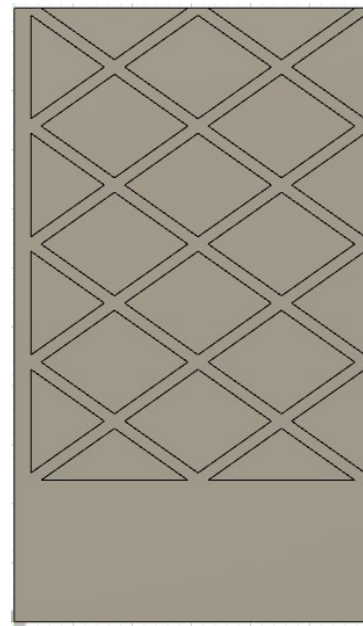


Figura 2.11: 10 mm.

Successivamente, è stato simulato un caso tridimensionale semplificato, il quale ha permesso il moto del PCM fuso, grazie all'eliminazione della compartimentazione. Si è pensato di estrarre uno *slab* di provino con dimensione del poro di base di 10 mm. Per motivi di tempistiche computazionali e a causa delle migliori prestazioni rilevate da Righetti et al. [1] per questo provino, l'analisi dello *slab* è stata realizzata solo per il caso con dimensione del poro di base di 10 mm. Grazie alle simmetrie geometriche, lo *slab* considerato è una minima frazione del provino intero. Nelle Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14 e Figura 2.15, si riportano alcune immagini del dominio 3D nell'analisi dello *slab*. Si osservano nell'ordine, una vista tridimensionale, una in pianta, frontale e del retro. Si può notare, specialmente in Figura 2.12, la continuità della zona che verrà riempita di PCM a cui consegue una certa libertà di movimento della paraffina fusa.

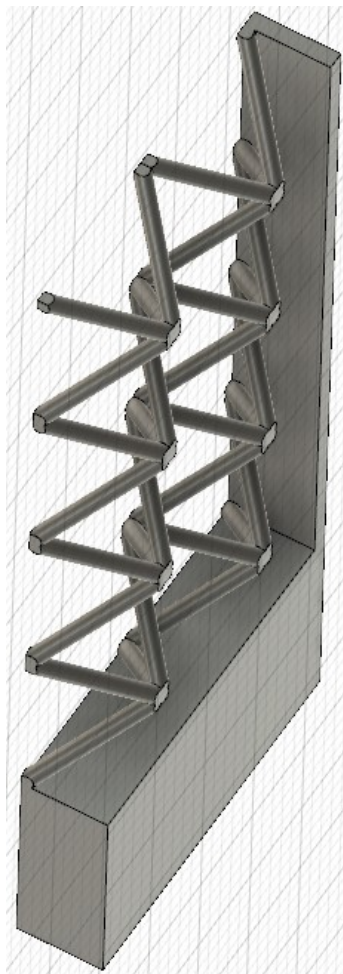


Figura 2.12: 10 mm, slab 3D.

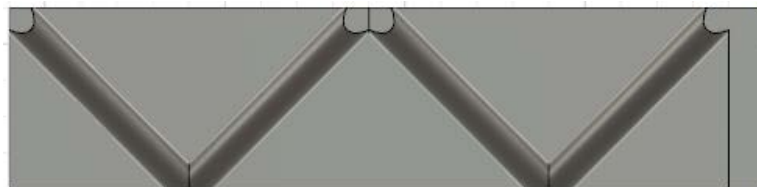


Figura 2.13: 10 mm, slab 3D, vista in pianta.

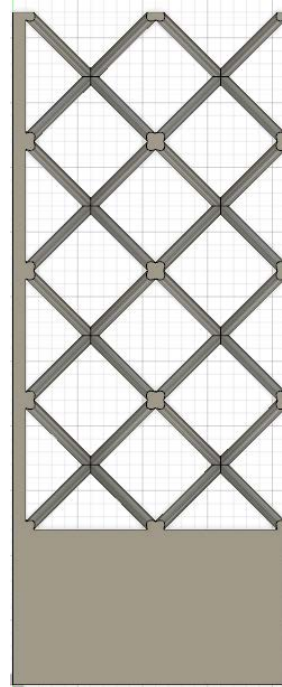


Figura 2.14: 10 mm, slab 3D, vista frontale.

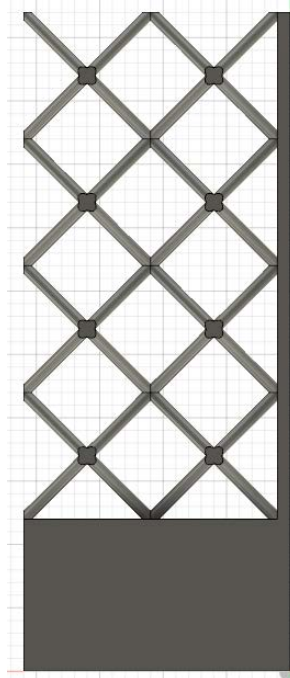


Figura 2.15: 10 mm slab 3D, vista da dietro.

Infine, è stata realizzata una simulazione tridimensionale completa del caso contenente una struttura periodica con dimensione del poro di base di 10 mm. L'analisi 3D completa è stata svolta solamente per questo provino per le motivazioni riportate in precedenza per lo *slab*. In Figura 2.16 si riporta un'assonometria della geometria tridimensionale completa usata come dominio in quest'ultima simulazione svolta.

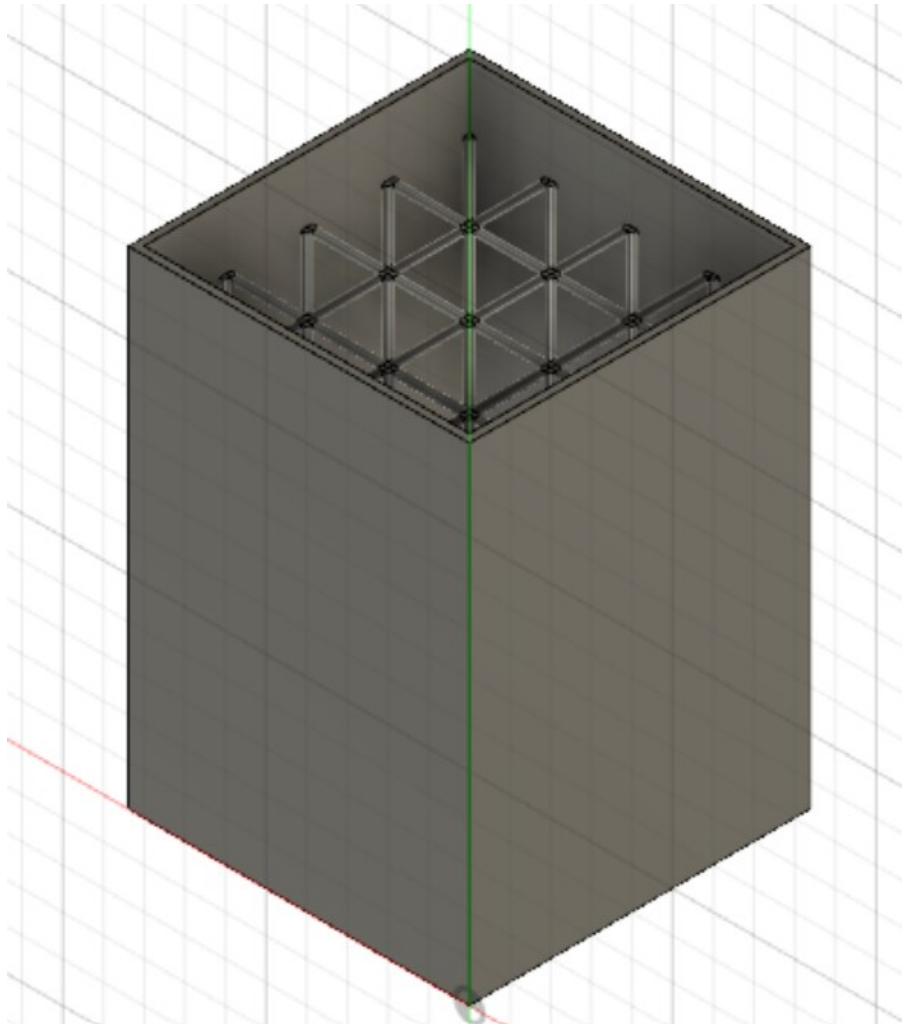


Figura 2.16: 10 mm, geometria 3D completa.

2.4 Mesh e time step

Mesh

Il primo provino ad essere studiato è stato il caso di riferimento, senza struttura periodica. Si è condotta un'analisi di sensitività della *mesh* per trovare il numero di elementi ottimale, che permettesse di arrivare a buoni risultati senza appesantire troppo la simulazione. In quest'ottica sono state realizzate tre *mesh* (con circa 2000, 6000 e 15000 elementi) per il caso di riferimento. In Tabella 2.4, sono riportate le dimensioni di queste tre discretizzazioni.

Tabella 2.4: Dimensioni delle *mesh* usate nel caso di riferimento.

Mesh	# Elementi	# Nodi
1	1608	1698
2	6431	6610
3	14469	14737

Data la regolarità del dominio, le *mesh* generate per il caso di riferimento sono di tipo strutturato, *mapped*. Si riportano in Figura 2.17, Figura 2.18 e Figura 2.19 rispettivamente le *mesh* 1, 2 e 3 dove si può osservare un graduale infittimento passando dalla prima alla terza discretizzazione. In Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22 si possono rispettivamente osservare dei dettagli relativi alle *mesh* 1, 2 e 3. Si nota come passando dalla prima alla seconda e, infine, alla terza *mesh*, la discretizzazione della parete laterale del provino, spessa 1 mm è stata divisa con una, due o tre colonne di celle.

Analizzando i risultati che verranno presentati nel capitolo 3, la *mesh* 2, con circa 6000/7000 elementi rappresenta il compromesso migliore tra costo computazionale e accuratezza della simulazione. Per la discretizzazione dei restanti tre provini, si è quindi cercato di mantenere un numero di elementi vicino a quello ottimale ricavato per il caso di riferimento.

I tre provini restanti hanno reso difficoltosa la realizzazione di una *mesh* completamente di tipo strutturato a causa della presenza delle strutture periodiche. Si è comunque puntato a generare discretizzazioni il più regolari possibile, in modo da ottenere un indice *skewness* elevato. Questo indice può assumere valori compresi tra 0 e 1 ed è rappresentativo del grado di distorsione delle celle. La convergenza della simulazione è facilitata in presenza di uno *skewness* elevato.

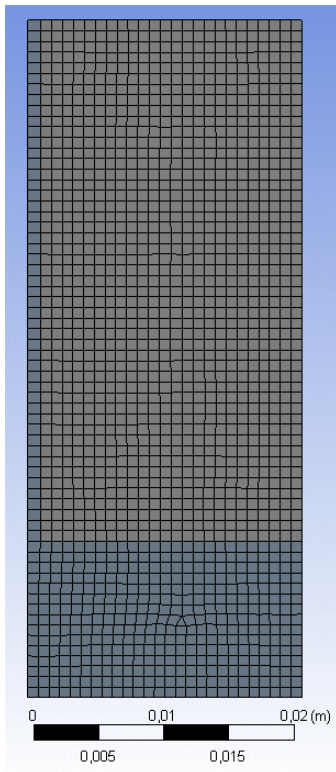


Figura 2.17: Mesh 1.

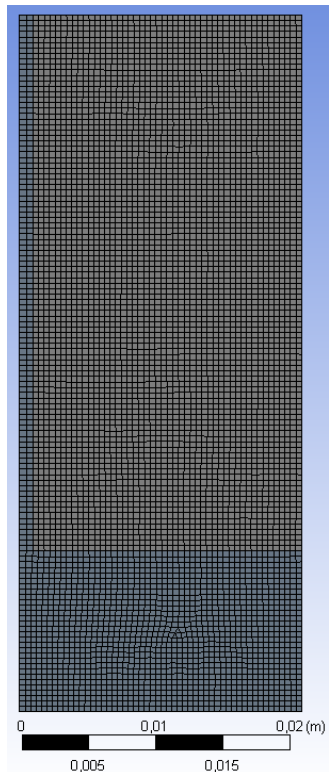


Figura 2.18: Mesh 2.

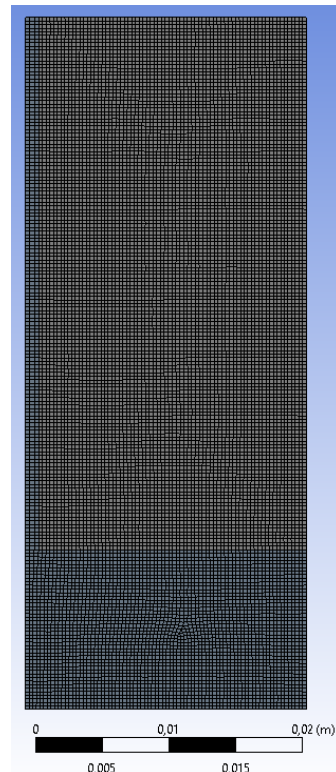


Figura 2.19: Mesh 3.

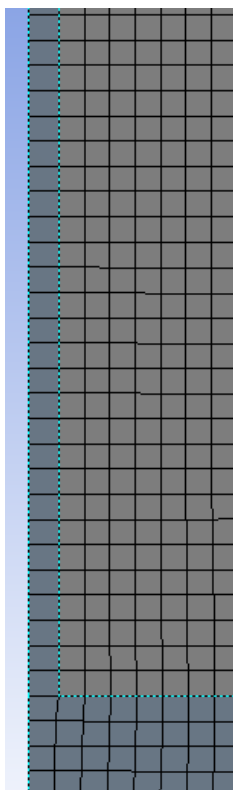


Figura 2.20: Mesh 1, dettaglio.

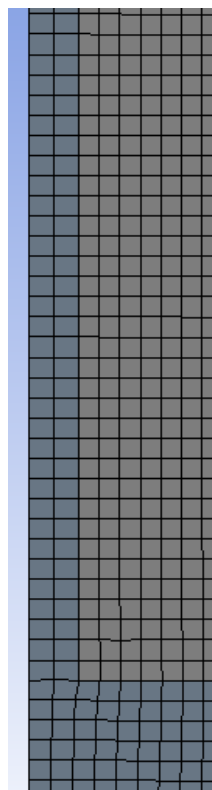


Figura 2.21: Mesh 2, dettaglio.

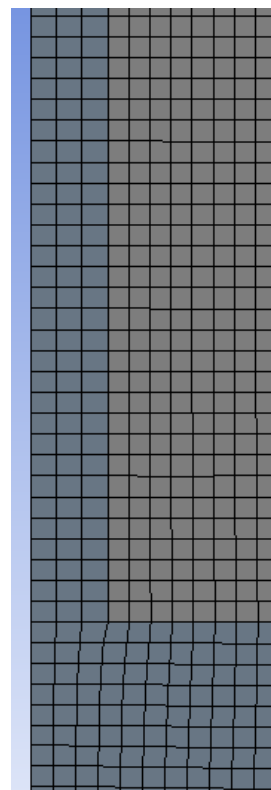


Figura 2.22: Mesh 3, dettaglio.

La *mesh* generata per la sezione ricavata dal provino con dimensione del poro di base di 40 mm presenta 6447 elementi e 6599 nodi. In Figura 2.23 si riporta la discretizzazione realizzata per questa geometria. Per garantire un adeguato numero di celle in prossimità dei vari spigoli, è stata sfruttata l'opzione *Proximity and Curvature* di *Ansys-Meshing*. È possibile osservare che la parete laterale del provino è stata divisa con tre colonne di celle, al contrario della *mesh 2* del caso di riferimento, la quale presenta solamente due divisioni. Questo si può apprezzare grazie al dettaglio presentato in Figura 2.24.

In modo analogo è stata generata una *mesh* della geometria rappresentante il provino contenente la struttura periodica con dimensione del poro di base di 20 mm. La discretizzazione ottenuta ha le dimensioni di 6687 elementi e 6829 nodi. In Figura 2.25 si riporta nel suo complesso questa *mesh*, generata come nel caso precedente sfruttando l'opzione *Proximity and Curvature*. Le "isole" di PCM ottenute sezionando la geometria tridimensionale sono più piccole rispetto al provino con dimensione del poro di base di 40 mm. Questo può portare ad una distorsione maggiore di alcuni elementi della *mesh*. Andando ad osservare il dettaglio di Figura 2.26, si notano quattro colonne di celle a divisione della parete laterale del provino. Ciò indica una minore dimensione degli elementi in alcune zone della *mesh*.

L'ultimo caso bidimensionale discretizzato è stato il provino contenente la struttura periodica con dimensione del poro di base di 10 mm. La *mesh* generata presenta 8942 elementi e 8990 nodi. Si riporta un'immagine integrale della presente discretizzazione in Figura 2.27. La modalità con cui è stata realizzata questa *mesh* è analoga a quanto fatto per le due geometrie precedenti. Si può notare come l'opzione *Proximity and Curvature* abbia portato alla divisione della parete laterale del provino in tre colonne di elementi, vedi Figura 2.28, una in meno rispetto al caso precedente. Tuttavia, il ridursi della dimensione delle "isole" di PCM, porta ad avere un maggior numero di elementi all'interno del dominio fluido che andrà ad accogliere la paraffina. Infatti, come sopra riportato, questa discretizzazione presenta più celle rispetto le *mesh* dei casi 40 mm e 20 mm.

Una volta generate tutte le *mesh* bidimensionali e realizzate le varie simulazioni, si è deciso di testare un paio di modelli 3D del provino contenente la struttura periodica con dimensione del poro di base di 10 mm. Le motivazioni alla base di questa scelta sono descritte nel paragrafo 2.3.

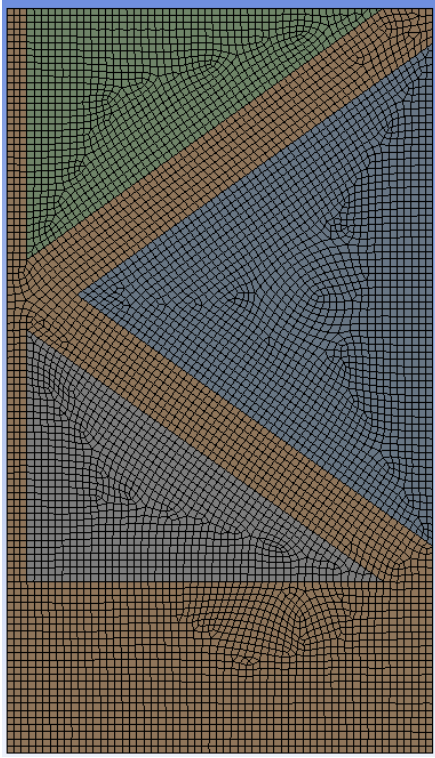


Figura 2.23: 40 mm, mesh.

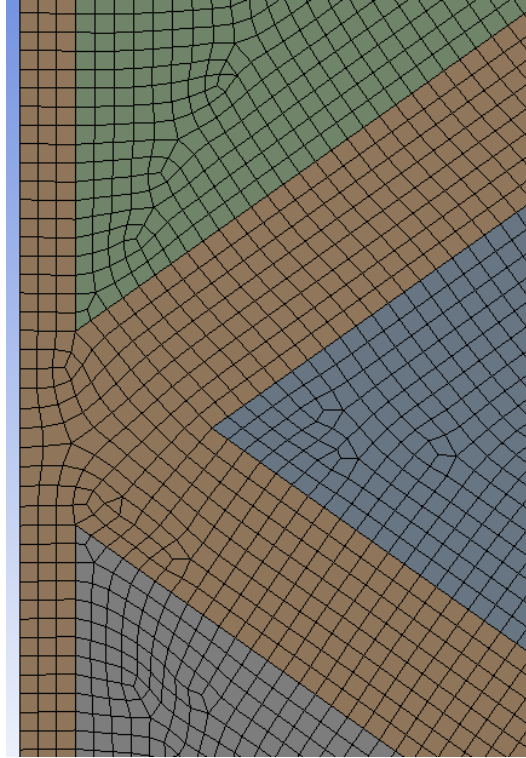


Figura 2.24: 40 mm, mesh, dettaglio.

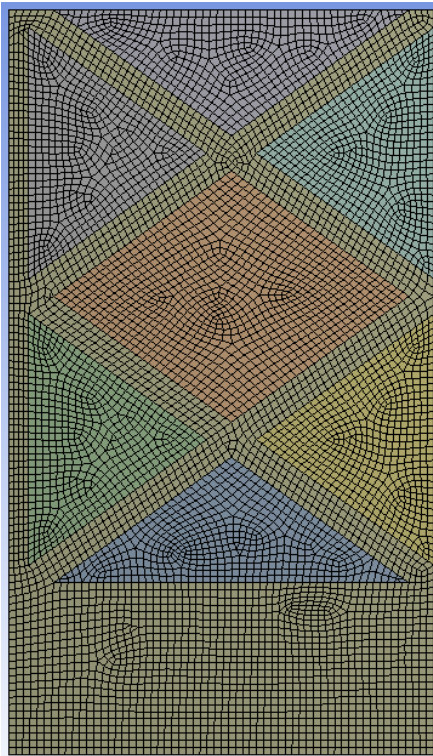


Figura 2.25: 20 mm, mesh.

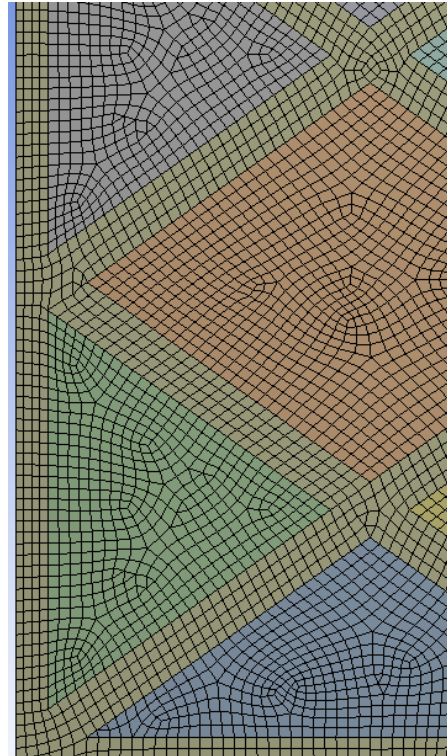


Figura 2.26: 20 mm, mesh, dettaglio.

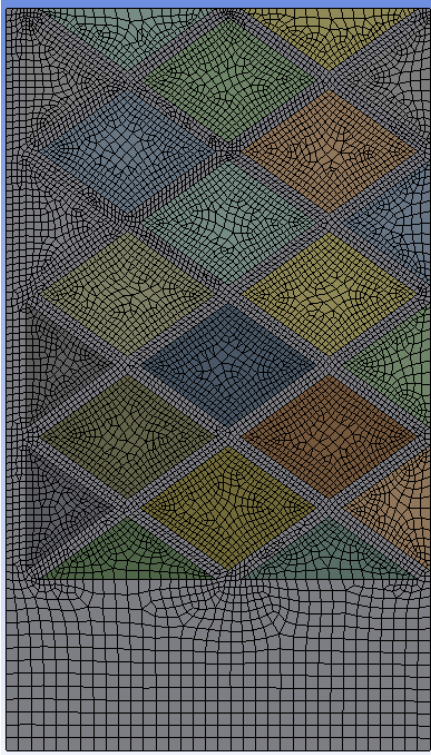


Figura 2.27: 10 mm, mesh.

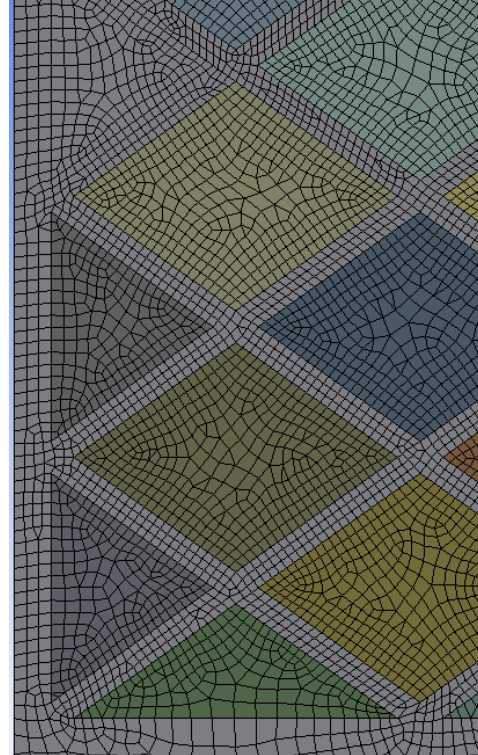


Figura 2.28: 10 mm, mesh, dettaglio.

L'analisi condotta sullo *slab* 3D, estratto dal provino più performante [1], ha portato alla generazione di una *mesh* con 1731640 elementi e 299077 nodi. La dimensione di questa *mesh* non è stata ottimizzata per problemi legati ai tempi di simulazione. Una simulazione 3D di questo tipo può durare più giorni, nonostante le semplificazioni usate. In Figura 2.29, si osservano alcuni dettagli della *mesh* usata sullo *slab* 3D. Si nota la rappresentazione completa della *mesh* in vista assonometrica, accompagnata dalle viste frontale, in pianta e del retro. Sono anche riportati un paio di dettagli relativi alle zone in cui la struttura porosa è stata sezionata dai piani di costruzione che hanno permesso di estrarre lo *slab*.

Infine, è stata realizzata una discretizzazione per la simulazione del provino 3D completo del caso 10 mm. Le dimensioni di questa *mesh* sono evidentemente maggiori rispetto le precedenti analizzate: 2088033 elementi e 366875 nodi. Si osserva un dettaglio della *mesh* descritta in Figura 2.30, dove è presente l'ingrandimento di un angolo del provino e si notano alcune parti del reticolo periodico emergere dal volume fluido contenente il PCM. In Figura 2.31 è invece riportata la *mesh* completa 3D e si può notare quanto questa sia fitta: le celle sono praticamente indistinguibili con il presente ingrandimento.

