



Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

tesi di laurea

**Studio numerico e sperimentale
di superfici estese ottenute
mediante ottimizzazione
topologica per accumuli termici
latenti**

Relatore: Prof. Simone Mancin

Laureando: Gianluca Slaviero

Anno Accademico 2022 - 2023

Autore: Gianluca Slaviero

Indice

Sommario	1
1 Introduzione e cenni teorici	3
1.1 Calore sensibile e calore latente	3
1.2 Trasmissione del calore	7
1.3 Misura della temperatura	9
2 PCM e Accumuli termici	13
2.1 Gli accumuli termici, TES	15
2.1.1 Accumuli sensibili	15
2.1.2 Accumuli latenti	16
2.1.3 Accumuli termochimici	18
2.2 PCM	19
2.2.1 PCM organici	20
2.2.2 PCM inorganici	23
2.2.3 PCM eutettici	24
2.2.4 Applicazioni dei PCM	25
2.3 Problemi dei PCM e miglioramento delle prestazioni	27
2.3.1 Superfici estese	28
2.4 L'Ottimizzazione Topologica	29
2.5 In sintesi	31
3 Setup Sperimentale	33
3.1 Provini	33
3.1.1 AlSi10Mg: caratteristiche e prova di conducibilità termica	35
3.2 Descrizione del sistema	37
3.2.1 Termocoppie e preparazione dei provini	39
3.3 PCM utilizzato	41
3.4 In sintesi	43

4 Prove sperimentali	45
Introduzione	45
4.1 Prove ΔT 5°C	47
4.1.1 Distribuzione della temperatura a 6 l/min	52
4.1.2 Influenza della portata	56
4.2 Prove ΔT 10°C	59
4.2.1 Distribuzione della temperatura a 2 l/min	66
4.2.2 Distribuzione della temperatura a 6 l/min	70
4.2.3 Influenza della portata	75
4.3 In sintesi	76
5 Modello numerico	79
5.1 Modellizzazione della fusione e solidificazione in <i>Ansys-Fluent</i>	80
5.2 Modellizzazione dei Materiali	83
5.3 Geometria e Mesh Sensitivity	85
5.4 Condizioni al contorno	88
5.5 In sintesi	90
6 Risultati dello studio numerico	91
6.1 La fusione	91
6.2 La solidificazione	97
6.3 In sintesi	100
Conclusioni	103
Bibliografia	106
Elenco delle tabelle	113
Elenco delle figure	114

Sommario

Al giorno d'oggi il cambiamento climatico e la sfida ambientale rappresentano tra le più grandi sfide per l'Europa e per il mondo. L'Unione Europea ha presentato nel Dicembre 2019 lo *European Green Deal* [1] al fine di rispettare i termini dell'accordo di Parigi [2]. Tale accordo è un trattato internazionale stipulato tra i 195 stati membri UNFCCC, nel quale vi è l'impegno collettivo a mantenere l'innalzamento della temperatura media globale sotto i 1.5 °C al fine di mitigare gli effetti del cambiamento climatico in atto. Il primo obiettivo è fissato per il 2030: ridurre di almeno il 55% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990 per arrivare ad un bilancio netto nullo entro il 2050. Con l'intento di rispettare tali obiettivi l'UE prevede l'investimento di un terzo dei 1800 miliardi di Euro previsti dal piano *NextGenerationEU* [3].

Tutto ciò si traduce in un intervento imponente in moltissimi aspetti della vita socio-economica (e culturale) dell'Unione; si prevedono infatti provvedimenti in settori molto diversi tra di loro, quali: trasporti, protezione della natura e della biodiversità, piano di azioni per l'economia circolare, agricoltura sostenibile, biologica ecc. L'edilizia svolge tuttavia il ruolo di protagonista tra queste riforme: l'UE stima infatti che tale settore è responsabile del 40% del consumo energetico totale nell'Unione e del 36% delle emissioni di gas serra [4]. Per monitorare in maniera efficace questo aspetto è stato fondato nel 2016 *L'Osservatorio europeo del parco immobiliare (BSO)* che rende disponibile una banca dati riguardanti: livelli di efficienza energetica negli edifici nei paesi dell'UE, sistemi di certificazione e attuazione, investimenti disponibili per la ristrutturazione degli immobili e i livelli di povertà energetica. Dalle ultime analisi emerge che circa il 75% del parco immobiliare europeo è inefficiente dal punto di vista energetico, con un tasso di ristrutturazione annuale inferiore all'1 % [5].

L'obiettivo è quindi chiaro: studiare, sviluppare e portare sul mercato nuove tecnologie in grado di rivoluzionare il sistema energetico oggi presente e ormai obsoleto nei confronti delle sfide poste dal cambiamento climatico in atto. Questo lavoro di tesi mira a un settore molto specifico ma

spendibile sicuramente nei contesti sopracitati. Nel capitolo 1 verranno introdotti i concetti alla base dello scambio termico, nel capitolo 2 verrà presentata una panoramica sui *PCM* (Phase Change Materials), cenni teorici, storici e una trattazione sul funzionamento e l'impiego di batterie termiche per calore latente che rappresentano un concetto recente ed efficiente di stoccaggio di energia. Il lavoro si concentrerà poi nel descrivere e riportare i dati riguardanti la validazione di un'ottimizzazione topologica operata sulle alette di scambiatori per lo stoccaggio di energia termica, svolto in un lavoro precedente a questo. La validazione è suddivisa in parte sperimentale e parte numerica, svolta tramite il software CFD Ansys Fluent.

Capitolo 1

Introduzione e cenni teorici

Nel primo capitolo della seguente trattazione verranno introdotti brevemente i concetti teorici su cui si basano i dispositivi studiati. In particolare verranno presentati i fenomeni di scambio termico sensibile e latente, sottolineando le principali differenze tra questi e riportando esempi che permettano di sottolineare le potenzialità che un accumulo latente ha nei confronti di un accumulo sensibile. Una breve sezione sarà dedicata agli accumuli termochimici. La seconda sezione è dedicata alla trasmissione del calore, presentando i meccanismi di conduzione, convezione e irraggiamento. La terza e ultima parte del capitolo è dedicata alla misura di temperatura, con una panoramica dei trasduttori impiegati in questo campo, ponendo particolare attenzione alle termocoppie e ai relativi principi di funzionamento.

1.1 Calore sensibile e calore latente

Una prima distinzione necessaria, per comprendere il funzionamento e il campo applicativo dei PCM (Phase Change Materials), è quella tra calore sensibile e calore latente.

Se ad un corpo viene fornita o asportata energia con un conseguente aumento o diminuzione di temperatura si parla allora di calore sensibile; il nome denota appunto una variazione misurabile di temperatura nel corpo. Questo tipo di fenomeno è già diffuso in moltissime applicazioni di stoccaggio termico, anche in contesto domestico, soprattutto mediante l'utilizzo di acqua date le caratteristiche quali ampia disponibilità e buone proprietà termiche.

La legge che governa tale fenomeno:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

dove:

- Q = calore scambiato [J]
- m = massa [kg]
- c_p = calore specifico [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

Il calore specifico è una proprietà espressa al variare della temperatura del corpo in esame; esso esprime la quantità di energia necessaria da apportare a un chilogrammo di materiale per innalzare la sua temperatura di un grado Celsius (o Kelvin). Di seguito, la tabella [1.1](#) contenente alcuni valori di c_p alla temperatura di 20 °C.

Materiale	J/(kg K)
Acqua	4186
Ghiaccio	2040
Aria	1004
Rame	385
Ferro	450
Alluminio	896

Tabella 1.1: Valori tipici c_p a 20 °C

Il calore latente è definito come quantità di energia scambiata durante la transizione di fase di una sostanza (da solido a liquido per esempio). La peculiarità del fenomeno del cambiamento di fase è che per una sostanza pura avviene a temperatura costante; l'energia viene di fatto impiegata dal materiale per modificare i legami intermolecolari con il conseguente mantenimento della temperatura costante durante il processo.

$$Q = \lambda \cdot m \quad (1.2)$$

L'equazione [1.2](#) contiene il parametro λ che misura il calore latente di uno specifico materiale, ed è espresso tipicamente in [kJ/kg], ne vengono riportati in tabella [1.2](#) alcuni valori tipici in condizione di fusione.

In base alla sostanza utilizzata la curva cambia in pendenza durante il riscaldamento per calore sensibile (secondo il parametro c_p), mentre la

Materiale	kJ/kg
Acqua	333
Alcol etilico	108
Ammoniaca	339
Paraffine	200-300

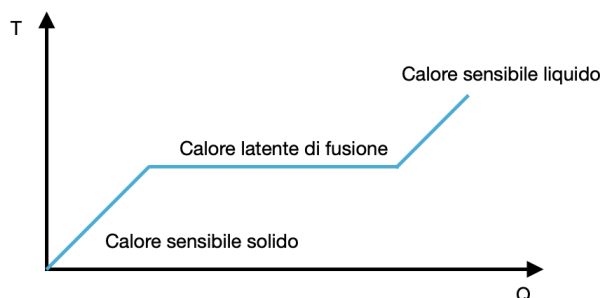
Tabella 1.2: Valori tipici di λ 

Figura 1.1: Curva generica di riscaldamento

parte orizzontale varia secondo il parametro λ . La curva di riscaldamento di una generica sostanza, che passa da fase solida a fase liquida può essere osservata in figura [1.1](#).

Questa peculiarità dei materiali può essere sfruttata nella progettazione di accumulatori termici, di seguito un esempio: poniamo di voler innalzare la temperatura di un chilogrammo di acqua da 19°C a 20°C , mediante i dati in tabella [1.1](#) e all'equazione [1.1](#) dobbiamo somministrare un'energia pari a 4186 J; se vogliamo invece portare un chilogrammo di acqua dallo stato solido a quello liquido, facendo riferimento all'equazione [1.2](#) e ai dati in tabella [1.2](#) otteniamo un'energia da apportare al materiale pari a 333000 J. L'esempio mostra chiaramente il concetto di impiego dei PCM: il ghiaccio fonde a temperatura costante asportando una grossa quantità di energia da un generico sistema. L'esempio dimostra inoltre le potenzialità di questo principio: attraverso il cambiamento di fase è possibile stoccare un'energia nettamente superiore rispetto a un sistema che funziona mediante il principio del calore sensibile. Questo si traduce immediatamente in sistemi che a parità di energia risultano essere nettamente più compatti.

Calore da reazioni chimiche

In una qualsiasi reazione chimica i componenti reagenti sono caratterizzati da un'entalpia diversa dai prodotti derivati dalla reazione stessa. Tale differenza di quota entalpica è detta calore di reazione e può essere impiegata nello stoccaggio di energia, utilizzando componenti caratterizzati da un elevato calore di reazione. La reazione può essere di tipo endotermico o esotermico; nel primo caso la reazione assorbe calore dall'ambiente, nel secondo lo rilascia.

Impiegare quindi reagenti caratterizzati da un elevato calore di reazione significa avere elevate temperature di esercizio, per formare (o rompere) i legami e portare a compimento il fenomeno; per tale motivo, questo tipo di stoccaggio termico, non viene impiegato in ambito domestico.

1.2 Trasmissione del calore

Il calore è una forma di energia che si manifesta nel passaggio da un primo a un secondo corpo quando tra i due c'è una differenza di temperatura. I due principi della termodinamica stabiliscono il bilancio delle varie forme di energia e il senso del trasferimento spontaneo del calore: dal corpo a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa. Il calore ha tre meccanismi di scambio: conduzione, convezione e irraggiamento; nella maggior parte dei casi avvengono in maniera concomitante o con un fenomeno che prevale, permettendo di trascurare gli altri. Nelle sezioni successive verrà presentata una breve panoramica dei tre.

Conduzione termica

Il fenomeno di conduzione termica si manifesta in corpi solidi, liquidi e gassosi senza movimento apparente di materia; avviene per la cessione, da parte di molecole di una sostanza a temperatura maggiore verso altre a temperatura minore, di energia cinetica. Il fenomeno è descritto dalla legge di Fourier, la quale descrive il flusso di calore dq che passa attraverso una sezione infinitesima dA è dato da:

$$dq = -\lambda dA \frac{dt}{dx} \quad (1.3)$$

con λ si indica il coefficiente di conduttività termica, tipico per ogni materiale e indica la quantità di calore che è trasmessa per unità di tempo, superficie, spessore e temperatura dello strato e si misura in [W/m K]. Questo valore varia entro limiti molto ampi, si riporta di seguito una tabella indicativa dei valori tipici di conduttività termica. Il parametro conduttività

Materiale	λ (W/m K)
Gas a pressione atmosferica	0.007 - 0.20
Materiali isolanti	0.02 - 0.2
Liquidi non metallici	0.05 - 0.7
Solidi non metallici	0.3 - 2.30
Metalli liquidi	8 - 80
Metalli e leghe metalliche	14 - 420

Tabella 1.3: Valori tipici di λ [6]

termica è tipico di ogni materiale e può variare secondo temperatura, pressione e trattamenti subiti dal materiale ed è riferito a una sostanza

omogenea e continua. La presenza di impurezze per esempio, provoca tipicamente brusche diminuzioni della conduttività di un materiale.

Convezione termica

La convezione termica costituisce uno dei tre meccanismi fondamentali della trasmissione del calore; il fenomeno avviene in presenza di due sistemi a temperature diverse posti in contatto fra di loro e che uno dei due sia un fluido (liquido, gas ma anche sistema bifase liquido + vapore). Il fluido deve poi avere una velocità relativa rispetto al corpo solido; nel caso in cui il fluido è fermo si instaura il solo fenomeno di conduzione, trattato nella sezione precedente. La convezione si divide in due categorie, in base a come si instaura il moto del fluido. Se il fluido è posto in movimento a causa di una differenza di densità per effetto di un gradiente di temperatura all'interno di un campo di forze centrali si tratta allora di convezione naturale. Se invece il fluido è posto in movimento da un organo meccanico, quali pompe o ventilatori, si tratta di convezione forzata. Il flusso termico convettivo è definito dalla relazione di Newton:

$$q = \alpha A(T_p - T_f) \quad (1.4)$$

Si indica con A la superficie di contatto tra solido e fluido, con T_p la temperatura alla superficie della parete solida, con T_f la temperatura del fluido mentre α è il coefficiente di convezione termica. Tale coefficiente non dipende solamente dal fluido impiegato ma da numerosi fattori, tra cui: la geometria del corpo solido, le proprietà fisiche del fluido e lo sviluppo dinamico del moto.

Condizione	α [W/(m ² K)]
Aria, conv. naturale	1 -20
Aria, conv. forzata	40 - 250
Liquidi organici, conv. naturale	80 -200
Liquidi organici, conv. forzata	300 -4000
Olii minerali, conv. forzata	100 - 100
Acqua, conv. naturale	250 -750
Acqua, conv. forzata	1000 - 12000
Acqua, ebollizione	1800 - 45000

Tabella 1.4: Ordini di grandezza α [6]

Irraggiamento

La trasmissione di calore per irraggiamento avviene tra due corpi quando il trasferimento di energia si verifica per mezzo di onde elettromagnetiche. La peculiarità di questo fenomeno è che non necessita di un mezzo e quindi può avvenire nel vuoto. Il flusso termico di energia per irraggiamento è espresso mediante l'equazione di Stefan-Boltzmann e dipende dalla posizione relativa dei corpi interessati, dalla natura delle superfici e dalla temperatura assoluta elevata alla quarta. La relazione è valida per soli corpi neri ideali.

$$q = \sigma_n AT^4 \quad (1.5)$$

Dove σ_n è la costante di radiazione di un corpo nero, che vale $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴) e q flusso termico. Risulta importante sottolineare che tutti i corpi emettono, e possono assorbire, energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche; inoltre variando con una potenza alla quarta della temperatura questo fenomeno può essere preponderante rispetto agli altri meccanismi quando si trattano sistemi a temperature molto elevate.

1.3 Misura della temperatura

La temperatura di un corpo definisce il grado di agitazione delle molecole che lo costituiscono e si esprime nel sistema internazionale in gradi Kelvin. La misura della temperatura avviene attraverso strumenti denominati termometri e possono essere di varia natura, tra i più diffusi troviamo per esempio termoresistenze, termocoppie e pirometri. I primi dispositivi citati permettono di misurare la temperatura sfruttando e osservando la variazione di resistività di un conduttore al variare della temperatura. I pirometri permettono di stimare la temperatura di un corpo attraverso la rilevazione dell'intensità della radiazione infrarossa emessa, trovano applicazione soprattutto per la misurazioni in alta temperatura in quanto non si necessita di contatto con il corpo. Le termocoppie, infine, sono trasduttori composti da due cavi, di materiale diverso, che permettono di rilevare la temperatura attraverso la misurazione della differenza di potenziale che si crea ai capi dei due filamenti. Il principio termoelettrico alla base di questi dispositivi è quello dell'effetto Seebeck: applicando un gradiente di temperatura ad un materiale metallico è possibile rilevare al suo interno la generazione di forza elettromotrice, secondo la legge:

$$V = \int_{T_2}^{T_1} \sigma_1(T) - \sigma_2(T) dT \quad (1.6)$$

Con $\sigma(T)$ ci si riferisce al coefficiente di Seebeck che risulta essere una proprietà di ogni materiale. Si riporta come esempio una termocoppia costituita da rame e costantana, tipologia di trasduttore impiegata nelle prove sperimentali di questo lavoro. Come visibile in figura 1.2 la termo-

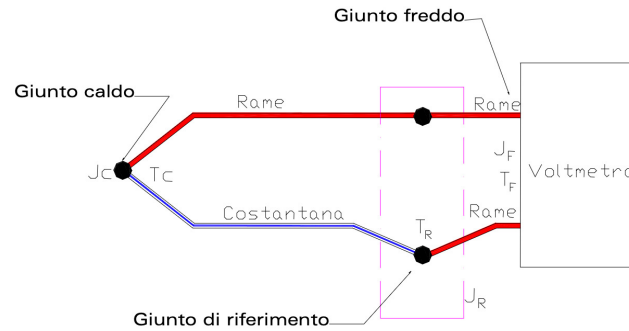


Figura 1.2: Schema di una termocoppia rame - costantana [7]

Tipo	Temperatura di esercizio	Materiali	
		Positivo	Negativo
T	-184 ÷ 370 °C -300 ÷ 700 °F	Rame	Costantana
J	0 ÷ 760 °C 32 ÷ 1400 °F	Ferro	Costantana
E	0 ÷ 870 °C 32 ÷ 1600 °F	Chromel	Costantana
K	0 ÷ 1260 °C 32 ÷ 2300 °F	Chromel	Alumel
S	0 ÷ 1480 °C 32 ÷ 2700 °F	Platino/10% Rhodio	Platino
R	0 ÷ 1480 °C 32 ÷ 2700 °F	Platino/13% Rhodio	Platino
B	870 ÷ 1705 °C 1600 ÷ 3100 °F	Platino/30% Rhodio	Platino/6% Rhodio

Figura 1.3: Schema di una termocoppia rame - costantana [8]

coppia sono presenti diversi giunti: in particolare il giunto di riferimento deve essere posto a una temperatura che permetta poi di rilevare dal giunto caldo una differenza di temperatura; il riferimento deve quindi essere posto a una temperatura costante, tipicamente a 0°C mediante per esempio a un bagno di acqua e ghiaccio. Per risalire quindi alla temperatura rilevata dal giunto caldo dalla misura di tensione sono necessarie delle tabelle o più

comunemente dei polinomi forniti dal produttore del trasduttore. In figura [1.3](#) una tabella fornita da un costruttore di termocoppie divise in base al campo di applicazione.

Nello specifico nelle prove di laboratorio svolte sono state utilizzate termocoppie di tipo T rame - costantana (lega metallica composta da circa il 60% di rame e nichel, con la presenza di piccole percentuali di ferro e manganese), particolarmente adatte a lavorare tra i -200°C e i 350°C .

Capitolo 2

PCM e Accumuli termici

La transizione energetica necessaria per rispettare il piano presentato dall'European Green Deal passa attraverso innumerevoli fronti; l'agenzia IRENA (*International Renewable Energy Agency*) [9] ha presentato un piano con sei azioni, grazie alle quali si arriverebbe a un bilancio di emissioni di gas serra nullo entro il 2050.

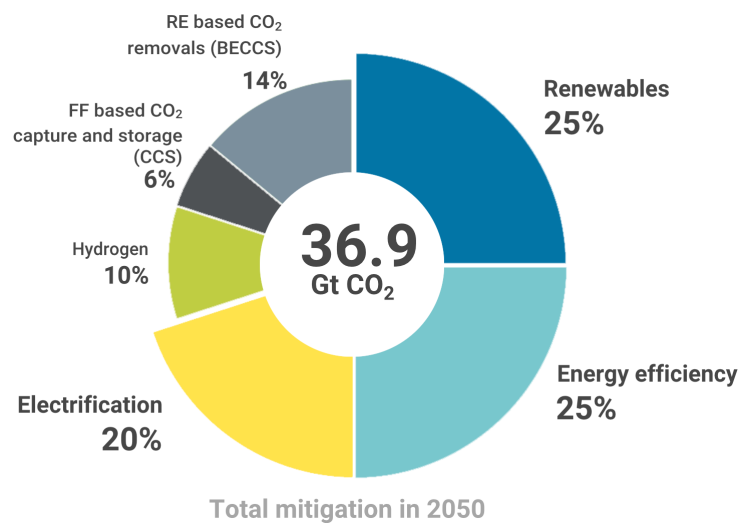


Figura 2.1: Piano di azione IRENA per la transizione ecologica del 2050 [9]

Dal grafico in figura 2.1 si può capire come l'impatto dell'efficienza energetica sia pari a quello dell'impiego delle energie rinnovabili, totalizzando insieme il 50% dell'impegno necessario a rispettare l'accordo di Parigi. La strada da intraprendere è quindi quella di un largo impiego di fonti di ener-

gia rinnovabile, senza però trascurare l'impiego in maniera efficiente dalla stessa. L'utilizzo di sorgenti di energia rinnovabili, quali eolico e solare (sia produzione elettrica che termica), pone il problema dell'intermittenza della risorsa; risulta quindi necessario l'impiego di accumuli energetici, ossia di batterie che possano fornire energia anche quando la sua produzione non risulta fattibile.

Nelle sezioni successive verranno dunque presentati gli accumuli termici *TES*, ossia *Thermal Energy Storage*, che negli ultimi anni stanno acquisendo sempre maggiore importanza. IRENA [9] stima infatti che il mercato delle TES triplicherà in valore nel 2030, arrivando in tale anno ad una potenza installata pari a 800 GWh, con investimenti stimati compresi tra i 13 e 28 miliardi di dollari. Particolare attenzione verrà infine posta ai *LTES*, accumuli termici, il cui funzionamento si basa sul principio del calore latente; di conseguenza, si descriveranno i PCM, materiali impiegati nelle prove sperimentali condotte nel presente lavoro di tesi.

2.1 Gli accumuli termici, TES

Gli accumuli termici (TES, *Thermal Energy Storage*) sono dispositivi che permettono di essere caricati mediante un apporto di calore e scaricati, in un secondo momento, da una seconda fonte che ne assorbe il calore stoccato [10]. Come introdotto nella sezione precedente, le fonti di energia rinnovabile sono soggette a variabilità di produzione giornaliera e stagionale; inoltre, spesso conducono a situazioni di eccesso di produzione. Per quanto riguarda i pannelli solari, per esempio, la possibilità di produzione di acqua calda è limitata alle sole ore di luce; è inoltre impossibile, a tal punto, impiegarla nelle ore notturne. Con la diffusione sempre maggiore di tali tecnologie, anche in ambiente domestico, risulta necessario impiegare nuove tecniche di stoccaggio del calore. Ciò consentirebbe di rispondere in maniera completa alle esigenze delle utenze senza impiegare fonti energetiche non rinnovabili.

Secondo IRENA [11] uno dei settori in cui la richiesta di energia sta incrementando più velocemente è quello della climatizzazione, soprattutto a causa del riscaldamento globale e del cambiamento climatico. Una stima di IRENA ci dice che l'energia impiegata per il raffreddamento degli edifici è arrivata al picco di 8.1 EJ nel 2016 e che arriverà a 11.3 EJ nel 2030 se non verranno presi dei provvedimenti. In questo settore gli accumuli termici possono giocare un ruolo fondamentale per abbattere la richiesta di energia e arrivare una soglia di 9.3 EJ nel 2030; questo può essere ottenuto impiegandoli insieme a sistemi che prevedono l'aumento di efficienza energetica dei locali. IRENA ha inoltre contato 400 progetti attivi nel campo TES nel 2019, 160 dei quali sono adibiti alla climatizzazione dei locali con un ammontare totale di energia prodotta pari a 13.9 GWh. Questi numeri sono sicuramente destinati a crescere nei prossimi anni, soprattutto in zone in cui le temperature stanno raggiungendo valori estremi, quali Africa settentrionale e sub-Sahariana e Medio Oriente.

In figura 2.2 è possibile vedere differenti tecnologie di TES per temperatura di esercizio e per tempo di funzionamento. In generale questi dispositivi possono essere divisi in tre principali famiglie in base alla tecnologia impiegata: sensibile, latente e termochimico.

2.1.1 Accumuli sensibili

Ad oggi il mezzo più diffuso nel mercato, oltre che il più studiato, risulta essere lo storage termico per calore sensibile. Questa tipologia di TES accumula energia riscaldando o raffreddando un mezzo solido o liquido, senza

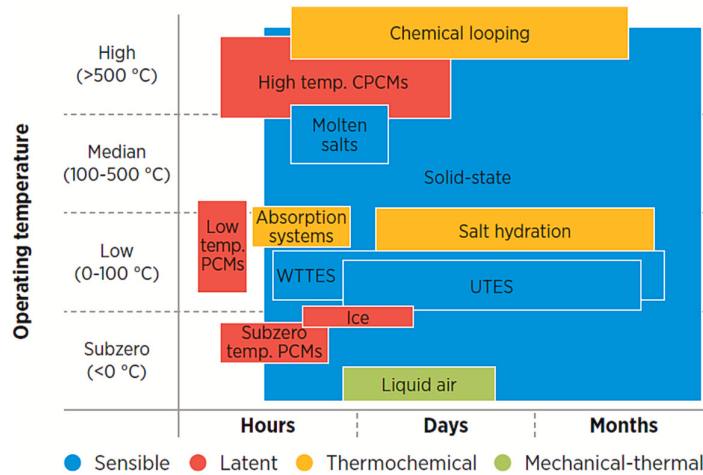


Figura 2.2: Range di temperatura e tempo di esercizio di varie tecnologie di TES [12]

cambiamento di fase. La quantità di energia stoccata quindi, è proporzionale al salto di temperatura operato e alla capacità termica del materiale impiegato; il campo di impiego per 1000kg di materiale soggetto a riscaldamento o raffreddamento, varia dai 10 kWh ai 50kWh, con un'efficienza che va da un minimo del 50% a un massimo del 98%, in base al calore specifico del mezzo e al tipo di isolamento scelto. Il range di temperatura invece è molto ampio e quindi adatto a un campo molto vasto di applicazioni: si va infatti da un minimo di -160 °C ai 1000 °C [13]. I vantaggi di tali sistemi sono la semplicità e il basso costo di realizzazione impiegando tipicamente acqua; il maggiore svantaggio però risulta la bassa densità di energia, che si traduce in impianti tipicamente molto grandi [14].