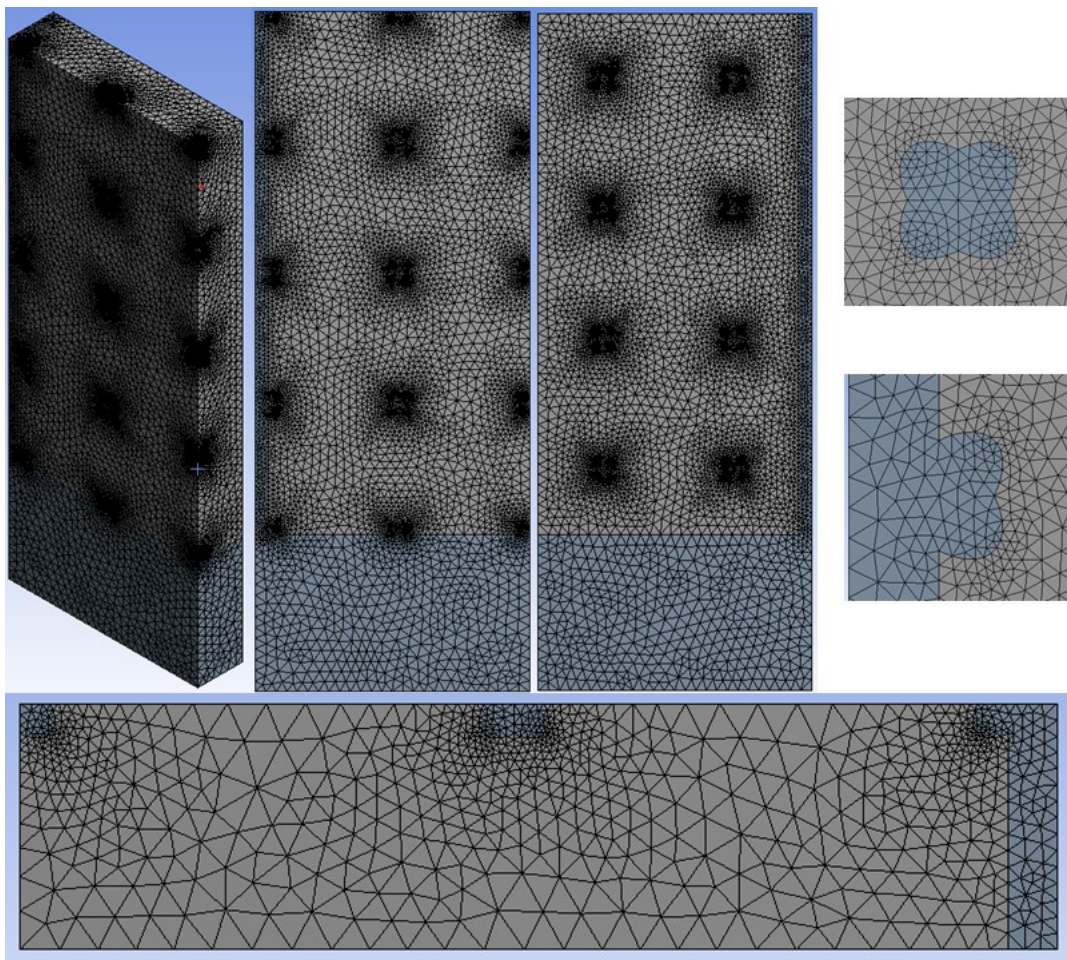


Figura 2.29: 10 mm, slab 3D, mesh.

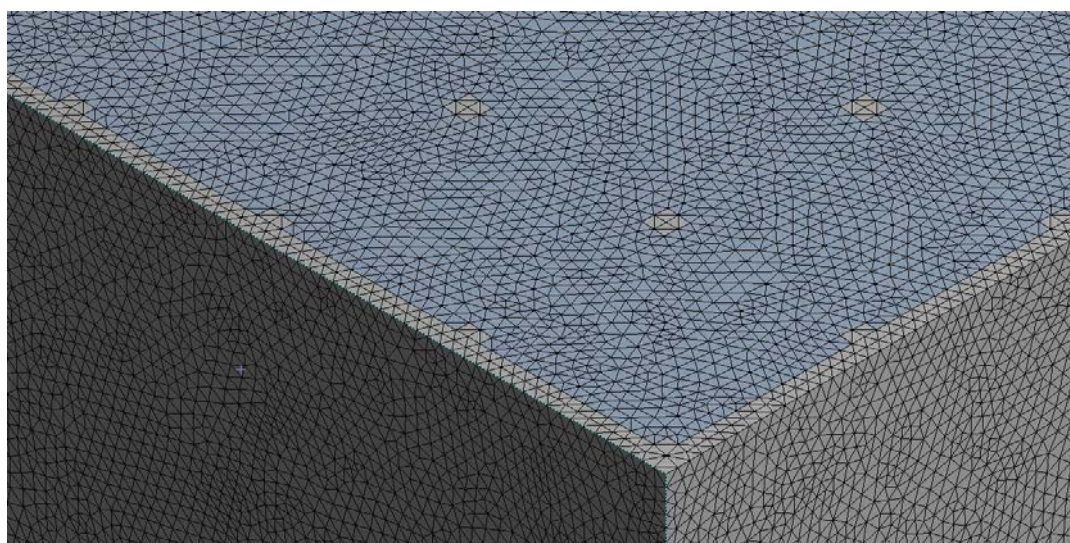


Figura 2.30: 10 mm, 3D completo, mesh, dettaglio.

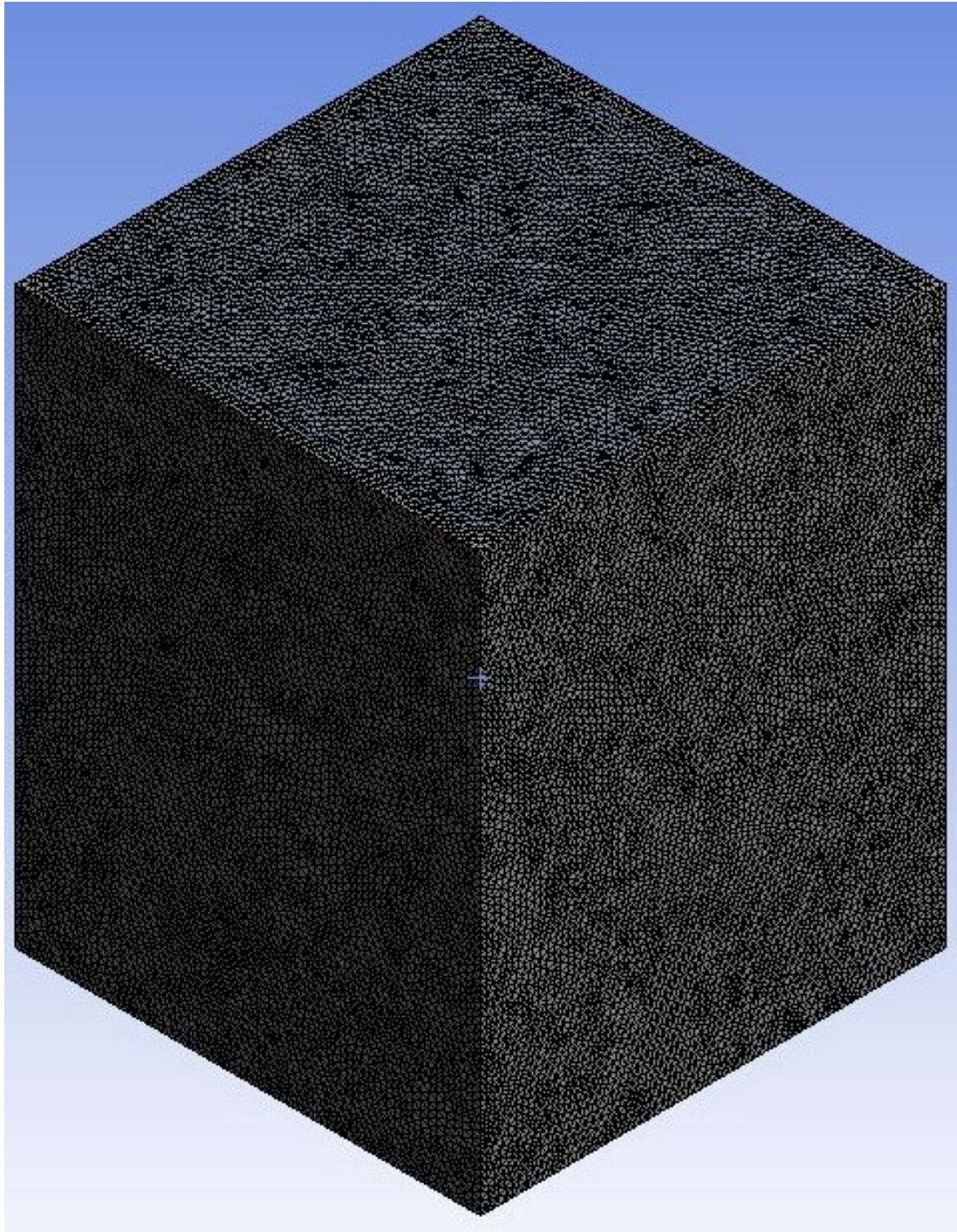


Figura 2.31: 10 mm, 3D completo, mesh.

Sono state generate varie *mesh* per i casi analizzati. Si riassumono quindi in Tabella 2.5 le dimensioni e la qualità (*skewness*) di ogni discretizzazione analizzata.

Tabella 2.5: Sintesi delle mesh generate.

	Mesh	# Elementi	# Nodi	Skewness [-]
reference	1	1608	1698	0.934
	2	6431	6610	0.952
	3	14469	14737	0.916
40 mm		6447	6599	0.650
20 mm		6687	6829	0.580
10 mm		8942	8990	0.366
10 mm – slab 3D		1731640	299077	0.150
10 mm – 3D completo		2088033	366875	0.154

Time step

Prendendo in esame il caso di riferimento senza struttura periodica interna, si sono valutati diversi *time step*, per poi scegliere quello ottimale con il quale realizzare tutte le successive simulazioni. Si sono perciò considerati i *time step* 0.5 s, 0.3 s e 0.1 s. Si è osservato come il primo sia troppo elevato per ottenere risultati accurati, anche se i tempi di calcolo risultano particolarmente vantaggiosi. Con questo *time step* non si è raggiunta la convergenza in più di una simulazione. Il *time step* 0.3 s ha dato generalmente buoni risultati, ma con la *mesh* 3 non ha portato a convergenza la simulazione. Nonostante questa *mesh* fosse più fitta delle altre e ci si aspettassero risultati migliori, sono stati rilevati residui altissimi. La spiegazione può risiedere nel fatto che aumentando il numero elementi l'indice *skewness* delle *mesh* realizzate è diminuito: celle più distorte hanno portato ad una mancata convergenza con *time step* troppo elevati. In sintesi, si è scelto di tenere come ottimo il *time step* 0.1 s in quanto ha sempre portato a convergenza ogni *mesh* del caso di riferimento, e successivamente anche i casi con struttura porosa.

Non avendo testato valori intermedi tra 0.1 s e 0.3 s non si può escludere la presenza di un *time step* migliore di quello scelto. Per esempio, 0.2 s potrebbe ipoteticamente portare ad una riduzione dei tempi di calcolo a parità di accuratezza dei risultati.

2.5 Condizioni al contorno

Di seguito vengono elencati i lati e le facce dei domini, dove sono state assegnate le condizioni al contorno. Si descrive inizialmente il caso *reference*; le condizioni usate si estendono analogamente ai domini 2D ricavati dai provini contenenti le strutture periodiche ed infine ai modelli 3D.

- i. Base del provino: denominata “down”, vedi Figura 2.32. A questo spigolo è stato associato un flusso termico pari a 30 W (escluse le perdite di calore verso l’ambiente).



Figura 2.32: Spigolo denominato “down”.

Nello studio di Righetti et al. [1], si sono testati altri 2 flussi termici, 10 W e 20 W. Queste tre potenze possono rappresentare il calore da dissipare in applicazioni legate al controllo termico delle apparecchiature elettroniche. Nella presente analisi si è studiata solo la potenza termica di 30 W. Sarebbe interessante analizzare numericamente anche le fasi di carica del PCM conseguenti l’applicazione dei flussi termici pari a 10 W e 20 W. Il flusso termico specifico calcolato dividendo

i 30 W per l'area di base del provino (42x42 mm²) e ipotizzando una perdita di calore costante del 6% risulta dall'equazione (2.14).

$$\bar{q} = \frac{q}{A} (1 - perdita) = \frac{30}{42 \times 42 \times 10^{-6}} (1 - 0.06) = 15986 \frac{W}{m^2} \quad (2.14)$$

Questo è stato arrotondato per semplicità a 15900 W/m². È importante osservare come l'ipotesi di una perdita costante non sia completamente realistica: al crescere del gradiente di temperatura tra provino e ambiente (cioè all'aumentare della temperatura del provino) il calore dissipato è maggiore. Righetti et al. [1], [25] hanno trovato una correlazione tra calore dissipato e temperatura media del provino sfruttando l'approccio numerico-sperimentale descritto da Patankar et al. [33]. Per implementare questo aspetto nelle presenti simulazioni è necessario utilizzare le UDFs (*User Defined Functions*) di *Ansys-Fluent* le quali permettono per esempio di assegnare delle condizioni al contorno variabili. Questo è un passaggio successivo: prima è necessario trovare un modello numerico che si avvicini adeguatamente ai dati sperimentali.

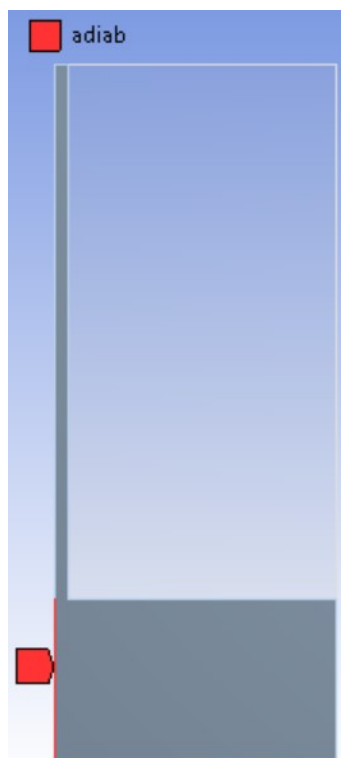


Figura 2.33: Spigolo denominato "adiab".

- ii. Parete di base adiabatica: lo spigolo denominato “*adiab*” si osserva in Figura 2.33. La base del provino, nello studio sperimentale di riferimento [1], è stata inserita in un sistema studiato per minimizzare le perdite di calore. Di conseguenza, questo tratto viene ipotizzato adiabatico. Per garantire questa condizione, si è assegnato un flusso termico specifico nullo allo spigolo “*adiab*”.

- iii. Parete laterale esterna: denominata “*side*”, vedi Figura 2.34.

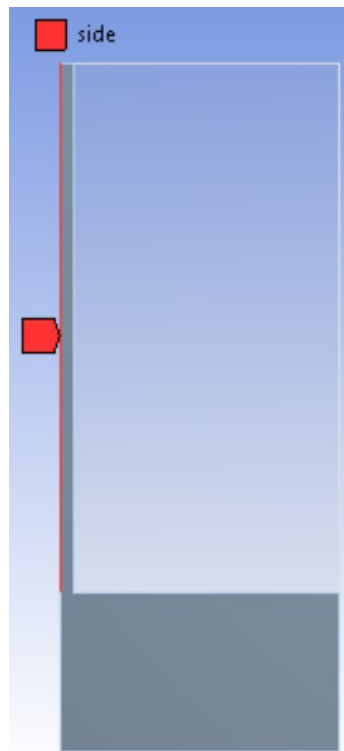


Figura 2.34: Spigolo denominato “*side*”.

La parete laterale del provino si trova a contatto con l’aria presente nell’ambiente. Il calore in questa zona viene scambiato verso l’esterno per convezione naturale e irraggiamento. Si ha quindi una condizione al contorno mista, data dalla composizione di questi due meccanismi di scambio termico. Le prove sperimentali sono state eseguite in camera climatica nel laboratorio di Termotecnica del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell’Università degli Studi di Padova [1]: la temperatura dell’ambiente esterno è quindi costante e pari a 20°C. Per la convezione naturale, tenendo conto che l’aria è ferma nella

stanza, si è assunto un valore di tentativo pari a $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il coefficiente di scambio. Per l'irraggiamento, si è considerata l'emissività tipica dell'alluminio di 0.95. In Tabella 2.6. si riassumono tutti i parametri richiesti da *Ansys-Fluent* per la modellizzazione dei due meccanismi di scambio termico descritti.

Tabella 2.6: Valori inseriti in *Ansys-Fluent* per la convezione naturale e l'irraggiamento.

Temperatura dell'ambiente esterno [K]	293
Coefficiente di scambio termico in convezione naturale [$\text{W/m}^2 \text{ K}$]	10
Emissività [-]	0.95



Figura 2.35: Spigolo denominato "up".

- iv. Top del provino: lo spigolo orizzontale superiore del dominio bidimensionale, formato dal tratto soprastante la parete di alluminio e dalla superficie del PCM è stato denominato "up", vedi Figura 2.35. Questa zona, analogamente allo spigolo "side" scambia calore con l'ambiente esterno tramite gli stessi meccanismi di scambio termico descritti in precedenza: convezione naturale ed irraggiamento. In Tabella 2.6, si riportano i valori di temperatura dell'ambiente esterno, coefficiente

di scambio termico ed emissività usati come condizione al contorno su questo spigolo.

- v. Piano di simmetria: denominato “*symmetry*” vedi Figura 2.36. Si è simulata solamente una parte della sezione ricavata come descritto nel paragrafo 2.3, in quanto è presente una simmetria geometrica. La geometria simulata è esattamente la metà della sezione estratta. Per la modellizzazione di questa caratteristica, è stato necessario applicare a questo spigolo la condizione al contorno di simmetria all’interno dell’ambiente *Ansys-Fluent*.

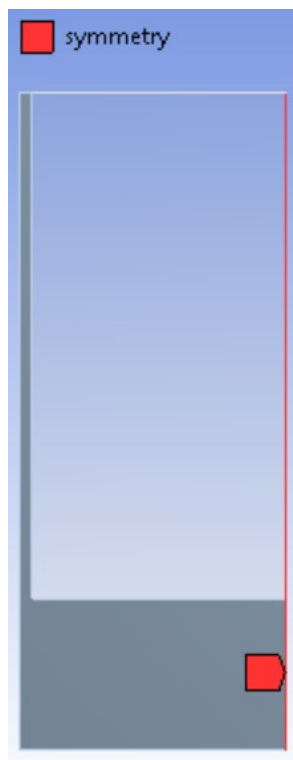


Figura 2.36: Spigolo denominato “*symmetry*”.

- vi. Dominio fluido: è stata assegnata al volume fluido evidenziato in Figura 2.37 la paraffina RT70 descritta nel paragrafo 2.2.
- vii. Dominio solido: è stato assegnato l’alluminio descritto nel paragrafo 2.2 al dominio solido evidenziato in Figura 2.38.

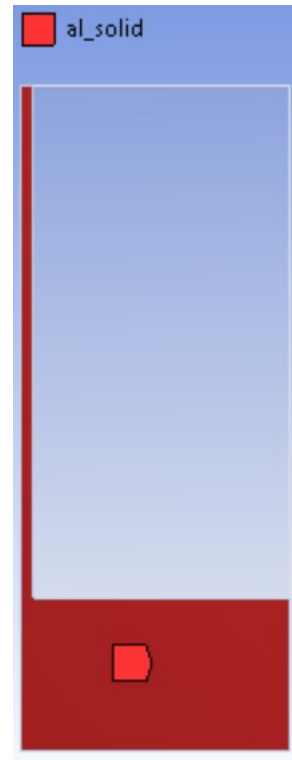
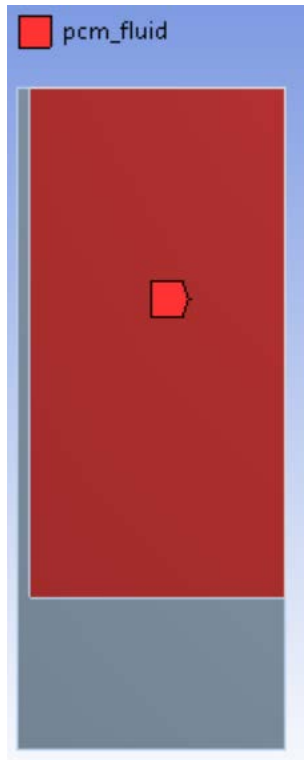


Figura 2.37: Dominio fluido denominato “pcm_fluid”. Figura 2.38: Dominio solido denominato “al_solid”.

Ai restanti casi, contenenti le strutture porose tridimensionali, sono state assegnate condizioni al contorno analoghe. Le *patches* di tutti i domini successivi sono state nominate come nel caso *reference*. Si riportano in seguito per completezza le *patches* di tutti i modelli realizzati. Figura 2.39 è riferita al provino contenente la struttura porosa con dimensione del poro di base pari a 40 mm. Figura 2.40 e Figura 2.41, invece, si riferiscono rispettivamente alle strutture con dimensione del poro di base di 20 mm e 10 mm.

Infine, si riportano le *patches* dei due modelli tridimensionali simulati. In Figura 2.42 è riportato lo *slab*, il quale, al contrario di tutti i modelli bidimensionali presenta tre superfici a cui è stata assegnata una condizione al contorno di simmetria. Le tre superfici denominate “*symmetry*” sono ben evidenziate in Figura 2.42. L’analoga denominazione degli spigoli è riportata per il modello 3D completo in Figura 2.43. È importante notare come la rappresentazione integrale del provino con dimensione del poro di base di 10 mm non presenti condizioni al contorno di simmetria, in quanto appunto il modello geometrico non è minimamente semplificato.

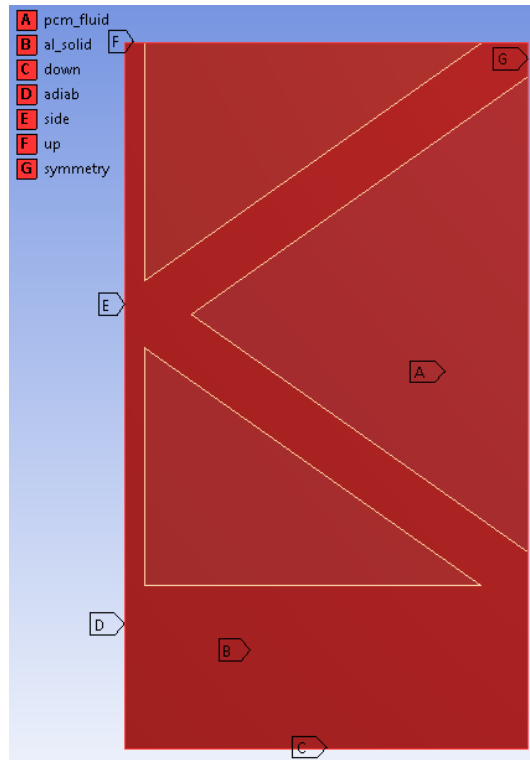


Figura 2.39: 40 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.

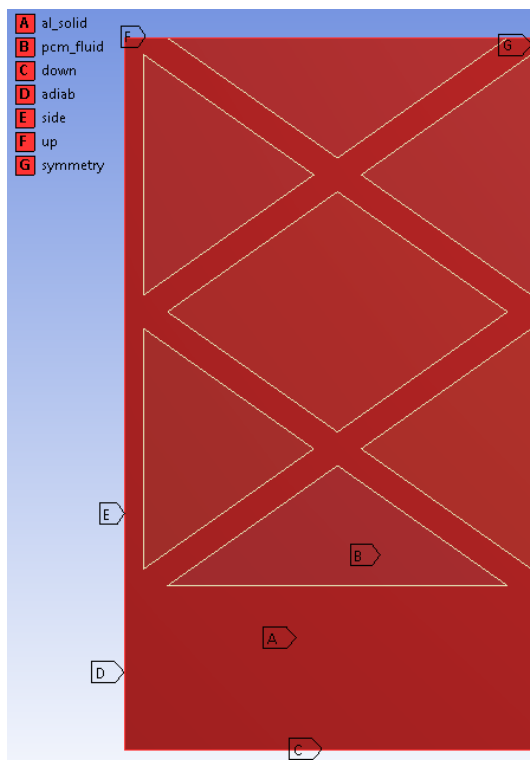


Figura 2.40: 20 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.

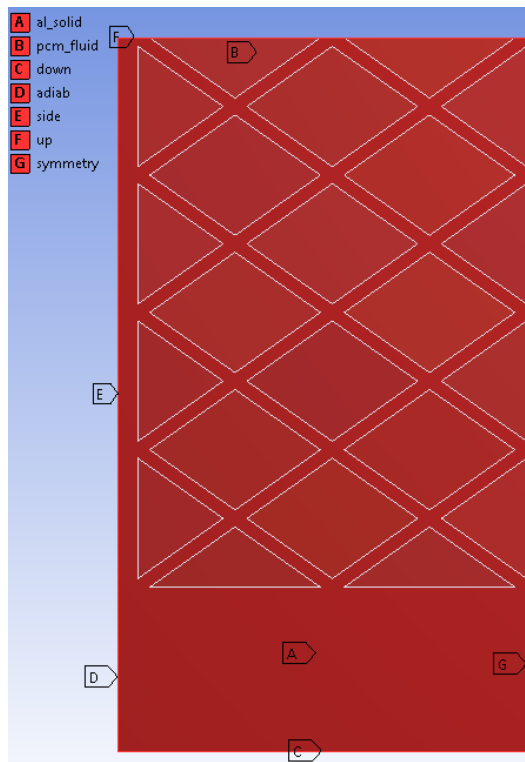


Figura 2.41: 10 mm, nomi di ogni spigolo, superficie.

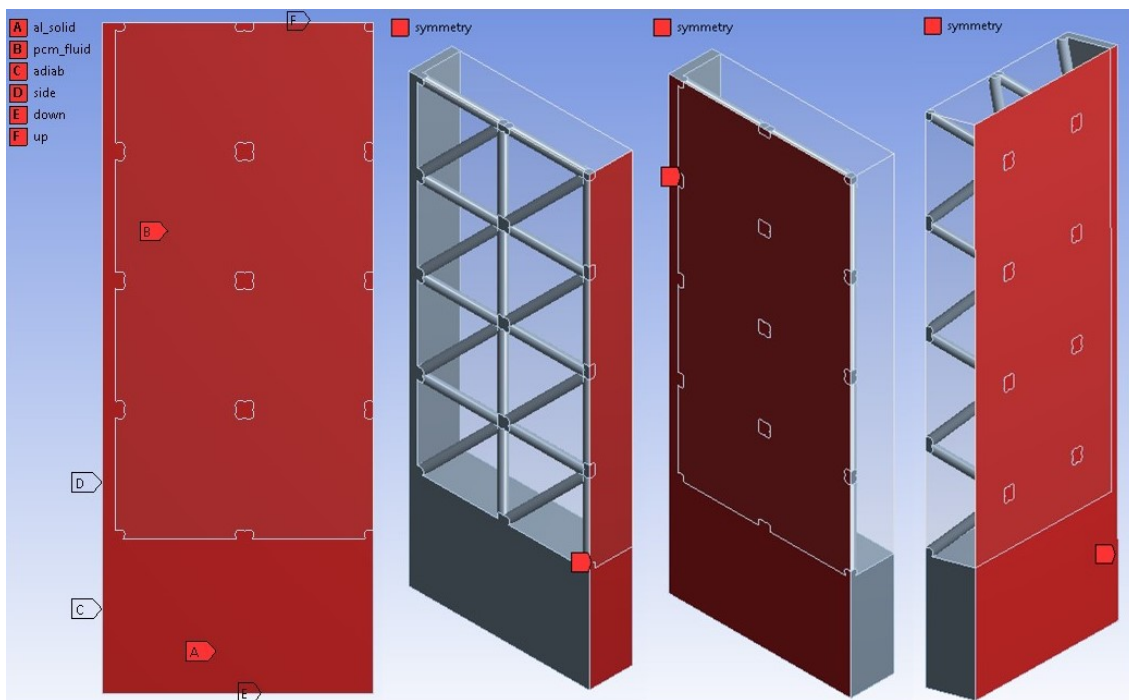


Figura 2.42: 10 mm, slab 3D, nomi di ogni patch.