2.1.2 Accumuli latenti

Gli accumuli latenti sfruttano l'entalpia di solidificazione o fusione di materiali chiamati PCM (*Phase Change Material*) per stoccare energia. Il calore latente come visto nel capitolo precedente, è l'energia necessaria da apportare o asportare al materiale per far sì che questo cambi di fase. I PCM hanno un range applicativo comparabile agli accumuli sensibili e una densità di energia nettamente superiore. In figura 2.3 si riportano alcuni esempi di PCM tra 100°C e 200°C.

In questo campo di temperature, le tipologie di PCM possono essere riassunte in quattro famiglie principali:

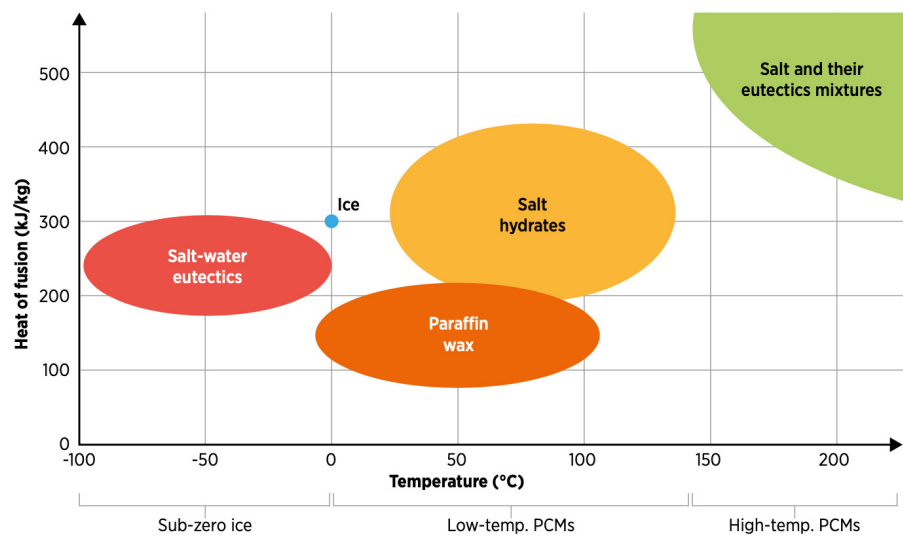


Figura 2.3: Range di funzionamento per tipologia di PCM [11]

- Sub-zero PCM: sono impiegabili da un range di $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sono ottenuti mediante soluzioni di acqua e sali. Un esempio è un PCM con temperatura di transizione di fase a $-21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ composto dal 27 % di NaCl disciolto in acqua; diminuendo la percentuale di sale disciolto si ottiene un composto con temperatura di solidificazione maggiore. Questa tipologia di materiali a cambiamento di fasi sono impiegati nel campo della refrigerazione.
- Ghiaccio: esso ha ottime potenzialità come PCM. Ha infatti un elevato calore latente di fusione, pari a 334000 J/kg e un ottimo valore di calore specifico, pari a 4200 J/(kgK) [15]; oltre alle suddette proprietà risulta essere non corrosivo, stabile e dal costo irrisorio. Di contro, è costretto a un range di temperatura limitato all'intorno degli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, risultando poco flessibile.
- PCM a bassa temperatura: si definiscono PCM a bassa temperatura (di transizione) quei materiali con un range di transizione di fase compresa tra gli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e i $120\text{ }^{\circ}\text{C}$; rientrano in questa categoria le paraffine, ossia i PCM impiegati nelle prove sperimentali trattate in questo lavoro. Le paraffine sono caratterizzate generalmente da un calore latente di fusione pari a 200000 J/kg ma con uno scarso valore di conduttività termica, pari a 0.2 W/m K che li rende in sostanza degli isolanti termici. Tale limite può essere migliorato aggiungendo al PCM particelle di metallo o grafite.

- PCM ad alta temperatura: rientrano in questa categoria quei PCM che sono caratterizzati da una temperatura di cambiamento di fase superiore a 120 °C. Tipicamente si ottengono con composti di sali inorganici, i quali sono caratterizzati da temperature di fusione molto alte (500 - 800 °C). Tali soluzioni possiedono un elevato valore di calore latente di fusione, ma bassa conduttività termica e risultano essere corrosivi.

2.1.3 Accumuli termochimici

Gli accumuli termici che si basano su reazioni termochimiche sono caratterizzati da valori molto elevati di densità di energia, nettamente maggiori rispetto alle controparti per calore sensibile e latente. Si dividono in due principali categorie: quelli basati su reazioni reversibili e quelli per assorbimento di energia. I primi si basano tipicamente su due reagenti che interagendo producono una reazione esotermica di sintesi, la quale cede grosse quantità di calore; i secondi permettono di stoccare calore in termini di potenziale chimico rompendo le forze di legame dei reagenti.

Tra i più diffusi sistemi che usufruiscono di reazioni termochimiche troviamo i *Chemical looping*, che rientrano nella categoria dei sistemi per reazioni reversibili. In queste architetture di storage termico si sfrutta la reazione tra ossido di calcio (CaO) e anidride carbonica (CO₂), che produce carbonato di calcio (CaCO₃). Quando il carbonato di calcio è esposto a elevate temperature si scompone nei due reagenti citati in precedenza, permettendo di immagazzinare energia sotto forma di legami chimici. Il grande vantaggio di questo sistema è dato primariamente dal fatto che i composti reagenti possono essere mantenuti nella loro forma per mesi, senza nessun tipo di dissipazione di energia. Nel momento in cui si ha necessità di fruire dell'energia stoccata si fanno reagire CaO e CO₂, che formando CaCO₃ rilasciano una grande quantità di calore [16].

La densità di energia è molto elevata, nell'ordine dei 3 GJ/m³, ma le temperature superano i 600 °C rendendo tali sistemi di difficile gestione, se non per ambienti specifici.

2.2 PCM

I phase change material, abbreviati in PCM, sono dei materiali di varia natura progettati appositamente per essere sottoposti a cicli di fusione e solidificazione continui. Queste sostanze vanno quindi impiegate in range di temperatura specifici in cui avviene il cambio di fase. Sfruttare la fusione o la solidificazione dei PCM permette di accumulare, o rilasciare, grandi quantità di energia sotto forma di calore latente, mantenendo la temperatura del sistema stabile. Nel cambio di fase la temperatura rimane costante solamente nelle sostanze pure; in quelle non pure invece la temperatura può subire delle piccole variazioni durante la transizione. La capacità di queste sostanze di accumulare molto calore deriva dalla quantità di energia necessaria a rompere o formare i legami molecolari della fase liquida o solida.

Di seguito un breve riepilogo dei principali requisiti necessari per PCM che devono essere impiegati in accumuli termici latenti [17]:

- Proprietà termofisiche:
 - Temperatura di cambiamento di fase compatibile con la temperatura di esercizio
 - Valore elevato di calore latente per unità di volume
 - Valore elevato di calore specifico (c_p) per sfruttare anche l'accumulo sensibile
 - Elevata conduttività termica da parte di entrambe le fasi (liquida e solida)
 - Piccola variazione di volume nel cambiamento di fase
 - PCM con punto di fusione congruente (ossia che la composizione chimica rimanga invariata nel cambiamento di fase)
 - Riproducibilità del cambiamento di fase
- Nucleazione e accrescimento [1]:
 - Forte nucleazione, in modo da evitare il fenomeno del sottoraffreddamento della fase liquida e per assicurarsi che fusione e solidificazione avvengano alla stessa temperatura
 - Elevato accrescimento, in modo da offrire buone prestazioni all'accumulo

¹La nucleazione è quel fenomeno per cui il numero dei cristalli tende ad aumentare; il fenomeno dell'accrescimento aumenta le dimensioni dei cristalli formatisi

- Proprietà chimiche:
 - Ciclo di congelamento e fusione completamente reversibile
 - Stabilità termica e chimica
 - Non corrosività nei confronti dei materiali dei contenitori o capsule
 - Non tossico, non infiammabile e non esplosivo
- Aspetti economici:
 - Abbondanza nel mercato
 - Facile da reperire
 - Facile da riciclare
 - Buon indice di sostenibilità ambientale secondo LCA ²

Di seguito, in figura [2.4](#) è possibile osservare le diverse famiglie di PCM, suddivise in base alla propria composizione chimica. Le tre categorie principali sono:

- Organici
- Inorganici
- Eutettici

Come riportato da Ghosh et al. [\[20\]](#) il tasso di crescita composto annuo (GAGR) dei PCM si prevede aumenterà del 16%, passando da un valore di 477 milioni USD a 1004 milioni USD nel 2026. Nel 2019 le paraffine rappresentavano il 53% del mercato complessivo dei PCM; ad oggi si prevede un aumento del 18.3% entro il 2026.

2.2.1 PCM organici

I PCM organici sono tra i più diffusi nel mercato dato il grande range di temperature di esercizio disponibili a catalogo. In questa famiglia troviamo le paraffine, o alcani, e le non-paraffine, o acidi grassi.

Le paraffine sono miscele di idrocarburi solidi, non solubili in acqua; sono composte soltanto da carbonio e idrogeno e la formula grezza risulta essere C_nH_{2n+2} . Questa specifica tipologia di PCM possiede un valore di

²Il Life Cycle Assessment (LCA), è un metodo standardizzato che permette di valutare oggettivamente l'impatto sull'ambiente di un prodotto o un servizio [\[18\]](#)

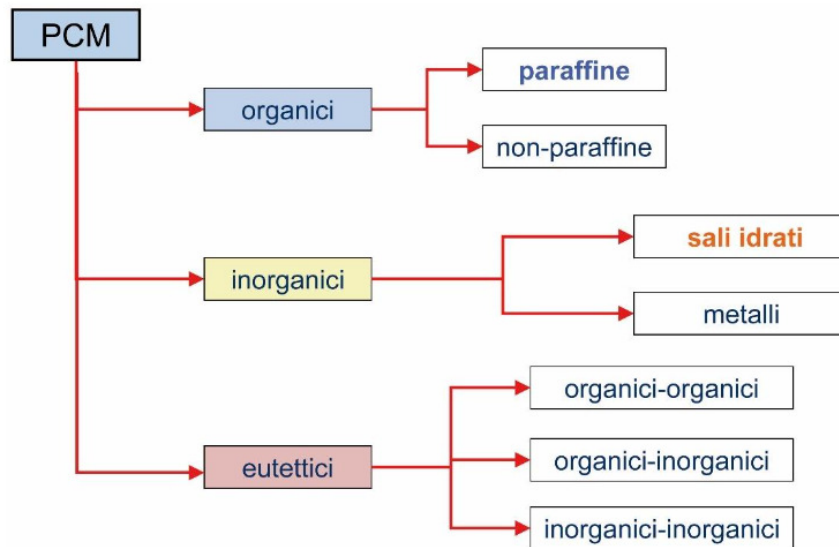


Figura 2.4: Classificazione dei PCM [19]

calore latente tipico che varia fra i 70 kJ/kg e i 250 kJ/kg. Gli acidi grassi sono invece dei composti organici ottenuti da olii, cere o grassi vegetali e animali; trovano impiego per temperature più basse rispetto alle paraffine, anche se hanno equiparabile valore di entalpia di fusione. I PCM organici non fondono a temperatura fissa, ma all'interno di un ran-



Figura 2.5: Cera di paraffina solida

Materiale	Temperatura di fusione [°C]	Conducibilità termica [W/mK]	Calore latente di fusione [kJ/kg]
Glicole dietilenico	-10.4	0.2	247
Dodecano	-9.65	0.142-0.144	216.1
Cera di paraffina	-9.11	0.2	150-260
Acido eptanoico	-7	0.17	118.6
Tridecano	-5.15	0.143	156.7
Acqua	0	160(s)/0.61(l)	333
Acido formico	8	0.3 (s)/0.27(l)	277
Acido acetico	17	0.26(s)/0.19(l)	192
Olio di cocco	23-25	0.166-0.228	103
Ottadecano	27.7	0.190(s)/0.148(l)	243.5
Climsel C48	44-53	0.76(s)/0.53(l)	180
Tetradecanoico	58	0.15	186.6
Esadecano	65.4	0.23	251
Urea	134	0.80(s)/0.60(l)	250

Tabella 2.1: Proprietà termofisiche di alcuni PCM organici [22] [23]

ge: passando dallo stato solido a quello liquido infatti passano attraverso uno stato transitorio, chiamato in genere "zona molle", che perdura tipicamente per alcuni gradi Celsius. Sono largamente impiegati nell'ambito della gestione termica domestica grazie a buoni valori di calore latente di fusione, permettendo quindi di accumulare buone quantità di energia in impianti di dimensioni ridotte; possiedono un punto di infiammabilità relativamente alto, superiore ai 400 °C, con caratteristiche di stabilità dal punto di vista chimico e fisico. Possono quindi essere impiegati per un grande numero di cicli fusione-solidificazione senza deteriorarsi e la loro scarsa reattività chimica e bassa corrosività permettono di impiegarli con moltissimi materiali di rivestimento. Il difetto riconosciuto delle paraffine è la loro bassa conducibilità termica, con un valore tipico di 0.2 W/(mK) [21] esse risultano essere degli isolanti (per confronto, il valore di conducibilità del rame è di circa 390 W/m K). Un secondo problema degli alcani è la variazione di densità che occorre nel cambiamento di fase: la fase liquida infatti ha densità che può essere anche del 20% inferiore a quella solida. Quest'ultimo problema risulta comunque relativamente semplice da gestire; molto più complesso è quello riguardante la conducibilità termica.

Se prendiamo come esempio la fase di carica (fusione del PCM), la frazione solida a diretto contatto con la fonte di calore tende a fondere molto velocemente surriscaldandosi; gli strati più distanti e ancora solidi, invece, non sono interessati ad aumento di temperatura. In ogni caso la fase di carica risulta essere più veloce rispetto a quella di scarica, per via dei moti convettivi che si instaurano man mano che la frazione liquida aumenta. Infatti, nella solidificazione, la fase solida che cresce per esempio intorno ad un'aletta, inibisce i moti convettivi portando a un allungamento della fase scarica dell'accumulo termico. Lo scopo di questa tesi è in primis trovare una soluzione a questo problema: si valuteranno infatti delle superfici estese ottimizzate topologicamente che permettono fasi di carica e scarica più veloci. In generale, i metodi per migliorare le performance degli accumuli sono:

- Impiego di superfici di scambio estese
- Inclusioni di materiali metallici o a base di carbonio
- PCM con nanoparticelle (NePCMs)

In tabella [2.1](#) vengono riportate le proprietà termofisiche di alcuni PCM organici.

2.2.2 PCM inorganici

La famiglia dei PCM inorganici contiene al suo interno i sali, gli idrati di sale e i metalli. Gli idruri salini sono composti ottenuti aggiungendo acqua a un sale inorganico. Questi materiali a cambiamento di fase sono caratterizzati da un range operativo molto ampio, spaziando dai 10 °C ai circa 800 °C; si predilige la loro applicazione nelle temperature più elevate, dove non è possibile utilizzare i PCM organici, i quali risultano più economici e di più facile gestione. Il campo di applicazione elettivo per i sali e idrati di sale è quello degli impianti a concentrazione solare, dove le temperature raggiunte sono molto elevate.

In questa classe di materiali a cambiamento di fase troviamo anche i metalli, la cui applicazione però è confinata a settori molto specifici, a causa soprattutto del basso valore di calore latente di fusione, in generale minore rispetto ai sali, che possiedono però valori di conducibilità termica molto elevata. Tra i metalli impiegati come PCM troviamo tra gli altri: il gallio, caratterizzato da una temperatura di fusione a circa 30° C, il piombo, con un punto di fusione medio-basso e il rame, con punto di fusione alto (1077 °C) [\[26\]](#).

Materiale	Temperatura di fusione [°C]	Conducibilità termica [W/mK]	Calore latente di fusione [kJ/kg]
Gallio	29.78	33.67	80.16
LiNO ₃ · 3 H ₂ O	29.9-30.2	0.74-0.8	287-296
CaCl ₆ · 6 H ₂ O	30	1.09/0.53	125
Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O	32	0.56/0.45	180
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5 H ₂ O	46	0.76/0.38	210
Ba(OH ₂) · 8 H ₂ O	78	1.26/0.66	280
Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O	89	0.65 /0.50	140
MgCl ₂ · 6 H ₂ O	117	0.70/0.58	150
ZnCl ₂	280	0.5	75
NaNO ₃	306.21-312.4	0.5	172-188.9
Pb	315	29/15	20.9
NaOH	318	0.92	165
MgCl ₂	714	NA	452
Cu	1077	386.44	53.2

Tabella 2.2: Proprietà termofisiche di alcuni PCM inorganici [24] [25]

In tabella [2.2] vengono riportati alcuni PCM inorganici con le più importanti proprietà termofisiche.

2.2.3 PCM eutettici

Con eutettico si definisce un composto la cui temperatura di fusione è minore rispetto a quella delle sostanze che lo compongono. I PCM eutettici possono essere divisi in tre categorie:

- Organico -Organico
- Organico - Inorganico
- Inorganico - Inorganico

In questo tipo di materiale a cambiamento di fase tutti gli elementi che formano la sostanza fondono e solidificano in maniera uniforme, senza la formazione di segregazioni. Essi sono generalmente caratterizzati da elevati valori di calore latente di fusione, rendendoli adatti all'impiego per applicazioni nel campo degli accumuli termici latenti.

In tabella [2.3] si riportano alcuni dei PCM eutettici più diffusi, con le relative proprietà termofisiche.

Materiali	Rapporto	Temperatura di fusione [°C]	Conducibilità termica [W/mK]	Calore latente di fusione [kJ/kg]
Acido laurico-a. stearico	75.5:24.5	37	NA	182.7
Acido stearico-a. palmidico	40:60	55.1-59.5	NA	189
Acido stearico-a. palmidico	40:60	55.1-59.5	NA	189
Acido adipico-A. sebacico	48:52	116.0	NA	206
Sn - Pb	63:37	183	50	52.1
NKNO ₃ - NaNO ₃	60:40	220	0.5	150
KNO ₃ -KCl	95.5:4.5	320	0.5	74

Tabella 2.3: Proprietà termofisiche di alcuni PCM eutettici [27] [28]

2.2.4 Applicazioni dei PCM

I campi di applicazione degli accumuli termici latenti sono molteplici (Nazir et al. [28]): nei sistemi solari a concentrazione, nella gestione termica di batterie ed edifici, nel riscaldamento dell'acqua con energia solare, nelle celle frigorifere ecc.

La forte richiesta di auto elettriche negli ultimi anni ha portato numerose sfide a numerosi settori: se si prendono come esempio le batterie, c'è una forte richiesta da parte dei costruttori di veicoli per dispositivi ad alta densità di energia, che possano essere ricaricati in tempi sempre più brevi. Come conseguenza di ciò, si avrà una complessa gestione termica del dispositivo. Le batterie tendono infatti a degradarsi se portate a temperature sopra i 40 °C, con conseguenze sulla longevità dei cicli di carica/scarica e sulla capacità di output in termini di potenza. Tra le varie soluzioni studiate, si trovano, anche a livello commerciale, dei dispositivi basati su PCM che permettono di asportare calore dalle celle durante il funzionamento, mantenendo sotto la soglia dei 40 °C la temperatura di esercizio [29].

Come già accennato, anche nella gestione termica degli edifici i PCM stanno diventando sempre più popolari. La presenza di sistemi di accumulo energetico permettono di gestire in maniera molto flessibile la temperatura interna delle abitazioni, soprattutto nelle zone molto calde o molto fredde. Se implementati direttamente nei materiali da costruzione si può concepire un edificio che, nella gestione termica, non abbia nessun impatto ambientale in termini di emissioni di gas serra [30]. In tale studio si è dimostrato che, settando una temperatura target interna di 22 °C, è possibile consumare meno energia se è presente uno strato di PCM all'interno

della muratura. La presenza o meno di PCM porta nel miglior caso a un risparmio energetico di 32.4 kWh/m^2 , con una significativa riduzione di emissioni di gas serra, per mantenere l'abitazione a temperatura costante, che si attesta intorno al 69.2 % (che corrisponde a una diminuzione di 34.9 kg di CO_2 per metro quadro dell'abitazione, rispetto ai 61 kg/m^2 senza isolamento dato dal PCM). Nel settore edilizio vengono tipicamente impiegati PCM organici o acidi grassi, i quali però necessitano di controllo nei riguardi della sicurezza, possono infatti, come già detto essere infiammabili se esposti a determinate condizioni.

Un'applicazione sempre più diffusa dei PCM è per l'accumulo di acqua

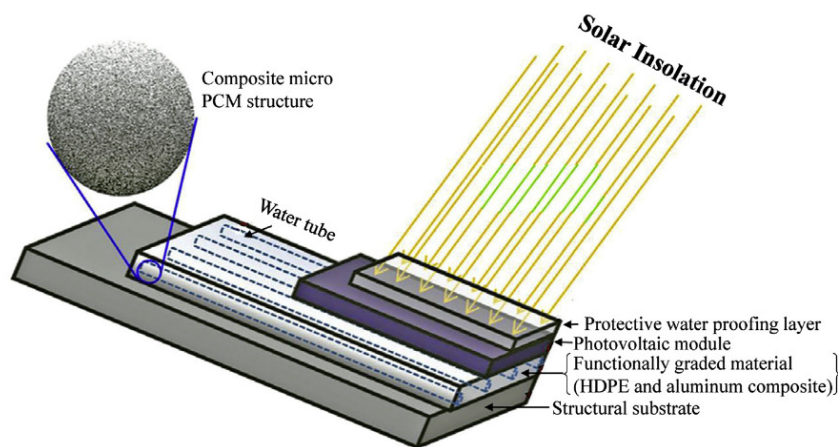


Figura 2.6: Pannelli solari con sistema di accumulo tramite PCM [31]

calda tramite pannelli solari. Rispetto alle controparti elettriche o a gas, un singolo pannello ($\approx 1.5 \text{ m}^2$) può ridurre le emissioni di circa 50000 kg di CO_2 in 20 anni di utilizzo [31]. Se all'accumulo sensibile (mediante acqua) si aggiunge tramite appositi sistemi del PCM l'efficienza può aumentare notevolmente. In questo settore vengono impiegate paraffine con temperatura di fusione intorno dai $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ai $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Oltre alla gestione termica e all'accumulo termico, i PCM possono essere impiegati anche per l'alimentazione di celle frigorifere (CTES) mediante paraffine con range di temperatura di cambio fase che può arrivare a $-37 \text{ }^\circ\text{C}$; nonostante i recenti sviluppi, i *Cold Thermal Energy Storage* necessitano di ulteriori sviluppi, in quanto la loro efficienza risulta ad oggi essere intorno al 20% [32].

I PCM trovano applicazione recente anche nella gestione termica passiva degli impianti fotovoltaici, portando a un aumento di efficienza complessiva degli impianti. Come riportato da Hasan et al. [33] l'implementazione di un modulo di PCM (Rubitherm $\text{\textcircled{R}}$ RT 25) accoppiato al pannello foto-

voltaico ha portato ad un miglioramento dell'1.3 % dell'efficienza di conversione con il 41% di calore asportato dall'impianto. L'energia asportata in questo modo dal pannello fotovoltaico può inoltre essere impiegata nel riscaldamento di acqua.

Tipologia	Vantaggi	Svantaggi
Organici	Sub-cooling poco marcato	Bassa conducibilità termica
	Buone proprietà termiche	Infiammabilità
	Fusione congruente	Bassa entalpia di cambio fase
	Compatibile con molti materiali	Bassa densità
	Range di temperatura ampio	Alta espansione volumetrica
Inorganici	Stabile chimicamente	Bassa conducibilità termica
	Alta conduttività termica	Subcooling marcato
	Alta capacità di accumulo	Presenza di segregazione
	Non infiammabile	Corrosivo
	Alta entalpia di cambio fase	Instabile chimicamente
Eutettici	Riciclabile	Tende a degradarsi
	Temperatura di fusione precisa	Pochi studi in letteratura
	Alta densità di accumulo	Costosi
	Non avviene segregazione	Presenza di subcooling

Tabella 2.4: Confronto delle proprietà tra le tipologie di PCM [10]

2.3 Problemi dei PCM e miglioramento delle prestazioni

Come visto nelle sezioni precedenti, i PCM, in base alla loro composizione, presentano vantaggi e svantaggi che devono essere accuratamente valutati in fase di dimensionamento. Le problematiche che più limitano in generale le prestazioni di un impianto sono due: la scarsa conducibilità termica e l'espansione volumetrica in fase di fusione. [34]

L'alta resistenza che il materiale interpone allo scambio di calore limita la capacità di portare a compimento i cicli di fusione/solidificazione, con una conseguente limitazione alla quantità di energia accumulabile [35]. Per ovviare a tale problema possono essere impiegate varie tecniche, tra cui l'utilizzo dell'incapsulamento e superfici estese.

2.3.1 Superfici estese

Sono tipicamente due i metodi per arginare il problema della scarsa conduttività dei PCM. La prima tecnica prevede di inserire all'interno degli scambiatori tubolari, alette, mezzi porosi o chips di materiale altamente conduttivo come rame o alluminio, al fine di aumentare l'area e la conduttività termica apparente. La seconda strada percorribile è quella dei nanofluidi, meno utilizzata soprattutto a causa dei costi più elevati e alla scarsa stabilità dei composti.