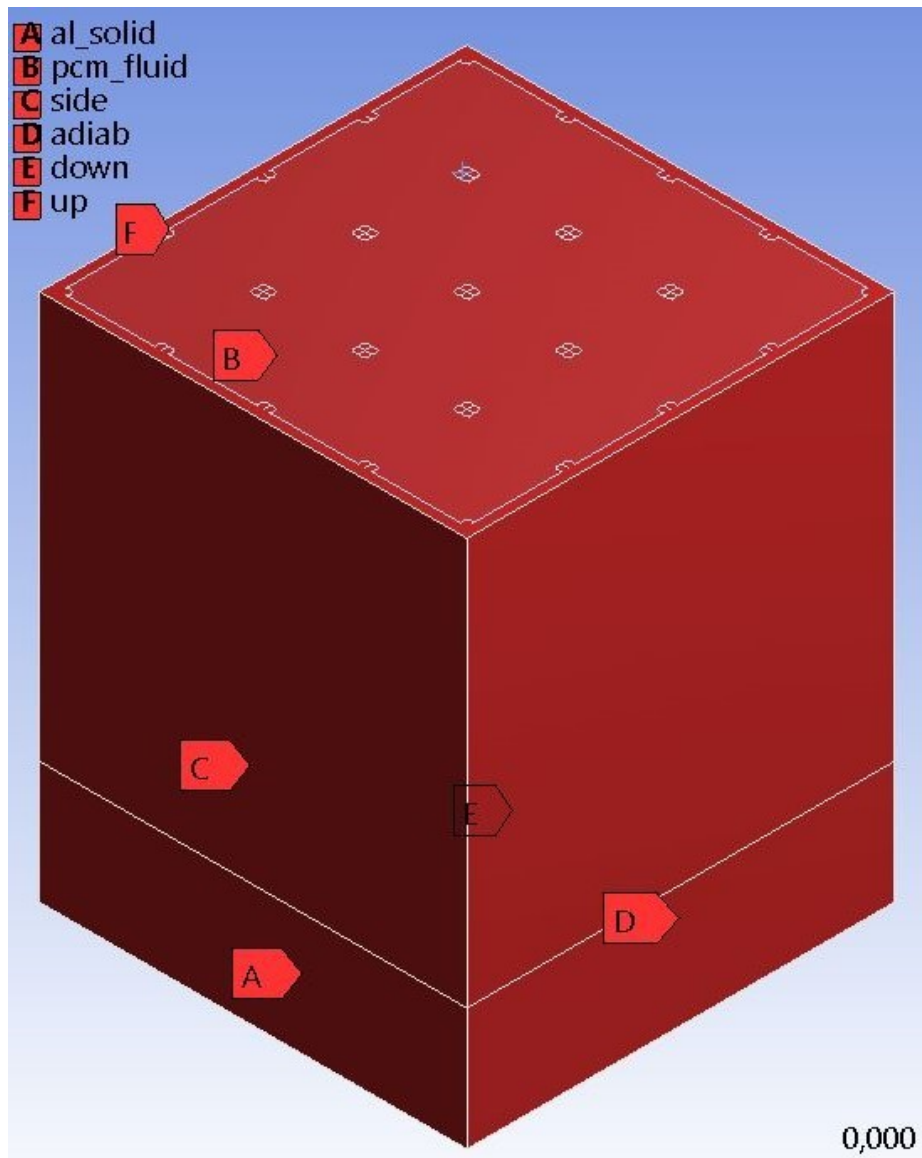


Figura 2.43: 10 mm, 3D completo, nomi di ogni patch.

Tutto il dominio è stato inizializzato ad una temperatura pari a quella dell'ambiente esterno, 293 K (20 °C). I residui imposti per ogni equazione sono i seguenti:

Continuità	10^{-3}
Velocità in direzione x	10^{-3}
Velocità in direzione y	10^{-3}
Energia	10^{-6}

3 RISULTATI

In questo capitolo si riportano tutti i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte. I grafici sono riportati seguendo l'ordine logico con cui i modelli numerici sono stati studiati.

In primo luogo, si sono svolte le analisi numeriche del provino *reference* al fine di impostare i parametri principali del modello, da sfruttare successivamente nelle altre simulazioni. Con questo scopo si sono ricavati *mesh* e *time step* ottimali nell'ottica di ottenere, in un tempo di calcolo ragionevole, risultati il più possibile prossimi ai dati sperimentali.

In secondo luogo, una volta validato positivamente il caso di riferimento, si sono passati ad analizzare i modelli rappresentanti i provini con le strutture metalliche al loro interno.

Tutte le simulazioni svolte fino a questo momento sono state caratterizzate dal valore di default della *mushy zone constant* A_{mush} ($10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$). Variando questo parametro se ne è successivamente analizzata l'influenza sui risultati. L'analisi di sensitività alla costante legata alla *mushy region* è stata realizzata solamente per i modelli bidimensionali dei tre provini contenenti le strutture periodiche porose.

Infine, a causa della scarsa accuratezza riscontrata nelle simulazioni 2D, si sono realizzati dei modelli tridimensionali. È stato analizzato uno *slab* 3D estratto dal provino con dimensione del poro di base di 10 mm e successivamente, sempre per questa geometria, si è realizzata una simulazione 3D completa.

I grafici che si riportano in seguito per la discussione dei risultati ottenuti, presentano il tempo sull'asse delle ascisse mentre la temperatura media del PCM o la frazione liquida sulle ordinate. Si osserva in ogni figura di questo tipo una linea tratteggiata nera accompagnata da un valore temporale: questo rappresenta il momento in cui tutta la paraffina risulta fusa secondo lo studio sperimentale di Righetti et al. [1].

Per i diagrammi riassuntivi delle simulazioni svolte su ogni provino, invece, l'istante in cui tutta la paraffina risulta fusa [1] è rappresentato da una linea orizzontale rossa tratteggiata accompagnata dal valore temporale.

3.1 Validazione del caso di riferimento (provino vuoto)

Si presenta in Figura 3.1 un diagramma riassuntivo delle varie simulazioni svolte per il caso di riferimento. Il grafico indica i tempi necessari alla fusione completa della paraffina ricavati per ogni simulazione risolta. Nelle nove analisi realizzate, si sono prese in considerazione tutti gli accoppiamenti *mesh-time step* al fine di ricavare la combinazione ottimale. In tutte le simulazioni del provino vuoto si è usato il valore di *default* della *mushy zone constant*, pari a $10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$.

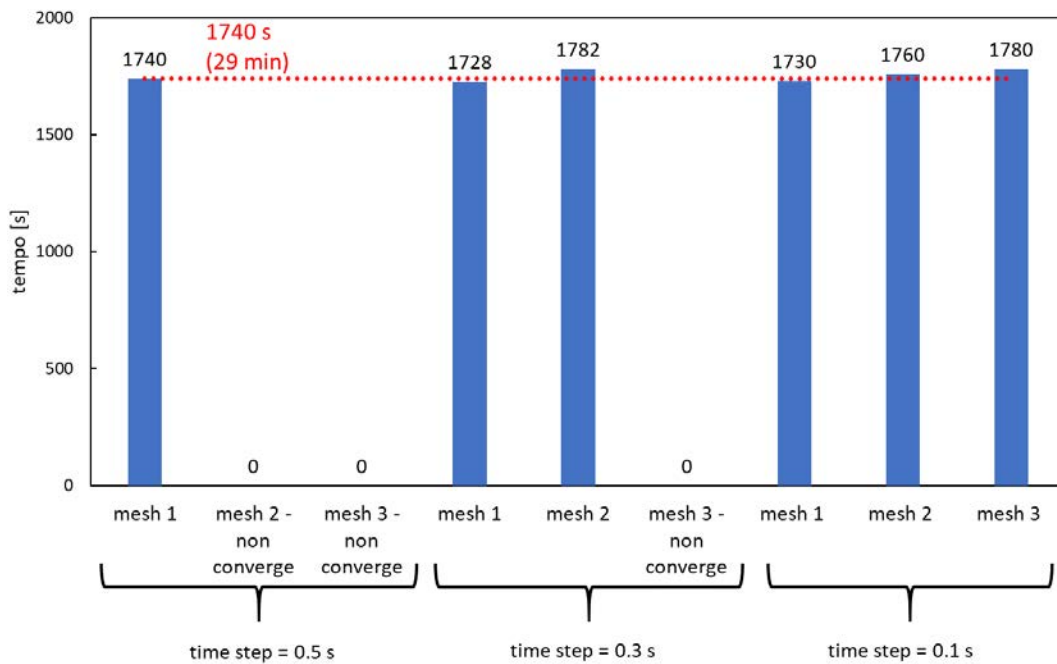


Figura 3.1: Caso di riferimento, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.

È possibile osservare come il *time step* più grossolano, pari a 0.5 s, porti in due casi su tre ad una mancata convergenza. Questo succede con le due *mesh* più fitte, fatto che in prima analisi potrebbe sembrare ambiguo, in quanto da una discretizzazione con un maggior numero di celle ci si dovrebbero aspettare risultati più accurati. Tuttavia, è necessario prendere in considerazione lo *skewness*. Per le *mesh* 2D realizzate in questo studio, si può osservare in Tabella 2.5, come questo parametro decresca all'aumentare degli elementi presenti. Infatti, aumentando il numero di celle è possibile che queste risultino maggiormente distorte. Analogamente, il caso con la *mesh* più fitta e *time step* 0.3s non giunge a convergenza. Si è quindi optato per il *time step* 0.1 s, in quanto è l'unico analizzato che ha portato a convergenza le simulazioni con tutte le *mesh* studiate.

Si riportano graficamente i risultati delle prime tre simulazioni realizzate, svolte sulle tre *mesh* del caso di riferimento abbinate ad un *time step* 0.5 s. In Figura 3.2 si può osservare il confronto tra gli andamenti numerici e sperimentali della temperatura media calcolata all'interno del PCM, mentre in Figura 3.3 sono riportate le curve relative alla frazione liquida al passare del tempo. Il confronto con la curva sperimentale della frazione liquida è reso impossibile in quanto gli autori [1] non hanno potuto ricavare questo dato. È possibile notare come l'andamento della temperatura media ricavato numericamente sia pressoché lineare al variare del tempo: i dati sperimentali sono quindi discretamente approssimati da queste simulazioni. Tuttavia, verso la fine delle simulazioni, cioè quando la paraffina è quasi fusa completamente, due delle tre simulazioni aventi *time step* 0.5 s presentano una variazione repentina della temperatura. Questo fatto è dovuto ad una mancata convergenza di vari *time steps* occorsa dopo i 1600 s. Ciò è evidente nelle Figura 3.2 e Figura 3.3, dove le curve numeriche presentano dei punti angolosi. In particolare, in Figura 3.3 si nota come la frazione di liquido ad un certo punto diminuisca: ciò non è fisicamente possibile. Per questo motivo il *time step* 0.5 s non è stato considerato ottimale ed è stato scartato.

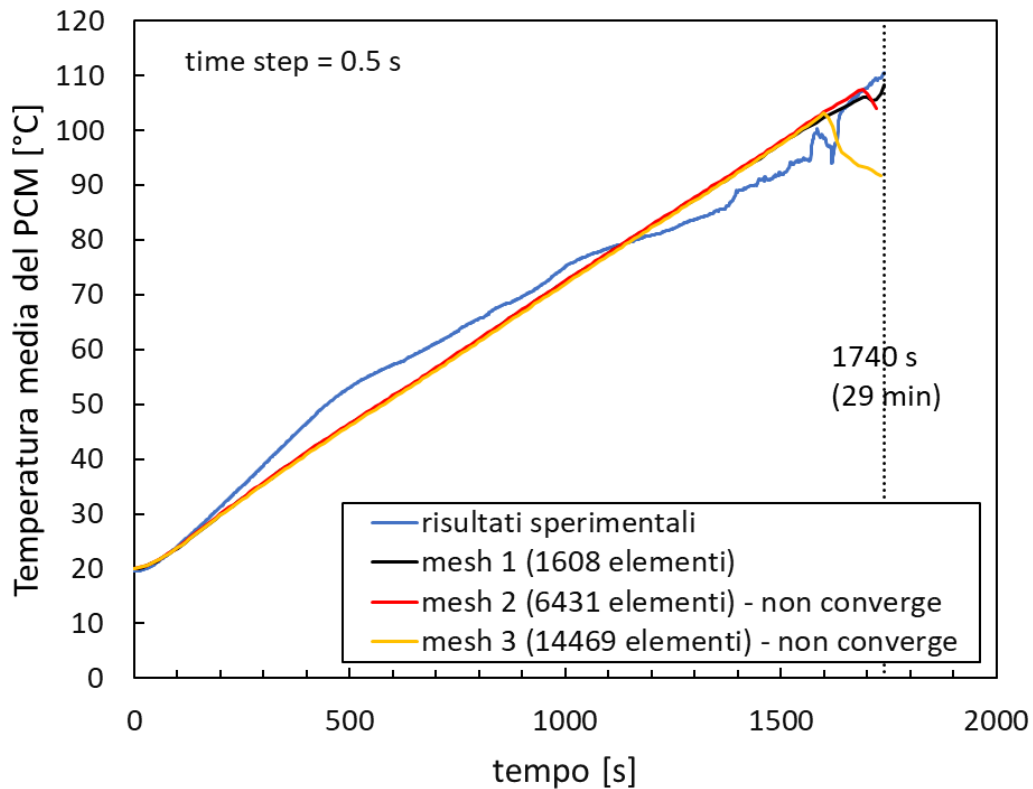


Figura 3.2: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, *time step* 0.5 s.

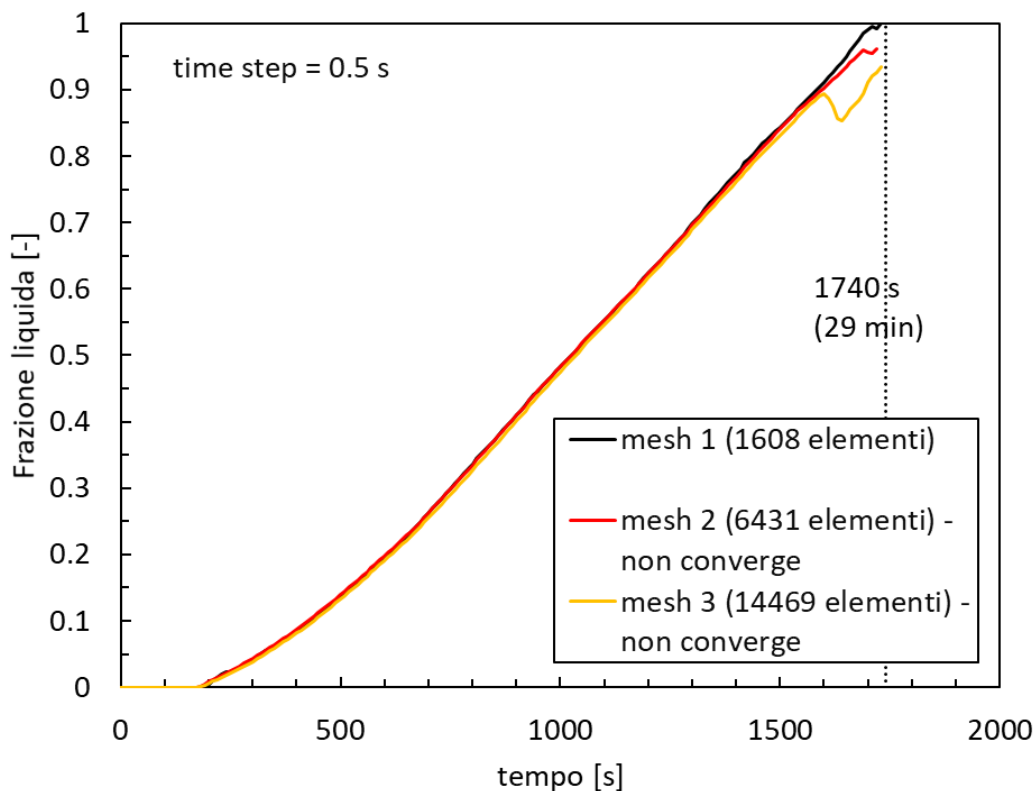


Figura 3.3: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.5 s.

Andando alla ricerca di un *time step* migliore, si è testato 0.3 s. Le simulazioni svolte con questo *time step* hanno portato a risultati analoghi ai precedenti, Figura 3.4 e Figura 3.5. Si nota nuovamente l'andamento quasi perfettamente lineare della temperatura media al variare del tempo. Questa curva è comunque abbastanza vicina a quella sperimentale. Si riscontra una chiara mancata convergenza verso la fine della simulazione con la *mesh* 3. Anche la *mesh* 2 sembra divergere negli ultimi secondi simulati. Tuttavia, essendo talmente ridotta la zona ne risente, la simulazione si è considerata andata a convergenza. La riduzione del *time step* da 0.5 s a 0.3 s ha portato dei miglioramenti, ma si sono comunque presentate delle simulazioni che non hanno raggiunto la convergenza. Un nuovo *time step* è stato così testato: 0.1 s.

Si riportano in Figura 3.6 e Figura 3.7 i risultati delle simulazioni svolte con quest'ultimo *time step*. La convergenza è stata sempre raggiunta. Per questo motivo il *time step* ottimale è stato quindi 0.1 s ma non è da escludere l'esistenza di un valore migliore compreso tra 0.1 s e 0.3 s, per esempio 0.2 s che non è tuttavia stato analizzato per motivi di tempo.

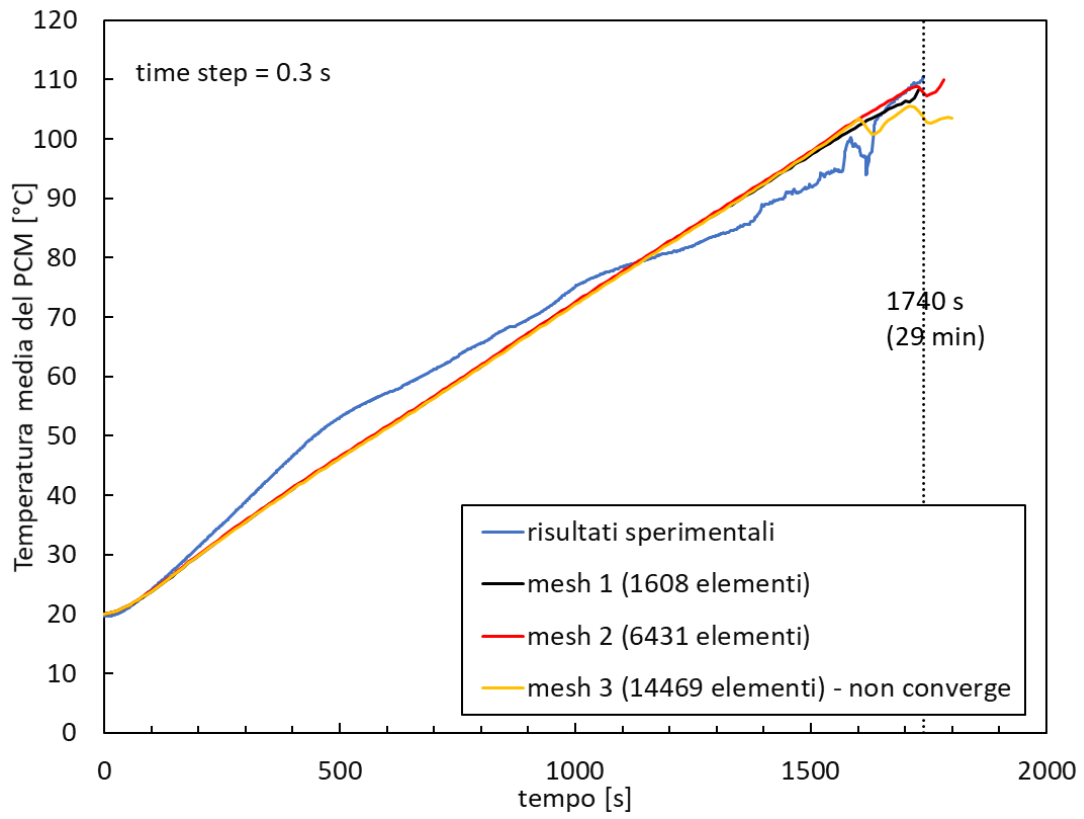


Figura 3.4: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, time step 0.3 s.

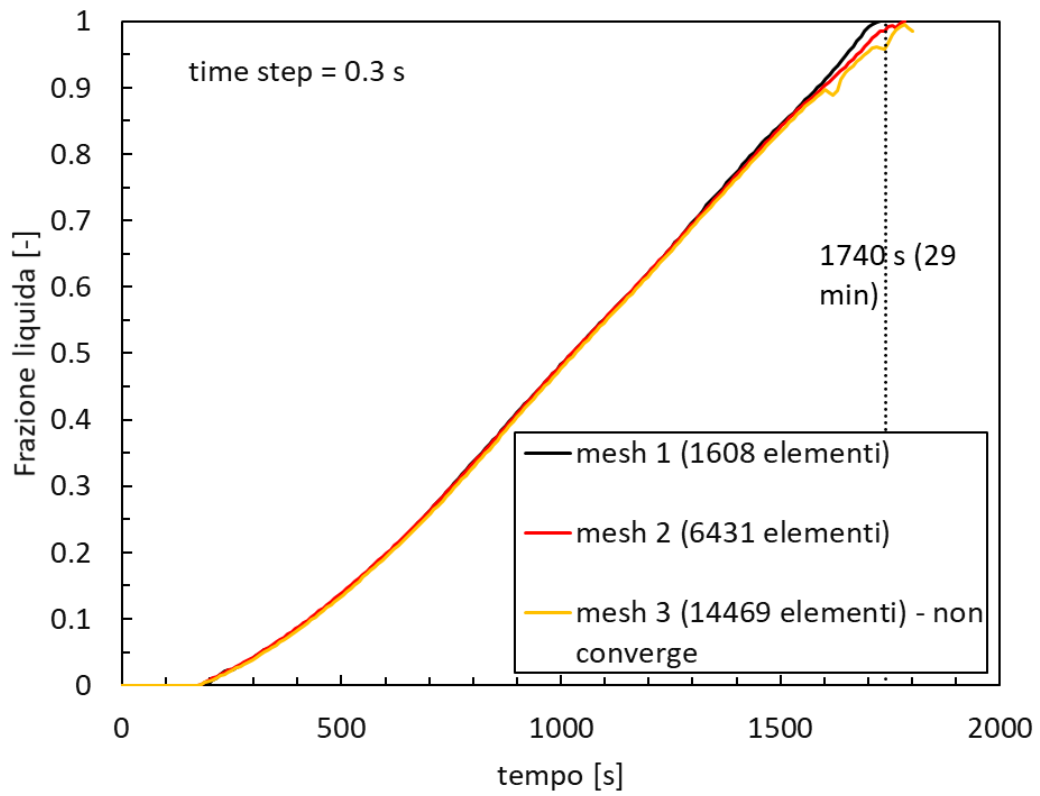


Figura 3.5: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.3 s.

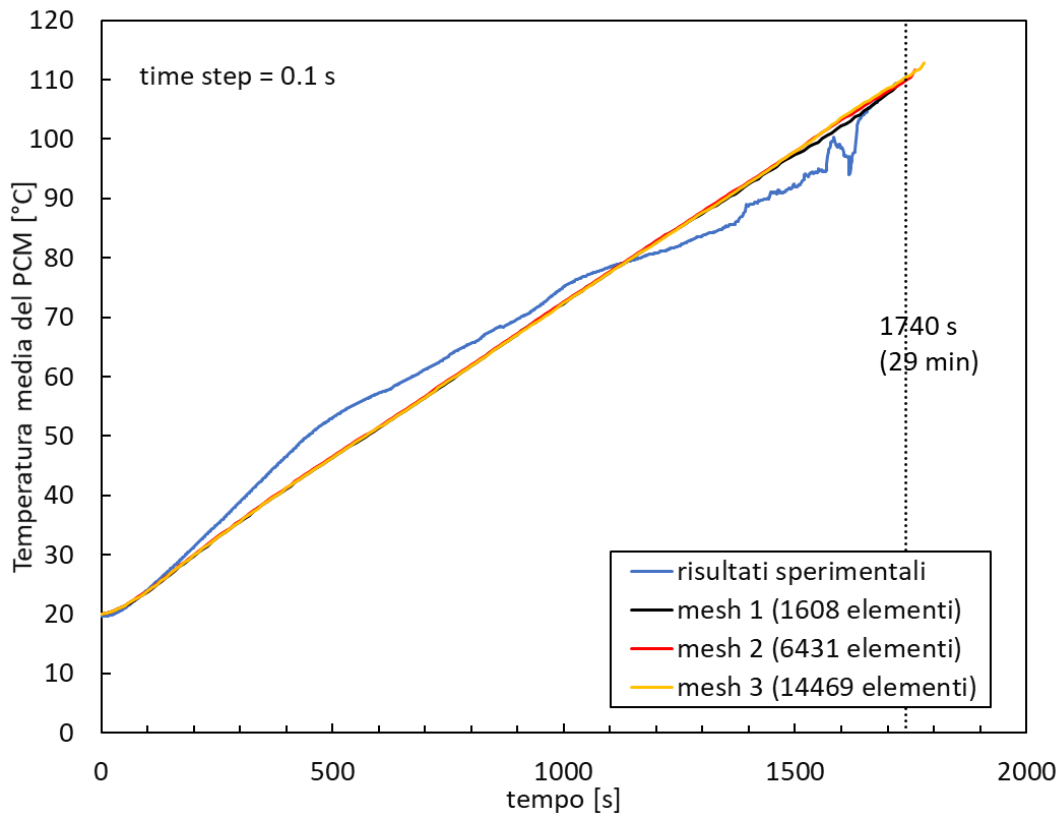


Figura 3.6: Caso di riferimento, temperatura media del PCM, time step 0.1 s.