Il metodo più diffuso per aumentare le prestazioni degli accumuli termici latenti è quello di aggiungere superfici alettate, grazie al loro basso costo, alla loro compattezza, alla loro efficienza e alla grande disponibilità presente sul mercato. Una prima tipologia di superficie impiegata negli accumuli tubolari è quella ad alette anulari, dove le sezioni di tali superfici possono essere costanti o a raggio variabile crescente o decrescente in funzione della posizione (tipicamente questa soluzione viene utilizzata se l'accumulo è disposto verticalmente). La variazione della geometria è principalmente pensata per incentivare i moti convettivi della fase liquida. In generale è importante sottolineare che all'aumentare del numero di alette diminuirà la convezione naturale presente nella frazione liquida, portando a un possibile peggioramento delle prestazioni. Karami e Kamkari [36] hanno condotto prove sperimentali per confrontare le prestazioni di due accumuli termici, uno ad alette piene e un secondo con alette forate. I risultati premiano il secondo, registrando un aumento del numero di Nusselt pari al 30% e un tempo di carica inferiore del 7% rispetto al provino ad alette piene.

Una seconda tipologia di superficie alettata è quella elicoidale, che in generale permette di accorciare i tempi di carica grazie al rimescolamento indotto dai moti convettivi della frazione liquida; tale configurazione permette inoltre di evitare la formazione di sacche d'aria durante la fase di solidificazione.

La terza configurazione di superficie estesa è quella ad alette longitudinali di forma rettangolare, storicamente la più impiegata per facilità di progettazione e realizzazione. Il numero e la forma (spessore e altezza) delle alette hanno un grande impatto sui tempi di carica e scarica dell'accumulo termico [37]. Un' aletta alta infatti permette una maggiore diffusività termica nel PCM, riducendo però i moti convettivi, i quali, possono essere maggiormente sviluppati con alette corte. A tal proposito è importante sottolineare che un dispositivo che incentiva la convezione naturale nel PCM porta benefici alla fusione del materiale nella parte superiore, ma disincentiva quello nella parte inferiore. Una seconda peculiarità non benefica della convezione naturale è la possibile instaurazione di disomogeneità del

campo di temperatura del PCM, che può portare a zone con frazione liquida molto calda e zone di frazione solida fredde. Zhadeh et al. [38], hanno condotto diverse prove numeriche 2D investigando diverse configurazioni, in termini di dimensione e orientazione delle alette (costituite di schiuma di alluminio), in accumuli termici latenti di forma circolare. I risultati mostrano che all'inizio della fase di fusione lo scambio termico è dominato dalla conduzione, per poi lasciare spazio alla convezione man mano che la frazione liquida aumenta.

2.4 L'Ottimizzazione Topologica

I metodi di ottimizzazione principali sono tre: dimensionamento ottimizzato, ottimizzazione di forma e ottimizzazione topologica.

Tutte le variabili di dimensionamento vengono fissate, tranne una, al va-

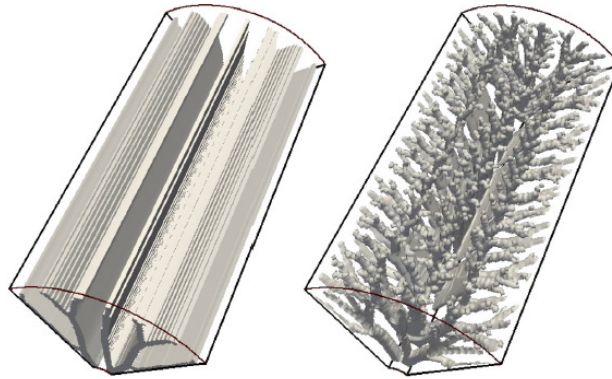


Figura 2.7: Forma delle alette ottimizzate

riare della quale si cerca la miglior risposta del sistema. Prendendo come esempio una superficie ad alette longitudinali di sezione rettangolare, i parametri fissati saranno spessore, forma e distribuzione, mentre la variabile di design sarà l'altezza. Ad ogni iterazione del processo, verrà valutata l'influenza di questa variabile nelle performance di scambio termico al fine di individuare un valore ottimale. Se si prende come esempio una superficie ad alette longitudinali di sezione quadrata: fisso parametri quali spessore, forma e distribuzione e si varia l'altezza, valutando ad ogni iterazioni l'influenza di questa variabile nelle performance di scambio termico, permettendo di individuare un valore ottimo. Il dimensionamento ottimizzato risulta quindi essere un metodo piuttosto semplice, che non impiega grosse risorse di calcolo ma che limita molto la libertà di dimensionamento. Nel-

L'ottimizzazione di forma l'obbiettivo è l'intero dominio della superficie di scambio; si fa quindi variare la forma del solido rispettando dei limiti posti precedentemente.

L'ottimizzazione topologica è invece un metodo matematico che ottimizza la distribuzione del materiale impostando a priori il volume e altri parametri fondamentali (come per esempio le condizioni di carico per una struttura). La teoria alla base di questo modello matematico è stata proposta da Bense nel 1989 per applicazioni in campo strutturale, teoria poi estesa in diversi altri campi, tra i quali lo scambio termico. Nel 2017 Pizzolato e collaboratori [39] hanno proposto una prima ottimizzazione topologica specifica per LTES ottenendo un sostanziale aumento delle performance dell'accumulo. La forma della superficie è visibile nell'immagine 2.7. In un secondo lavoro [40] sono state condotte delle ottimizzazioni in tre casi diversi: PCM fermo (assenza di moti convettivi), configurazione specifica per fusione e conformazione specifica per solidificazione. Le tre configurazioni sono visibili in figura 2.8.

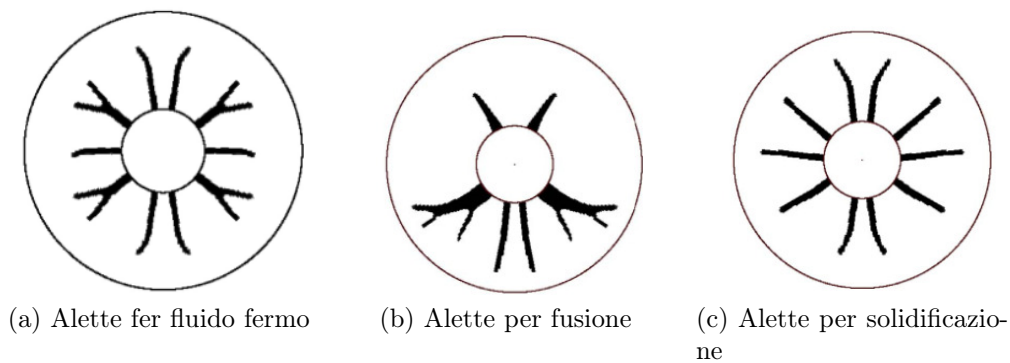


Figura 2.8: Confronto tra ottimizzazioni topologiche [40]

Nella figura 2.8a si può apprezzare il primo caso, dove si è considerato il PCM (anche la frazione liquida) fermo: in questo caso il solo obbiettivo è quello di raggiungere la massima diffusione del calore attraverso le alette. In questa configurazione si possono notare alette con diramazioni che ricordano una Y; la sezione inoltre risulta essere simmetrica rispetto l'asse orizzontale. In figura 2.8b si trova l'ottimizzazione topologica specifica per la fase di fusione, considerando quindi i moti convettivi che si instaurano nella frazione liquida del PCM. Le alette in questo caso si concentrano nella parte inferiore, caratterizzate da uno spessore maggiore, con la presenza di tre biforcazioni e con una lunghezza maggiore rispetto al caso precedente; nella parte superiore invece, le alette sono solamente due, di dimensioni

ridotte. Una seconda differenza sostanziale di questa configurazione è l'asimmetria rispetto all'asse orizzontale. Queste caratteristiche permettono di favorire il rimescolamento del liquido, fenomeno che risulta essere di fondamentale importanza per velocizzare la carica dell'accumulo.

Una terza configurazione è presentata in figura 2.8c. In questo caso si considera la fase di solidificazione, con la presenza di movimento nel fluido. Si nota che in questo caso non sono presenti biforcazioni delle alette e che queste risultano essere più lunghe rispetto al caso in figura 2.8a; anche in questo caso la geometria risulta asimmetrica. In figura 2.9 si può os-

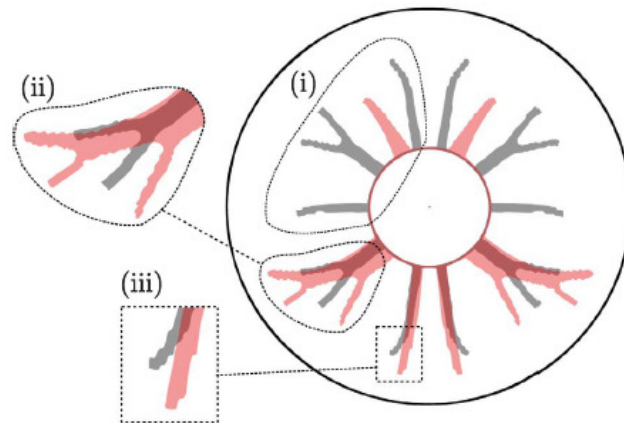


Figura 2.9: Confronto tra ottimizzazioni

servare la differenza tra le configurazioni ottimizzate considerando il PCM sempre fermo (in grigio) e in rosso la superficie ottimizzata per la fase di fusione. Risulta quindi chiaro che la configurazione migliore per la fase di carica risulta essere molto diversa da quella ottima per la fase di scarica, rendendo necessario identificare un giusto compromesso, dato che negli LTES una fase è sempre seguita dall'altra. Un secondo problema risulta essere la fabbricazione di queste strutture; l'unica via percorribile, ad oggi, risulta essere quella dell'*additive manufacturing* con materiali metallici, rendendo difficili i test sperimentali di tali dispositivi.

2.5 In sintesi

Per concludere, è possibile affermare che gli accumuli latenti rappresentano un ottimo metodo per rispondere in maniera efficiente agli obiettivi di decarbonizzazione posti dalle istituzioni; questi dispositivi permettono

infatti il disaccoppiamento tra produzione e utilizzo di energia in maniera efficiente. Tra i vari PCM le paraffine sono le più diffuse, con una quota di mercato pari al 53%, valore destinato a crescere di un ulteriore 18.3% entro il 2026, soprattutto grazie allo loro larga disponibilità e compatibilità combinata a buone prestazioni in termini di accumulo. In generale i PCM organici risultano essere degli isolanti termici a causa della loro bassissima conducibilità termica; ciò comporta delle limitazioni nel a portare a compimento in modo efficaci cicli completi di carica e scarica degli accumuli latenti. Per far fronte a tale problematica sono state proposte in letteratura varie soluzioni: tra le più innovative troviamo la generazioni di superfici mediante ottimizzazioni topologiche, le quali permettono di massimizzare lo scambio termico tra superfici conduttive e PCM. Tale soluzione è però legata a limiti tecnologici di produzione, richiedendo l'impiego di additive manufacturing di materiali conduttivi e rendendo di conseguenza difficile lo studio di questa tipologia di superfici estese.

Capitolo 3

Setup Sperimentale

Nella prima parte di questo capitolo verranno presentati i tre provini sottoposti a test durante il presente lavoro di tesi, descrivendone caratteristiche geometriche e i processi di produzione coinvolti. Nella sezione 3.1.1 verrà fornita una descrizione del materiale conduttivo impiegato, con la relativa misura di conducibilità termica. La sezione 3.2 è dedicata alla presentazione del setup sperimentale e di tutti gli strumenti di misura impiegati durante i test; particolare attenzione verrà posta alla descrizione e al posizionamento delle termocoppie.

La terza e ultima sezione è dedicata alla presentazione delle proprietà della paraffina scelta, con relativa analisi critica dei dati forniti dal produttore.

3.1 Provini

I provini sottoposti a prove sperimentali sono tre, tutti con la stessa porosità (rapporto fra volume vuoto e volume totale dei provini) pari a 95%:

- Provino ad alette dritte: questo campione presenta alette longitudinali a sezione rettangolare, con diametro interno dove scorre il fluido operativo ("*Heat Transfer Fluid*") pari a 19.6 mm ed esterno di 25.6 mm; l'altezza dell'aletta è 20.25mm e ha spessore di 3 mm. Questo rappresenta il provino di riferimento per confrontare le prestazioni di carica e scarica rispetto ai provini dimensionati secondo l'ottimizzazione topologica. Il provino è visibile in figura [3.1a](#).
- Prima ottimizzazione topologica: il provino in figura [3.1b](#) è chiamato "Fillet 2" e rappresenta la prima ottimizzazione topologica testata in laboratorio. Il diametro interno è pari a 19.6 mm. La superficie

estesa presenta 8 diramazioni che ricordano i rami di un albero, con un'altezza massima di 17 mm. La sezione è simmetrica rispetto l'asse verticale.

- Seconda ottimizzazione topologica: il campione in figura [3.1c](#) denominato come "Eccentrico" presenta anch'esso un diametro interno per l'HTF di 19.6 mm, ma il tubo risulta spostato in basso di 11.2 mm rispetto ai precedenti. Anche in questo caso troviamo alette che presentano biforcazioni a spessore variabile; sono caratterizzate anch'esse da lunghezze molto diverse tra loro che vanno da un minimo di 8 mm nella parte inferiore a un massimo di 26 mm per l'aletta posta verticalmente nella parte superiore del campione.

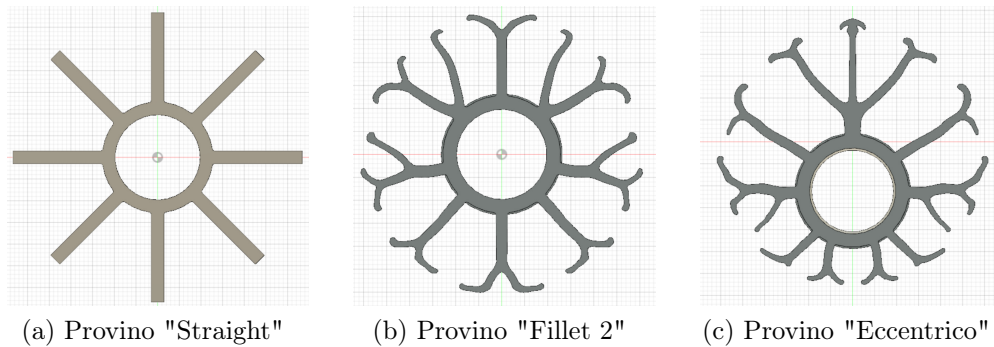


Figura 3.1: Sezioni provini

Ognuno dei tre scambiatori tubolari presenta una lunghezza della superficie alettata pari a 150 mm. Ogni provino è stato progettato prevedendo il montaggio di un tubo di plexiglass, dal diametro interno di 73.5 mm e con spessore 3 mm.

Il tubo di plexiglass trasparente permette di avere una prova visiva durante le fasi di carica e scarica dell'LTES della frazione liquida e solida del PCM al suo interno. Ogni provino ospita un volume di PCM pari a 0.49 litri.

Data la geometria delle superfici estese ottenute tramite ottimizzazione topologica, i campioni sono stati fabbricati mediante tecnologia di stampa additiva, impiegando lega di alluminio AlSi10Mg con particle size distribution di 15-45 μm e spessore del layer di 30 μm . La stampante utilizzata è una Eosint m280.

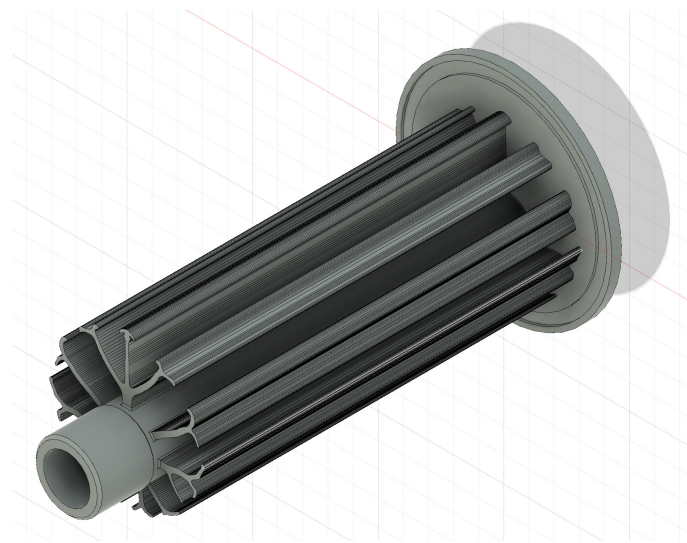
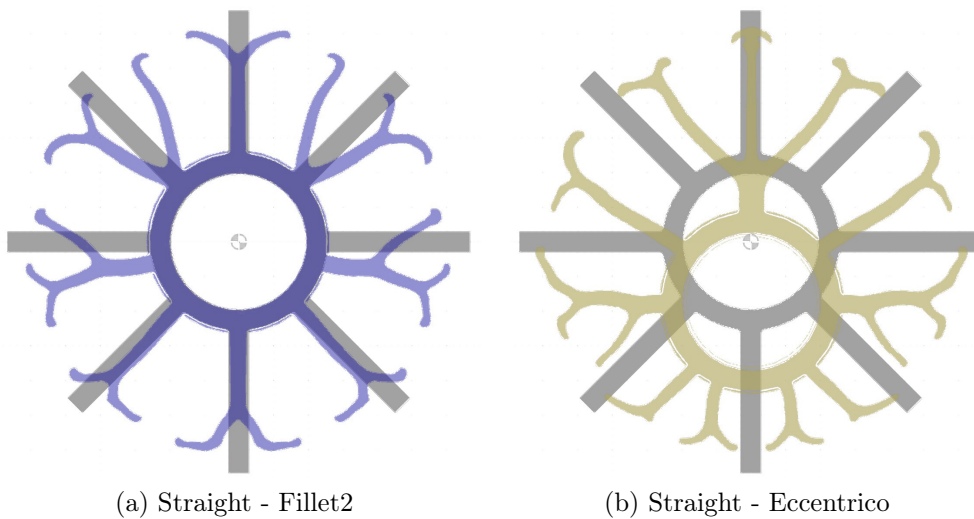


Figura 3.2: Visualizzazione 3D provino eccentrico



(a) Straight - Fillet2

(b) Straight - Eccentrico

Figura 3.3: Confronto tra provini ottimizzati e standard

3.1.1 AlSi10Mg: caratteristiche e prova di conducibilità termica

La lega di alluminio utilizzata per la fabbricazione dei provini in questione è la AlSi10Mg, ampiamente impiegata nell'ambito della stampa 3D per la realizzazione di componenti caratterizzati da ottime proprietà meccaniche

e di scambio termico, con massa contenuta. Tipicamente questa lega, se prodotta in maniera tradizionale in fonderia, deve essere sottoposta a trattamenti termici al fine di migliorarne le proprietà meccaniche (es. ciclo T6 di solubilizzazione). Se però viene prodotta, come nel caso dei provini relativi a queste prove sperimentali, tramite *Selective Laser Melting* tali processi non risultano essere necessari, dati i continui cicli di fusione e solidificazione imposti dal processo di produzione stesso.

Tale metodo di costruzione dei provini non permette di utilizzare il tipico valore di conducibilità termica dell'alluminio (circa 200 W/m K), dato che il materiale dei provini risulta essere anisotropo, rendendo necessaria la misura della conducibilità. La prova in questione si svolge con un cilindro di alluminio ottenuto con lo stesso processo di stampa degli scambiatori. La conducibilità λ è definita come il rapporto tra flusso di calore e il gradiente di temperatura. Per il cilindro di raggio r e lunghezza d :

$$W = \pi \lambda \frac{r^2}{d} \Delta T \quad (3.1)$$

Dove W rappresenta la potenza entrante da un'estremità del cilindro e ΔT la differenza di temperatura osservata agli estremi del cilindro stesso. La potenza W viene fornita da una resistenza percorsa da una corrente I . Il provino di alluminio è a contatto alle due estremità con dei blocchetti di rame, uno dei quali è posto a temperatura costante (tipicamente quello al lato opposto rispetto al lato in cui si riscalda il provino), sempre mediante una resistenza elettrica. Due termocoppie rilevano quindi la temperatura ai due estremi del cilindro di alluminio, fornendo il valore di ΔT . Conoscendo raggio e lunghezza del campione è possibile quindi ricavare la conducibilità termica λ propria di quel materiale.

In questo caso le prove condotte sono state due: una stampando il cilindro verticalmente, la seconda ricavando la medesima geometria ma orizzontalmente. I due test restituiscono due valori diversi di λ , sottolineando l'influenza dei metodi di stampa sui parametri termo-fisici:

- Conducibilità termica stampa in verticale: $\lambda = 132.3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
- Conducibilità termica stampa in orizzontale : $\lambda = 112.9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

3.2 Descrizione del sistema

L'intero setup sperimentale, in figura 3.4 è stato preparato all'interno di una camera climatica che permette di mantenere la temperatura costante a 20°C, per minimizzare le perdite di calore verso l'ambiente. La temperatura dell'ambiente è stata scelta sulla base della temperatura di fusione del PCM. Il fluido operativo HTF è acqua che scorre nel tubo interno

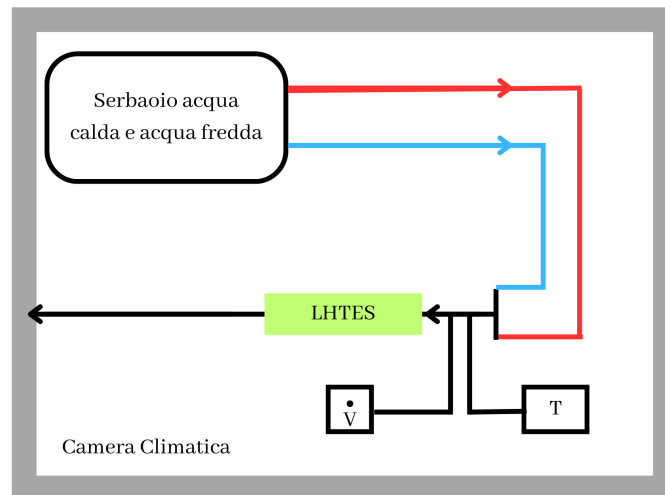


Figura 3.4: Setup sperimentale

del provino la cui temperatura è regolata da un chiller con una stabilità pari a $\pm 0.2^\circ\text{C}$. La misura di portata viene eseguita da un misuratore di portata volumetrica elettromagnetico Endress + Hauser Promag H, il quale ha un'accuratezza di misura massima pari a $\pm 1\%$ del fondo scala impostato. Per misurare la temperatura dell'acqua in ingresso è stato installato un pozzetto lungo 50 mm, visibile in figura 3.5. L'interno del canale è stato riempito di grasso silconico, avente conducibilità termica nettamente superiore all'aria, per eseguire una misura di temperatura tramite la termocoppia inserita all'interno. Una seconda termocoppia è posta all'uscita mentre 12 sono state utilizzate per monitorare la temperatura del PCM. Una ulteriore termocoppia è stata impiegata per il monitoraggio della temperatura dell'ambiente all'interno della camera climatica.

I 14 trasduttori di temperatura sono collegati ad un *ice point reference* Kaye k170 a 50 canali, che permette di eseguire rilevazioni con incertezza di $\pm 0.02^\circ\text{C}$. I segnali analogici sono quindi raccolti da un sistema di acquisizione Keysight 34970A con una frequenza di 0.285 Hz (una lettura ogni

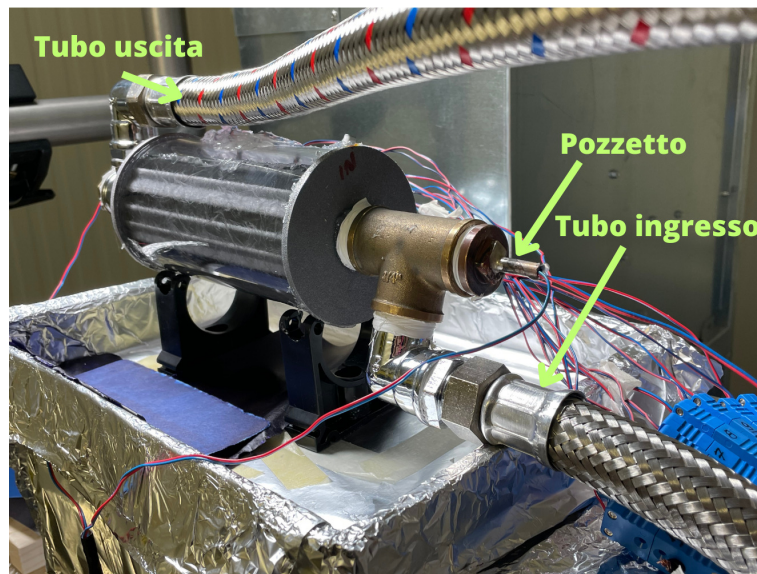


Figura 3.5: Provino collegato al circuito dell'acqua

3.5 secondi) e trasmessi al programma LabView dedicato, per la visualizzazione dei dati in tempo reale e la raccolta di essi in un file excel. Come visibile dalla figura [3.6](#), il programma permette di monitorare la temperatura di ogni singola termocoppia in uno schema che richiama la posizione reale di queste all'interno del provino.

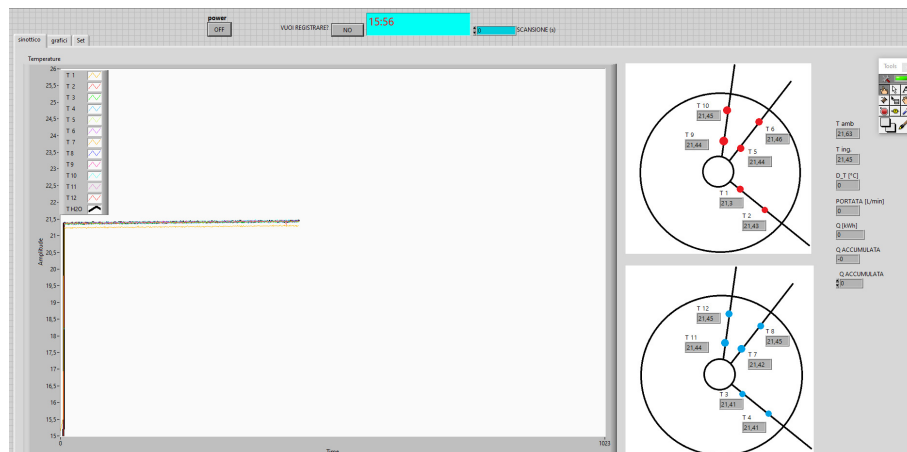


Figura 3.6: Screenshot programma LabView

Infine, in figura [3.7](#), viene mostrata una foto dell'intero setup durante

una prova. La macchina fotografica è impostata per creare un time-lapse di ogni fase di carica e scarica del provino, scattando una fotografia ogni 15 secondi. Il setup è illuminato da una lampada composta a LED per permettere una visualizzazione ottimale del PCM in cambio di fase.

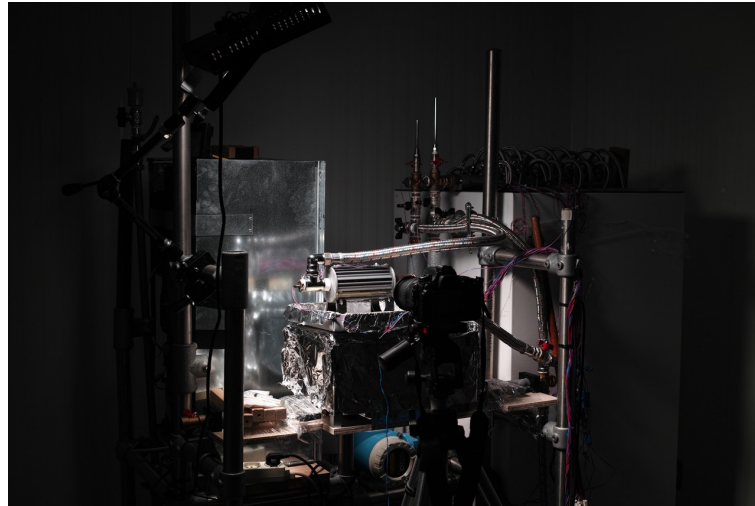


Figura 3.7: Foto setup durante una prova

3.2.1 Termocoppie e preparazione dei provini

Come precedentemente accennato, ogni provino è stato inserito in un tubo di plexiglass e successivamente sigillato per evitare perdite di PCM. Nella parte superiore del contenitore trasparente è stato eseguito un foro che funge da sfiato, per compensare l'espansione volumetrica della paraffina. Sono state poi installate, in ogni provino, 12 termocoppie (TC) di tipo T (rame-costantana) distribuite in due diverse sezioni. La prima sezione, in figura [3.8a](#) è posizionata a 5 cm dall'estremo destro del provino, vicino quindi all'ingresso dell'acqua. La seconda, in figura [3.8b](#), a 5 cm dall'estremo sinistro. Come si può vedere dall'immagine [3.8](#) quindi, le termocoppie sono state inserite all'interno del PCM a coppie, attraverso un foro nel plexiglass successivamente sigillato: delle due una è posizionata a 5 mm dalla superficie interna del contenitore, l'altra a 10 mm di distanza dalla prima. Le coppie sono orientate in tre angoli diversi rispetto all'asse orizzontale della sezione, in posizione radiale, con angoli di -65° , 35° e 65° . Infine il posizionamento delle termocoppie è stato eseguito nella sola porzione destra della sezione, lasciando libera la parte opposta per visualizzare il



(a) Posizioni TC sezione ingresso

(b) Posizioni TC sezione uscita

Figura 3.8: Posizioni termocoppie

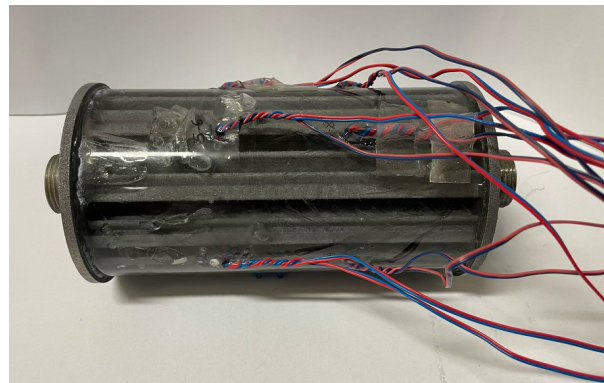


Figura 3.9: Provino con termocoppie

cambiamento di fase durante la prova. In figura [3.9](#) è possibile osservare il risultato del montaggio del tubo di plexiglass, del coperchio e delle 12 termocoppie.

In figura [3.10](#) una foto che mostra in dettaglio il posizionamento delle termocoppie all'interno del provino. Al fine di evitare fenomeni corrosivi sui fili di rame e costantana da parte della paraffina, la giunzione è stata stagnata; i cavi rivestiti, inoltre, sono stati twistati e incollati tra di loro, al fine di evitare perdite di PCM. L'incollaggio delle termocoppie è stato

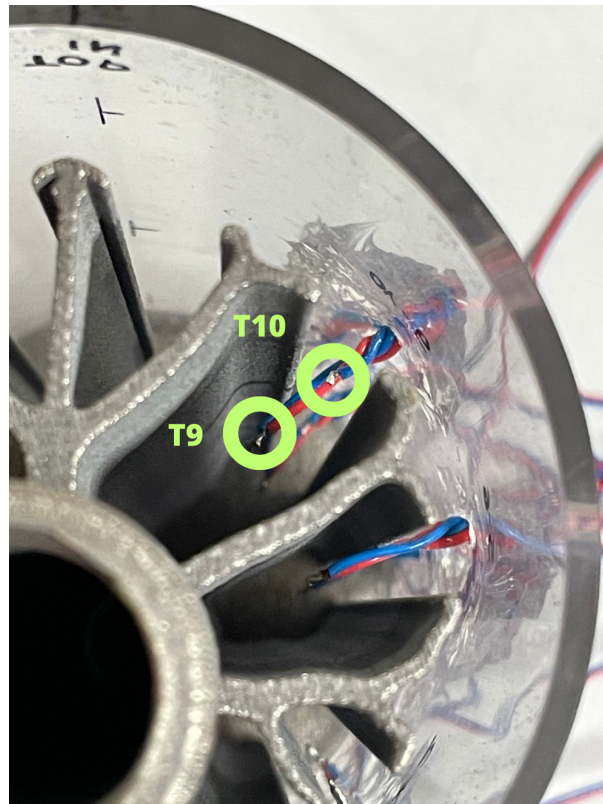


Figura 3.10: Dettaglio di due termocoppie

eseguito con colla bi-componente; il tutto poi è stato coperto da uno strato di silicone per sigillare il sistema.

3.3 PCM utilizzato

Per le prove di laboratorio è stata utilizzata la paraffina RUBITHERM RT21HC, con temperatura di cambio fase intorno ai 21°C. La scelta di tale PCM è stata dettata dalla necessità di condurre le prove limitando al massimo le perdite di calore verso l'ambiente, considerata la mancanza di uno strato di isolante intorno al dispositivo (che non avrebbe permesso la documentazione foto/video delle prove). Il produttore dichiara che le misure di capacità termica sono condotte mediante un calorimetro a 3 layer. Nel caso dei PCM tale dispositivo di misura è da preferire al calorimetro

¹Il produttore dichiara la capacità di storage termico in un range di temperatura che va da 15°C a 28°C, come combinazione di calore sensibile e calore latente

Proprietà	Valore	Unità di misura
Range fusione	20-23	°C
Range solidificazione	21-19	°C
Capacità di storage termico ^[1]	190	kJ/kg
Calore specifico	2	kJ/(kg K)
Densità solido (15°C)	880	kg/m ³
Densità liquido (25°C)	770	kg/m ³
Conducibilità termica	0.2	W/(m K)
Espansione volumetrica	14	%
Flash point	140	°C
Max temperatura esercizio	45	°C

Tabella 3.1: Proprietà del PCM (dichiarate dal produttore [21])

differenziale a scansione, che usa un campione di materiale nettamente inferiore rispetto a quello a 3 layer. Questo tipo di misurazione permette inoltre di avere una misura della combinazione di calore sensibile e latente in un range di temperatura, tipicamente a step di 1°C. In figura 3.11 è

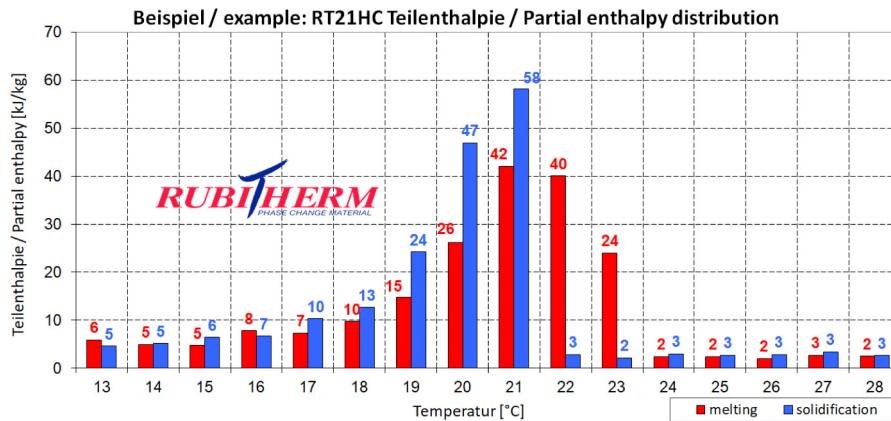


Figura 3.11: Distribuzione calore sensibile e latente per temperatura

rappresentato il grafico della distribuzione per temperatura della capacità termica del PCM considerando sia calore sensibile che calore latente. Risulta importante sottolineare che, soprattutto nel caso di prove numeriche CFD dove si analizza un campo di temperatura ristretto, non è possibile considerare il solo valore di capacità termica riportato in tabella 3.1, la quale riporta il dato in un range di temperatura di 13°C. Ulteriori ap-

profondimenti sono rimandati al capitolo dedicato alla prove numeriche condotte su Ansys Fluent.

3.4 In sintesi

In sintesi, i tre provini presentati possiedono diverse configurazioni: la superficie ad alette longitudinali (riferimento). Il provino Fillet2 ed eccentrico hanno caratteristiche simili, ma il secondo presenta un tubo spostato più in basso, per favorire la fusione del PCM in tale zona. Tutti i provini sono stati prodotti mediante stampa additiva, utilizzando un'apposita polvere della lega di alluminio AlSi10Mg; dato il processo di produzione è stato necessario condurre delle prove di conducibilità termica in diverse orientazioni dei piani di stampa ottenendo $\lambda = 132.3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ per l'orientazione verticale del provino e $\lambda = 112.9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ per la stampa orizzontale. La paraffina impiegata possiede una temperatura di cambio fase media di 21°C ed è prodotta dall'azienda Rubitherm. Per evitare dispersioni di calore verso l'ambiente le prove sperimentali sono state svolte all'interno di una camera climatica, posta a temperatura costante di 20°C . Ogni provino ospita 12 termocoppie di tipo T, suddivise in due sezioni radiali differenti.

Capitolo 4

Prove sperimentali

Introduzione

Il presente capitolo riporta le prove condotte e la discussione dei dati raccolti. Come già accennato i provini testati sono tre: "Straight", "Fillet2" ed "Eccentrico".

Temperatura	Portata [l/min]	Nome prova
ΔT 2.5	10	A
ΔT 5	1.2	B _{1.2}
	2	B ₂
	6	B ₆
	10	B ₁₀
ΔT 10	1.2	C _{1.2}
	2	C ₂
	6	C ₆
	10	C ₁₀

Tabella 4.1: Tabella esecuzione prove

Le prove riportate in tabella [4.1](#) sono state eseguite per ognuno dei tre provini, distinguendo, per ognuna, fase di carica e fase di scarica. Le prove sono state condotte a 3 diverse differenze di temperatura tra l'acqua in ingresso e la temperatura nominale di fusione ΔT 2.5 K, 5 K e 10 K. I criteri di inizio e fine prova risultano essere gli stessi per prove a ΔT 5 e ΔT 10, ma non per ΔT 2.5 per la quale, data la lentezza del cambiamento di fase dovuta alla minima differenza di temperatura si è adottato un criterio differente.

Con riferimento alla tabella [4.1](#) ci si riferisce con la dicitura ΔT a una differenza di temperatura per carica e scarica, rispetto alla temperatura nominale di fusione posta a 20.5°C , quindi:

- ΔT 2.5:
 1. temperatura acqua per carica a 23°C
 2. temperatura acqua per scarica a 18°C
- ΔT 5:
 1. temperatura acqua per carica a 25.5°C
 2. temperatura acqua per scarica a 15.5°C
- ΔT 10:
 1. temperatura acqua per carica a 30.5°C
 2. temperatura acqua per scarica a 10.5°C

Per valutare quindi i tempi di fusione e solidificazione in maniera oggettiva, sono stati scelti dei parametri di inizio e fine prova. Per la fusione (carica del PCM) la prova inizia quando la temperatura media delle 12 termocoppie è pari a 17°C e finisce quando ogni punto di valutazione risulta essere sopra i 24°C . Per quanto riguarda la solidificazione, si dà inizio alla prova quando la temperatura media del PCM solido è pari a 23°C e si considera conclusa quando ogni termocoppia ha temperatura inferiore alla soglia posta a 18.5°C . I criteri di inizio e fine sono diversi per carica e scarica a causa del comportamento del PCM che varia a seconda della fase in cui ci si trova, di solidificazione o fusione.

Per ogni singola prova verranno riportati i grafici di confronto tra provini con la temperatura media rispetto al tempo. Per alcune prove verranno inoltre presentati i grafici con le temperature delle 12 termocoppie installate per ogni provino.

4.1 Prove ΔT 5°C

In questa sezione verranno presentati tutti i confronti riguardanti la prova a ΔT 5°C. In figura 4.1 è possibile osservare il grafico delle temperature medie, della prova di carica a 1.2 l/min per i tre diversi provini; in figura 4.2 invece, la medesima prova ma per la fase di scarica.

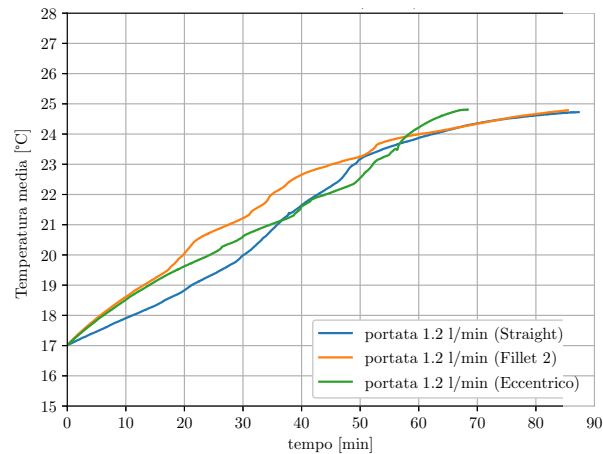


Figura 4.1: Carica ΔT 5°C 1.2 l/min

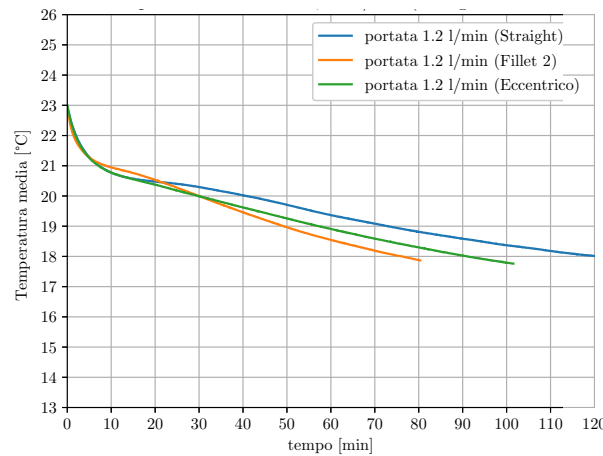


Figura 4.2: Scarica ΔT 5°C 1.2 l/min

In prova di fusione il provino ad alette dritte fa registrare un tempo di 87 min, il provino Fillet2 86 min, l'eccentrico invece 69 min. Da questa prova quindi si registra una diminuzione per il tempo di fusione del PCM

del 21.7% del provino eccentrico rispetto al provino di riferimento. La differenza tra tempi di carica tra scambiatore ad alette dritte e fillet2 risulta essere di due punti percentuali a favore della prima superficie ottimizzata. In figura 4.2, si riportano i dati per la prova di solidificazione del PCM. Il provino ad alette dritte registra un tempo necessario a portare la temperatura media del materiale a cambiamento di fase sotto i 18.5°C, pari a 119 min. Il Fillet2, con un tempo di 81 min, permette di contrarre i tempi di scarica del 33.7%; il provino eccentrico fa registrare un tempo di 102 min.

In figura 4.3 e 4.4 si riportano rispettivamente carica e scarica a 2l/min.

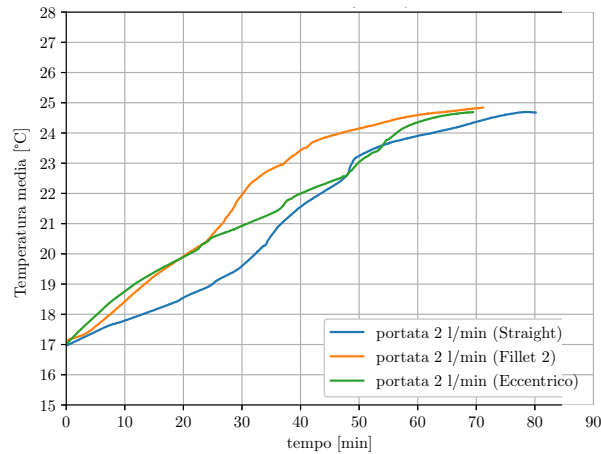


Figura 4.3: Carica ΔT 5°C 2 l/min

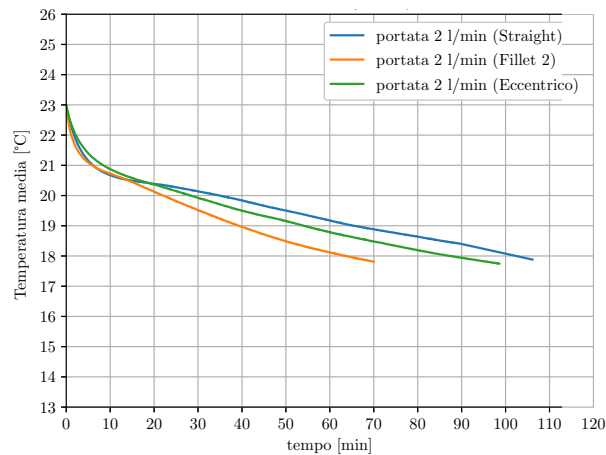


Figura 4.4: Scarica ΔT 5°C 2 l/min

La superficie ad alette dritte porta la temperatura media del PCM a 24°C in 80 min, quella del Fillet2 in 71 min, per l'eccentrico si ferma a 69.45 min. In questo caso la prestazioni del Fillet2 e della seconda superficie ottimizzata risultano essere molto simili, con una riduzione media dei tempi di carica del 12%.

Per quanto concerne la prova di solidificazione, in figura 4.4 si nota ancora una sostanziale riduzione dei tempi. La miglior prestazione è sicuramente offerta dallo scambiatore Fillet2, il quale ferma il cronometro dopo 70 min, impiegando il 34% in meno rispetto allo scambiatore di riferimento, che segna un tempo pari a 106 min. Lo scambiatore a conformazione eccentrica, con un miglioramento pari al 7%, scarica l'accumulo latente in 98 min.

In figura 4.5 e 4.6 si riportano le prove di carica e scarica con portata di 6 l/min.

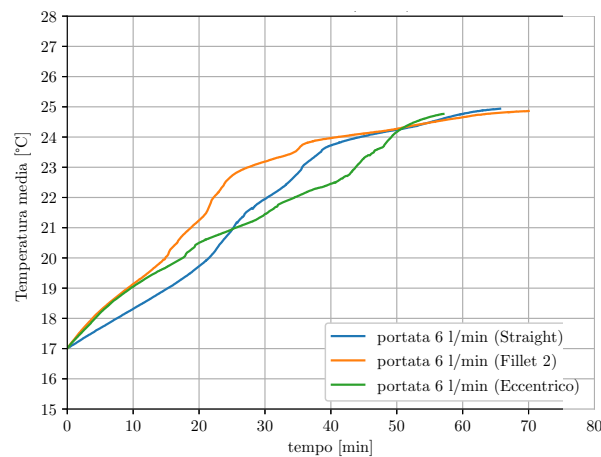


Figura 4.5: Carica ΔT 5°C 6 l/min

Nel test di fusione in questo caso il provino più lento a far raggiungere la temperatura media al PCM di 24°C è stato il Fillet2, facendo registrare il fine prova a 70 min, contro i 66 del provino di riferimento. Il provino eccentrico risulta essere ancora il migliore, completando la prova in 57 min. Segue invece il trend delle prove precedenti il test di scarica in figura 4.6, con il provino Fillet2 che porta il PCM alla temperatura media di 18.5°C in 64 min, con una riduzione percentuale del tempo di scarica del 41.1%.

In figura 4.7 e 4.8 possono essere visualizzate le prove di carica e scarica per portate dell'acqua pari a 10 l/min, sempre con temperatura media.

Osservando la prova di carica si nota che il provino più lento a portare la temperatura media del PCM a 24°C è il Fillet2. Con un tempo pari a

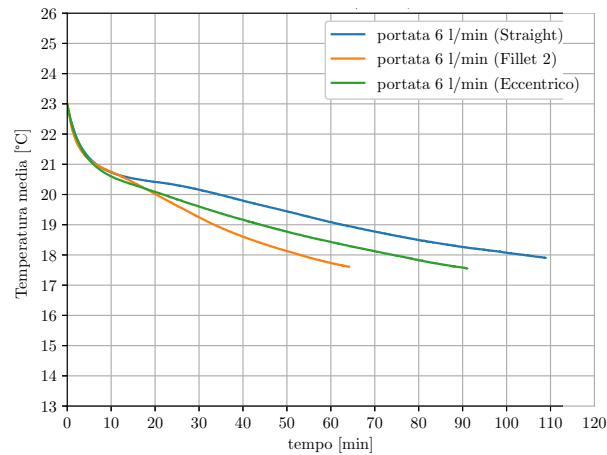


Figura 4.6: Scarica ΔT 5°C 6 l/min

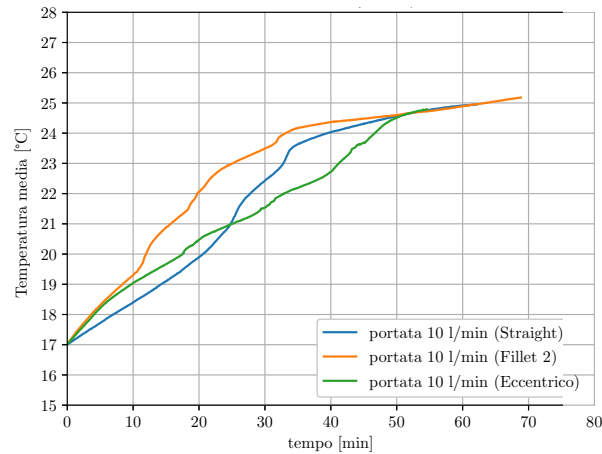
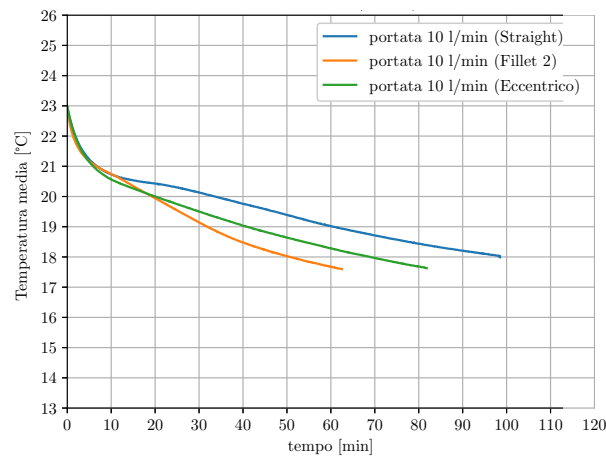


Figura 4.7: Carica ΔT 5°C 10 l/min

68.9 min, risulta essere circa il 10% più lento rispetto al provino standard ad alette dritte, che porta a compimento la prova con un tempo pari a 62 min. Questo comportamento può essere associato all'inibizione dei moti convettivi da parte delle alette; il PCM fuso vicino al tubo dove scorre l'acqua tende a rimanere confinato nella parte centrale assorbendo grandi quantità di calore. Tale dinamica porta il PCM più esterno (soprattutto nella parte inferiore dello scambiatore) a rimanere solido più a lungo, avendo difficoltà ad assorbire calore dalla frazione liquida calda, la quale, nel frattempo, si è spostata verso la parte alta dell'accumulo. Il fenomeno in atto verrà comunque analizzato in maggiore dettaglio nella sezione suc-

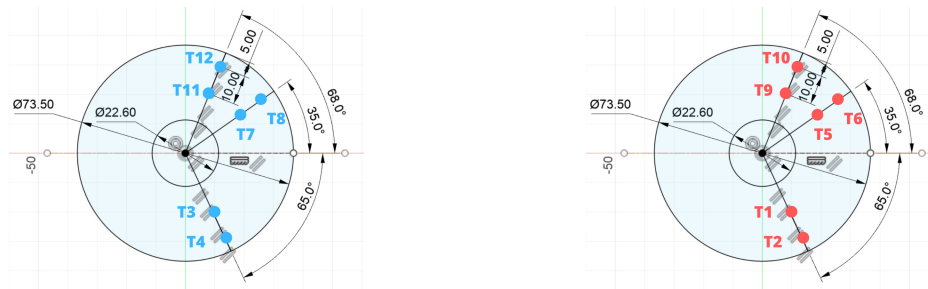
Figura 4.8: Scarica ΔT 5°C 10 l/min

cessiva, dove verranno presentati per questa prova i grafici dell'andamento della temperatura per ogni singola termocoppia.

Per quanto riguarda la fase di scarica in figura [4.8](#) si conferma nuovamente il comportamento visto nelle prove precedenti, con lo scambiatore ottimizzato simmetrico che, con un tempo 62 min, risulta sempre più rapido rispetto agli altri.

4.1.1 Distribuzione della temperatura a 6 l/min

In questa sezione si riportano i grafici delle 12 termocoppie, sia per fase di carica che per fase di scarica, della prova a portata 6 l/min. I 12 punti di valutazione sono visibili in figura [4.9](#).