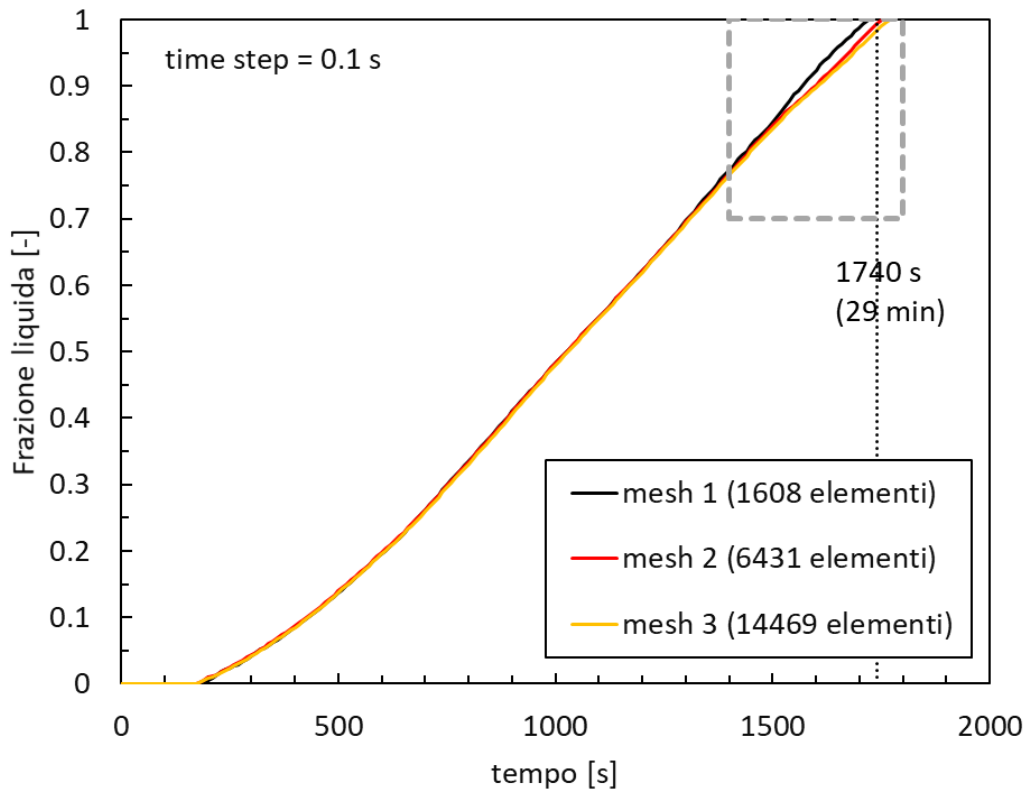


Figura 3.7: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.1 s.

Osservando Figura 3.8, che rappresenta un ingrandimento del rettangolo tratteggiato in grigio in Figura 3.7 si nota come le tre *mesh* diano risultati analoghi se non per gli ultimi secondi della simulazione. La curva relativa alla prima *mesh* è evidentemente diversa dalle altre due, mentre la differenza tra la curva riferita alla *mesh* 2 e la 3 è molto ridotta. Si è scelto come *mesh* ottimale la seconda, la quale ha portato a risultati simili a quelli dati dalla terza discretizzazione, con tempi di calcolo minori.

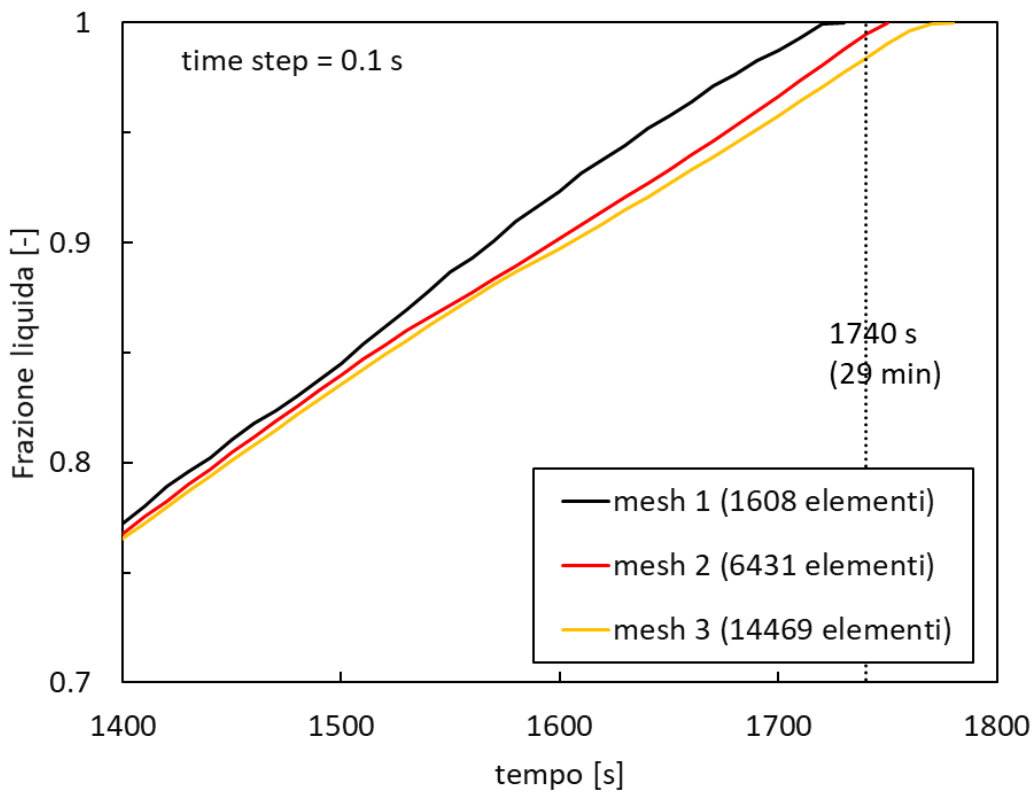


Figura 3.8: Caso di riferimento, frazione liquida, time step 0.1 s, dettaglio.

In sintesi, si può affermare di aver ricavato i valori ottimali di dimensione della *mesh* e *time step*. Inoltre, osservando Figura 3.6, si nota che, ancora una volta, viene mantenuto l'andamento quasi completamente lineare della temperatura media del PCM al variare del tempo. Questo può essere dovuto all'assunzione di una perdita di calore verso l'ambiente costante e pari al 6% della potenza termica totale. Per migliorare questo aspetto sarebbe interessante valutare, tramite lo strumento delle UDF (*User Defined Functions*) di *Ansys-Fluent* una condizione al contorno che permetta di fornire un calore alla base del provino variabile nel tempo.

In tutte queste simulazioni si è anche andati a valutare le temperature in alcuni punti dove nello studio sperimentale erano state poste le termocoppie, vedi Figura 3.9.

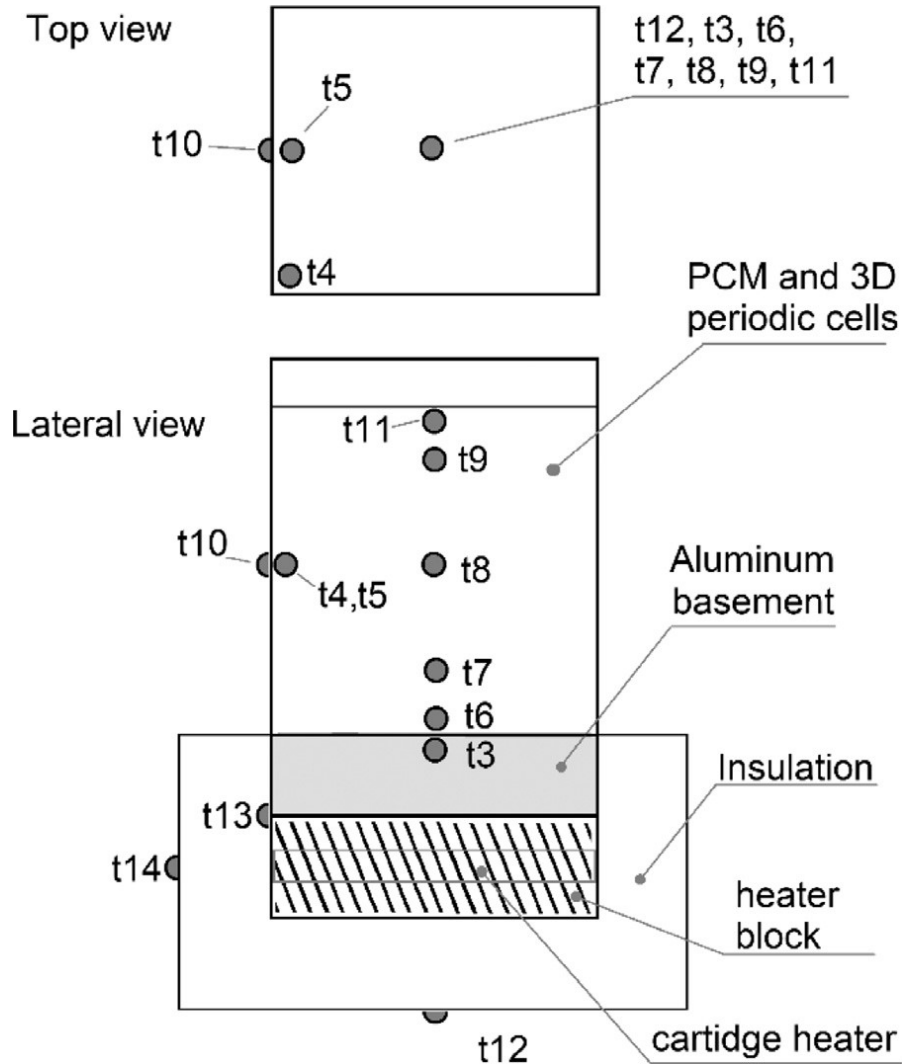


Figura 3.9: Posizione delle termocoppie disposte all'interno dei vari provini [1], [25].

Per le termocoppie denominate t5, t6, t7, t8, t9, t10 si sono confrontati i valori di temperatura sperimentali con quelli numerici. In seguito, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16, Figura 3.17, Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22, Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25, Figura 3.26, Figura 3.27, si riportano i grafici che esprimono i suddetti confronti. I dati numerici sono stati estratti dalle simulazioni svolte, le quali combinavano ogni *mesh* studiata con tutti i *time step* considerati. Tra questi grafici sono riportati ingranditi solamente quelli realizzati con *time step* 0.1 s, ritenuto essere il valore ottimale.

Termocoppia t5

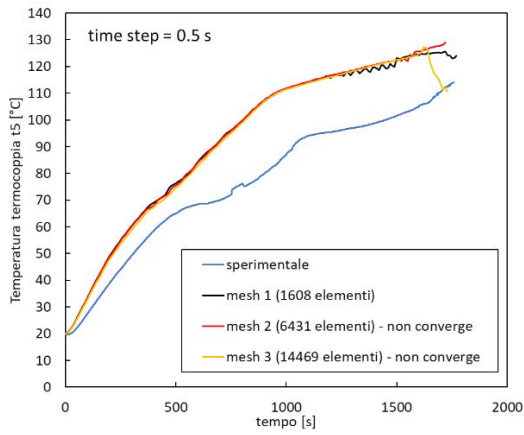


Figura 3.10: t5, time step 0.5 s.

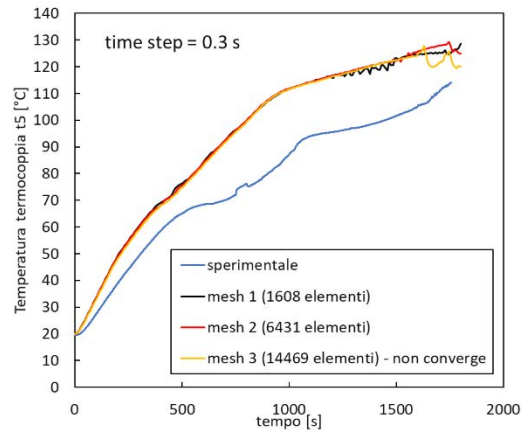


Figura 3.11: t5, time step 0.3 s.

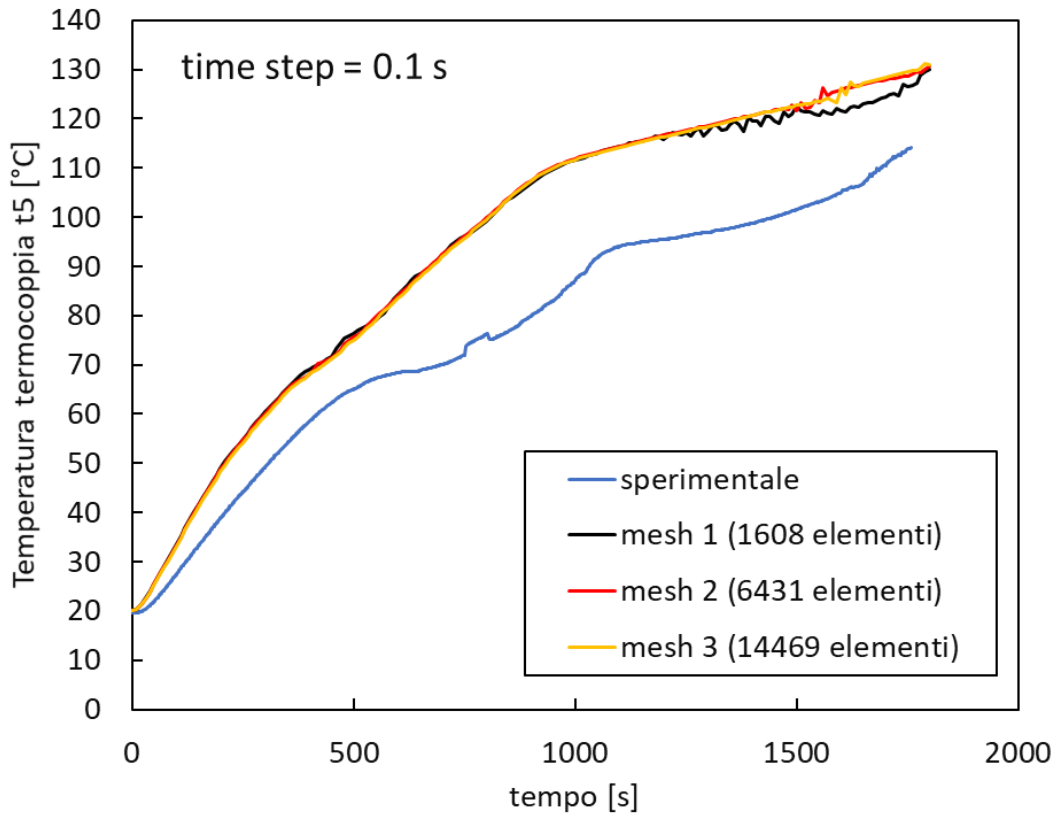


Figura 3.12: t5, time step 0.1 s.

Termocoppia t6

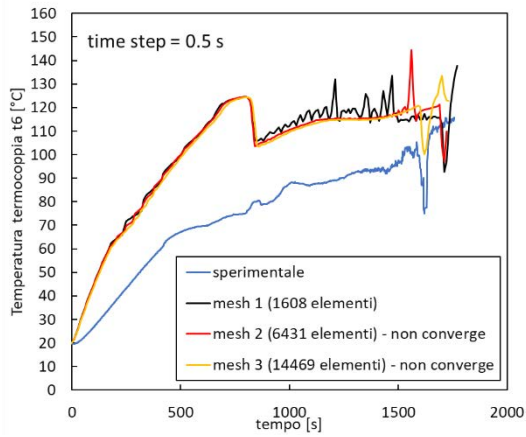


Figura 3.13: t6, time step 0.5 s.

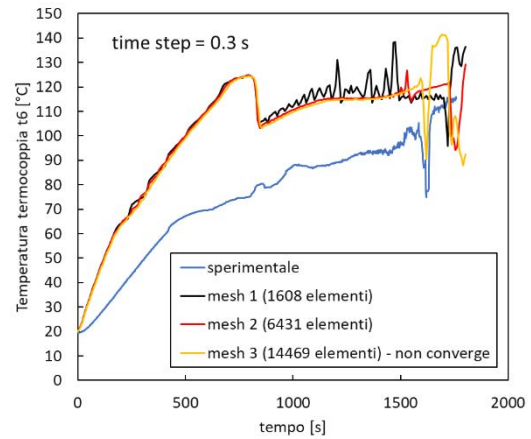


Figura 3.14: t6, time step 0.3 s.

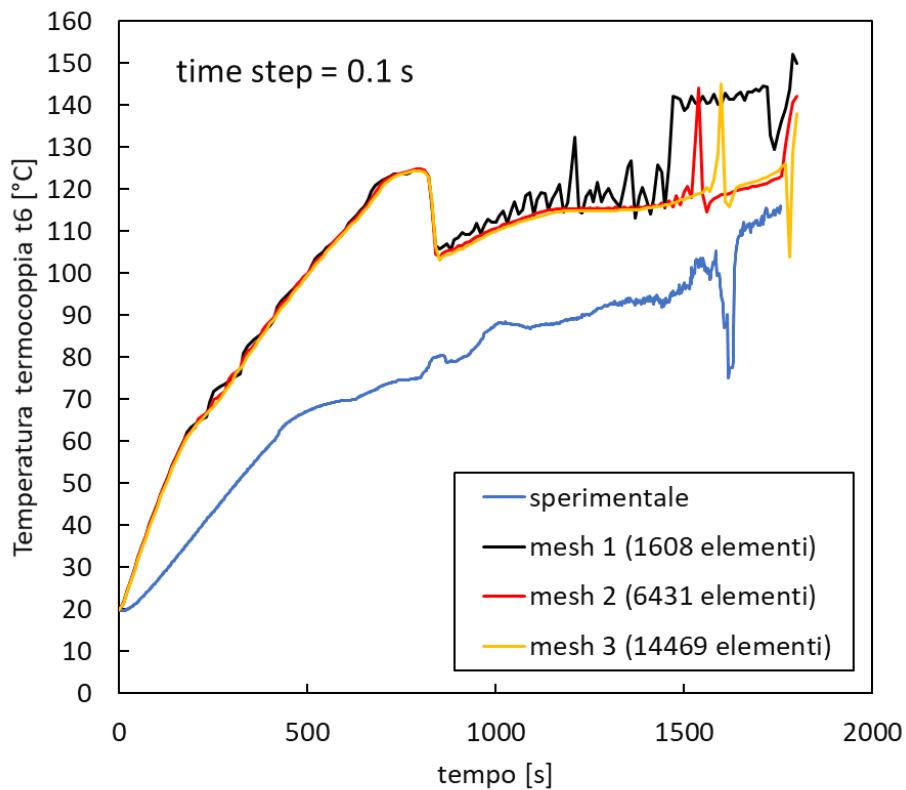


Figura 3.15: t6, time step 0.1 s.

Termocoppia t7

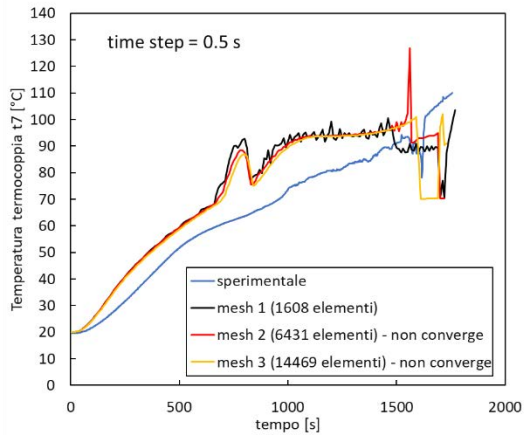


Figura 3.16: t7, time step 0.5 s.

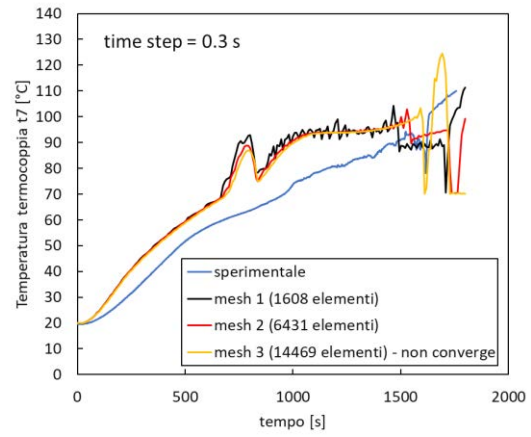


Figura 3.17: t7, time step 0.3 s.

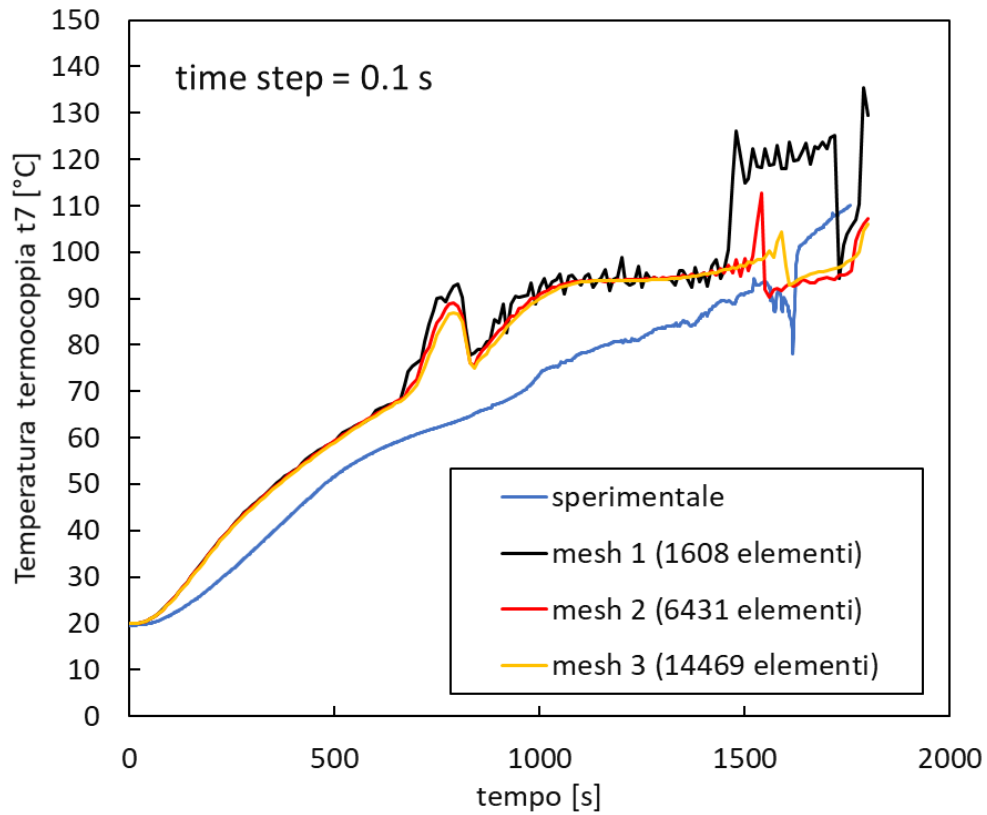


Figura 3.18: t7, time step 0.1 s.

Termocoppia t8

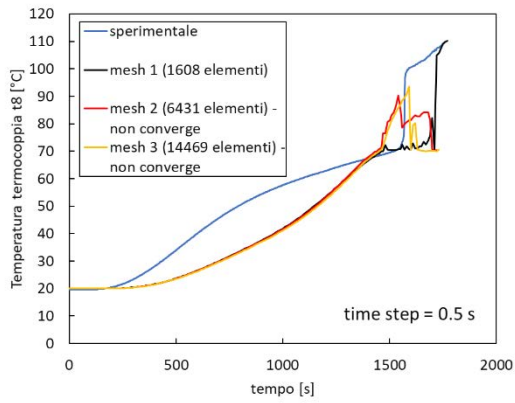


Figura 3.19: t8, time step 0.5 s.

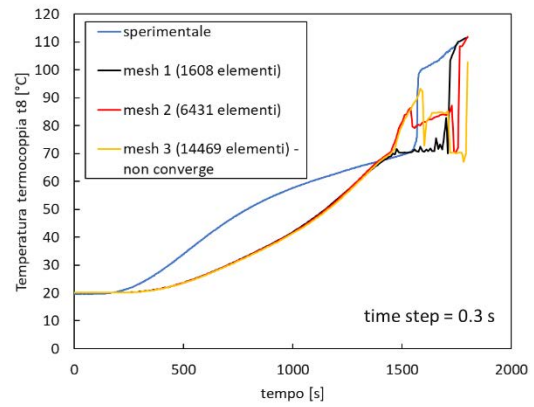


Figura 3.20: t8, time step 0.3 s.

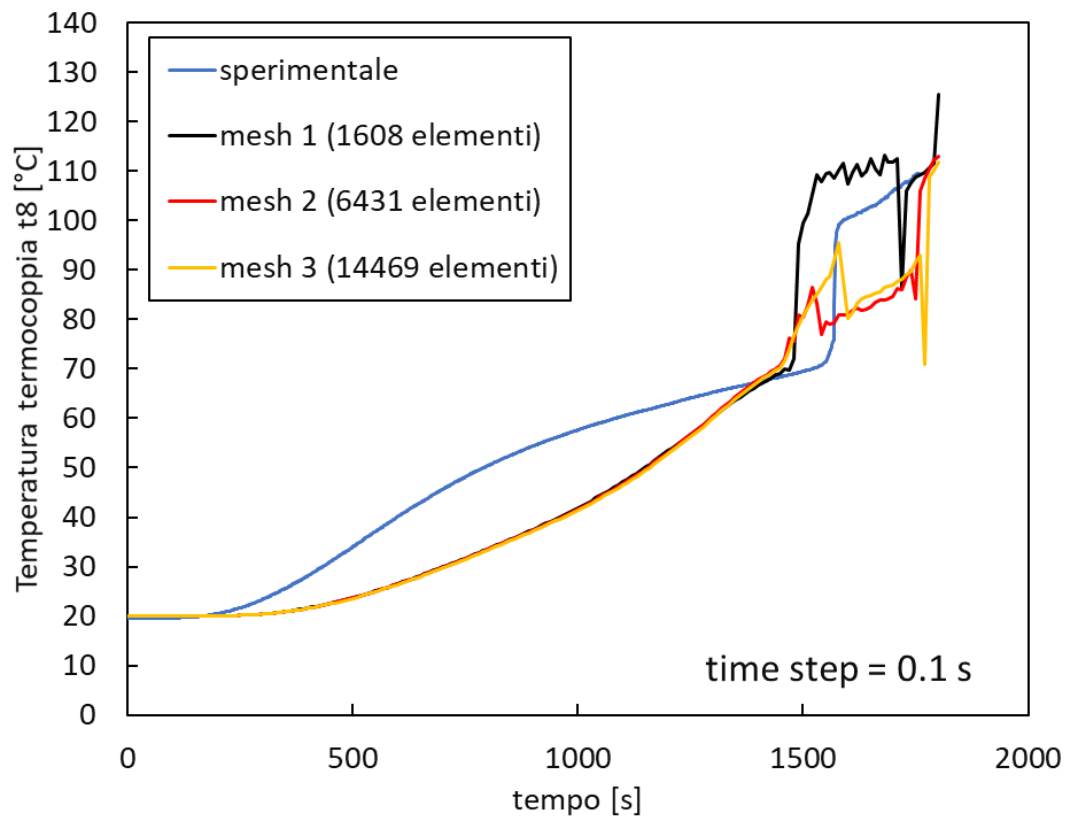


Figura 3.21: t8, time step 0.1 s.

Termocoppia t9

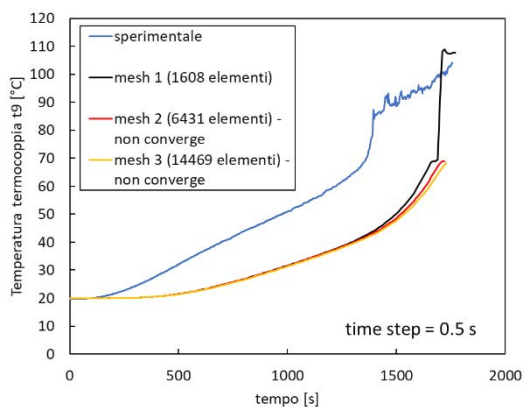


Figura 3.22: t9, time step 0.5 s.