(a) Posizioni TC sezione ingresso

(b) Posizioni TC sezione uscita

Figura 4.9: Posizioni termocoppie

Dai grafici nelle figure [4.10](#) e [4.11](#) è possibile osservare l'andamento delle temperature nei 12 punti del dominio. Da questi grafici si nota un comportamento comune tra provino Straight e Fillet2: il PCM posto nella parte alta (termocoppie in figura [4.11c](#), [4.11d](#), [4.11e](#), [4.11f](#)) riceve prima il calore rispetto alle altre zone e quindi tende a cambiare di fase più rapidamente. Il Fillet2, sempre nella zona superiore, risulta essere notevolmente più veloce rispetto al caso di riferimento, ma viene fortemente penalizzato nella parte inferiore. Se si osservano infatti le figure [4.10a](#), [4.10b](#), [4.10c](#), [4.10d](#) lo scambiatore Fillet2 impiega circa 10 minuti in più a fondere il PCM in tale zona. La conformazione del provino eccentrico permette invece di fondere il PCM nella parte inferiore velocemente. La mancanza di superficie di scambio nella parte superiore viene compensata dai moti convettivi, che portano il PCM fuso a salire, determinando aumenti repentini di temperatura (si veda per esempio la termocoppia 12 in figura [4.11f](#) intorno ai 45 minuti).

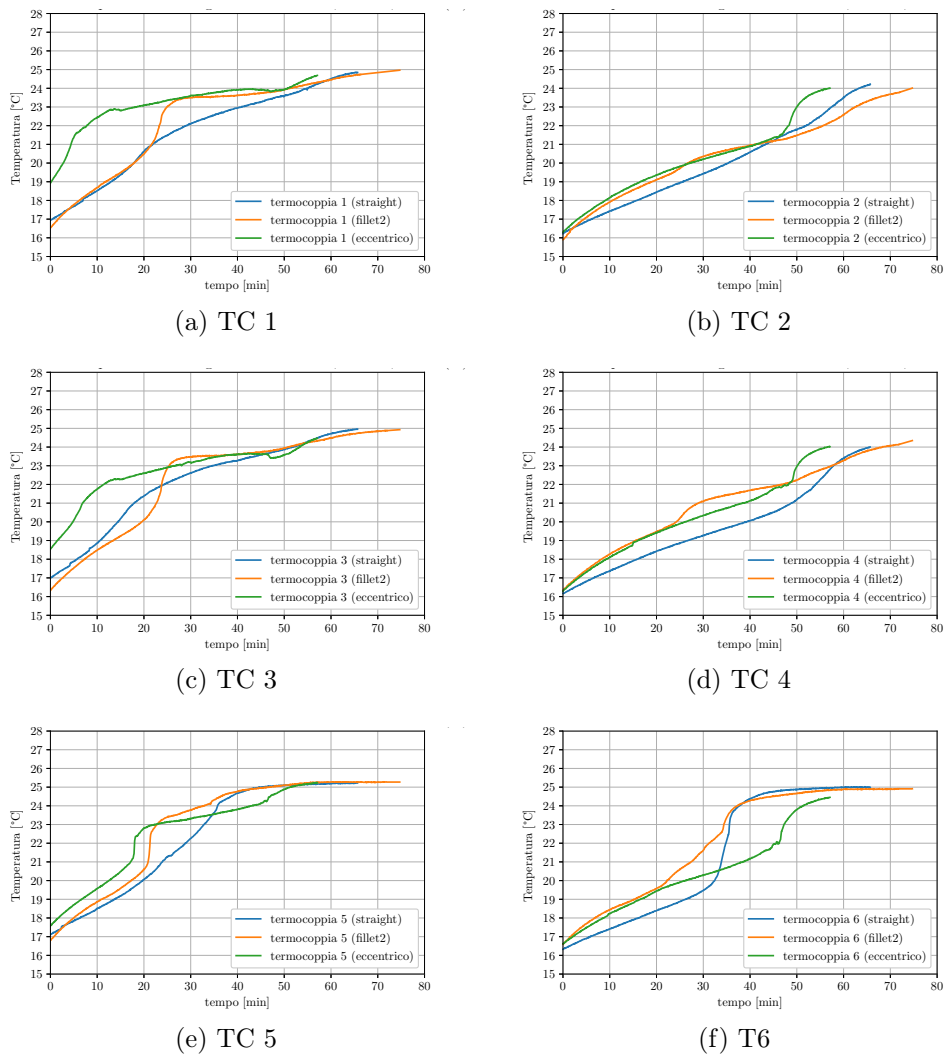


Figura 4.10: Grafici TC 1-6 carica

Di seguito, nelle figure [4.12](#) e [4.13](#), le temperature nei 12 punti di misurazione per la prova di scarica a 6 l/min.

Dai grafici è possibile in primo luogo notare che i provini Straight e Fillet2 portano a solidificazione del PCM in maniera omogenea: non risultano infatti presenti sensibili differenze di temperatura nel PCM nei vari punti di misurazione. Il provino eccentrico invece, favorisce fortemente la solidificazione rapida nella zona inferiore (grafici [4.12a](#), [4.12b](#), [4.12c](#) e [4.12d](#)), ma risulta fortemente penalizzato nella parte superiore, dove la mancanza di superficie di scambio rende più lento il processo. Dai grafici in figura [4.11d](#) e [4.11f](#) si nota che le temperature nei suddetti punti (più alti e più

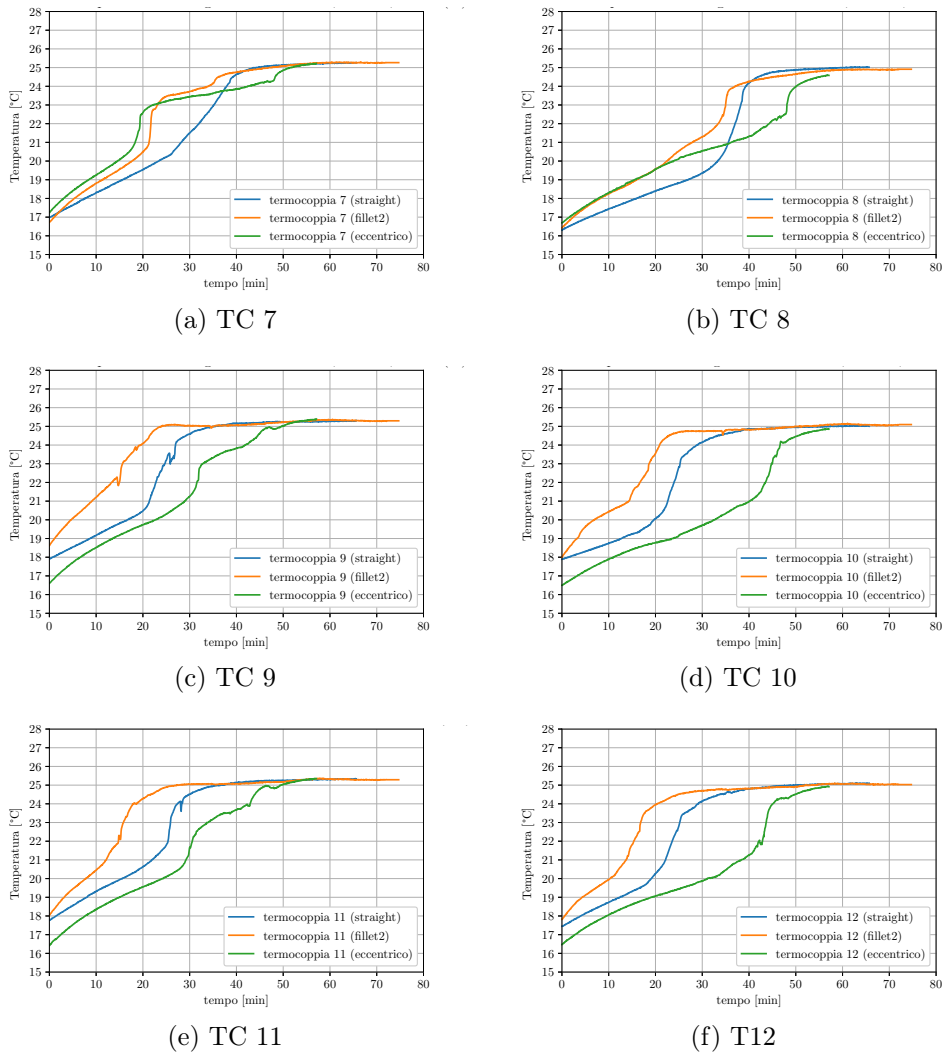


Figura 4.11: Grafici TC 7-12 carica

vicini al contenitore di plaxiglass), siano più alte anche rispetto al provino ad alette dritte; nel caso del provino eccentrico è proprio la termocoppia T12 a raggiungere per ultima la soglia dei 18.5°C .

Si riportano di seguito i tempi di ciclo completo (fusione + solidificazione) per la prova a 6 l/min :

- provino Straight: 175 minuti
- provino Fillet2: 134 minuti
- provino eccentrico: 148 minuti

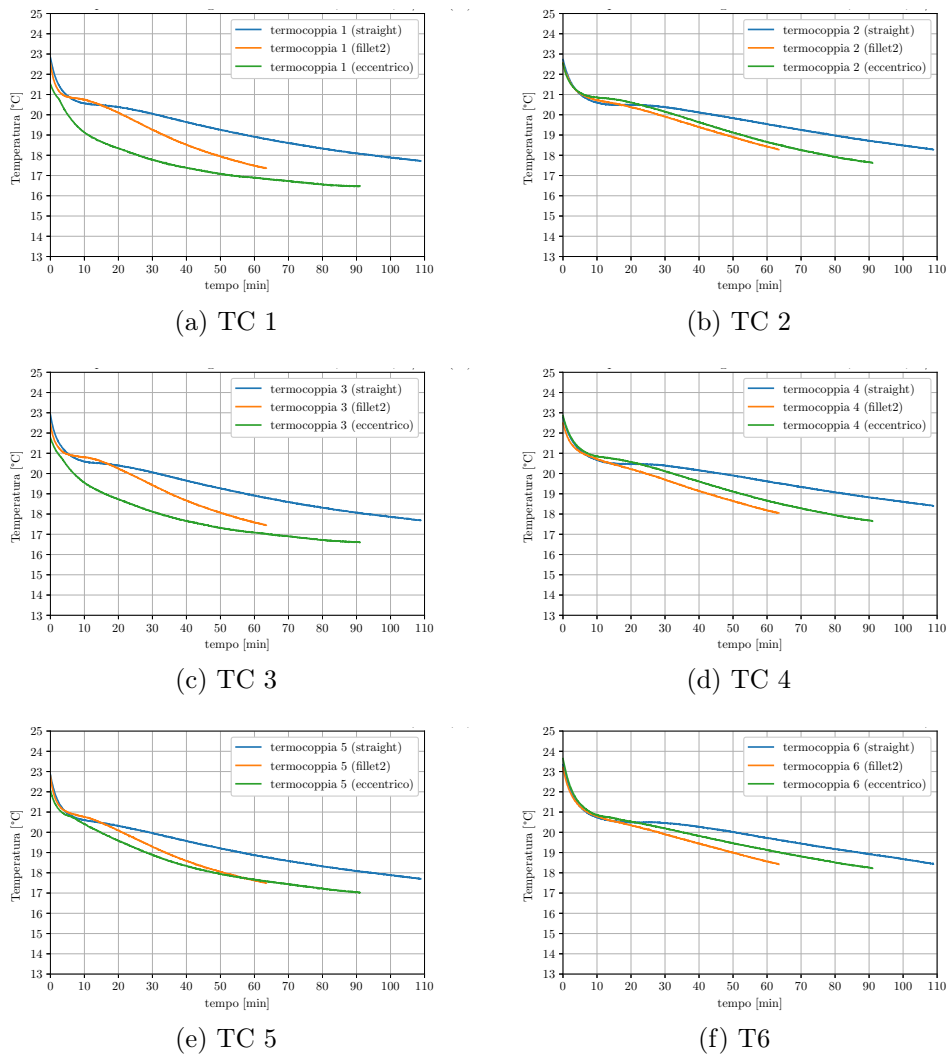


Figura 4.12: Grafici TC 1-6 carica

Considerando il tempo di ciclo totale è possibile affermare che il provino Fillet2 risulta essere il più performante, compensando tempi di carica leggermente più lunghi rispetto al provino di riferimento con elevate prestazioni in fase di solidificazione.

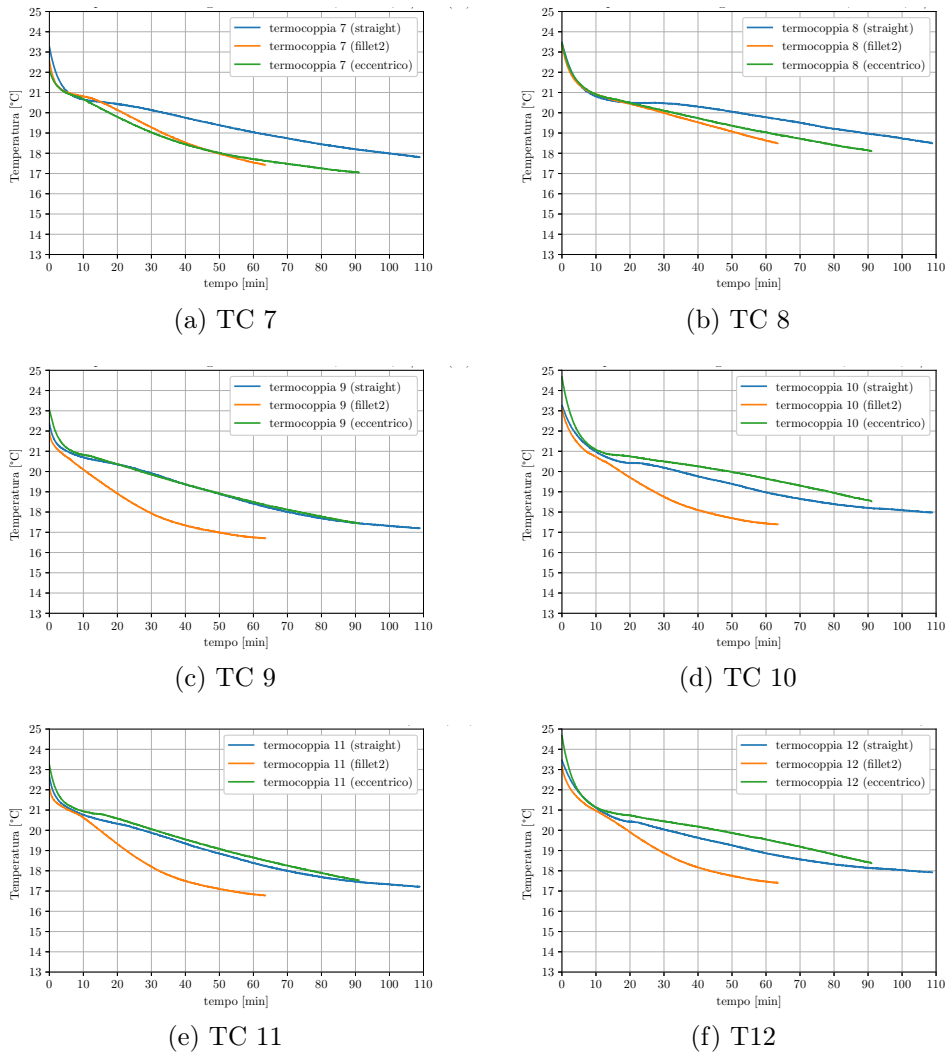
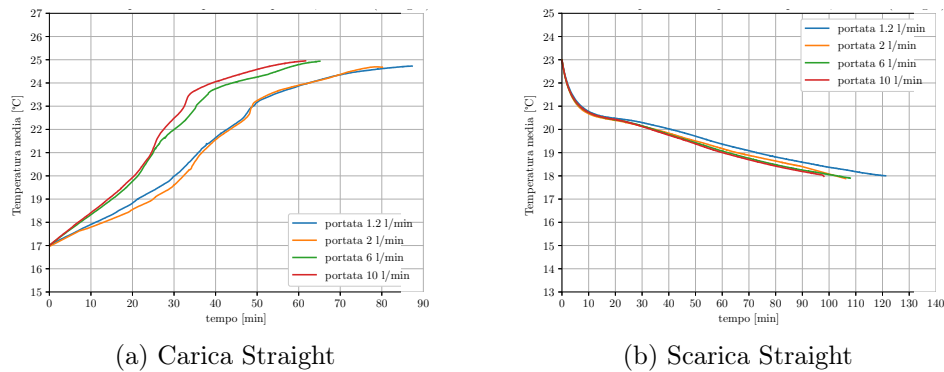


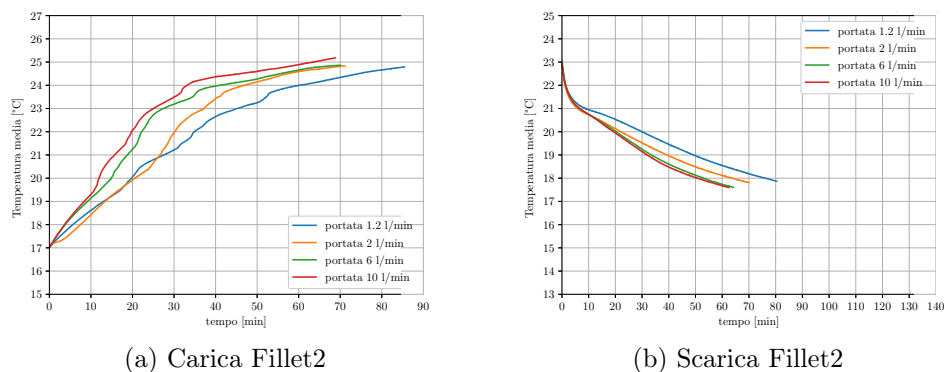
Figura 4.13: Grafici TC 7-12 carica

4.1.2 Influenza della portata

In questa sezione verrà presentata l'indagine condotta sull'influenza della portata, per fasi di solidificazione e fusione, nei tre provini testati. Osservando la fase di carica in figura [4.14a](#) si può subito notare che la portata d'acqua che scorre all'interno della tubazione dell'accumulo ha un effetto sui tempi di carica e scarica del PCM. In particolare: la prova a 1.2 l/min termina dopo 87 minuti mentre quella a portata maggiore (10 l/min) invece, dopo 62, il che determina una differenza del 28%. In tale fase comunque oltre i 6 l/min l'effetto della portata tende a non essere più evidente: pas-

Figura 4.14: Confronto portate ΔT 5°C Straight

sando dai 6 l/min a 10 l/min si ha una diminuzione di appena il 5 %, a fronte di una portata quasi raddoppiata. Osservando invece la fase di scarica (in figura 4.14b) le temperature risultano essere molto più vicine tra di loro durante la prova; la differenza percentuale in termini di tempo tra prova a 1.2 l/min e 10 l/min risulta essere del 18.7%. In solidificazione è possibile affermare che la portata non determina effetti rilevanti oltre i 2 l/min.

Figura 4.15: Confronto portate ΔT 5°C Fillet2

In figura 4.15 si osservano i dati di comparazione per le quattro differenti portate, in fase di carica (grafico 4.15a) e fase di scarica (grafico 4.15b) per la superficie ottimizzata Fillet2. Per questo scambiatore in fase di carica è possibile notare come la portata non abbia nessun impatto significativo se aumentata oltre i 2 l/min; se compariamo infatti i 2 l/min con i 10 l/min, la prova a portata maggiore termina appena 2.2 minuti prima rispetto all'altra (miglioramento del 3%). Per quanto riguarda la fase

di solidificazione è possibile affermare che la portata d'acqua che scorre all'interno del tubo di diametro 19.6 mm non comporta cambiamenti oltre i 6 l/min. La differenza tra prova a 1.2 l/min e 10 l/min non comporta sostanziali differenze: a fronte di una portata 8 volte maggiore si registra un tempo di carica del 22.2% minore.

Si conclude la sezione presentando il medesimo confronto per il provino eccentrico in nei grafici [4.16a](#) e [4.16b](#). In questo caso è distinguibile, sia

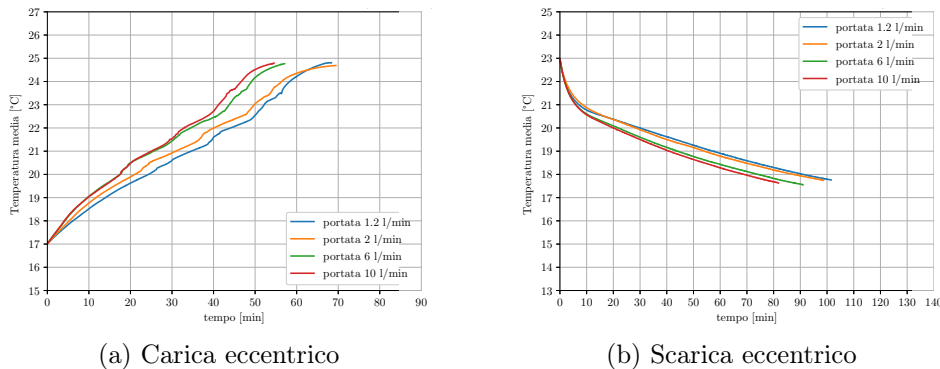
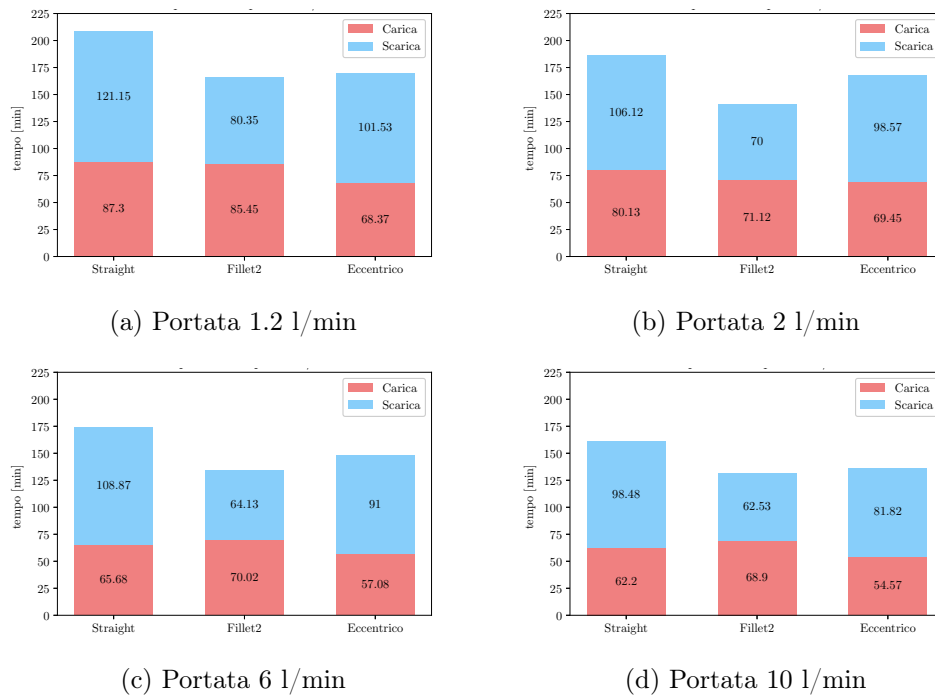


Figura 4.16: Confronto portate ΔT 5°C eccentrico

per la fusione che la solidificazione, che la portata diventa indifferente nei confronti dei tempi di fine prova dopo i 2 l/min. I dati suggeriscono che la fase di fusione può essere velocizzata in tutti i provini se si aumenta la portata e di conseguenza il coefficiente di scambio termico; ciò non può dirsi però per la fase di scarica. Tale differenza può essere imputata principalmente all'instaurazione dei moti convettivi da parte di coefficienti di scambio maggiori; i rimescolamenti non possono essere presenti nella fase di solidificazione, spiegando in parte anche i maggiori tempi che questa fase di prova richiede rispetto all'altra.

Si riportano per concludere in figura [4.17](#), gli istogrammi con i tempi di ciclo completo (carica + scarica) per ogni portata della prova a ΔT 5°C.

Figura 4.17: Tempi totali di ciclo ΔT 5°C

4.2 Prove ΔT 10°C

Nella presente sezione verranno presentati e commentati tutti i dati relativi alle prove svolte sui tre provini con ΔT 10°C, quindi con temperatura dell'acqua per fase di fusione a 30.5° e per fase di solidificazione a 10.5°C.

Nella fase di carica (grafico 4.18) il provino che completa la prova per primo risulta essere quello eccentrico, con un tempo pari a 36 min; il più lento risulta essere il Fillet2 che termina la prova in 41 minuti, un tempo del 12% maggiore rispetto alla superficie ad alette dritte. Per quanto concerne la prova di scarica, visibile nel grafico 4.19, gli andamenti sono del tutto confrontabili alla prova con acqua a 15.5°C. Si conferma il Fillet2 come il provino più performante, che termina la prova in 39 minuti, 19 minuti prima rispetto al provino con alette longitudinali (miglioramento del 32.44%). L'accumulo con tubo eccentrico, infine, termina in 52 minuti. Il tempo totale di ciclo per il provino di riferimento è di 95 minuti, per il Fillet2 di 80 minuti mentre per l'eccentrico è pari a 88 minuti. La superficie con tubo centrale ottenuta mediante ottimizzazione topologica si conferma anche in questo caso la migliore rispetto al ciclo carica + scarica nonostante

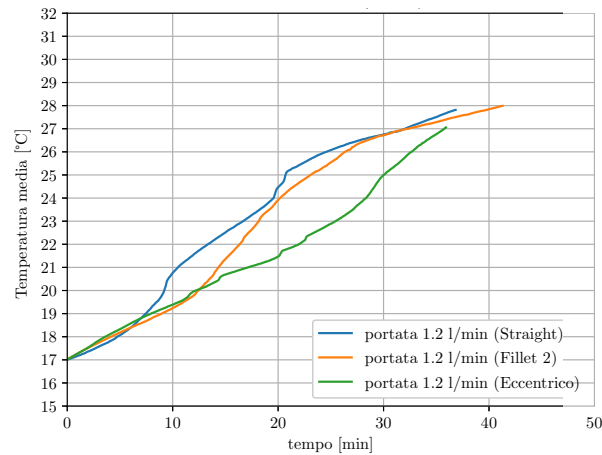


Figura 4.18: Carica 1.2 l/min

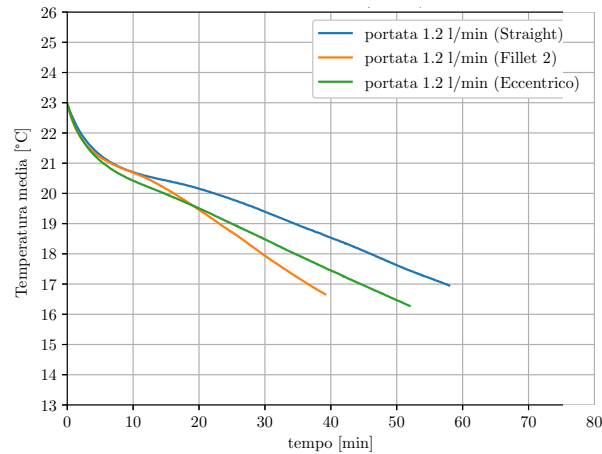


Figura 4.19: Scarica 1.2 l/min

il peggior tempo realizzato nella fase di fusione del PCM.

Si riportano nelle immagini [4.20](#) e [4.21](#) gli andamenti della temperatura media di carica e scarica nella prova a 2 l/min.

La temperatura media rilevata sui 12 punti di misurazione è del tutto comparabile a quella nella prova a 1.2 l/min. Il provino Fillet2 si conferma il più lento a portare a termine la prova di fusione e con un tempo di 38 min impiega 4 minuti in più rispetto allo scambiatore ad alette dritte. Lo scambiatore eccentrico in questo caso, con il fine prova per portare tutto il PCM oltre i 24°C di 31.37 minuti, risulta essere il più veloce dei tre. Nella prova di scarica (grafico [4.21](#)) invece il Fillet2 si conferma la superficie

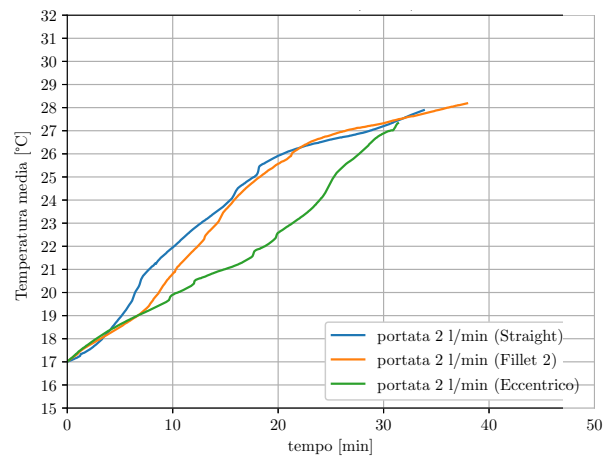


Figura 4.20: Carica 2 l/min

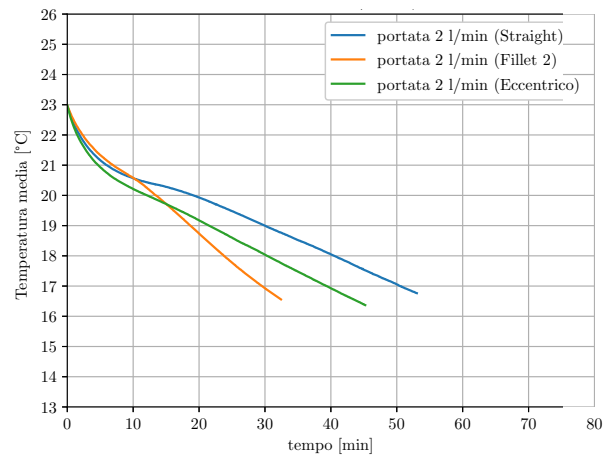


Figura 4.21: Scarica 2 l/min

estesa più performante, terminando la prova in 32 minuti, il 38.9% in meno rispetto al provino di riferimento. Il provino con tubo eccentrico termina la prova in 45 minuti.

In figura [4.22](#) e [4.23](#) si riportano, rispettivamente, i grafici per fusione e solidificazione per la prova a portata dell'acqua a 6 l/min.

Si presenta nuovamente la situazione in cui una delle superfici ottenuta mediante ottimizzazione topologica ottiene performance peggiori rispetto alla classica superficie alettata a sezione rettangolare. Scendendo nel dettaglio dei tempi di carica dell'accumulo in questa prova si nota che: sono necessari 30 minuti per il provino Straight, 35 minuti per Fillet2 e 29 mi-

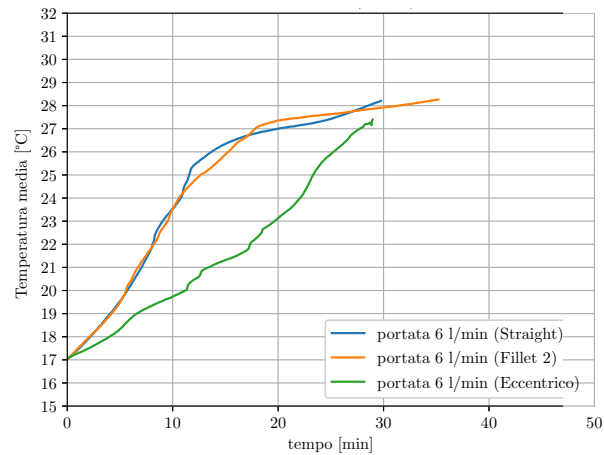


Figura 4.22: Carica 6 l/min

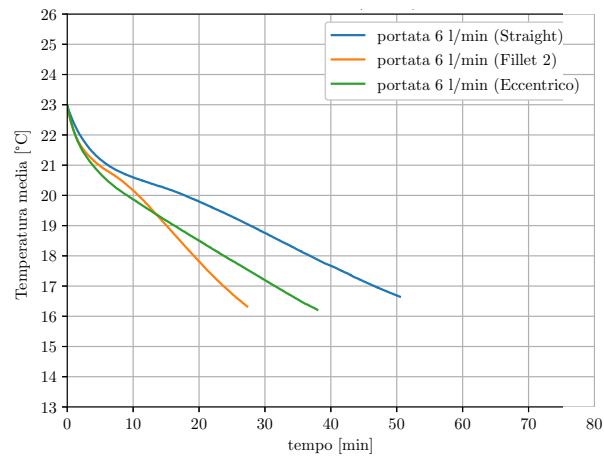


Figura 4.23: Scarica 6 l/min

nuti per l'eccentrico.

La fase di fusione, nel grafico in figura [4.23](#) mostra nuovamente le buone prestazioni della superficie ottimizzata con tubo centrale, che termina la prova in 27 minuti, contro i 50 minuti della superficie ad alette dritte. In questa prova è stata registrata la maggior differenza tra due tempi di scarica: il Fillet2 risulta infatti essere il 45.89% più veloce rispetto al provino di riferimento.

Per quanto riguarda le prove a 10 l/min è possibile osservarne i grafici nelle figure [4.24](#) (fase di carica) e [4.25](#) (fase di scarica).

Si conferma nuovamente il Fillet2 a registrare il più lento a portare

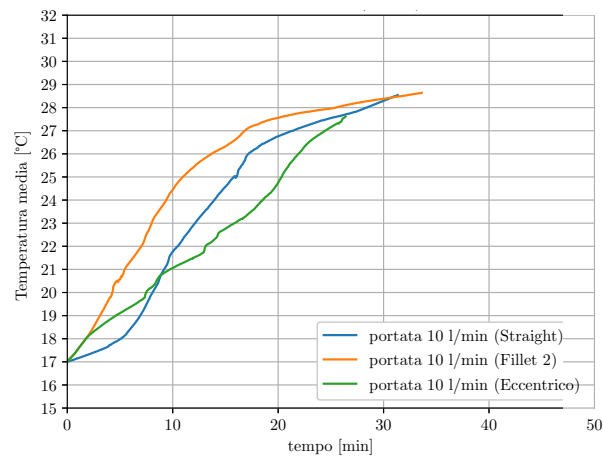


Figura 4.24: Carica 10 l/min

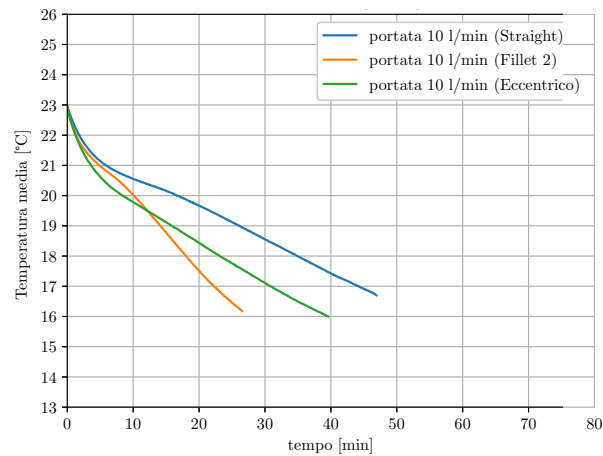


Figura 4.25: Scarica 10 l/min

tutto il PCM a 24°C (34 minuti), mentre per la prima volta il provino eccentrico, con un tempo pari a 26 minuti, riesce a consolidare uno scarico consistente rispetto al provino di riferimento, il quale termina dopo 32 minuti; la differenza percentuale tra i due è pari al 15.8%. Nel test di solidificazione il Fillet2, terminando con un tempo di 26 minuti, risulta il provino che permette la solidificazione completa del PCM più rapidamente rispetto agli altri. Provino ad alette dritte ed eccentrico terminano rispettivamente dopo 47 min e 40 min.

Per avere una chiara comparazione delle prestazioni tra le varie prove si andrà ora a valutare il tempo di ciclo completo per tutte le portate. Si

riportano quindi i seguenti istogrammi, per tutte le portate, in figura [4.26](#). Osservando i grafici è possibile notare che in generale, come visto prece-

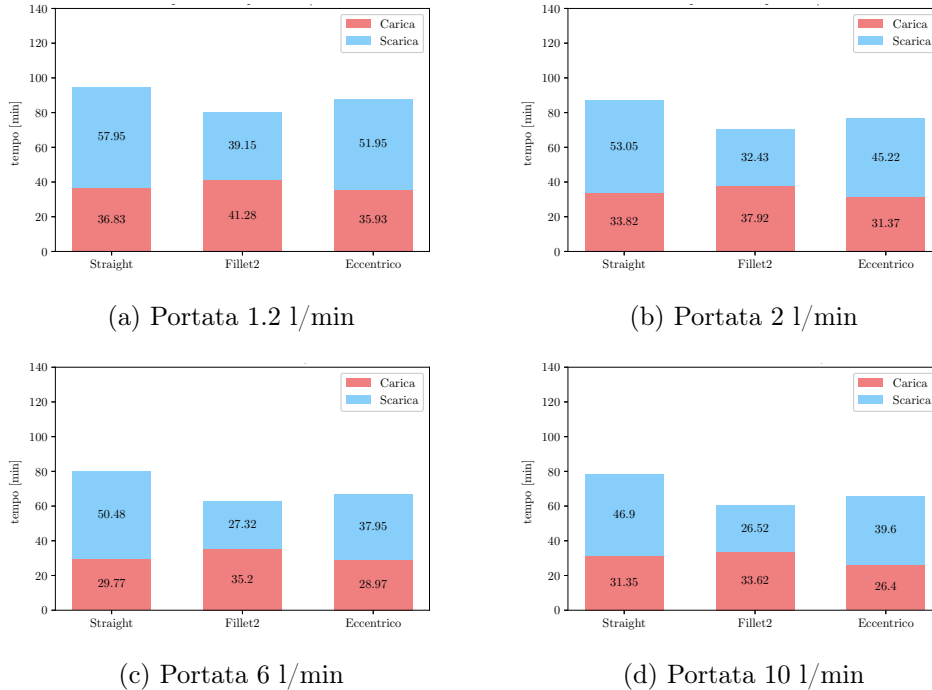


Figura 4.26: Tempi totali di ciclo ΔT 10°C

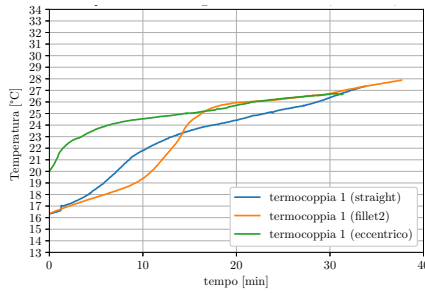
dentemente, il Fillet2 registra i peggiori tempi in fase di fusione del PCM, ma al contempo concede una solidificazione nettamente più rapida rispetto agli altri. Queste ottime performance permettono a tale superficie di avere tempi di ciclo sempre minori rispetto agli altri due; il risparmio in termini di tempo è nella prova con portata dell'acqua a 10 l/min, dove il tempo ciclo totale risulta essere il 23.15% minore rispetto alla superficie ad alette dritte. Il provino eccentrico risulta invece essere sempre il più veloce in fase di carica, seppur di pochissimi minuti, rispetto al provino di riferimento; in fase di scarica questo si posiziona al secondo posto, dietro al Fillet2. Analizzando il ciclo completo il provino eccentrico si classifica in ogni prova al secondo posto; il test migliore rispetto al provino ad alette dritte si registra per la prova a 6 l/min, dove il ciclo risulta durare il 16.6% in meno.

Le ottime prestazioni della superficie ottenuta mediante ottimizzazione topologica in fase di scarica del PCM (sia per le prove appena presentate con temperatura dell'acqua a 10.5°C sia per le precedenti a 15.5°C), sono da associare alle diramazioni della sezione (visibile in figura [3.1b](#)). La

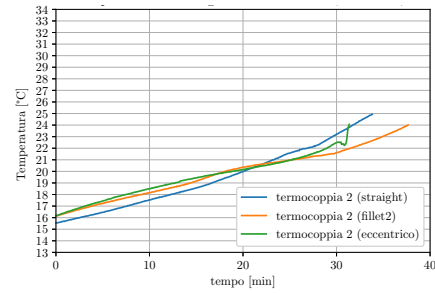
conformazione delle alette, più sottili ed estese rispetto a quelle a sezione rettangolare, permettono di assorbire calore dalla frazione liquida di PCM in maniera più efficiente, raggiungendo più punti del liquido. La fase di solidificazione infatti, non potendo contare sui moti convettivi del liquido, che vengono via via bloccati durante la prova, si basa sulla conduzione del calore attraverso le superfici di scambio, premiando quindi fortemente il provino Fillet2. Considerando invece la fase di fusione il provino con tali diramazioni risulta spesso essere il peggiore. Tale comportamento è nuovamente imputabile ai moti convettivi della fase liquida: è probabile che le biforcazioni delle alette nelle parti più alte tendano a confinare la frazione liquida surriscaldata. A tal proposito, al fine di comprendere più a fondo tale comportamento, nella prossima sezione verranno presentati i grafici delle singole termocoppie per due portate differenti.

4.2.1 Distribuzione della temperatura a 2 l/min

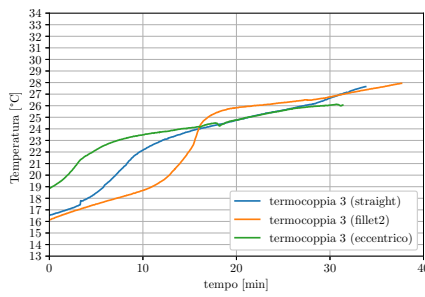
Nella presente sezione verranno presentati i grafici delle singole termocoppie per la prova a portata d'acqua a 2 l/min.



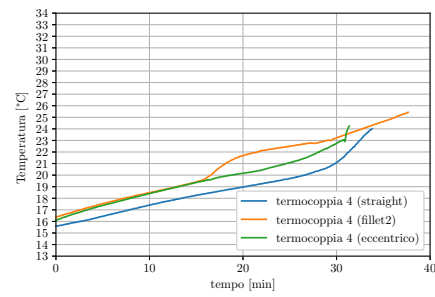
(a) TC 1



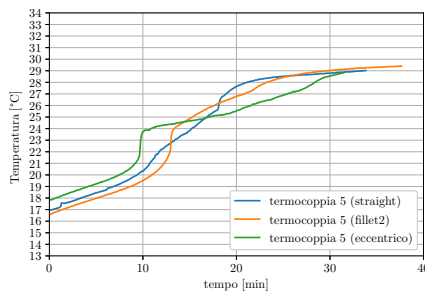
(b) TC 2



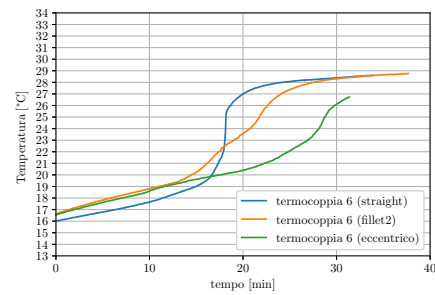
(c) TC 3



(d) TC 4



(e) TC 5



(f) T6

Figura 4.27: Grafici TC 1-6 carica

Nella fase di carica a 2 l/min tutti i provini hanno difficoltà a fondere il PCM nella zona inferiore dell'accumulo. Osservando il grafico [4.27b](#) si nota infatti che tale punto è l'ultimo a rilevare i 24°C, temperatura da raggiungere per terminare la prova, sia per il Fillet2 che per l'eccentrico. Per il provino Straight è comunque la TC4 a rappresentare la zona più critica, confermando la difficoltà degli accumuli a fondere il PCM in tale

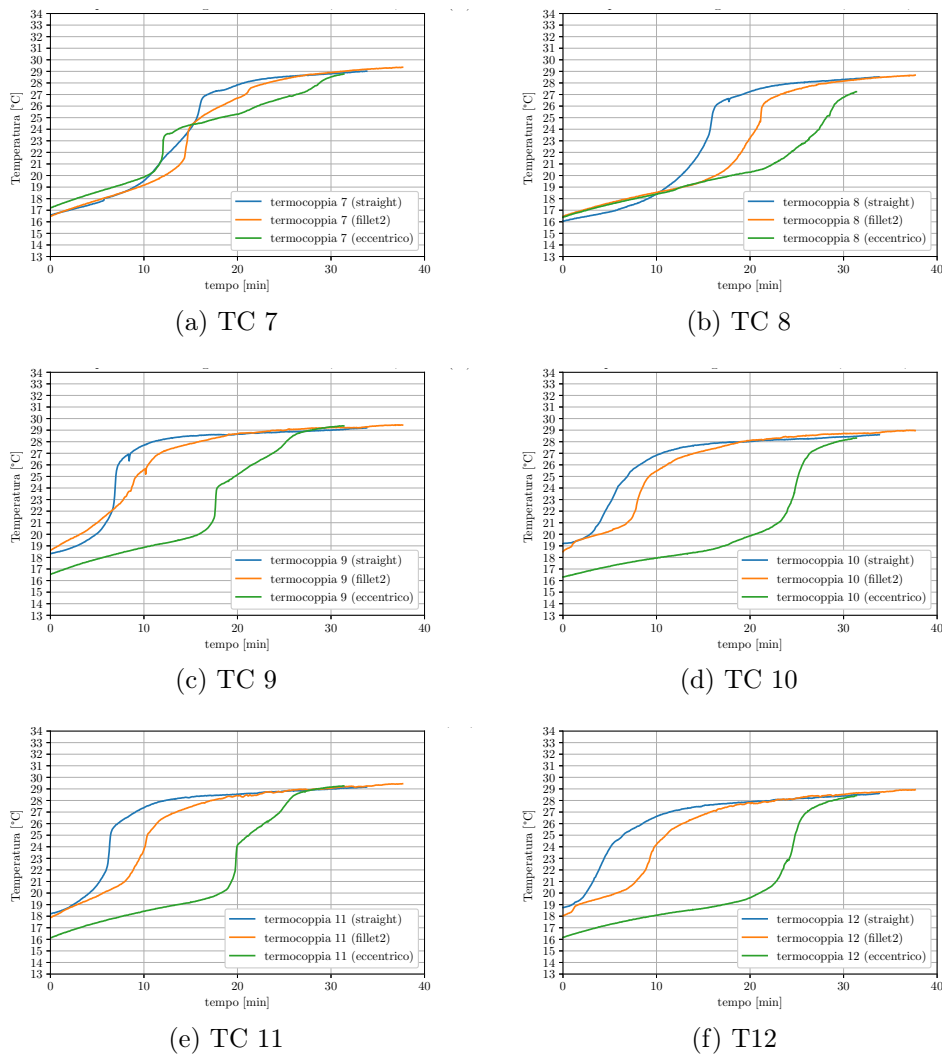
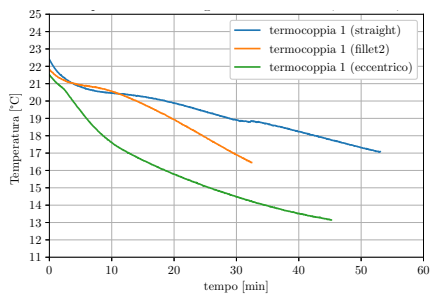


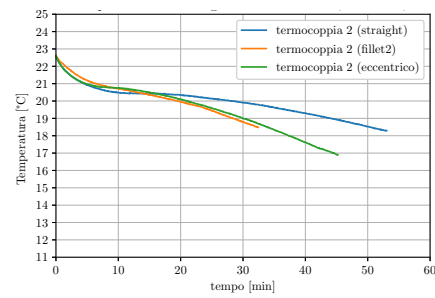
Figura 4.28: Grafici TC 7-12 carica

zona. Risulta importante rilevare che posizionare il tubo nella parte bassa dell'accumulo porta in questo caso benefici limitati. La differenza in termini di tempo, da provino ad alette dritte ed eccentrico, è di circa 3 minuti considerando il fine prova per singola zona. Questo risultato porta a concludere che una superficie estesa asimmetrica, con la zona più calda fortemente orientata verso il basso non comporta miglioramenti rilevanti alle performance dell'accumulo.

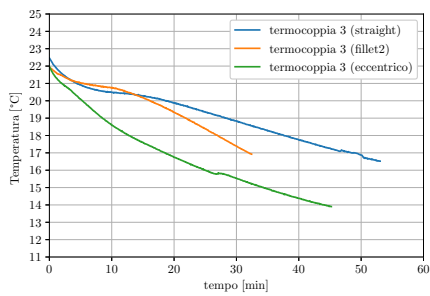
Nei blocchi [4.29](#) e [4.30](#) vengono presentati i grafici per la prova di scarica.



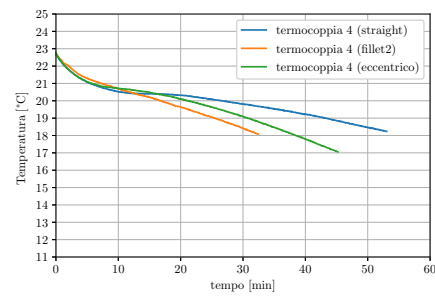
(a) TC 1



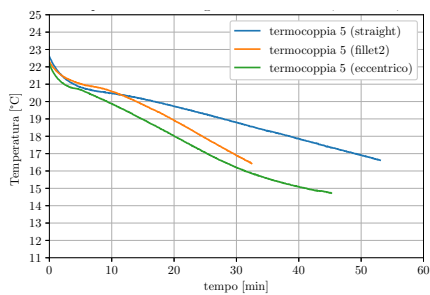
(b) TC 2



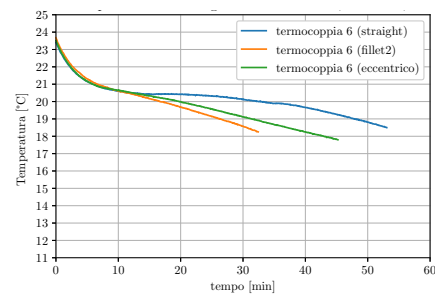
(c) TC 3



(d) TC 4

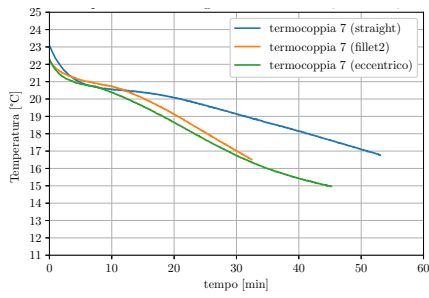


(e) TC 5

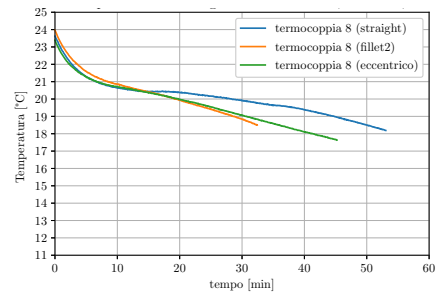


(f) T6

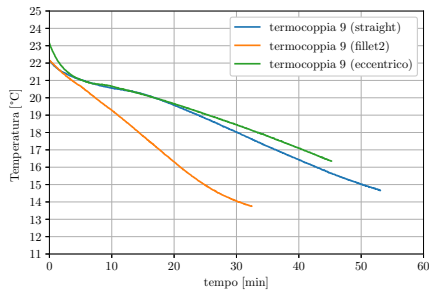
Figura 4.29: Grafici TC 1-6 scarica



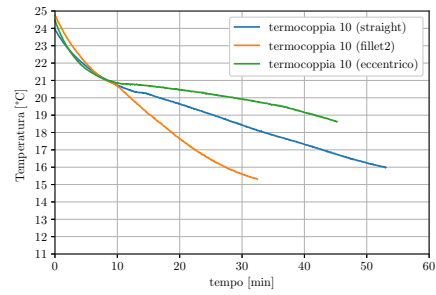
(a) TC 7



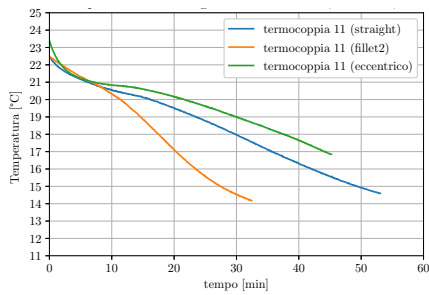
(b) TC 8



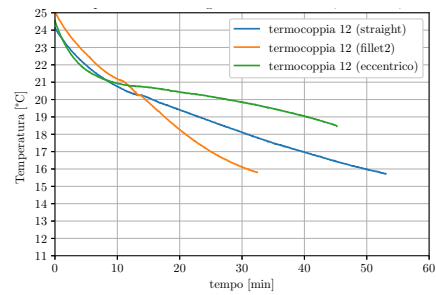
(c) TC 9



(d) TC 10



(e) TC 11



(f) T12

Figura 4.30: Grafici TC 7-12 carica

4.2.2 Distribuzione della temperatura a 6 l/min

In questa sezione verranno presentati tutti i grafici delle singole termocoppie per la prova a 6 l/min.