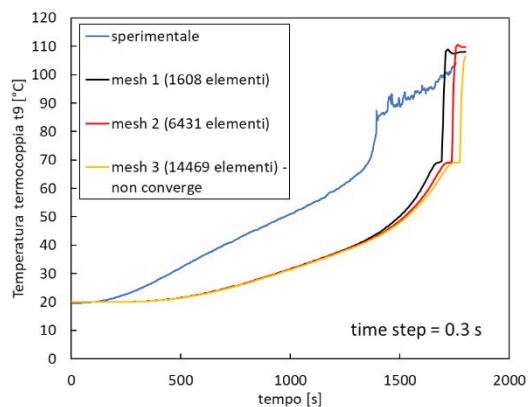


Figura 3.23: t9, time step 0.3 s.

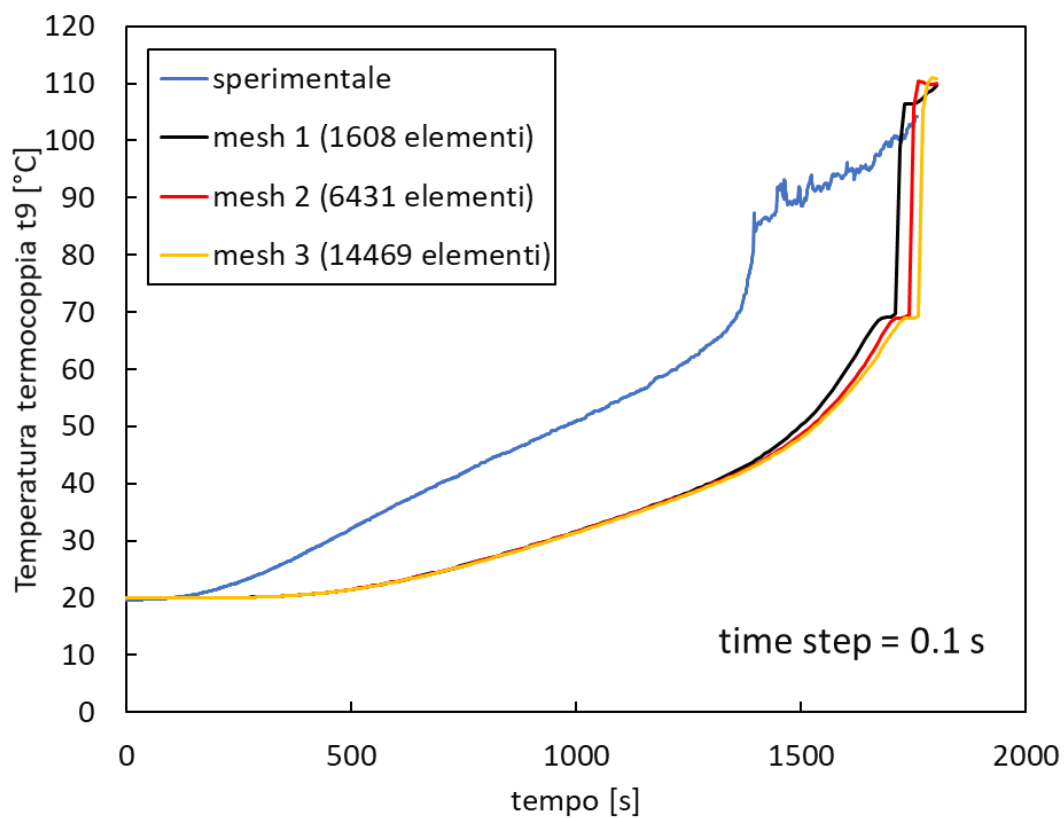


Figura 3.24: t9, time step 0.1 s.

Termocoppia t10

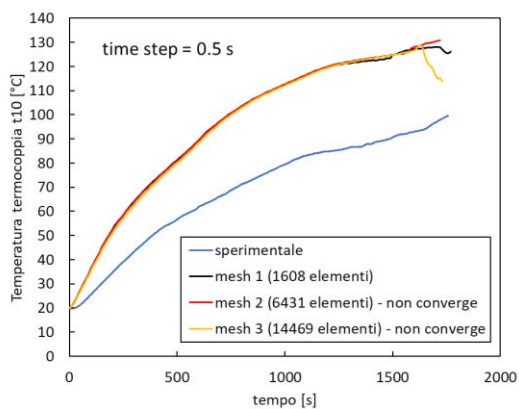


Figura 3.25: t10, time step 0.5 s.

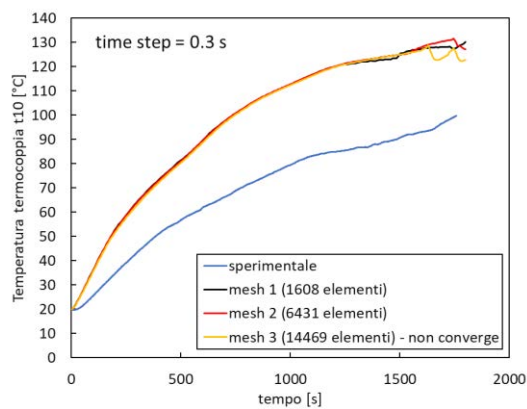


Figura 3.26: t10, time step 0.3 s.

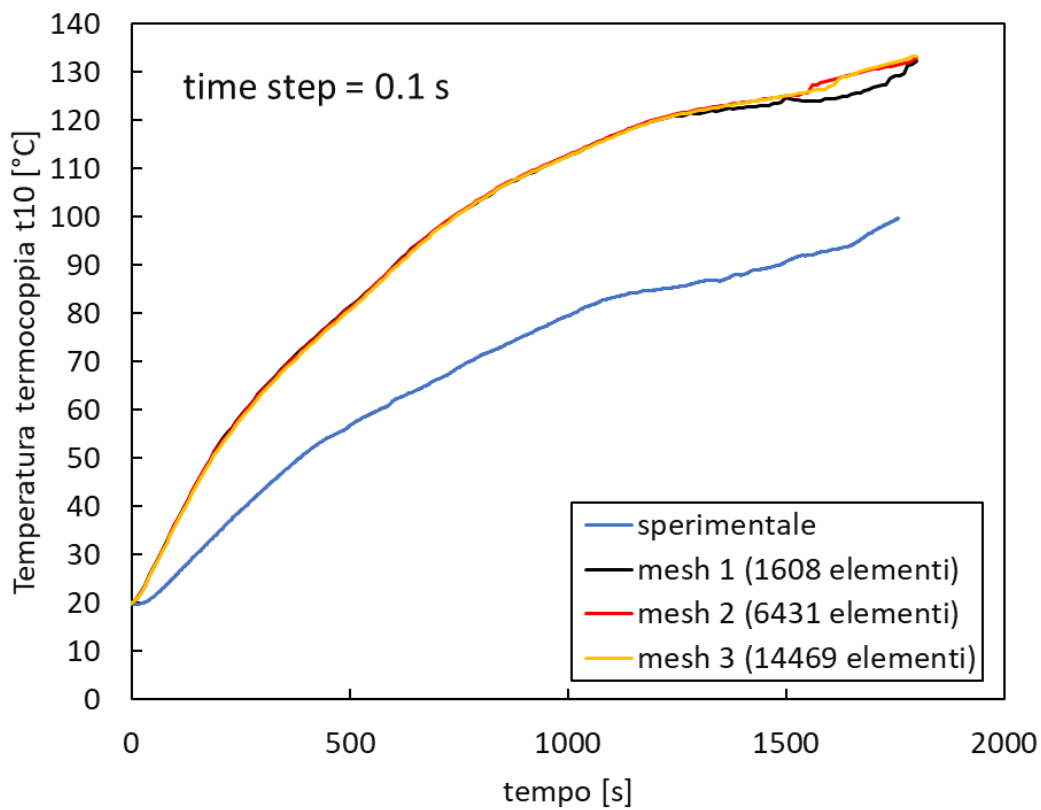


Figura 3.27: t10, time step 0.1 s.

La termocoppia t5 è posizionata all'interno del PCM, a metà altezza in posizione laterale. In Figura 3.10, Figura 3.11 e specialmente in Figura 3.12, si osserva come l'andamento numerico della temperatura relativa a questa termocoppia inizi ad allontanarsi significativamente dalla curva sperimentale dopo i primi 500 secondi. Dopo questa soglia, le curve numeriche sembrano assumere un andamento lineare che cambia pendenza intorno ai 1000 secondi. Verso la fine della simulazione i grafici sperimentali e numerici tendono leggermente a riavvicinarsi. Nel complesso è evidente, tuttavia, un'ampia differenza tra le due curve.

Le termocoppie t6, t7, t8 e t9 sono disperse all'interno del PCM, allineate una sopra l'altra al centro del provino.

Osservando in Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 l'andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia t6, si nota come la curva numerica si discosti significativamente dai dati sperimentali, nonostante il trend sia pressoché rispettato. È presente una prima zona in cui dati sperimentali e numerici divergono molto, fino a circa 800-900 secondi. Le curve numeriche poi, compiono un salto, ingiustificato dai dati sperimentali. Grazie a questo salto, dati sperimentali e numerici tendono lievemente a convergere al passare del tempo, ma presentando sempre significative differenze tra loro.

In Figura 3.16, Figura 3.17 e Figura 3.18, invece, la temperatura ricavata numericamente relativa alla termocoppia t7 è più vicina ai dati sperimentali rispetto la t5 e t6, ma, tuttavia, si nota ancora una non trascurabile differenza tra i due. Inoltre, gli andamenti numerici sono molto più irregolari rispetto la curva sperimentale.

In Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21, si osserva un'iniziale sovrapposizione tra la curva della temperatura t8 sperimentale e quella numerica. Dopo circa 300 secondi i due grafici assumono tendenze completamente differenti: i dati sperimentali hanno un andamento concavo, mentre quelli numerici convesso. Intorno ai 1500 secondi c'è una sovrapposizione tra valori numerici e sperimentali, seguita da un repentino aumento della temperatura sperimentale. Ciò può indicare la fusione della paraffina in corrispondenza della termocoppia t8. Si osserva come le curve numeriche riescano in parte a seguire questa tendenza.

In Figura 3.24, si osserva come i dati numerici sottostimino fortemente la temperatura sperimentalmente letta dalla termocoppia t9. Tuttavia, negli ultimi istanti di simulazione, le curve numeriche compiono un salto, raggiungendo la curva sperimentale.

L'ultima termocoppia confrontata nel presente studio è la t10, posta sulla superficie esterna del provino e necessaria a valutare lo scambio termico convettivo e radiante verso l'ambiente esterno. In Figura 3.25, Figura 3.26 e specialmente in Figura 3.27, si nota come la temperatura relativa alla termocoppia t10 ricavata numericamente sovrastimi di oltre 20 °C quella sperimentale. Per i primi 1000 secondi, le curve sperimentali e numeriche tendono a divergere, mentre successivamente, queste sembrano proseguire in modo pressoché parallelo.

Puntualmente è quindi chiaro che il modello numerico fatica a replicare i dati sperimentali, tuttavia, valutando la temperatura media calcolata all'interno della paraffina, si osservano per il caso *reference* buone analogie con i dati sperimentali, vedi Figura 3.6.

Questo risultato tuttavia non deve stupire perché il modello di simulazione utilizzato è definito *volume average* in quanto non distingue in modo assoluto i sistemi e permette di fornire un valore mediato sul volume dei principali parametri.

Il risultato ottenuto è comunque di grande importanza perché il modello numerico sviluppato ha permesso di simulare con ragionevole accuratezza la fusione della paraffina all'interno del provino di riferimento.

3.2 Validazione delle strutture porose

Il numero di elementi della *mesh* e il *time step* ottimale trovati per il caso di riferimento, sono poi stati utilizzati nelle simulazioni dei tre casi presentanti le strutture porose. Si è analizzato in primo luogo il caso con dimensione del poro di base di 10 mm, in quanto Righetti et al. [1] hanno affermato che questa struttura ha dato migliori risultati in termini di tempi di fusione (e solidificazione), mantenendo una temperatura di giunzione più bassa. Successivamente, si sono realizzate le simulazioni dei casi con dimensione della cella di base pari a 20 mm e 40 mm.

3.2.1 10 mm

Si presenta in Figura 3.28 un riassunto delle varie simulazioni svolte per il caso con dimensione del poro di base pari a 10 mm. Il grafico indica i tempi di fusione di ogni simulazione risolta. I domini analizzati per questa configurazione sono principalmente bidimensionali, ottenuti come descritto nel paragrafo 2.3. Si sono anche simulati due domini 3D, uno semplificato ed uno completo, paragrafo 2.3.

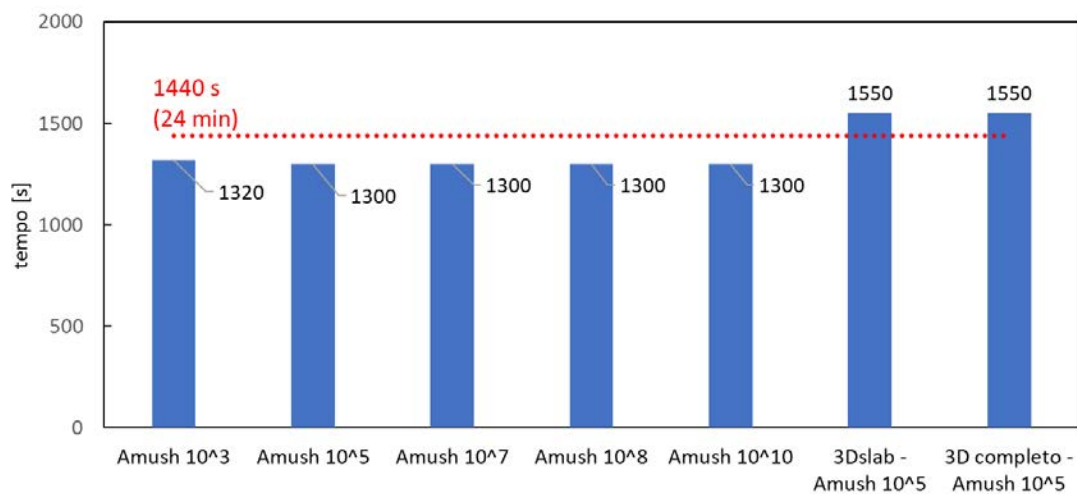


Figura 3.28: 10 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.

In seguito, si riportano i grafici relativi ai risultati ottenuti con *time step* 0.1 s e *mushy zone constant* pari a 10^5 kg/m³s (*default*).

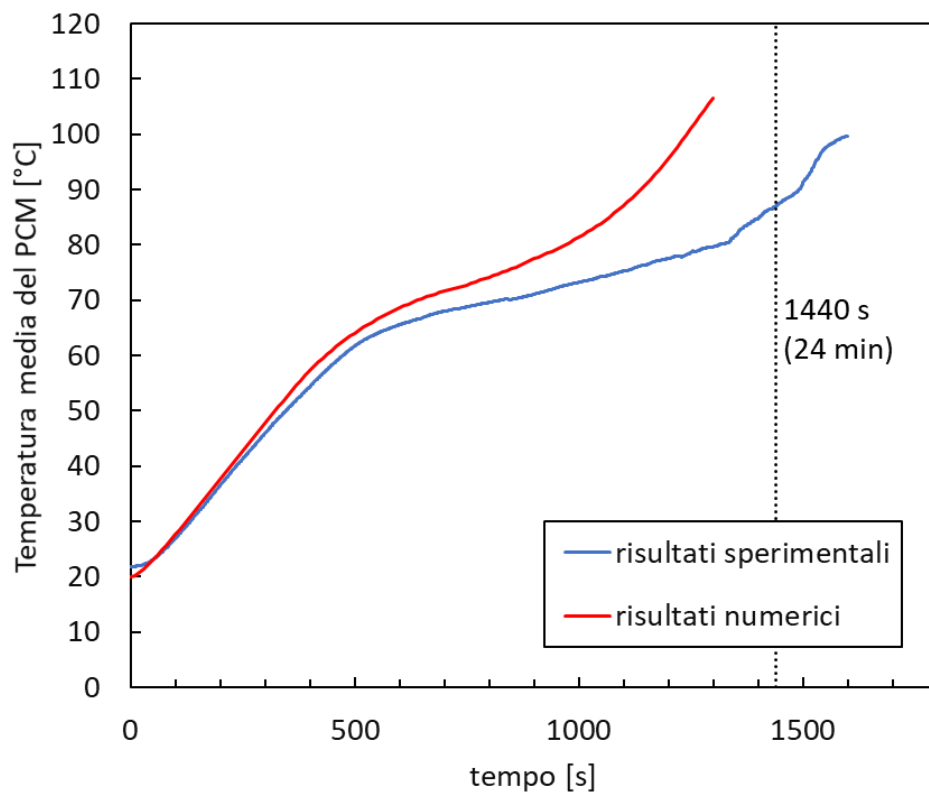


Figura 3.29: 10 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

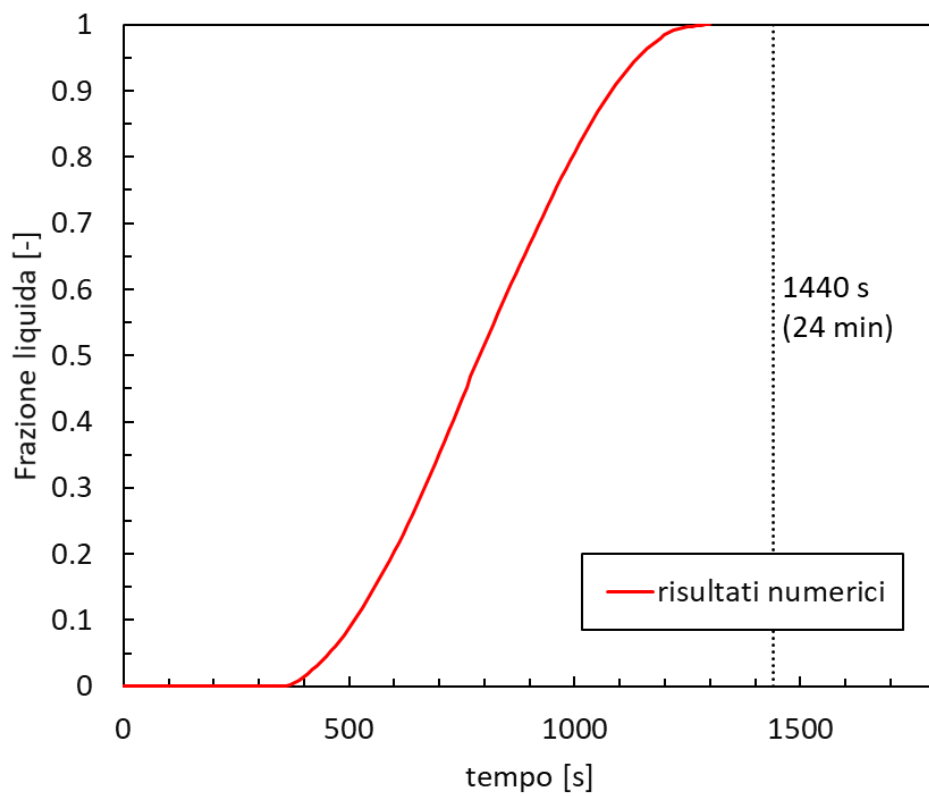


Figura 3.30: 10 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

In Figura 3.29 si riporta il confronto tra l'andamento sperimentale e quello numerico della temperatura media del PCM. Nella prima fase del processo di fusione si osserva buona somiglianza tra le due curve. Tuttavia, oltre i 500 secondi i risultati numerici tendono ad allontanarsi sempre più al passare del tempo dalla curva sperimentale. Il modello numerico sovrastima la temperatura, portando di conseguenza a tempi di fusioni inferiori a quelli reali. Questo effetto è con buona certezza causato dalle “isole” di PCM che si sono ottenute generando il dominio bidimensionale. Queste “isole” non rappresentano la reale quantità di paraffina che riceve calore dalle aste della struttura. La paraffina risulta chiusa e riceve calore in modo estremamente efficiente portando ad una sostanziale sottostima del tempo di fusione. In Figura 3.30 si riporta invece, la frazione liquida della corrispondente simulazione. Questo dato però non ha un riscontro sperimentale.

Nei paragrafi 3.3 e 3.4, verranno riportate le altre simulazioni svolte su questa geometria, e che hanno permesso l'analisi dell'effetto di A_{mush} e la valutazione delle differenze con i modelli tridimensionali.

3.2.2 20 mm

Si presenta in Figura 3.31 un riassunto delle varie simulazioni svolte per il caso con dimensione della cella di base pari a 20 mm. Il grafico indica i tempi di fusione di ogni simulazione risolta. I domini analizzati sono solamente bidimensionali e sono stati ottenuti estraendo una sezione diagonale come descritto nel paragrafo 2.3.

In seguito, si riportano i grafici che mostrano i risultati ottenuti con *time step* 0.1 s e costante legata alla *mushy region* pari a $10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$, valore di *default*.

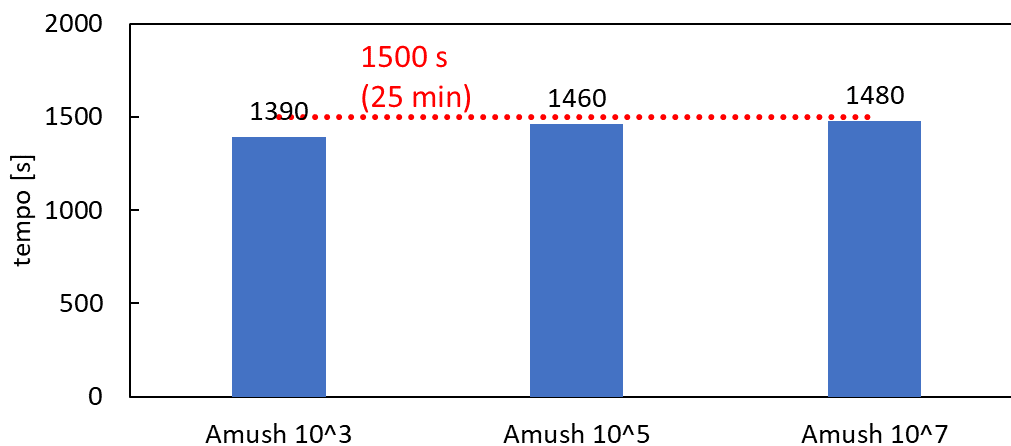


Figura 3.31: 20 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.

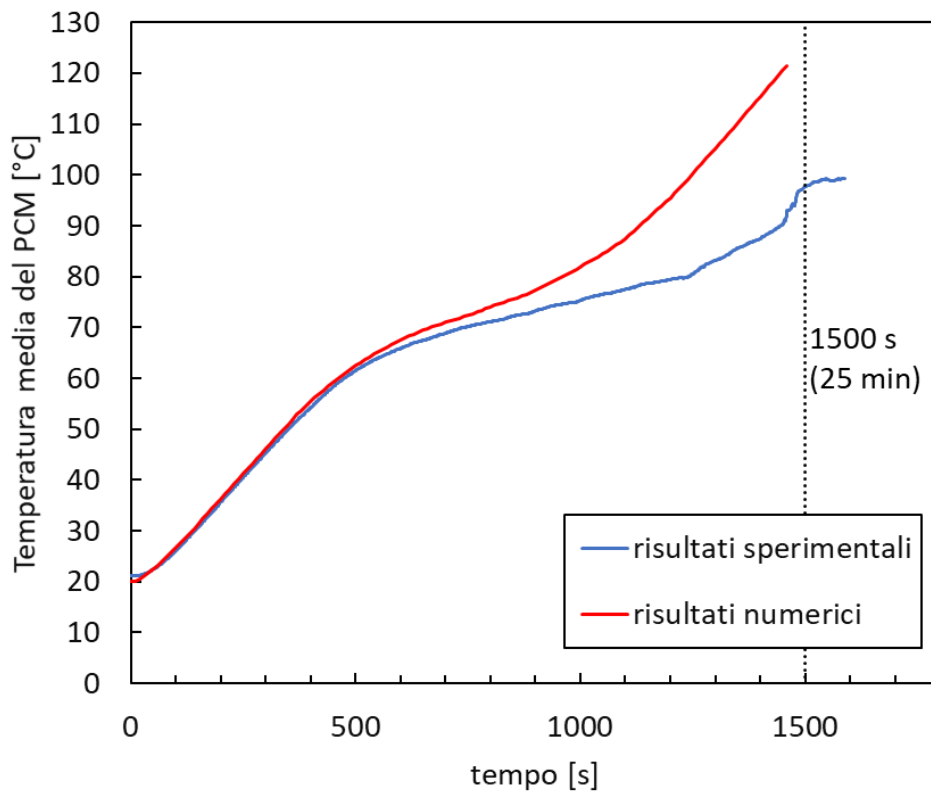


Figura 3.32: 20 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

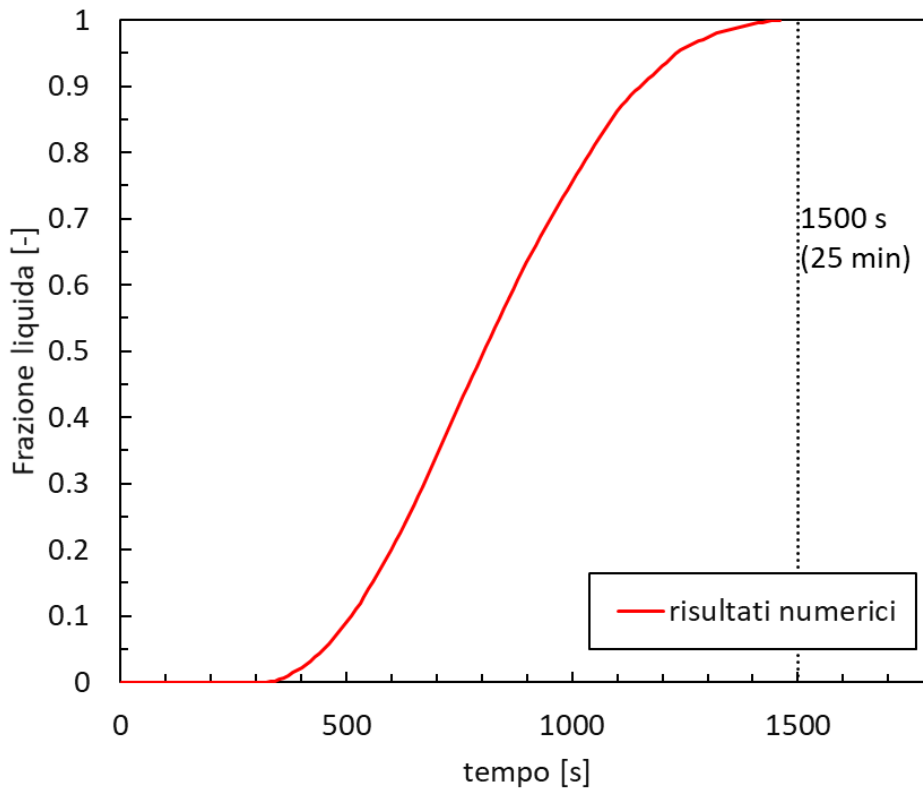


Figura 3.33: 20 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

In Figura 3.32 si riporta il confronto tra l'andamento sperimentale e quello numerico della temperatura media del PCM. Gli andamenti delle curve sono molto simili a quelli già descritti nel caso 10 mm. Nella prima fase del processo di fusione si osserva buona somiglianza tra le due curve. Tuttavia, oltre i 500-600 secondi i risultati numerici tendono a divergere dalla curva sperimentale al passare del tempo. Come in precedenza, anche per questa geometria, il modello numerico sovrastima la temperatura. Ciò risulta in tempi di fusione inferiori a quelli reali. La spiegazione di questo fenomeno risiede nel dominio 2D utilizzato, il quale contiene delle "isole" di PCM non comunicanti tra loro che inibiscono i moti di convezione naturale della paraffina fusa. È però importante osservare come, rispetto al caso precedente, ci sia minore discrepanza tra risultati numerici e sperimentali, anche a livello di tempi di fusione, vedi Figura 3.31. Questo probabilmente è conseguenza della dimensione maggiore delle "isole" di paraffina che si sono generate, conseguenza di una dimensione della cella di base maggiore. In Figura 3.33, invece, è riportata la frazione liquida della corrispondente analisi numerica. Nel paragrafo 3.3, sono riportate le altre simulazioni svolte su questa geometria, le quali hanno permesso di analizzare l'effetto di A_{mush} .