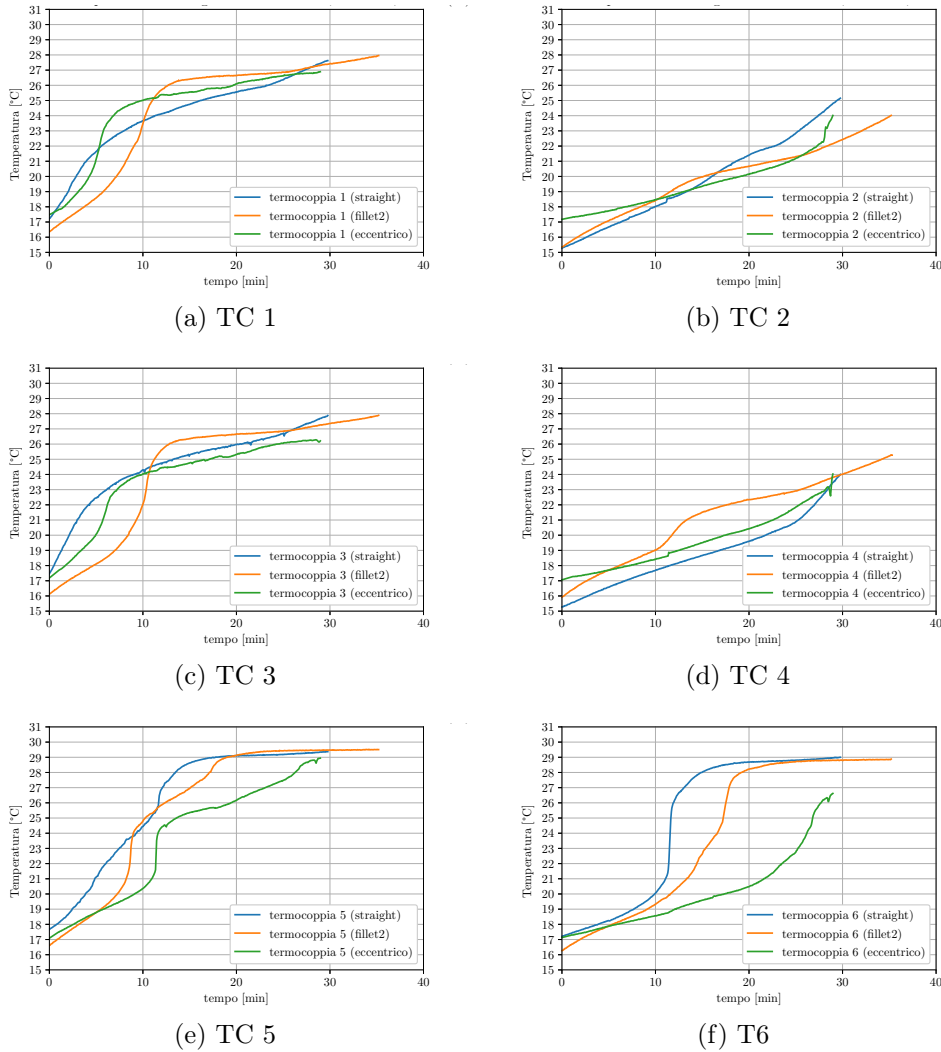


Figura 4.31: Grafici TC 1-6 carica

I due blocchi [4.31](#) e [4.32](#) contengono i 12 grafici della parte di carica. Si può innanzitutto notare che, per tutti i provini, l'ultimo punto a raggiungere la temperatura di 24°C è uno tra il TC2 ([4.31b](#)) o T4 ([4.31d](#)), che corrispondono alle due termocoppie posizionate nella parte bassa dell'accumulo e 5mm di distanza dal contenitore di plexiglass. Nonostante il provino eccentrico abbia il tubo posizionato nella parte inferiore, oltre che

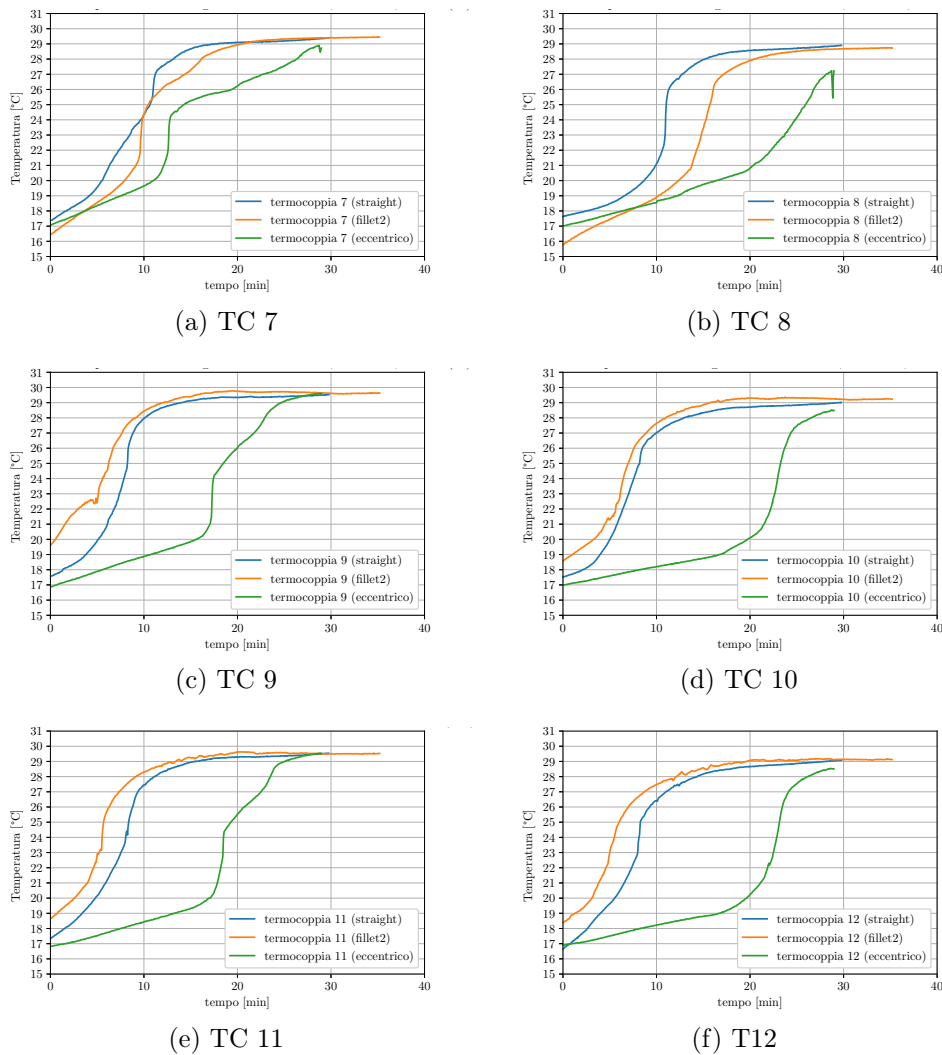


Figura 4.32: Grafici TC 7-12 carica

numeroso alette in quella zona, le termocoppie T2 e T4 restituiscono la temperatura di 24°C in concomitanza del provino ad alette dritte, intorno ai 30 minuti. La zona inferiore risulta particolarmente critica per la superficie Fillet2, che raggiunge la temperatura impostata di fine prova ben oltre i 30 minuti. La lentezza con cui il PCM riceve calore nella parte bassa è un'ulteriore dimostrazione dell'importanza della convezione naturale nella fase di fusione, fenomeno che sovrasta la conduzione all'aumentare della presenza di frazione liquida. Questo è dimostrabile osservando i punti TC 9, 10, 11 e 12 (4.32c, 4.32d, 4.32e, 4.32f), ossia le termocoppie posizionate nella parte superiore dell'accumulo. Osservando per esempio la TC11 del

Fillet2, questa raggiunge una temperatura di 24°C dopo appena 6 minuti; la parte superiore (di Fillet2 e Straight) quindi ha tutto PCM liquido dopo circa 5 minuti dall'inizio della prova.

Risulta importante osservare ora anche il comportamento del provino eccentrico nella parte superiore.

In questa zona infatti risulta esserci meno materiale conduttivo rispetto agli altri scambiatori, ma nonostante ciò, se osserviamo per esempio il grafico [4.32f](#), che è una termocoppia esterna, questa indica una temperatura di 24°C dopo circa 23 minuti, sottolineando ancora la difficoltà nel fondere il PCM nella parte inferiore nonostante la presenza del tubo caldo e di numerose alette.

Infine si commentano alcuni salti di temperatura visibili verso il fine prova, ad esempio quello in figura [4.32b](#) a circa 28 minuti. In figura [4.33](#) (foto



Figura 4.33: Foto prova a 25 minuti

scattata dopo circa 25 minuti dall'inizio della prova) si nota un blocco di PCM ancora solido proprio nei pressi del punto TC 8. Dalla documentazione video della prova si nota che tale frazione solida tenda a "scivolare" verso il basso poco dopo. Il salto di temperatura presente quindi, è da imputare all'improvviso rimescolamento tra le due diverse zone del PCM dopo il distacco del blocco di solido.

Nei grafici dalla figura [4.34a](#) alla figura [4.35f](#) sono riportate le rilevazioni di tutte le termocoppie per la prova di scarica a 6 l/min. Come per il caso della prova con acqua a ΔT 5°C questa fase mostra il cambiamento di fase del PCM a temperatura quasi costante, fenomeno che nella carica non è possibile osservare. Come detto in precedenza la solidificazione del PCM è fortemente legata a fenomeni di conduzione, quindi un dimensionamento con alette fitte e sottili è sulla carta il miglior candidato. Nei grafici a temperatura media infatti erano già state notate le ottime prestazioni del Fillet2. Se si osservano le rilevazioni di temperatura del provino ad alette

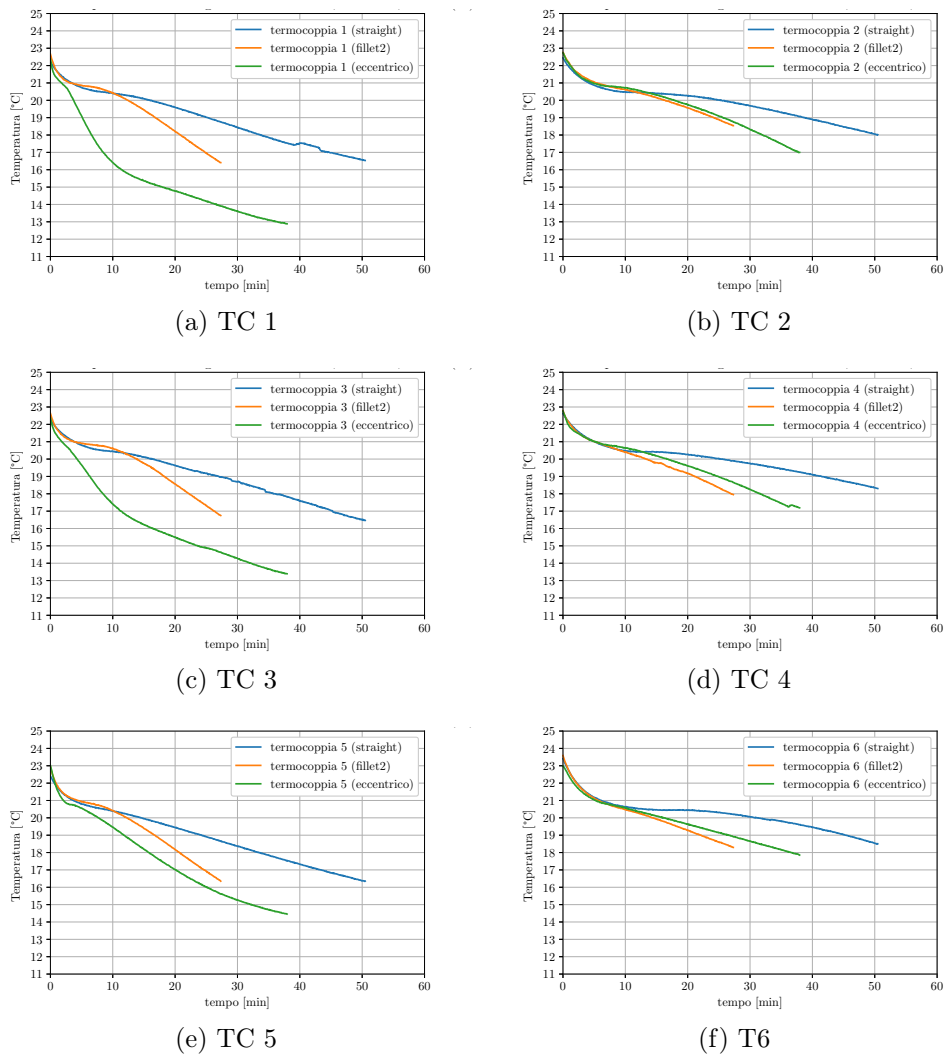
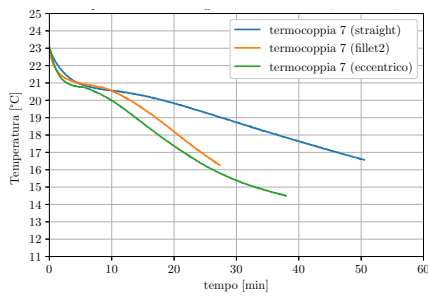
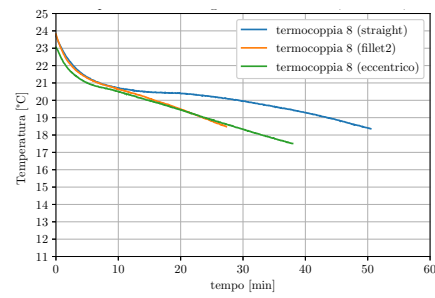


Figura 4.34: Grafici TC 1-6 scarica

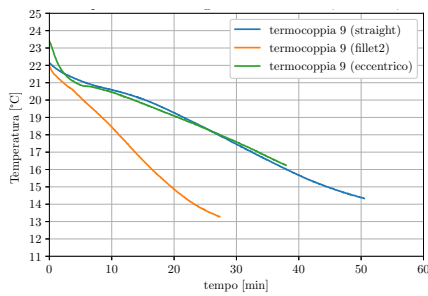
dritte si nota che è la termocoppia T6 (4.34f) quella a raggiungere per ultima la temperatura target di 18.5°C. Quindi per tale provino la zona meno performante risulta essere quella centrale. I provini Fillet2 ed Eccentrico, grazie alle diramazioni presenti, consentono una solidificazione del PCM nettamente migliore; il primo in particolare, nel grafico 4.35f arriva alla temperatura di 18.5°C circa 25 minuti prima rispetto allo Straight. La zona T6 risulta comunque quella più lenta anche per il Fillet2. Il provino eccentrico riesce a migliorare le performance rispetto al provino ad alette dritte nella zona centrale, ma come visibile dai grafici 4.35d e 4.35f, fatica a far solidificare il PCM nella zona superiore; TC10 e TC12 sono infatti le



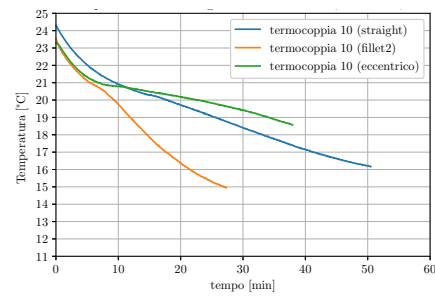
(a) TC 7



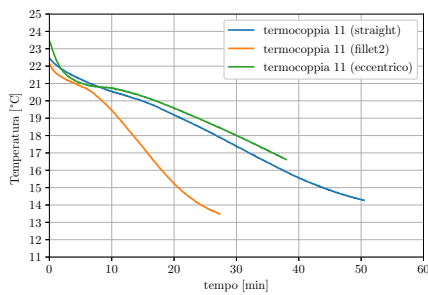
(b) TC 8



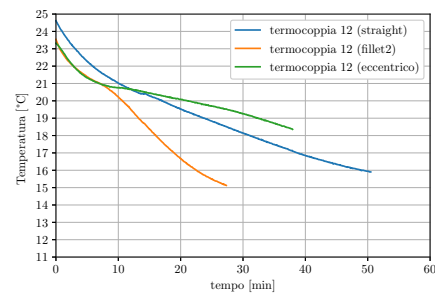
(c) TC 9



(d) TC 10



(e) TC 11



(f) T12

Figura 4.35: Grafici TC 7-12 carica

ultime termocoppie a rilevare la temperatura di 18.5°C che segna il termine della prova.

4.2.3 Influenza della portata

In figura 4.36 vengono presentati i grafici di carica e scarica riguardanti il provino ad alette dritte in funzione delle quattro diverse portate. Per quanto concerne la fase di carica avviene una situazione particolare: nel grafico 4.36a si può osservare che il tempo di carica per la portata 10 l/min è leggermente maggiore rispetto al tempo impiegato per la portata 6 l/min. La differenza tra le due prove è di 1.58 minuti. Nelle prove di solidificazione del PCM si verifica nuovamente la saturazione dell'effetto della portata oltre i 6 l/min.

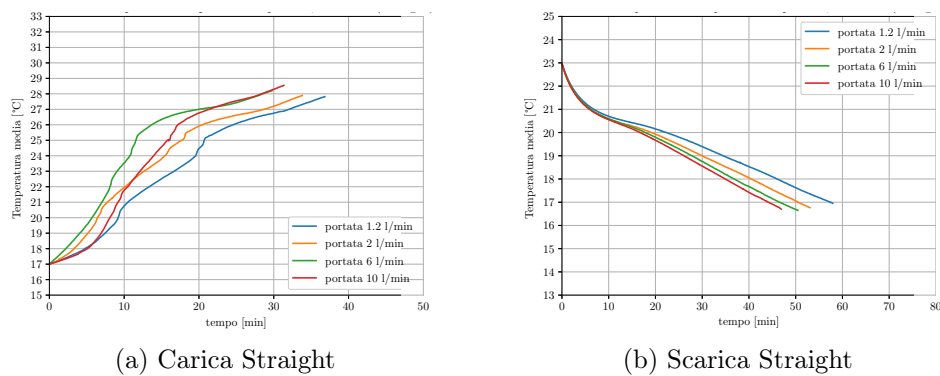


Figura 4.36: Confronto portate ΔT 10°C Straight

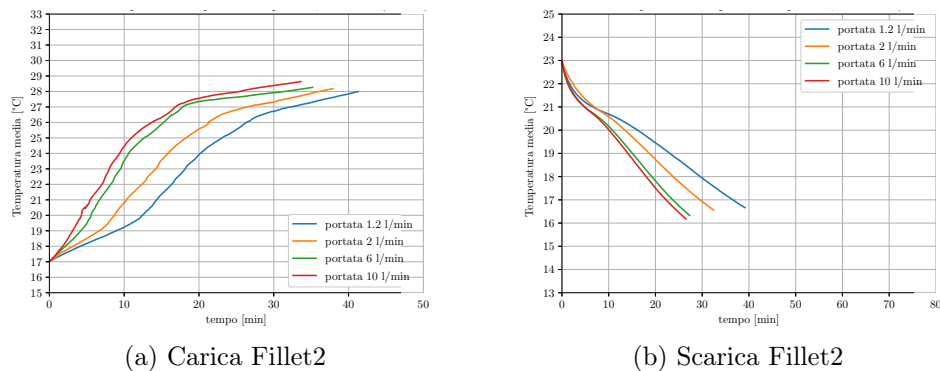


Figura 4.37: Confronto portate ΔT 10°C Fillet2

Per quanto riguarda il Fillet2 l'influenza della portata in fase di carica è molto poco marcata. La prova a 1.2 l/min termina dopo 41.28 min, quella a 10 l/min invece, dopo 33.62 min. Aumentando la portata di 8 volte quindi si ottiene un risparmio di tempo del 18.5%. Al contrario, nella prova di

carica una portata alta di HTF permette di ottenere grandi contrazioni dei tempi di solidificazione. La prova a 1.2 l/min e a 10 l/min differiscono del 32.3%, con tempi rispettivamente pari a 39.15 minuti e 26.52 minuti.

Il provino eccentrico è dei tre quello che più risente dell'effetto della portata

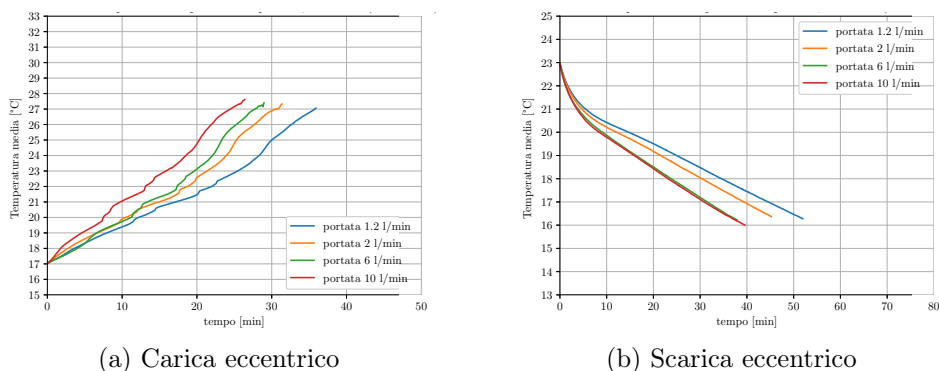


Figura 4.38: Confronto portate ΔT 10°C eccentrico

durante la fase di carica. La prova a 10 l/min permette una completa fusione in un tempo minore del 9% rispetto al test eseguito a 6 l/min; tale differenza è la più grande tra tutte i confronti eseguiti per le due suddette prove. Risulta essere molto marcata anche la differenza tra prova a portata minore e maggiore: a 1.2 l/min il PCM fonde in 51.95 min, a 10 l/min a 39.60 min; la differenza percentuale tra i due test è pari al 23.7%.

Se per il provino con tubo eccentrico le prove con le due portate maggiori mostravano sostanziali differenze durante la carica, questo non accade per i test in scarica. Osservando il grafico 4.36b le prove a 10 l/min e 6 l/min risultano essere praticamente identiche.

4.3 In sintesi

Nel presente capitolo sono state presentate e discusse le prove sperimentali dei tre provini selezionati. Le prove di fusione prevedevano due differenti temperature dell'HTF: 25.5°C e 30.5°C. I test di solidificazione prevedevano invece la temperatura dell'acqua a 15.5°C e 10.5°C. Per ogni temperatura di carica e scarica sono state utilizzate quattro diverse portate: 1.2 l/min, 2l/min, 6l/min e infine 10 l/min. Il provino denominato come *Straight*, con alette longitudinali a sezione rettangolare, rappresenta il riferimento su cui valutare le performance delle superfici estese ottenute mediante ottimizzazione topologica. Sin dai primi test effettuati su tale provino, risulta che

la fase di fusione è nettamente più veloce della fase di solidificazione; tale comportamento è da associare ai moti indotti dalla convezione naturale nella fase liquida, i quali permettono di aumentare il ritmo di fusione della paraffina.

Le prove effettuate sulla superficie ottimizzata *Fillet2* mostrano prestazioni in fase di carica del tutto comparabili al provino di riferimento. Nonostante la superficie sia più diramata all'interno del PCM, questa tende a inibire i moti convettivi; l'ipotesi è compatibile con il lavoro svolto da Pizzolato e collaboratori [40]: in tale studio, la superficie che permette una rapida fusione del PCM prevede alette corte e in maggior quantità nella parte inferiore del provino, dato che nella parte superiore il cambio fase è dominato dalla convezione. Tale provino risulta però il più performante nella fase di solidificazione. La conformazione sottile delle alette e la loro distribuzione "ad albero", permettono di solidificare il PCM molto più rapidamente rispetto al provino ad alette dritte. In mancanza di moti convettivi nella fase solida, infatti, la fase di scarica della paraffina è dominata dalla conduzione termica.

Il terzo e ultimo provino testato sperimentalmente, denominato *Eccentrico*, presenta il tubo per l'HTF spostato di 11 mm più in basso rispetto all'asse centrale del contenitore in plexiglass. La conformazione di tale superficie dovrebbe favorire la fusione del PCM nella parte inferiore, lasciando spazio ai moti convettivi nella parte superiore. Tale ipotesi trova conferma dai grafici ottenuti delle singole termocoppie, sia per temperatura dell'acqua a 25.5°C che 30.5°C. In generale il provino in questione permette di ottenere prestazioni leggermente migliori rispetto al provino di riferimento, ma peggiori se confrontate al *Fillet2*.

In conclusione, è possibile affermare che, nonostante le tecniche di ottimizzazione topologica le performance in fase di fusione del PCM non subiscono sostanziali miglioramenti nei provini *Fillet2* ed *Eccentrico*, dato che la conduzione termica non influisce fortemente sul fenomeno. La fase di solidificazione, invece, essendo fortemente condizionata dalla conduzione, beneficia delle alette ottenute dall'ottimizzazione, mostrando ottime performance nella fase di scarica.

Capitolo 5

Modello numerico

Come visto nei capitoli precedenti, sviluppare e produrre superfici estese ottenute mediante ottimizzazione topologica può essere complesso. Al fine di studiare in maniera agile nuove soluzioni per il miglioramento delle performance degli accumuli termici latenti, è utile impiegare software che permettano di svolgere analisi, simulazioni numeriche e previsioni. A tal proposito, in questo capitolo verrà presentato il modello numerico sviluppato in ambiente *Ansys-Fluent* del provino ad alette longitudinali a sezione rettangolare (*Straight*) impiegato anche nelle prove sperimentali.

Significato	Simbolo	Unità di misura
Porosità	ϵ	[-]
Velocità	v	[m/s]
Pressione	p	[Pa]
Coordinata spaziale	x	[m]
Frazione liquida	γ	[-]
Temperatura	T	[K]
Entalpia specifica	h	[J/kg]
Calore specifico	c_p	[J/(kg K)]
Calore latente fusione	L	[J/kg]
Tempo	s	[s]
Densità	ρ	[kg/m ³]
Tensore tensioni	$\vec{\tau}$	[Pa]
Conduktività termica	k	[W/(m K)]
Coeff. espansione termica	β	[1/K]

Tabella 5.1: Simboli utilizzati

5.1 Modellizzazione della fusione e solidificazione in *Ansys-Fluent*

Le prove da replicare sul software CFD prevedono la simulazione del fenomeno di cambio di fase. Per risolvere questo tipo di problema Ansys Fluent utilizza il metodo *enthalpy-porosity*. Il metodo dell'entalpia è stato descritto per la prima volta da Voller et al. nel 1987 [41] ed è specifico per i casi in cui è presente scambio termico per conduzione e convezione. L'approccio di questo modello permette di considerare gli effetti del calore latente da fornire, o da asportare, al fine di descrivere il cambiamento di fase di una sostanza; il modello in questione non necessita nemmeno di descrizioni dell'interfaccia solido-liquido, permettendo quindi l'utilizzo di mesh fisse. Il modello necessita inoltre di un riferimento per conoscere la velocità degli elementi: Fluent considera il dominio in cui può avvenire il cambiamento di fase come un mezzo poroso, in cui è applicata la legge di Darcy. La legge appena citata afferma che la velocità di un fluido in un mezzo poroso è proporzionale al gradiente di pressione:

$$\frac{k}{\epsilon} v = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.1)$$

Nella risoluzione del modello CFD, la frazione liquida presente rappresenta proprio la porosità ϵ . La frazione liquida viene calcolata mediante la seguente equazione:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (5.2)$$

In figura 5.1 viene rappresentata la suddivisione di una cella del dominio, ottenuta mediante il calcolo della frazione liquida con l'equazione 5.2. La zona *mushy* rappresenta l'interfaccia solido-liquido: qui l'elemento possiede frazione liquida compresa tra il valore 0 e 1.

$$\vec{S} = \frac{(1 - \lambda)^2}{(\lambda^3 - \epsilon_k)} A_{mush} \vec{v} \quad (5.3)$$

Nell'equazione 5.3 viene quindi calcolata la quantità di moto tenendo conto della frazione liquida; per evitare divisioni per zero, al denominatore viene introdotta l'addizione del termine ϵ_k (posto tipicamente pari a 0.001). Inoltre, quando la frazione liquida nella cella è pari a 0, la velocità di tale elemento sarà nulla.