3.2.3 40 mm

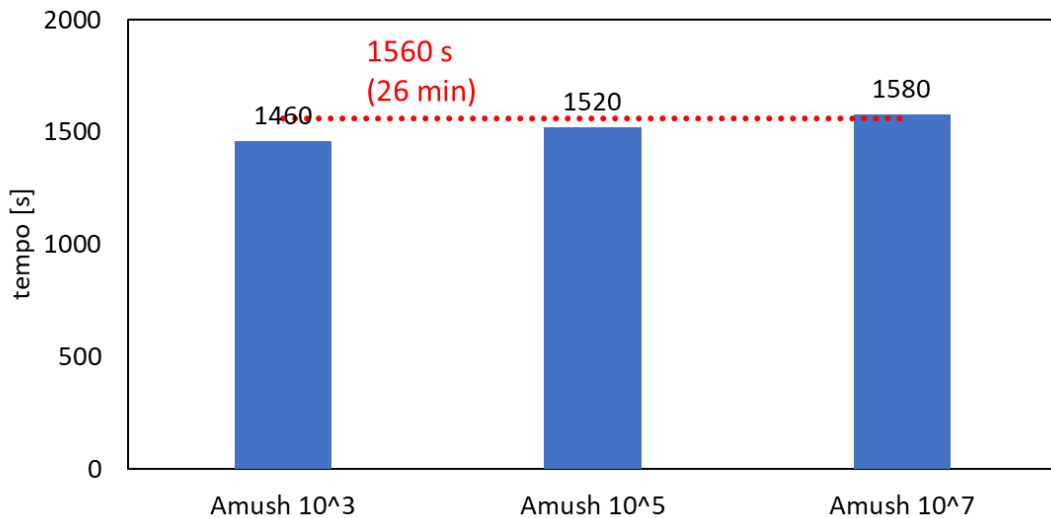


Figura 3.34: 40 mm, tempi di fusione nelle varie simulazioni analizzate.

Si presenta in Figura 3.34 un riassunto delle varie simulazioni svolte per il caso con dimensione del poro di base pari a 40 mm. Il grafico indica i tempi di fusione di ogni

simulazione risolta. I domini analizzati sono bidimensionali, ottenuti estraendo una sezione diagonale come descritto nel paragrafo 2.3. In seguito, si riportano i grafici relativi ai risultati ottenuti con *time step* 0.1 s e costante legata alla *mushy region* pari a 10^5 kg/m³s, valore di *default*.

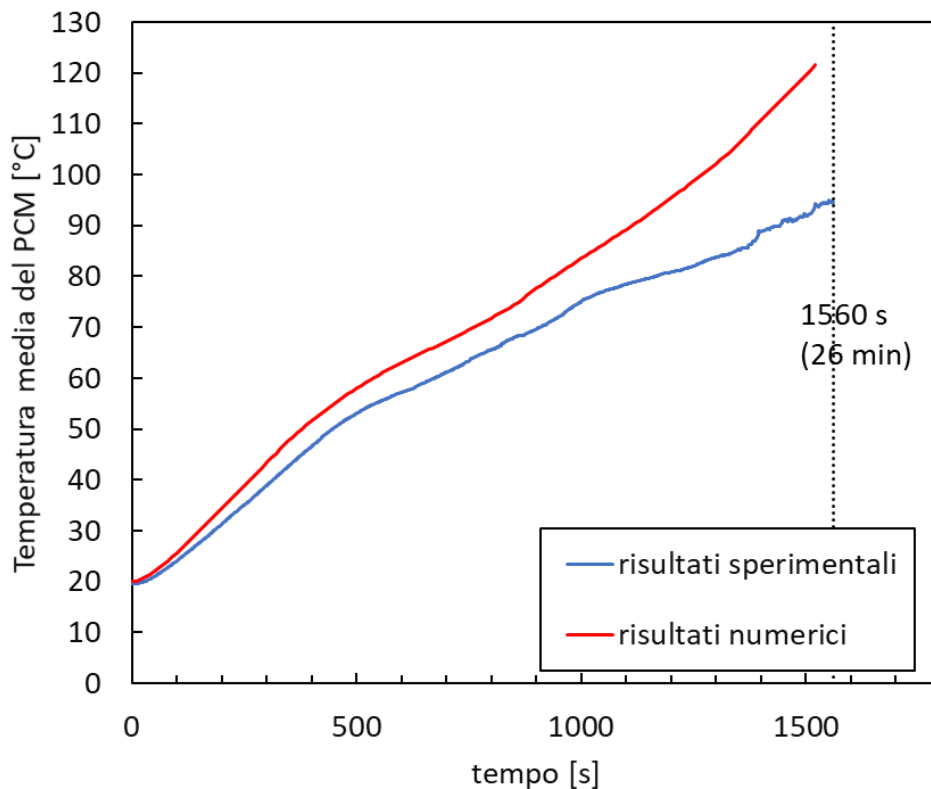


Figura 3.35: 40 mm, temperatura media del PCM (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m³s).

In Figura 3.35 si riporta il confronto tra l'andamento sperimentale e quello numerico della temperatura media del PCM. Confrontando questa curva con i grafici presentati in Figura 3.6, Figura 3.29 e Figura 3.32, si nota che l'andamento della temperatura media nel caso 40 mm è simile agli altri due casi aventi le strutture periodiche, tuttavia, compare un trend simile a quello riscontrato nel caso *reference*. Questo è dovuto alla dimensione della cella di base, all'aumentare della quale ci si avvicina al caso senza struttura porosa. Fin dall'inizio delle curve, si riscontra una sovrastima della temperatura media della paraffina. I grafici sperimentale e numerico divergono al passare del tempo. In Figura 3.36 si presenta la frazione liquida estratta dalla stessa simulazione. Si può osservare, grazie a

questi due grafici e anche tramite Figura 3.34, come il tempo necessario a portare a completa fusione la paraffina sia più vicino a quello sperimentale rispetto quanto non accada con i casi 10 mm e 20 mm.

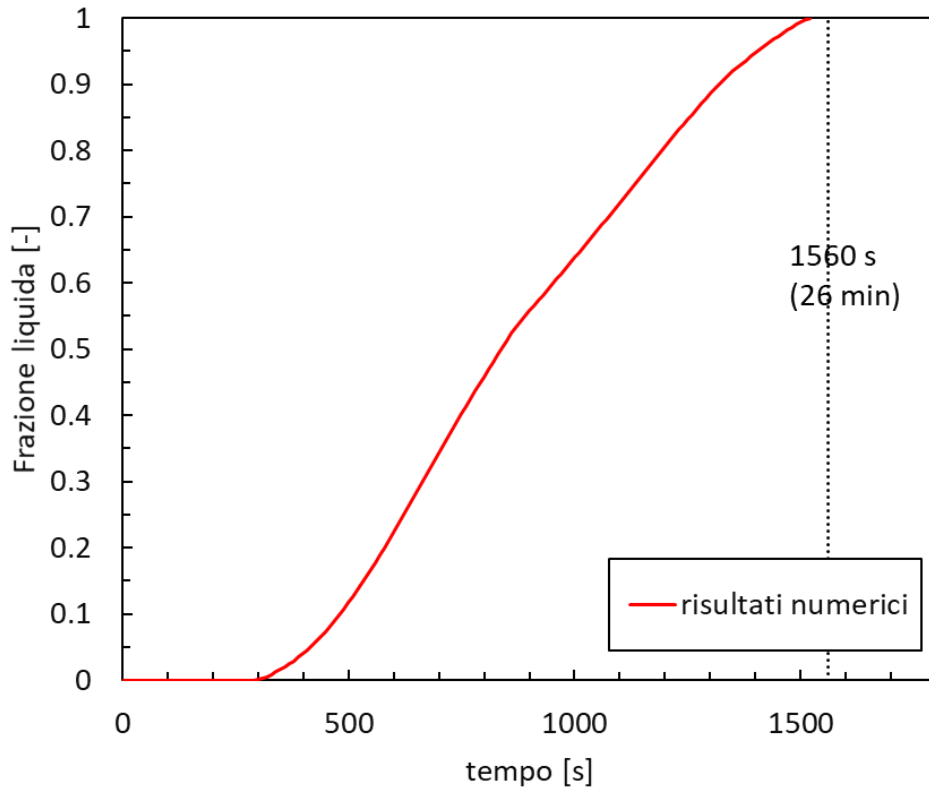


Figura 3.36: 40 mm, frazione liquida (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

Nel paragrafo 3.3, verranno riportate le altre simulazioni svolte su questa geometria, le quali hanno permesso di analizzare l'effetto di A_{mush} .

I grafici appena presentati esprimono i risultati ottenuti dalle analisi bidimensionali dei tre provini contenenti le strutture periodiche svolte sfruttando il modello messo appunto per il caso *reference*. Tuttavia, è chiaro come la presenza delle *mesh* metalliche influenzi i domini geometrici delle tre simulazioni svolte sui provini caratterizzati dalle strutture periodiche. Le già citate “isole” di paraffina che vengono a generarsi sezionando i provini al fine di ottenere una modellizzazione 2D, inibiscono la simulazione dei moti convettivi naturali che si dovrebbero instaurare nel PCM fuso con lo spostamento del

materiale da una cella all'altra. Questo porta ad uno scostamento, molto evidente al passare del tempo, dei dati numerici da quelli sperimentali.

Lo scostamento sopra descritto non è accettabile. Le semplificazioni utilizzate hanno portato a risultati inadeguati, nonostante i brevi tempi di calcolo delle simulazioni analizzate. Al fine di ottenere modelli semplificati che si avvicinino maggiormente ai dati sperimentali, si è cercato di indagare l'effetto di altri parametri che permettessero di mantenere un modello bidimensionale. La variabile considerata è stata la cosiddetta *mushy zone constant* o A_{mush} , già descritta in precedenza nel paragrafo 2.1. L'effetto di questo parametro numerico è legato alla modellizzazione della zona di interfaccia solido-liquido.

3.3 Studio della costante A_{mush}

Si è passati ad analizzare l'influenza della costante legata alla *mushy region*, A_{mush} (o *mushy zone constant*). Questo parametro rappresenta l'ampiezza dello smorzamento della velocità durante la solidificazione del materiale. Al crescere di A_{mush} , la transizione a zero della velocità è più rapida [30].

Shmueli et al. [28] hanno studiato diversi valori A_{mush} , che, come descritto sopra, ha effetti sulla cinetica di solidificazione nella *mushy region*. I valori analizzati dagli autori spaziano tra 10^5 kg/m³s (valore di default di *Ansys-Fluent*) e 10^8 kg/m³s, fino ad arrivare a 10^{10} kg/m³s. Il minor tempo di fusione è stato ottenuto in corrispondenza di $A_{mush}=10^5$ kg/m³s, mentre per $A_{mush} = 10^8$ kg/m³s gli autori hanno osservato una carica del PCM più lenta [28]. Aumentando ulteriormente questa costante fino a 10^{10} kg/m³s, è risultato un minor tempo di fusione rispetto $A_{mush}=10^8$ kg/m³s. Ciò indica l'esistenza di un valore di A_{mush} che porta a risultati più vicini a quelli sperimentali.

Nel presente studio si è analizzato l'effetto di A_{mush} per i tre casi caratterizzati dalle strutture porose, valutando diversi valori di questa costante, compresi tra 10^3 e 10^{10} kg/m³s.

3.3.1 10 mm

Nel caso con dimensione della cella di base di 10 mm l'effetto della costante A_{mush} è quasi impercettibile. Le curve numeriche realizzate tramite le simulazioni svolte con diversi valori di questa costante, risultano praticamente sovrapposte. Ciò si nota in Figura 3.37 e in Figura 3.38. Nella prima, si può osservare l'andamento della temperatura media del PCM, che si discosta, analogamente a quanto descritto nel paragrafo 3.2, dai dati sperimentali. I diversi valori testati per questa costante sono 10^3 , 10^5 , 10^7 , 10^8 e 10^{10} kg/m³s. Nella seconda figura, si riportano gli andamenti della frazione liquida, anch'essi molto vicini tra loro.

I due quadrati tratteggiati grigi rappresentano zone dei grafici che sono state successivamente ingrandite al fine di una più dettagliata analisi dell'effetto di A_{mush} . In seguito, vengono riportati questi ingrandimenti, nei quali si tenta di osservare l'influenza della *mushy zone constant* sul processo.

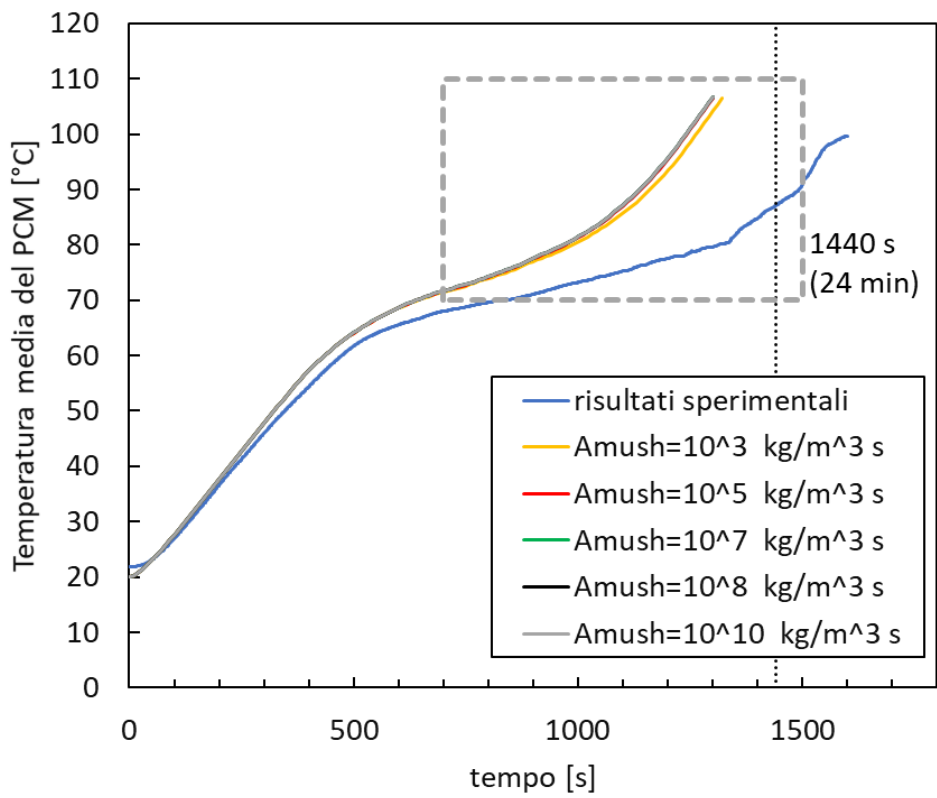


Figura 3.37: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.

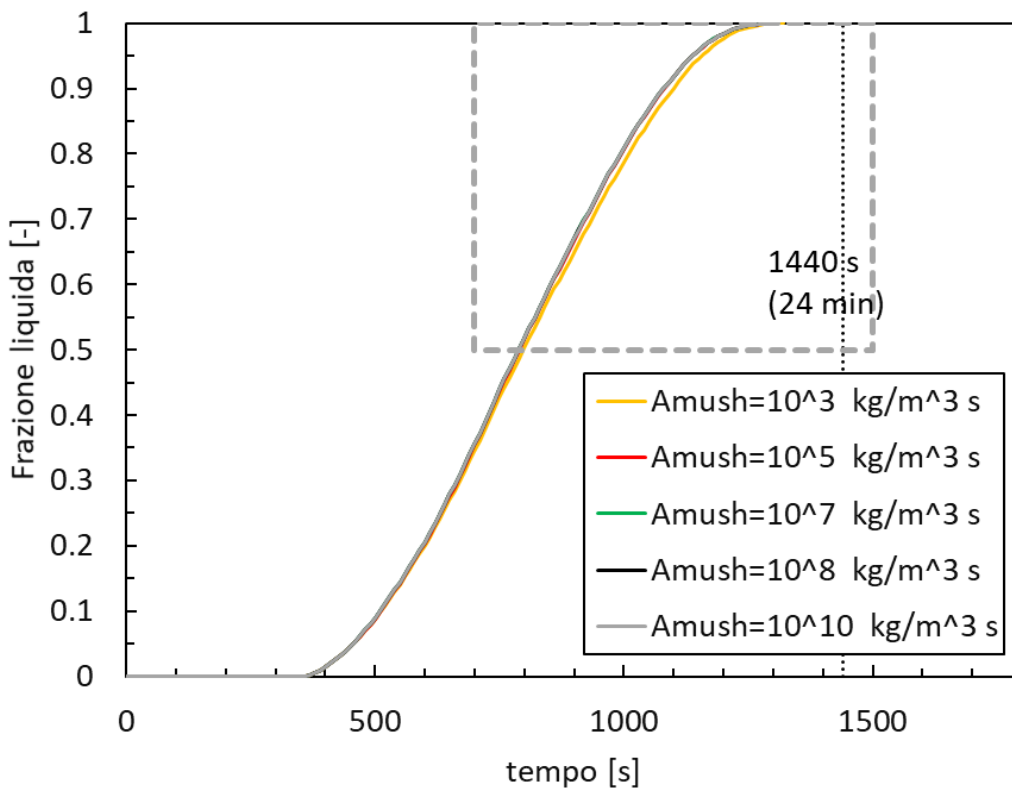


Figura 3.38: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.

Come sopra descritto, analizzando più nel dettaglio l'influenza di A_{mush} sui risultati, si presentano rispettivamente in Figura 3.39 e in Figura 3.40 gli ingrandimenti delle zone riquadrate con una linea tratteggiata grigia nei grafici di Figura 3.37 e Figura 3.38.

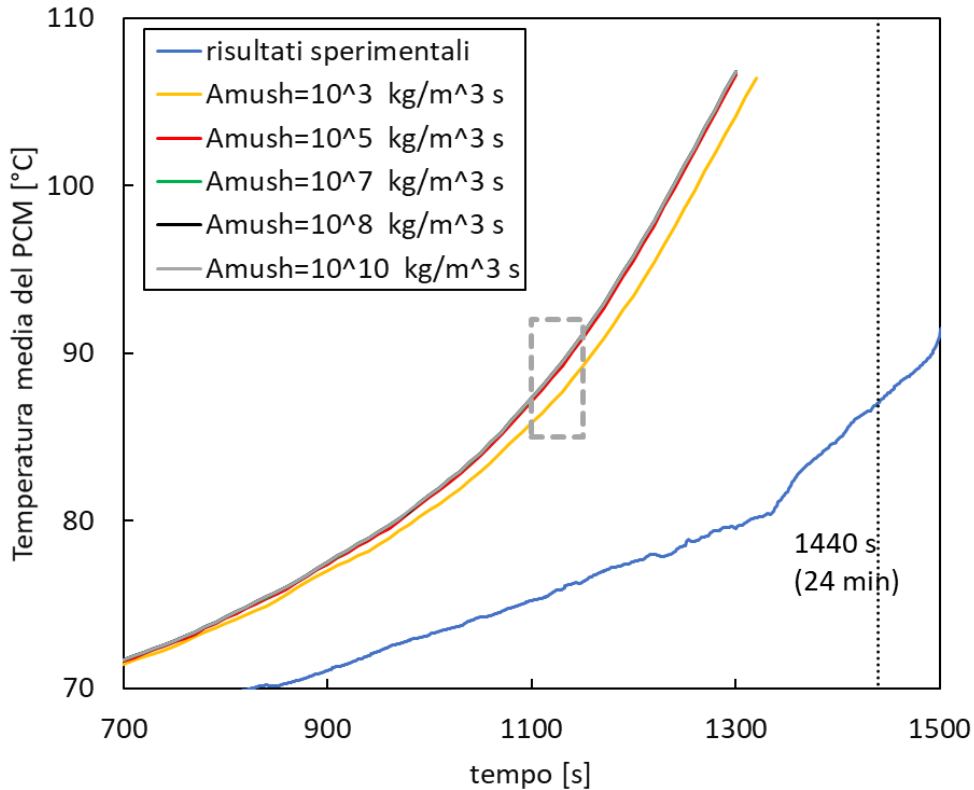


Figura 3.39: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.

Prendendo come riferimento il valore di default, cioè $A_{mush} = 10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$, si nota come, sia nel grafico ingrandito della temperatura media, sia in quello della frazione liquida, le simulazioni realizzate con $A_{mush} = 10^7, 10^8$ e $10^{10} \text{ kg/m}^3\text{s}$ comportino un processo di fusione della paraffina più rapido: le curve corrispondenti sono leggermente spostate verso sinistra rispetto quella associata a $10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Ciò implica che a parità di tempo si riscontra una temperatura media (e una frazione liquida) maggiore. Passando da 10^5 a $10^3 \text{ kg/m}^3\text{s}$ si nota un rallentamento del processo di fusione più marcato rispetto la differenza esistente tra le curve relative a $10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$ contro $10^7, 10^8, 10^{10} \text{ kg/m}^3\text{s}$. Quindi a parità di tempo, risulta una temperatura media (e una frazione liquida) inferiore per il valore $A_{mush}=10^3 \text{ kg/m}^3\text{s}$. In ogni caso, anche il grafico ricavato con questo valore di *mushy zone constant* rimane molto vicino ai precedenti.

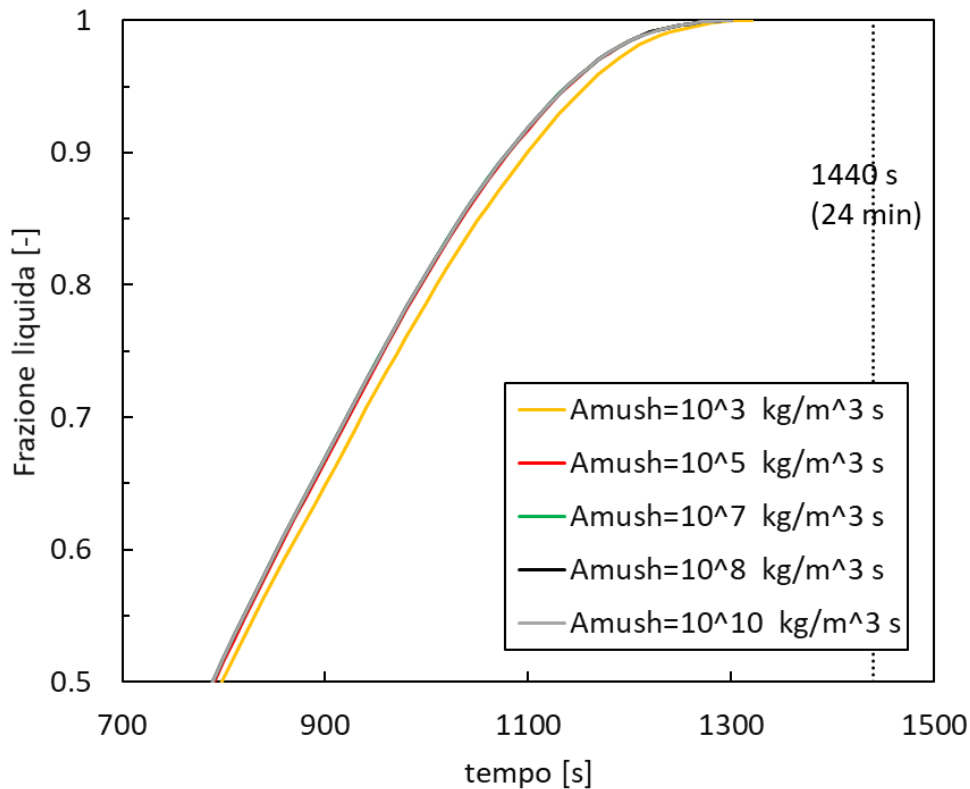


Figura 3.40: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.

In Figura 3.39 si osserva un'altra zona riquadrata da linea tratteggiata grigia. L'ingrandimento di questa parte di grafico è mostrato in Figura 3.41, dove è possibile osservare ancor più nel dettaglio gli andamenti descritti in precedenza. Inoltre, si può notare come non vi sia alcuna differenza tra i valori di $A_{mush} = 10^7, 10^8$ e 10^{10} kg/m³s, i quali danno risultati sovrapposti tra loro.

Si può quindi concludere che, per il caso 10 mm e fino ad un certo valore di A_{mush} , all'aumentare di questo parametro, il processo accelera, portando a minori tempi di fusione. Ciò, tuttavia, è in contrasto con quanto affermato da Shmueli et al. [28], per i quali l'aumento della *mushy zone constant* porta ad un rallentamento del processo fino ad un A_{mush} massimo, oltre il quale si presenta un'inversione di tendenza.

La causa della scarsa influenza della costante legata alla *mushy region* sui risultati può attribuirsi alla geometria analizzata. Come descritto nel paragrafo 2.3, non è stato semplice individuare una sezione rappresentativa della geometria tridimensionale. Il dominio bidimensionale individuato presenta delle zone isolate di PCM, le quali inibiscono i moti di convezione naturale che si instaurano al momento della fusione della paraffina.

Si ipotizza quindi che il confinamento della paraffina fra la struttura metallica sia il motivo per cui A_{mush} non ha grande influenza nelle simulazioni della struttura con cella di base da 10 mm.

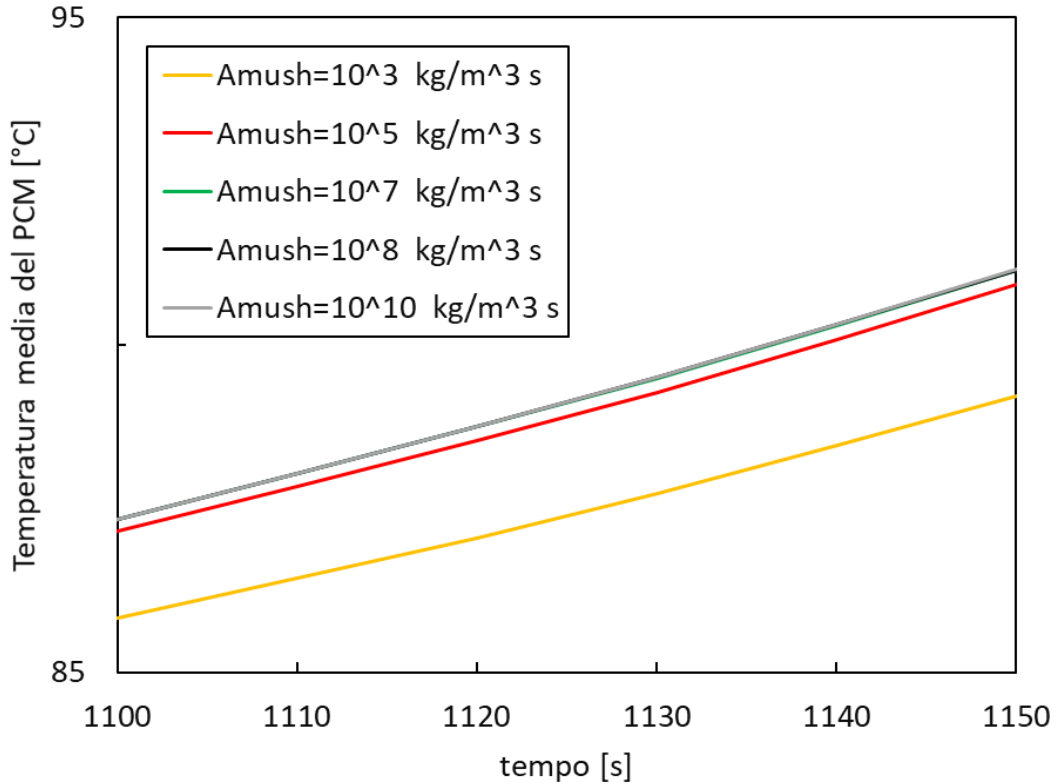


Figura 3.41: 10 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ulteriore ingrandimento.

Una volta analizzata l'influenza di A_{mush} per il caso con dimensione della cella di base di 10 mm, si è passati a valutare le due restanti geometrie presentanti al loro interno le strutture porose. Ciò al fine di osservare se i risultati ottenuti in precedenza siano estendibili a dei casi con una diversa dimensione del poro di base.

3.3.2 20 mm

È possibile osservare (Figura 3.31) che, rispetto al caso 10 mm, risultano tempi di fusione leggermente diversi al variare di A_{mush} . Nel caso precedente (Figura 3.28), in tutte le simulazioni 2D risulta un tempo per portare alla completa fusione la paraffina praticamente costante. Questo potrebbe far pensare, in questo caso, ad una maggiore influenza di A_{mush} sui risultati. Tuttavia, anche nel caso caratterizzato da una dimensione del poro

di base di 20 mm, l'influenza di A_{mush} è ridotta. Le curve numeriche realizzate tramite le simulazioni svolte con diversi valori di questa costante risultano praticamente sovrapposte. Ciò si può osservare in Figura 3.42 e Figura 3.43, le quali riportano, tramite il grafico della temperatura media del PCM e la curva della frazione liquida, gli esiti delle simulazioni svolte.

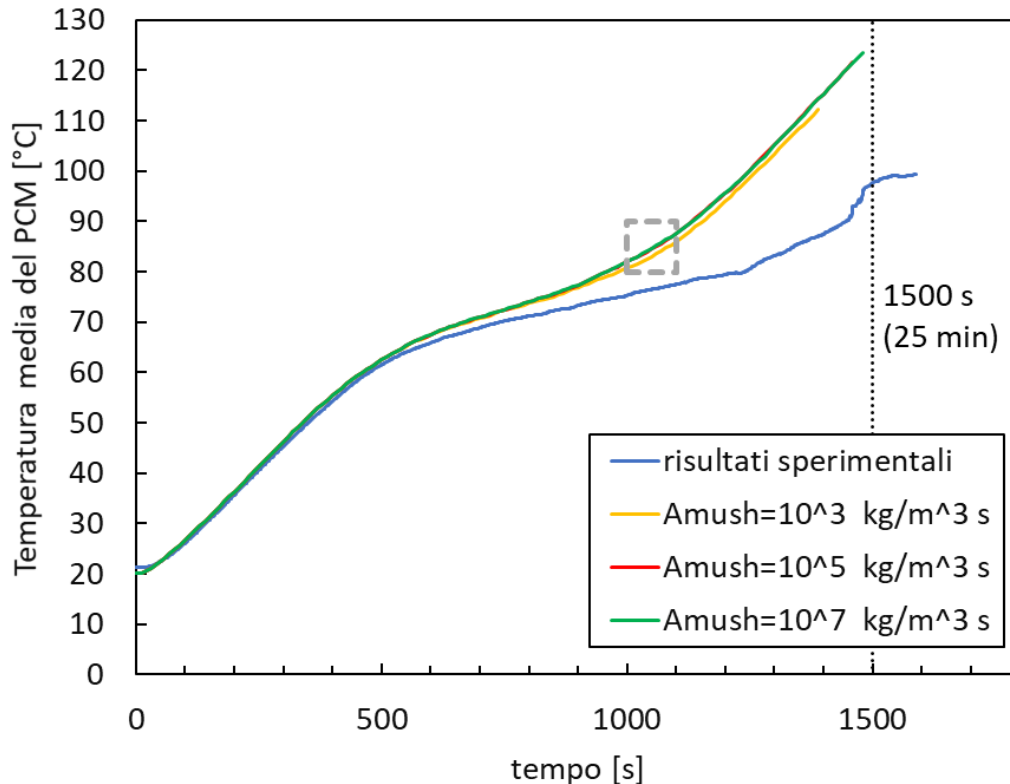


Figura 3.42: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.

In questi due grafici le zone riquadrate da una linea tratteggiata grigia verranno successivamente ingrandite al fine di una più dettagliata analisi di A_{mush} .

I valori di della *mushy zone constant* analizzati per il caso 20 mm (e anche per il caso seguente, 40 mm) sono 10^3 , 10^5 e 10^7 $\text{kg/m}^3\text{s}$. Si è deciso di non testare i valori $A_{mush}=10^8$ e 10^{10} $\text{kg/m}^3\text{s}$ in quanto in Figura 3.44, ingrandimento di Figura 3.42, si nota come l'effetto che A_{mush} ha sul caso 20 mm sia molto simile a quello relativo alla geometria con dimensione della cella di base pari a 10 mm. In quel caso i valori 10^8 e 10^{10} $\text{kg/m}^3\text{s}$ per la *mushy zone constant* davano risultati pressoché identici a 10^7 $\text{kg/m}^3\text{s}$.

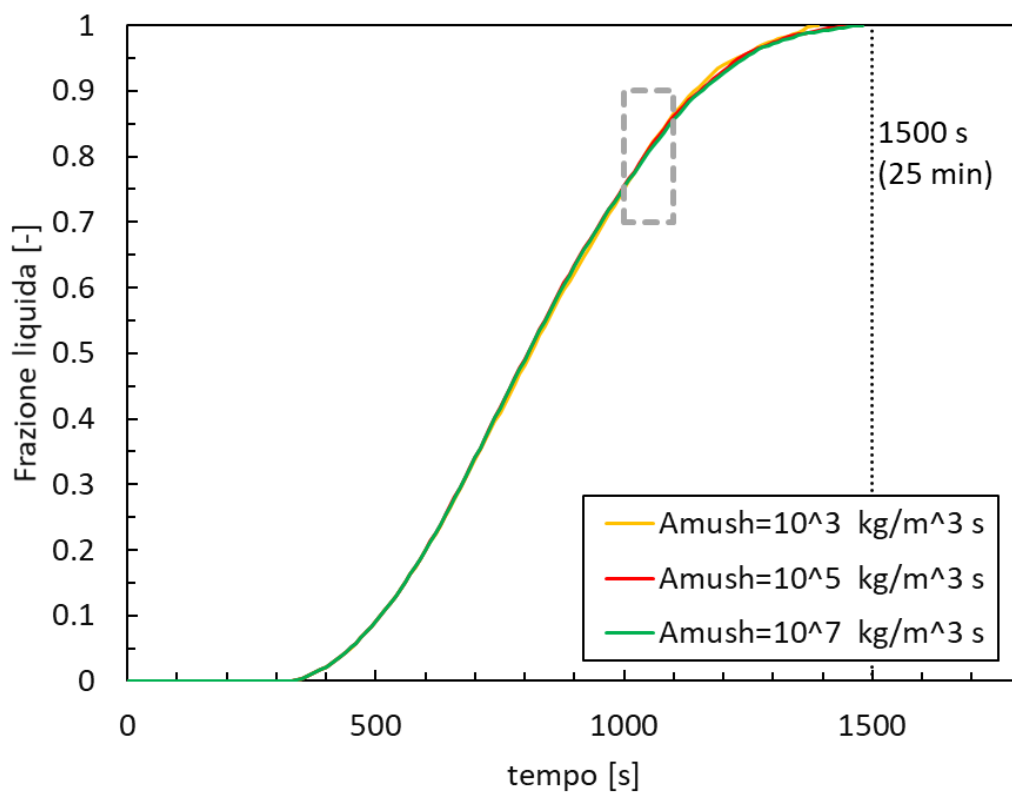


Figura 3.43: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.

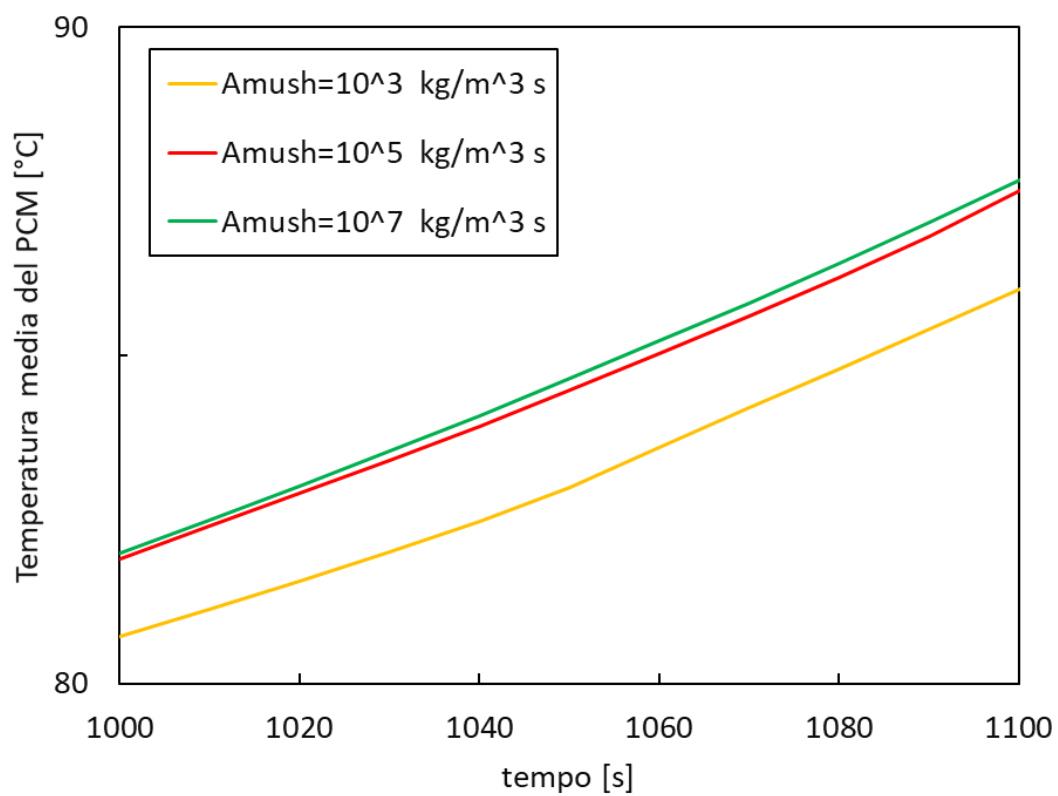


Figura 3.44: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.

In Figura 3.45, ingrandimento di Figura 3.43, è possibile osservare un'inversione di tendenza rispetto quanto descritto in precedenza per il caso 10 mm e per la temperatura media della stessa geometria con dimensione del poro di base di 20 mm. Infatti, il valore A_{mush} pari a $10^3 \text{ kg/m}^3\text{s}$ porta ad un minore tempo di fusione: la curva gialla relativa a questo valore di *mushy zone constant* partendo dal basso incrocia le altre due, le quali sono disposte al contrario rispetto quanto descritto per la frazione liquida del caso 10 mm e a quanto ci si aspetterebbe dopo aver visionato il grafico della temperatura media del caso 20 mm. Si rimanda al caso successivo (paragrafo 3.3.3) per la descrizione della motivazione alla base di questo fenomeno.

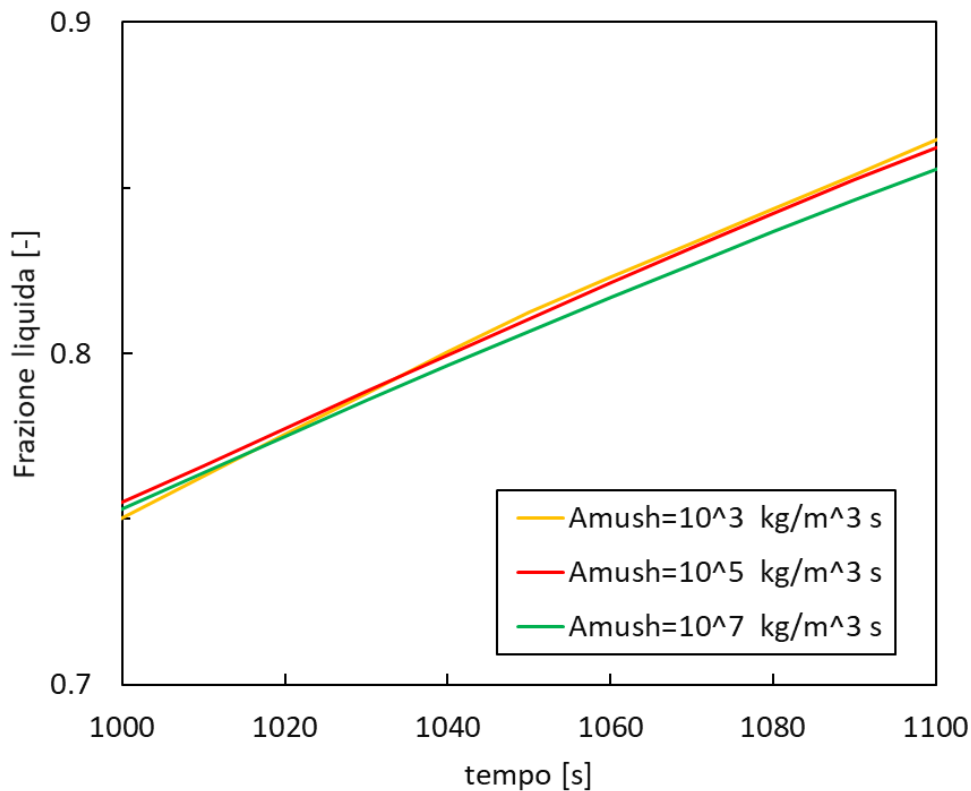


Figura 3.45: 20 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.

3.3.3 40 mm

In Figura 3.46 e Figura 3.47 si riportano graficamente gli effetti della variazione di A_{mush} per il caso con dimensione del poro di base di 40 mm. L'influenza di questo parametro è sempre piuttosto ridotta, ma comunque più marcata rispetto i due casi precedenti, caratterizzati da una dimensione del poro di base di 10 mm e 20 mm.

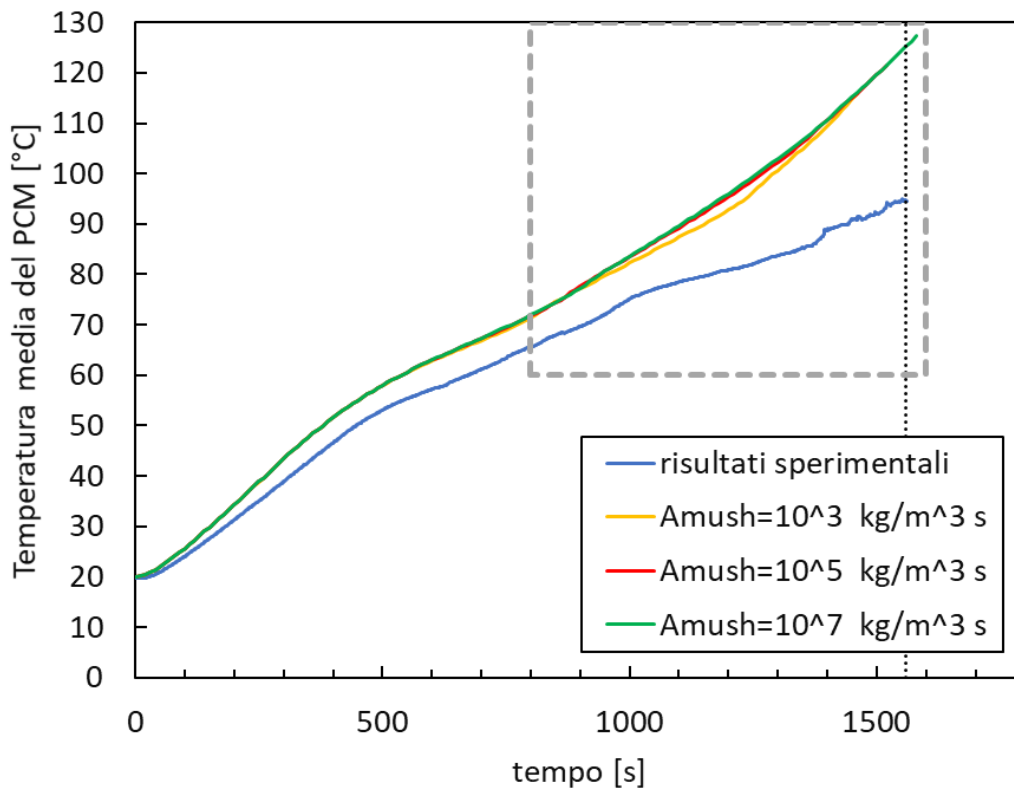


Figura 3.46: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM.

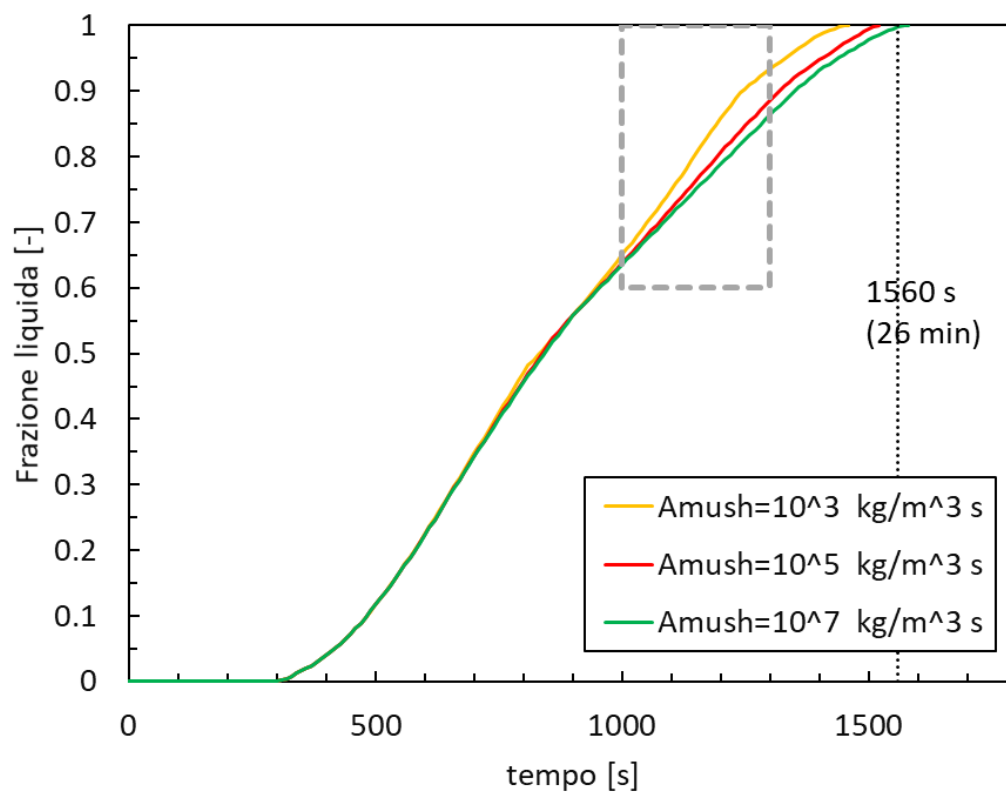


Figura 3.47: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida.

Ingrandendo le due zone riquadrate da una linea tratteggiata grigia in Figura 3.46 e in Figura 3.47, si ottengono Figura 3.48 e Figura 3.49.

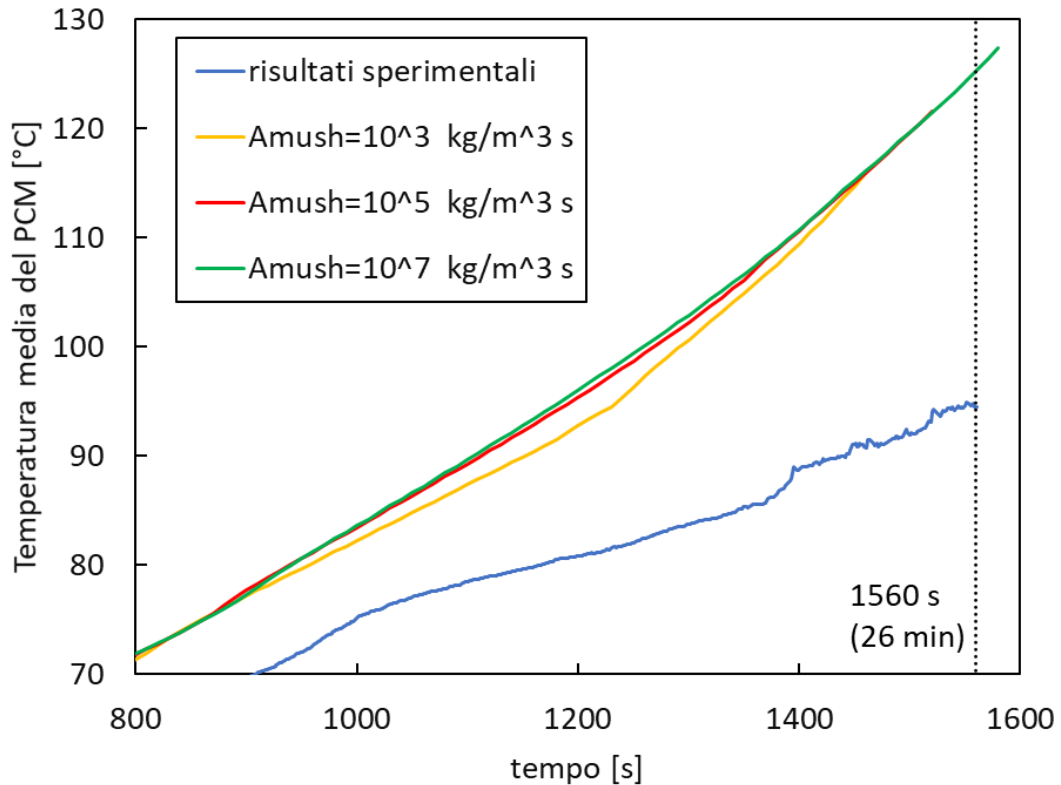


Figura 3.48: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla temperatura media del PCM, ingrandimento.

La prima mostra nel dettaglio l'andamento della temperatura media calcolata all'interno del PCM. Si nota la stessa tendenza già riportata per i casi 10 mm e 20 mm: all'aumentare del valore assunto dalla *mushy zone constant* la curva della temperatura sta leggermente sopra le altre, ad indicare un processo di fusione più rapido (nonostante in Figura 3.34 si osservi come il tempo necessario alla fusione completa della paraffina aumenti al crescere di A_{mush}).

Analogamente a quanto evidenziato per il caso 20 mm, si nota, con riferimento all'ingrandimento del grafico della frazione liquida, Figura 3.49, una tendenza opposta a quella osservata per la temperatura media. Sembrerebbe che, al contrario di quanto affermato in precedenza, un processo di fusione più rapido avvenga in presenza di un valore di A_{mush} minore.

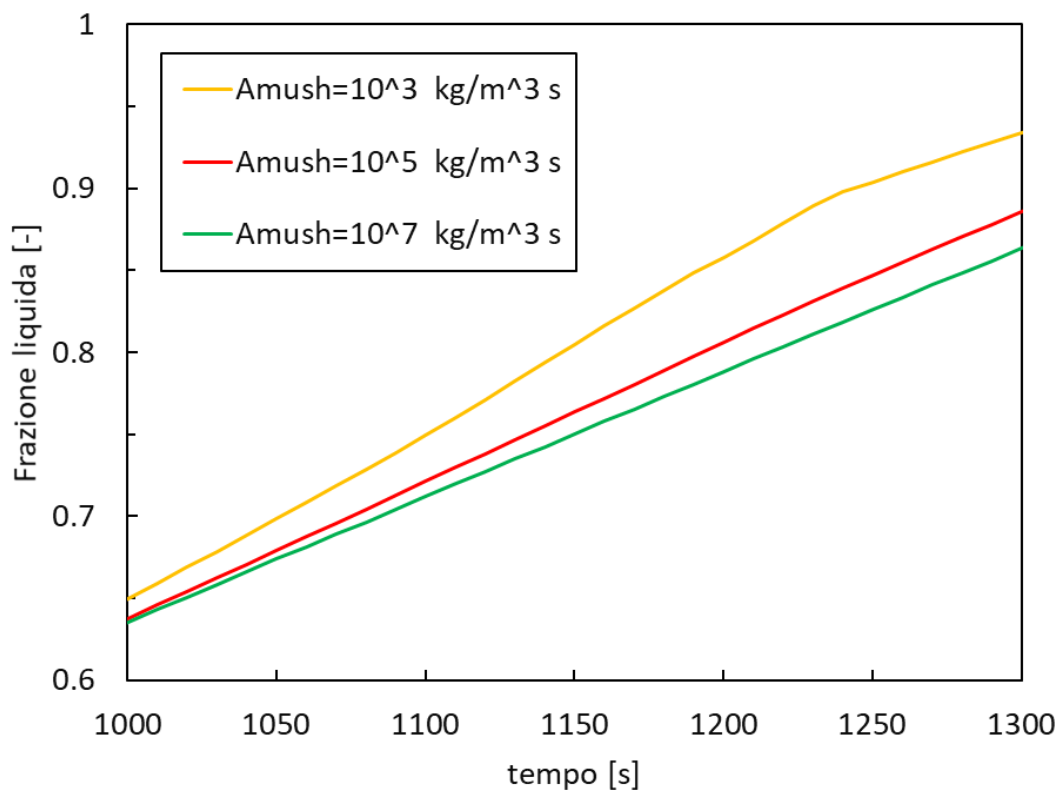


Figura 3.49: 40 mm, effetto di A_{mush} sulla frazione liquida, ingrandimento.

Questa strana influenza della *mushy zone constant* ha una spiegazione non banale per i casi 20 e 40 mm. Tutti i casi analizzati sono caratterizzati dalla presenza di un flusso termico imposto. Ciò implica come la temperatura raggiunta dal PCM sia conseguenza di quanto il sistema sia in grado di accumulare sotto forma di calore latente e sensibile la potenza termica che gli viene fornita. Il calore, quindi, porta, o alla fusione della paraffina, o, se questa è già in fase liquida, ad un aumento sensibile della temperatura. Per le strutture con una maggiore densità di pori, il calore viene disperso all'interno del PCM in modo uniforme, perciò va, fin da subito, a fondere la paraffina senza surriscaldare il materiale fuso. Di conseguenza, la temperatura media viene mantenuta più bassa durante il processo in quanto la quota parte di calore destinata a surriscaldare il PCM fuso è limitata. Per il caso 10 mm, si osserva un accordo tra i grafici della temperatura media e della frazione liquida: all'aumentare di A_{mush} , il processo di fusione accelera. Invece, il disaccordo tra questi due grafici osservato per i casi 20 e 40 mm si spiega grazie al fatto che, il calore fornito al sistema, non viene disperso uniformemente come nel caso 10 mm. Ciò

implica che la parte di PCM che fonde prima viene anche surriscaldata in modo non trascurabile, in quanto il calore fatica ad attraversare questa zona a causa della bassa conducibilità termica della paraffina. Questo fa aumentare la temperatura media calcolata nel PCM, a discapito però di una frazione liquida minore: la parte di paraffina fusa infatti è più piccola. Ad un aumento di A_{mush} , corrisponde quindi un rallentamento del processo, il quale avviene tuttavia con una temperatura media maggiore. La presenza delle strutture periodiche porta ad avere quindi una diversa influenza di A_{mush} sui risultati. Il processo di fusione accelera all'aumentare di A_{mush} per strutture con una maggiore densità di pori, mentre rallenta per strutture con dimensioni del poro di base maggiori. Inoltre, è importante osservare che l'influenza della costante A_{mush} sia sempre più marcata per dimensioni del poro di base maggiori.

Riassumendo i tre casi analizzati, è possibile affermare come la presenza delle strutture periodiche porose limiti l'influenza della *mushy zone constant* sui risultati delle simulazioni. Infatti, l'effetto di A_{mush} , studiato da Shmueli et al. [28] per la fusione di un PCM in un tubo verticale cilindrico, è risultato essere significativo. Nel loro studio, si sono potute osservare simulazioni che hanno portato alla completa fusione del PCM oltre 20 minuti prima rispetto ad altre, svolte con un diverso valore della *mushy zone constant*.

All'aumentare della densità dei pori, cioè al diminuire della dimensione della cella di base, si riscontra una minor effetto di questa costante sui risultati. Sarebbe utile in futuro eseguire un'analisi di sensitività di questo parametro anche sul caso *reference*, in modo da comprendere a pieno l'influenza che esso comporta.

Per il caso 10 mm, risulta un rallentamento del processo di fusione al diminuire del valore di A_{mush} . Questo emerge sia dal grafico della temperatura media del PCM, sia da quello della frazione liquida ed è in contrasto con quanto riscontrato da Shmueli et al. [28]. I tempi numerici di fusione completa della paraffina, Figura 3.28, sono quasi tutti costanti, tranne che per il caso con $A_{mush} = 10^3 \text{ kg/m}^3\text{s}$. In accordo alle osservazioni fatte in precedenza sui risultati, questo valore di A_{mush} porta ad un tempo di fusione leggermente maggiore.

Per i due casi successivi, 20 mm e 40 mm, emerge lo stesso andamento che si riscontra nella geometria 10 mm se si osserva la temperatura media del PCM, mentre dalla frazione liquida sembrerebbe che al diminuire della *mushy zone constant*, il processo

di fusione acceleri. I tempi di fusione completa della paraffina calano al diminuire di A_{mush} , Figura 3.31 e Figura 3.34. Questi sono quindi in accordo con l'andamento della frazione liquida. La spiegazione risiede nella presenza delle strutture porose: una maggior densità di pori comporta una più uniforme dispersione del calore all'interno del PCM. Di conseguenza, nelle geometrie con una grande dimensione dei pori, il calore fornito non viene trasmesso in modo uniforme, andando quindi, non solo a fondere, ma anche a surriscaldare fin dal principio la paraffina fusa. Ciò aumenta il valore della temperatura media. Per valutare correttamente l'influenza di A_{mush} , è quindi necessario considerare il grafico della frazione liquida.

Ricapitolando:

- 10 mm: l'aumento di A_{mush} comporta un processo di fusione più rapido;
- 20 mm e 40 mm: l'aumento di A_{mush} comporta un processo di fusione più lento.

È importante notare che le osservazioni appena riportate sono state ricavate grazie agli ingrandimenti dei grafici precedenti. Osservando le curve nel loro complesso risulta che l'influenza della *mushy zone constant* sia praticamente inesistente.

3.4 3D: slab e geometria completa

Per concludere lo studio, si sono svolte delle analisi tridimensionali. Questo sono state realizzate solamente per il provino con la struttura periodica caratterizzata dalla dimensione del poro di base di 10 mm. La presente geometria è stata scelta per lo svolgimento di queste ulteriori simulazioni in quanto nello studio originale di Righetti et al. [1], il provino con dimensione del poro di base 10 mm ha mostrato migliori prestazioni in termini di tempi di carica e scarica del PCM.

Si riportano in Figura 3.50 e Figura 3.51 rispettivamente la temperatura media del PCM e la frazione liquida confrontando fra loro dati sperimentali, le simulazioni bidimensionali e quelle tridimensionali. I risultati 2D riportati nei grafici sono quelli analizzati nei paragrafi precedenti con *mushy zone constant* pari al valore di default di 10^5 kg/m³s. Tutte le analisi 3D sono state realizzate con questo valore di A_{mush} .

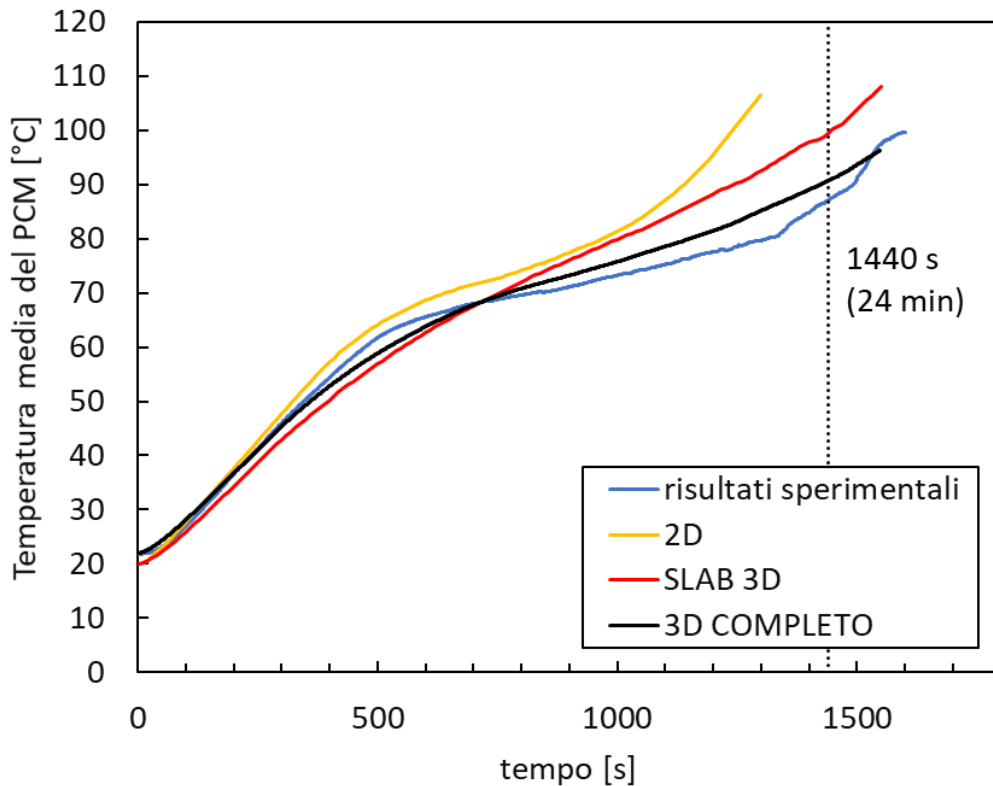


Figura 3.50: 10 mm, temperatura media del PCM confrontata con le analisi 3D (risultati numerici con $A_{mush}=10^5$ kg/m³s).

In Figura 3.50, il primo tratto della curva relativa alla temperatura media della paraffina è ben rappresentato da tutti e tre i modelli considerati in questi grafici. Oltre i 500 secondi, si osservano diverse tendenze dei tre modelli numerici. Il caso 2D tende ad accelerare il processo di fusione: la curva gialla nel grafico inizia a crescere sempre più rapidamente, allontanandosi dalla curva sperimentale. I due casi tridimensionali, invece, portano ad un andamento della temperatura media più vicino ai dati sperimentali. Il modello 3D completo ricalca bene la curva sperimentale, presentando solamente una concavità ed una convessità meno accentuate rispetto la curva azzurra, quella reale. Il modello dello *slab*, a livello di risultati si pone nel mezzo, tra la simulazione 2D già discussa e la 3D completa. Si osserva come la curva rossa riferita ai risultati ottenuti da questo modello, porti quasi ad eliminare la concavità e la convessità citate in precedenza. L'andamento di questa curva è quasi lineare.

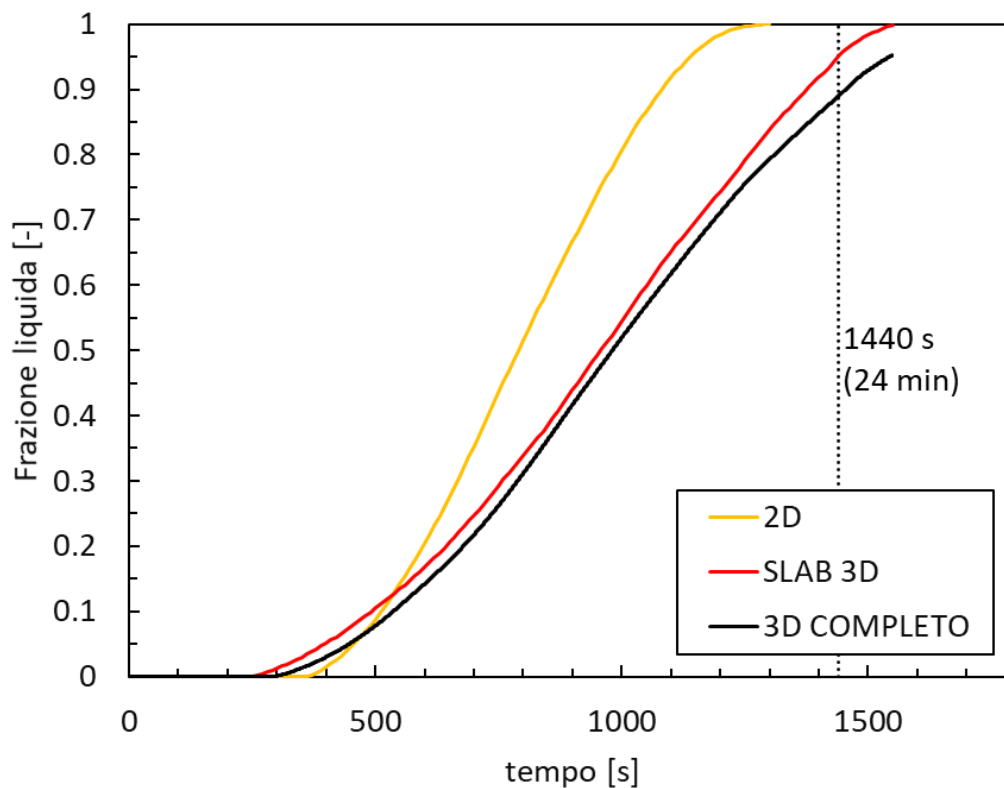


Figura 3.51: 10 mm, frazione liquida confrontata con le analisi 3D (risultati numerici con $A_{mush}=10^5 \text{ kg/m}^3\text{s}$).

In Figura 3.51, invece, si confrontano gli andamenti delle frazioni di liquido calcolate nelle tre simulazioni presentate in questo paragrafo. La modellizzazione bidimensionale comporta un processo di fusione numerico molto rapido, sottostimando pesantemente il tempo necessario a sciogliere completamente la paraffina. In questa simulazione, la carica del PCM inizia dopo e termina prima, come si nota osservando la curva gialla. I due modelli tridimensionali, al contrario, sovrastimano il tempo necessario per arrivare alla completa fusione del PCM, come si riporta anche in Figura 3.28. L'analisi della geometria 3D completa sembra allungare maggiormente il tempo di fusione. La simulazione è stata fermata al 95% di frazione liquida. Il modello dello *slab* 3D, come in precedenza porta a risultati intermedi agli altri due. In questo caso, tuttavia, la fusione della paraffina inizia prima rispetto ai restanti due modelli considerati e nel momento in cui il 3D completo raggiunge la frazione liquida del 95%, lo *slab* arriva al 100%. In Figura 3.28, come tempo di fusione nel caso 3D completo è stato indicato pari a 1550 s in assenza di un altro dato, ma in realtà questo valore sarebbe leggermente più elevato.

Le geometrie contenenti le strutture periodiche si prestano maggiormente a simulazioni tridimensionali a causa della loro forma. Le sezioni ricavate al fine di realizzare dei modelli bidimensionali portano a risultati leggermente falsati. Questo è dovuto alla compartimentazione del PCM da parte della struttura metallica che si viene a generare nella semplificazione geometrica. Le zone isolate di paraffina che si ottengono, inibiscono i moti convettivi naturali che normalmente si instaurano fra i pori nel momento in cui il PCM diventa liquido. Questi moti convettivi alimentano la convezione naturale, che rappresenta il principale meccanismo di scambio termico all'interno del PCM negli ultimi istanti del processo di fusione, il quale è inizialmente dominato dalla conduzione. È chiaro quindi che la mancanza di un'adeguata rappresentazione di questa parte di fenomeno porti a risultati numerici non realistici se confrontati con i valori sperimentali.

La presente analisi, realizzata confrontando modelli 2D e 3D sul provino contenente la struttura porosa con dimensione della cella di base di 10 mm, è dimostrazione di quanto appena affermato.

Volendo evitare di svolgere simulazioni troppo complesse a livello computazionale, ma non potendo prescindere dallo svolgimento di analisi tridimensionali, comporta lo studio di modelli 3D semplificati.

In futuro sarebbe utile esplorare la modellizzazione di diverse parti di dominio estratte dai provini considerati [1] al fine di trovare una configurazione geometrica che porti a risultati numerici il più vicini possibile ai dati sperimentali. In quest'ottica la simulazione dello *slab* ha portato a buoni risultati, che, tuttavia, semplificano solamente il caso con dimensione della cella di base 10 mm. Se si andasse ad estrarre uno *slab*, analogamente a quanto fatto in questa sede, dai restanti due provini, si otterrebbe comunque un dominio troppo grande. Infatti, aumentando la dimensione del poro di base, si ingrandirebbe la cella minima da considerare. Di conseguenza, il dominio da analizzare sarebbe poco più piccolo rispetto la geometria completa. È necessario testare quindi modelli che sfruttano altre simmetrie, per esempio metà o un quarto di provino.

4 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi si sono studiate numericamente le fasi di carica di un PCM (paraffina RT70) contenuto in quattro provini di alluminio realizzati tramite *additive manufacturing*. Righetti et al. [1] hanno svolto delle prove sperimentali che sono state utilizzate in questa sede per la validazione del modello numerico realizzato. Tre dei quattro provini studiati sono caratterizzati dalla presenza di strutture periodiche tridimensionali con diversa dimensione del poro di base ma costante porosità.

Data la complessità delle simulazioni di fusione e solidificazione, è stata generato inizialmente un modello 2D dei quattro provini. È importante sottolineare che gli sforzi rivolti in questa direzione sono di fondamentale importanza al fine di evitare, se possibile, di svolgere complesse analisi 3D che, sicuramente, permettono un'accurata rappresentazione del fenomeno, ma comportano anche un ingente sforzo computazionale. Il raggiungimento di soddisfacenti modelli 2D del LTES rappresenterebbe un eccellente risultato poiché consentirebbe di estendere l'analisi a strutture periodiche di forma e caratteristiche geometriche diverse.

Si è partiti dall'analisi del caso di riferimento, il quale non presenta alcuna struttura periodica al suo interno. Per questa configurazione si è andati alla ricerca di un numero di elementi della *mesh* e un *time step* ottimali, considerando il *trade-off* tra accuratezza dei risultati e costo computazionale.

Tra i *time step* analizzati, 0.5, 0.3 e 0.1 s, solo l'ultimo ha portato a convergenza le analisi svolte con tutte le *mesh* considerate. Si è scelto 0.1 s come *time step*, osservando che un valore intermedio tra 0.1 e 0.3, come per esempio 0.2, sarebbe da testare in quanto potrebbe portare a minori tempi di calcolo a parità di risultati. È stata riscontrata una più marcata differenza tra i grafici relativi alle *mesh* 1 e 2 rispetto a quella tra le discretizzazioni 2 e 3. La *mesh* ottimale è quindi la seconda.

Una volta validato il modello ottenuto per il caso di riferimento, si è condotto lo stesso studio sulle restanti tre geometrie. Il caso con dimensione del poro di base di 10 mm, che nello studio originale [1] ha dato i migliori risultati, è stato il primo ad essere considerato. Successivamente, si sono simulate le restanti due geometrie (20 e 40 mm).

Per questi tre modelli si è riscontrata la difficoltà di identificare una sezione adeguatamente rappresentativa del fenomeno fisico a causa della complessità geometrica delle strutture. Dopo alcuni tentativi si sono scelte delle geometrie ricavate sezionando diagonalmente la vista in pianta dei provini. In questo procedimento, si sono generate delle zone isolate di PCM tra le aste della struttura periodica.

L'analisi del caso 10 mm ha dato risultati che sottostimano significativamente il tempo di fusione, modellando un processo di carica del PCM molto più rapido rispetto quello reale. Gli altri due provini hanno analogamente portato a tempi di fusione minori rispetto quelli ricavati in laboratorio. La discrepanza tra i dati numerici e quelli sperimentali sembra ridursi all'aumentare della dimensione della cella di base. Infatti, con riferimento alle Figura 3.29, Figura 3.32 e Figura 3.35, si può affermare che all'aumentare della densità dei pori, le "isole" di PCM nelle sezioni 2D, siano sempre più piccole e ciò influenzi negativamente la rappresentazione numerica del reale fenomeno fisico. Questo è dovuto ai moti convettivi naturali che si dovrebbero instaurare tra le celle al momento della fusione della paraffina, ma che queste "isole" impediscono.

Si è poi passati all'analisi di un parametro fondamentale alla modellizzazione della solidificazione e fusione in *Ansys-Fluent*: la *mushy zone constant*, A_{mush} . Questa costante influenza la cinetica di solidificazione/fusione ed è legata alla zona di interfaccia solido-liquido. In generale, non si riscontra una significativa influenza a questo parametro a causa della presenza delle strutture periodiche.

Si sono testati diversi valori di A_{mush} partendo dal caso 10 mm. Andando ad osservare le lievi differenze tra i vari grafici realizzati, il processo di fusione rallenta al diminuire di A_{mush} . Per le geometrie con 20 e 40 mm, invece, l'andamento è opposto, nonostante però, la temperatura media del PCM cresca al ridursi di A_{mush} . Ciò si spiega tramite una meno uniforme distribuzione del calore in queste ultime due geometrie: la potenza termica fornita va a surriscaldare la paraffina liquida invece di sciogliere le zone ancora solide.

Si è infine passati alla realizzazione di due modelli tridimensionali del caso con dimensione della cella di base di 10 mm: uno semplificato (*slab* 3D) e uno integrale (3D completo). Le analisi tridimensionali sono state realizzate solamente sul provino più performante. Lo *slab* ha dato risultati più vicini a quelli sperimentali rispetto alle analisi 2D.

Ci si è avvicinati ulteriormente ai dati sperimentali tramite il modello 3D completo, come si nota in Figura 3.50.

L'obiettivo iniziale di ottenere un buon modello 2D non è quindi stato raggiunto ma il percorso intrapreso ha permesso di evidenziare i limiti e le possibilità della modellazione 2D. Come ci si poteva aspettare, i modelli 3D hanno portato ad ottimi risultati a discapito di tempi di calcolo elevati.

In futuro, sarebbe interessante svolgere diverse simulazioni 3D semplificate. Sarebbe interessante, per esempio, valutare metà e/o un quarto di geometria. Ciò potrebbe permettere di estendere l'analisi di strutture con diverse forme e permettere un migliore studio preliminare nella fase di progettazione di LTESs basati su PCMs.

Inoltre, per completare la riproduzione numerica dello studio originale [1] sarebbe interessante simulare il comportamento del sistema anche ai flussi termici di 10 e 20 W.

Infine, si potrebbero considerare anche le perdite di calore in funzione della temperatura media del sistema. Per modellare questo aspetto, sarebbe necessario assegnare una condizione al contorno variabile nel tempo tramite le UDFs (*User Defined Functions*) di *Ansys-Fluent*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Righetti, L. Doretto, C. Zilio, G. A. Longo e S. Mancin, Experimental investigation of phase change of medium/high temperature paraffin wax embedded in 3D periodic structure, *International Journal of Thermofluids*, vol. 5, n. 100035, 2020.
- [2] P. K. Adom, W. Bekoe, F. Amuakwa-Mensah, J. T. Mensah e E. Botchway, Carbon dioxide emissions, economic growth, industrial structure, and technical efficiency: Empirical evidence from Ghana, Senegal, and Morocco on the causal dynamics, *Energy*, vol. 47, pp. 314-325, 2012.
- [3] L. Colla, D. Ercole, L. Fedele, S. Mancin, O. Manca e S. Bobbo, Nano-Phase Change Materials for Electronics Cooling Application, *Journal of Heat Transfer*, vol. 139, n. 052406, 2017.
- [4] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen e D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [5] A. Alhusseny, N. Al-Zurfi, A. Nasser, A. Al-Fatlawi e M. Aljanabi, Impact of using a PCM-metal foam composite on charging/discharging process of bundled-tube LHTES units, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 150, n. 119320, 2020.
- [6] D. Zhou, C. Zhao e Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593-605, 2012.
- [7] M. Rastogi, A. Chauhan, R. Vaish e A. Kishan, Selection and performance assessment of Phase Change Materials for heating, ventilation and air-conditioning applications, *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 260-269, 2015.

- [8] L. Jing, P. Gang e J. Jie, Optimization of low temperature solar thermal electric generation with Organic Rankine Cycle in different areas, *Applied Energy*, vol. 87, pp. 3355-3365, 2010.
- [9] H. Xu, A. Romagnoli, J. Y. Sze e X. Py, Application of material assessment methodology in latent heat thermal energy storage for waste heat recovery, *Applied Energy*, vol. 187, pp. 281-290, 2017.
- [10] J. Shon, H. Kim e K. Lee, Improved heat storage rate for an automobile coolant waste heat recovery system using phase-change material in a fin-tube heat exchanger, *Applied Energy*, vol. 113, pp. 680-689, 2014.
- [11] Q. Ren, P. Guo e J. Zhu, Thermal management of electronic devices using pin-fin based cascade microencapsulated PCM/expanded graphite composite, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 149, n. 119199, 2020.
- [12] A. Verma, S. Shashidhara e D. Rakshit, A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM), *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 11, pp. 74-83, 2019.
- [13] S. E. Shafiei e A. Alleyne, Model predictive control of hybrid thermal energy systems in transport refrigeration, *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, pp. 264-280, 2015.
- [14] S. Jegadheeswaran e S. D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2225-2244, 2009.
- [15] L. Fan e J. Khodadadi, Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 24-46, 2011.
- [16] J. Wang, H. Xie, Z. Guo, L. Guan e Y. Li, Improved thermal properties of paraffin wax by the addition of TiO₂ nanoparticles, *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, pp. 1541-1547, 2014.
- [17] S. Ebadi, S. H. Tasnim, A. A. Aliabadi e S. Mahmud, Melting of nano-PCM inside a cylindrical thermal energy storage system: Numerical study with experimental verification, *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 241-259, 2018.

- [18] R. P. Singh, S. Kaushik e D. Rakshit, Melting phenomenon in a finned thermal storage system with graphene nano-plates for medium temperature applications, *Energy Conversion and Management*, vol. 163, pp. 86-99, 2018.
- [19] A. Gil, G. Peiró, E. Oró e L. F. Cabeza, Experimental analysis of the effective thermal conductivity enhancement of PCM using finned tubes in high temperature bulk tanks, *Applied Thermal Engineering*, vol. 142, pp. 736-744, 2018.
- [20] M. Gürtürk e B. Kok, A new approach in the design of heat transfer fin for melting and solidification of PCM, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 153, n. 119671, 2020.
- [21] C. Zhao, M. Opolot, M. Liu, F. Bruno, S. Mancin e K. Hooman, Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 150, n. 119348, 2020.
- [22] J. Yang, L. Yang, C. Xu e X. Du, Numerical analysis on thermal behavior of solid-liquid phase change within copper foam with varying porosity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, pp. 1008-1018, 2015.
- [23] P. Zhang, F. Ma e X. Xiao, Thermal energy storage and retrieval characteristics of a molten-salt latent heat thermal energy storage system, *Applied Energy*, vol. 173, pp. 255-271, 2016.
- [24] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman e L. Rossetto, Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 90, pp. 79-89, 2015.
- [25] G. Righetti, G. Savio, R. Meneghello, L. Doretto e S. Mancin, Experimental study of phase change material (PCM) embedded in 3D periodic structures realized via additive manufacturing, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 153, n. 106376, 2020.
- [26] P. Zhang, Z. Meng, H. Zhu, Y. Wang e S. Peng, Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam, *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1971-1983, 2017.
- [27] Opolot et al, Pore-scale Simulations of Melting Performance Enhancement for a PCM Embedded in Metal Periodic Structures, *Submitted*, 2020.

- [28] H. Shmueli, G. Ziskind e R. Letan, Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 4082-4091, 2010.
- [29] V. Voller, M. Cross e N. Markatos, An enthalpy method for convection/diffusion phase change, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, pp. 271-284, 1987.
- [30] ANSYS Inc., *Ansys FLUENT manual*.
- [31] Renishaw ®.
- [32] Rubitherm Technologies GmbH.
- [33] G. Patankar, S. Mancin, J. A. Weibel, S. V. Garimella e M. A. MacDonald, A Method for Thermal Performance Characterization of Ultrathin Vapor Chambers Cooled by Natural Convection, *ASME. Journal of Electronic Packaging*, vol. 138(1), n. 010903, 2016.