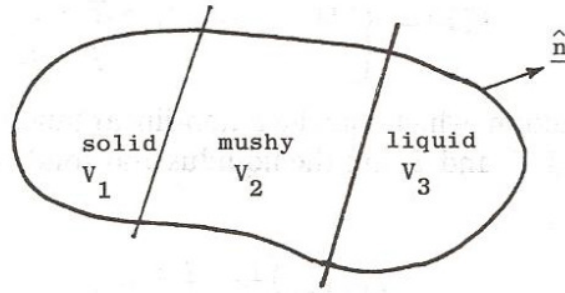


Figura 5.1: Suddivisione del dominio [41]

L'entalpia del materiale sottoposto a cambiamento di fase è calcolata come somma del contributo sensibile h e di quello latente ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (5.4)$$

dove:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5.5)$$

$$\Delta H = \gamma L \quad (5.6)$$

Dove con ΔH nell'equazione [5.6] ci si riferisce alla variazione di entalpia specifica latente.

Nella sezione dedicata a *Solidification and melting* del manuale di *Ansys-Fluent*, vengono fornite tutte le equazioni risolte dal software [42]:

Equazione di continuità

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.7)$$

L'equazione [5.7] vale sia per fluidi comprimibili che incomprimibili; dato che nel presente studio non ci sarà apporto di fluido durante la prova l'equazione è posta uguale a zero.

Quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p_s + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (5.8)$$

L'equazione [5.3] rappresenta la forma differenziale della conservazione della quantità di moto per sistemi inerziali. Si indica con p_s la pressione statica misurata in pascal. Tale equazione, somma i contributi delle forze di pressione, viscosità e gravitazionali; l'ultimo termine del secondo membro è

invece legato all'azione di forze esterne. Nel caso della soluzione di sistemi in presenza di solidificazione o fusione il termine \vec{S} è legato alla quantità di moto del mezzo poroso, descritta precedentemente nell'equazione [5.3](#). Il tensore $\vec{\tau}$ è calcolato nell'equazione [5.9](#), dove μ rappresenta la viscosità molecolare e I il tensore unitario.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (5.9)$$

Il secondo termine del secondo membro dell'equazione [5.9](#) rappresenta l'effetto dell'espansione volumetrica del fluido.

La terza equazione risolta ad ogni iterazione da parte del risolutore è l'equazione dell'energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5.10)$$

L'equazione [5.10](#) rappresenta un bilancio di energia: a sinistra dell'uguale il primo termine rappresenta una variazione di energia locale, il secondo, invece, è legato al calore scambiato per convezione; nel secondo membro si trova infine il termine associato alla conduzione di calore.

Un parametro fondamentale per ottenere una buona previsione del comportamento del PCM in fase di carica o scarica risulta essere A_{mush} , presente nell'equazione [5.3](#). Tale parametro è ad oggi argomento di dibattito nella comunità scientifica: Fadl e Eames [\[43\]](#) hanno raccolto vari valori di A_{mush} impiegati in diversi lavori riguardanti gli accumuli latenti. Dallo studio risulta che il valore ideale è strettamente legato al tipo di sistema simulato. Per un contenitore sferico riempito di paraffina Rubitherm RT27, analizzata in sola fase di fusione, il parametro che risponde in maniera efficace risulta pari a 10^4 [\[44\]](#). Mahdi e Nsofor [\[45\]](#) invece, hanno investigato l'effetto di A_{mush} durante il processo di solidificazione della paraffina RT82 all'interno di un *triplex-tube* [\[1\]](#). Nello studio appena citato, la costante che restituiva una miglior risposta della simulazione era $A_{mush}=10^6$. In generale è comunque possibile affermare dalla letteratura che: incrementando il valore della costante, la velocità del fluido in esame e lo scambio termico per convezione tenderanno a diminuire. L'effetto di A_{mush} inoltre, risulta più pronunciato nelle zone in cui la frazione liquida prevale: diminuendo la velocità del fluido infatti, si andrà a penalizzare fortemente lo scambio termico per convezione naturale.

¹Il *triplex-tube* è un particolare tipo di accumulo latente che permette all' HTF di scorrere sia in un tubo interno che in uno esterno.

Nel presente studio è stato utilizzato il metodo *PRESTO!* (*PRessure STag-gering Option*) per la discretizzazione della pressione. Per quanto concerne la soluzione dell'accoppiamento pressione-velocità è stato impiegato lo schema *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*). Tali scelte sono ispirate al lavoro svolto da Shmueli et al. [46], i quali hanno condotto varie prove di simulazione numerica per fusione e solidificazione di PCM. I risultati ottenuti dallo studio dimostrano che lo schema *PRESTO!* permette di ottenere risultati migliori rispetto agli altri metodi offerti dal software.

5.2 Modellizzazione dei Materiali

Come introdotto nel Capitolo 3, i provini ottenuti mediante *additive manufacturing* sono realizzati in lega di alluminio AlSi10Mg. La conducibilità termica di tale materiale è stata misurata mediante delle prove sperimentali; essa varia in funzione dell'orientazione di stampa. Per le prove numeriche in *Fluent* è stata assunta una conducibilità media, pari a 120 W/m K.

Per quanto riguarda la paraffina Rubitherm RT21HC alcune proprietà sono state ricavate dal datasheet fornito dal produttore, altre sono state prese da un lavoro sperimentale di caratterizzazione di vari PCM. Nello studio svolto da Longo et al. [47] sono state misurate: densità della fase liquida, diffusività termica, conducibilità termica e viscosità dinamica di 5 PCM commerciali. Due di questi materiali sono paraffine prodotte da Rubitherm: la RT2HC e la RT5HC. Per caratterizzare la paraffina RT21HC in *Ansys-Fluent* sono stati utilizzati i dati di viscosità dinamica e conducibilità termica ricavati sperimentalmente; gli altri dati, invece, provengono dal datasheet. La densità varia a seconda della fase: la paraffina solida possiede un valore di densità pari a 880 kg/m³, se liquida invece di 770 kg/m³. Per descrivere la densità nel software di simulazione è stata utilizzata l'approssimazione di Boussinesq. Tale approccio, proposto dall'omonimo fisico nel 1877, permette di descrivere le variazioni di densità dovute alla temperatura in maniera semplificata, senza l'utilizzo delle equazioni di Navier-Stokes. L'approssimazione assume che le variazioni di densità siano proporzionali alla temperatura e che il calore specifico sia costante. Il modello assume poi che la densità rimanga sempre costante tranne che per il calcolo della quantità di moto.

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (5.11)$$

L'approssimazione consiste in sostanza nel calcolare ρ come descritto nell'equazione [5.12](#), per eliminarla dal termine di galleggiamento dell'equazione [5.11](#).

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \quad (5.12)$$

L'approssimazione di Boussinesq risulta essere accurata per piccole variazioni di densità ed è valida solo se:

$$\beta(T - T_0) \ll 1 \quad (5.13)$$

Nel software è stata quindi inserita una densità pari 825 kg/m^3 , pari alla media tra la densità della fase solida e della fase liquida del PCM.

Il valore di calore latente è stato ricavato dal grafico [3.11](#):

- fusione: range di temperatura $20^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}$, calore latente pari a 132 kJ/kg
- solidificazione: range di temperatura $21^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C}$, calore latente pari a 129 kJ/kg

Il calore specifico a pressione costante risulta essere pari a 2000 J/(kg K) , per entrambe le fasi come dichiarato dal costruttore (dati presenti in tabella [3.1](#) del Capitolo 3).

Per quanto concerne la conducibilità termica della paraffina, come anticipato, sono stati sfruttati dati provenienti da prove sperimentali. Lo studio in questione ha fornito dei modelli di regressione lineare per il calcolo di varie proprietà. Per la conducibilità termica risulta (con validità fino a 30°C):

$$\lambda = a_3 + b_3T \quad (5.14)$$

Per la viscosità dinamica invece è valida la seguente equazione, sempre fino a 30°C :

$$\mu = a_4 + b_4T + c_4T^2 + d_4T^3 \quad (5.15)$$

Nella tabella [5.2](#) vengono riportati i valori dei coefficienti per il calcolo di conducibilità termica e viscosità dinamica per la paraffina RT5HC. Per il PCM RT21HC non sono presenti in letteratura prove sperimentali che permettano il calcolo di tali valori, per questo motivo sono stati utilizzati quelli di una paraffina con temperatura di cambio fase diversa. Nella descrizione del materiale in *Fluent*, conducibilità e viscosità dinamica sono state inserite come costanti a tratti, selezionando l'opzione *piecewise linear*. Per il calcolo del coefficiente di espansione termica β è stata sfruttata l'equazione [5.12](#). Nel datasheet del PCM utilizzato la densità di fase solida

Coefficiente	Valore
a_3	0.1483
b_3	0.0008
a_4	2.8327
b_4	0.0167
c_4	-0.0033
d_4	0.00006

Tabella 5.2: Coefficienti regressione lineare per RT5HC [47]

e liquida sono misurate a, rispettivamente, 15°C e 25°C; applicando la formula inversa è possibile ricavare il parametro desiderato:

$$\beta = \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_S \cdot \Delta T} = 0.0125 \text{ 1/K} \quad (5.16)$$

5.3 Geometria e Mesh Sensitivity

Questa sezione è dedicata alla descrizione della geometria costruita mediante il *Design Modeler* offerto da *Ansys-Fluent* e allo studio dedicato all'analisi di sensitività della mesh.

Le prove sperimentali condotte sui tre provini prevedono la temperatura dell'HTF imposta; tale condizione è giustificata dall'impiego di portate d'acqua relativamente elevate. L'ipotesi di temperatura imposta è inoltre confermata dalle temperature misurate da termocoppie poste sulle stesse posizioni ma su sezioni radiali differenti, le quali, dimostrano minime differenze. Quindi, dato che la posizione della sezione radiale non influisce in maniera significativa sulla temperatura rilevata, è stato possibile condurre analisi numeriche bi-dimensionali. Inoltre, grazie alla simmetria della superficie considerata, è stato possibile studiare metà della sezione, riducendo significativamente il lavoro di computazione; in figura 5.2 viene presentata la sezione presa in esame. L'etichetta "A" indica la superficie interna del tubo in cui scorre l'acqua, definita come *wall*. La superficie interna del contenitore in plexiglass è indicata dall'etichetta "B"; dato che le prove sperimentali sono state condotte all'interno della camera climatica è possibile definire tale porzione di circonferenza come adiabatica. L'etichetta "C" indica gli spigoli che fanno parte di una simmetria. Questi segmenti delimitano quelle porzioni di piano divise dall'asse verticale di simmetria della sezione e comprendono sia alluminio che PCM. La geometria bi-dimensionale della superficie estesa è stata ottenuta dai modelli

CAD 3D mediante il software *Autodesk Fusion 360*. Si procede quindi

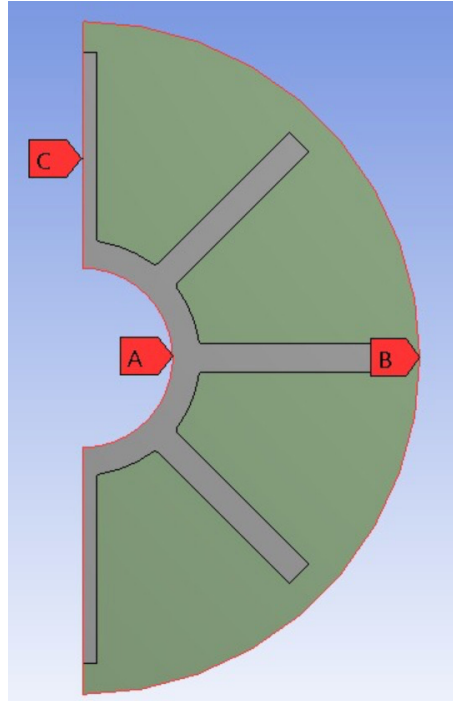


Figura 5.2: Geometria ottenuta in *Design Modeler*

alla presentazione dell'analisi di sensitività condotta rispetto a mesh e time step. Per la costruzione della mesh è stato inserito un *method* che permetta la costruzione di soli elementi triangolari; nel dettaglio del *face-meshing* è stato poi variato il valore *Max face size*. Tale parametro è stato valutato in varie simulazioni, partendo da 2 mm fino ad arrivare a 0.5mm, passando per 1 mm e 0.75 mm. Le mesh con dimensione 2mm, 0.75mm e 0.5mm sono visibili in figura 5.3. I dati delle mesh vengono riportati in tabella 5.3. In figura 5.4 viene riportato il grafico che mostra gli andamenti di

Mesh	Elementi	Nodi	Tempo [h]
2 mm	3122	6381	18.23
1mm	5581	11374	24.46
0.75mm	8353	16978	22.06
0.5mm	17081	34564	36.23

Tabella 5.3: Dati mesh

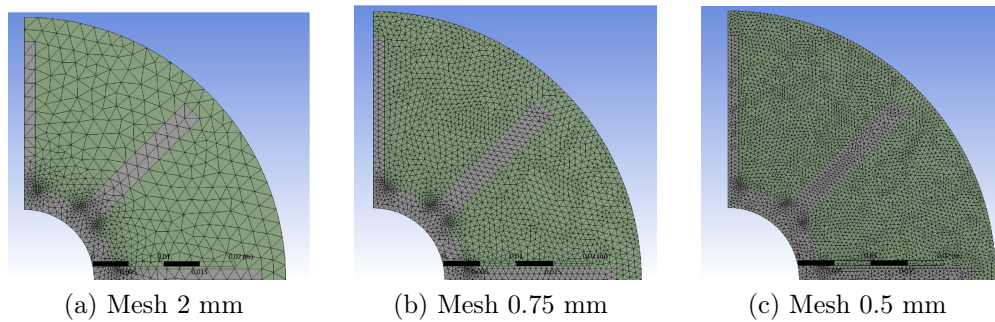


Figura 5.3: Confronto mesh

temperatura media del PCM nella simulazione CFD al variare del parametro *Max face size*; i parametri di simulazione sono consultabili nella sezione 6.1. Nel grafico non è riportata la prova con size pari a 1 mm in quanto restituisce andamenti sostanzialmente identici al valore 0.75 mm. Dal

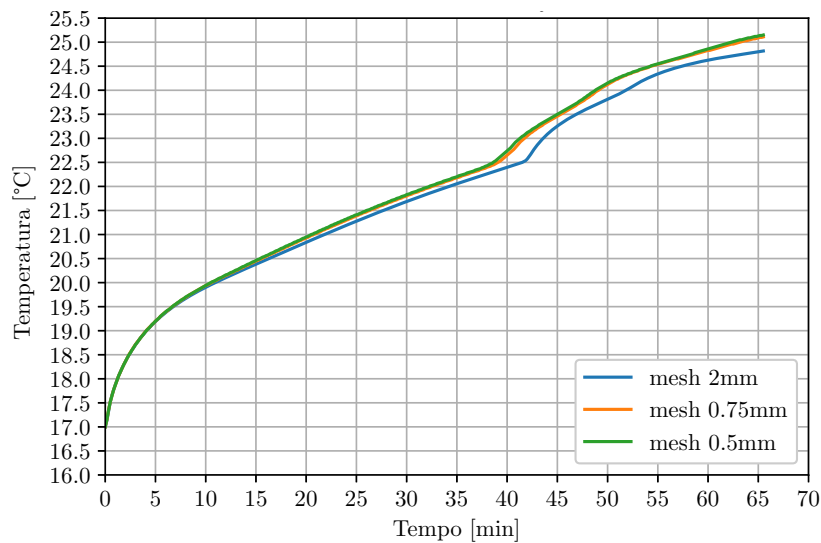


Figura 5.4: Confronto andamento temperatura

grafico si nota che a partire dal valore 0.75 mm la simulazione converge verso un'unica soluzione. Utilizzando la mesh con dimensione 0.5 mm il tempo di calcolo però aumenta notevolmente, impiegando in totale 36.23 ore, il 39% in più rispetto alla mesh con dimensione pari a 0.75mm. La seconda analisi condotta mira a investigare l'influenza del *time-step*; in particolare sono stati analizzati *time-step* pari a 0.5 s, 0.25 s e 0.1 s, tutti

con *Max face size* pari a 0.5 mm; in tal modo non si influenza la simulazione con la dimensione della mesh. Utilizzando un passo di simulazione di 0.5 s l'analisi numerica diverge intorno ai 1000s. Si riporta quindi in

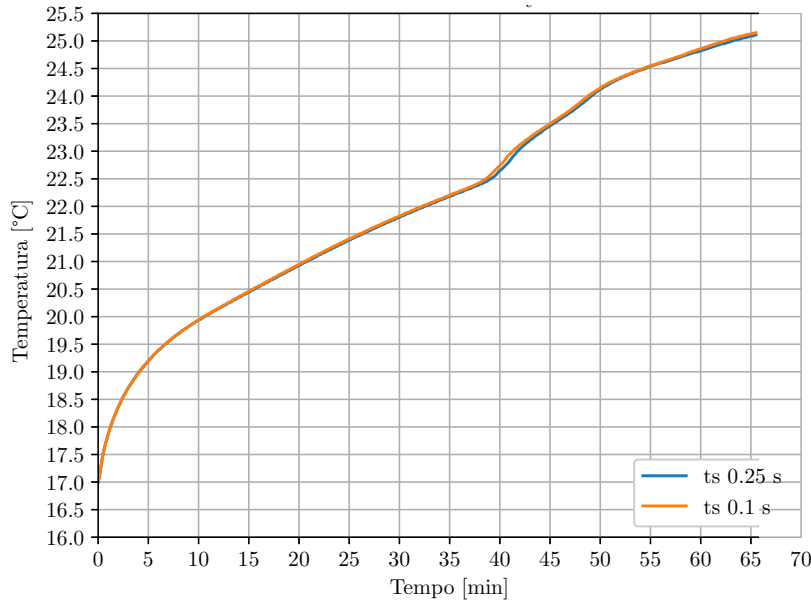


Figura 5.5: Confronto andamento temperatura al variare del *time-step*

figura 5.5 la temperatura media del PCM al variare del *time-step*. Dal grafico si nota che sotto i 0.25 secondi il passo di simulazione non influisce in maniera rilevante sui risultati di temperatura media. Per sicurezza è stato comunque scelto di utilizzare il *time-step* minore per le prove numeriche di carica.

5.4 Condizioni al contorno

Come accennato nel capitolo 1, il calore può essere trasmesso mediante tre diversi meccanismi. Nel caso del provino in esame, in cui l'acqua scorre nel tubo interno, si rientra nel caso della convezione forzata entro condotti. Dato che il fluido è a temperatura minore o maggiore rispetto alla superficie a cui è in contatto, tra parete e acqua si manifesta un flusso termico convettivo. I parametri che influiscono sullo scambio sono:

- Lunghezza e forma del condotto in cui scorre il fluido. Nel caso di sezioni circolari o formate da poligoni regolari si utilizza semplicemente il diametro per descrivere l'estensione della geometria; in

caso di sezioni di altra natura ci si riferisce al diametro idraulico equivalente.

- Condizioni fluidodinamiche del fluido, espresse dalla velocità media \bar{v}
- Proprietà fisiche del fluido che ne influenzano il dominio del moto quali densità ρ , viscosità dinamica μ e la capacità di trasmissione del calore, in cui concorrono parametri come conduttività termica λ e calore specifico a pressione costante c_p . Se indichiamo con h il coefficiente di convezione medio si avrà che questo è funzione di tutti i parametri sopracitati:

$$h = f(d, \bar{v}, \rho, \mu, \lambda, c_p) \quad (5.17)$$

L'equazione [5.17](#), mediante il teorema di Buckingham, è esprimibile come serie di prodotti adimensionali, permettendo di definire il numero di Nusselt, Reynolds e Prandtl come:

$$Nu = \frac{hd}{\lambda}; \quad Re = \frac{\bar{v}d\rho}{\mu}; \quad Pr = \frac{c_p\mu}{\lambda} \quad (5.18)$$

Varie prove sperimentali hanno inoltre fornito una relazione empirica che lega i coefficienti appena presentati:

$$Nu = CRe^mPr^n \quad (5.19)$$

Con i termini C , m , n da ricavare con prove sperimentali o mediante l'utilizzo di metodi convalidati. Nel caso della prova con portata d'acqua a 6 l/min, presa in esame per la simulazione al CFD, è stata utilizzata la relazione di *Sieder-Tate* che definisce:

$$Nu = 1.86 \left(RePr \frac{d}{l} \right)^{1/3} \quad (5.20)$$

Nel caso preso in esame si ha quindi:

$$\bar{v} = \frac{\dot{q}}{A} = 0.331 m/s \quad (5.21)$$

Con \dot{q} che indica la portata d'acqua in metri cubi al secondo e A la sezione del condotto circolare in metri quadri. Si procede quindi con il calcolo del numero di Reynolds e di Prandl:

$$Re = \frac{\bar{v}d\rho}{\mu} = 3248 \quad (5.22)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = 7 \quad (5.23)$$

Ora è quindi possibile calcolare il numero di Nusselt tramite l'equazione 5.20, ottenendo $Nu = 25.7$.

Dalla prima relazione presente in 5.18, si ottiene:

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} = 786.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (5.24)$$

Il coefficiente di scambio appena calcolato e la temperatura dell'acqua che scorre all'interno del condotto, sono i due parametri necessari a definire le condizioni al contorno della parete interna (etichetta "A" in figura 5.2).

5.5 In sintesi

Nel presente capitolo sono stati presentati i modelli impiegati dal software *Ansys-Fluent*, per la simulazioni di sistemi in cui avviene il cambiamento di fase solido-liquido e viceversa. Il modello in questione è chiamato *enthalpy-porosity* il quale assume che il dominio sottoposto a cambiamento di fase sia un mezzo poroso, in cui la porosità varia al variare della frazione liquida presente. Per la modellizzazione della densità, la quale varia al variare della temperatura, è stata impiegata l'approssimazione di Boussinesq. Successivamente sono stati presentate le proprietà per caratterizzare il PCM nelle prove numeriche: conducibilità termica e viscosità dinamica sono stati ricavati da lavori sperimentali condotti su paraffine con temperatura di cambio fase diversa. La terza sezione analizza in dettaglio la geometria studiata e presenta l'analisi di sensitività della mesh e del time step; tali studi permettono di concludere che la grandezza minima degli elementi triangolari quadratici della mesh, adatta a tale prova, è di 0.5mm. Il time step designato per la fase di carica è pari a 0.1s.

Nella quarta e ultima sezione sono stati presentate le condizioni al contorno utilizzate nella simulazione numerica del provino ad alette dritte. A tal proposito, è stata presentata una breve trattazione teorica del modello per la stima del coefficiente di scambio termico di Sieder-Tate, da impostare nelle condizioni al contorno in *Fluent*.

Capitolo 6

Risultati dello studio numerico

In questo capitolo verranno presentate le due prove numeriche, bi-dimensionali, di carica e scarica condotte su metà sezione del provino *Straight*.

L'obiettivo di questo studio è quello di tarare il modello numerico sviluppato in *Ansys-Fluent*, per eventuali future simulazioni di altri accumuli con geometrie diverse. Per ogni prova verranno presentati tutti i parametri impostati nel software e i confronti fra i risultati numerici e quelli sperimentali.

6.1 La fusione

Questa sezione è dedicata alla presentazione della prova numerica condotta su *Fluent* che replica il test con temperatura dell'acqua a 25.5°C e portata di 6 l/min. La prova sperimentale inizia quando la temperatura media tra le 12 termocoppie installate è pari a 17°C ; questo comporta che, come visibile nei grafici del capitolo 4, alcune termocoppie saranno leggermente sotto i 17°C , altre di qualche decimo di grado sopra. La simulazione, invece, verrà inizializzata con tutto il dominio del PCM a 17°C in quanto non sarebbe possibile replicare la situazione reale nel software. Questo rappresenta un primo elemento di approssimazione dell'analisi numerica rispetto alla realtà.

Un secondo aspetto critico della simulazione numerica risulta l'espansione volumetrica del PCM che, passando da fase liquida a solida si contrae del 14%. Il provino in laboratorio è stato riempito con PCM del liquido, quindi, una volta solido non riempirà del tutto il contenitore dell'accumulo. Anche questa situazione non è implementabile nella simulazione numerica. Per aggirare tale problematica è stato corretto il valore del calore latente di fusione: dato che nel CFD tutta la sezione risulta riempita di PCM, è stato

abbassato il valore del calore latente per simulare una minor quantità di paraffina. Da catalogo, nel range considerato nella simulazione, la combinazione di calore sensibile e latente risulta pari a 157 kJ/kg; considerando il 14% in meno di materiale e quindi diminuendo la capacità accumulo termico della paraffina del 14%, si ottiene un valore pari a 135 kJ/kg. Questa quantità è stata quindi utilizzata nel parametro *Pure solvent melting heat* nella descrizione del materiale in *Fluent*. Il valore di A_{mush} per questa prova è stato settato a quello di default, pari a 10^6 kg/(m³s).

Il confronto tra prova sperimentale e simulazione CFD avverrà tramite le sole temperature, in quanto non sono state previste misurazioni della frazione liquida. Per valutare la temperatura media del dominio del PCM in *Fluent*, sono stati creati sei punti in *CFD-Post* che replicano le posizioni delle termocoppie installate nel provino; i punti sono visibili in figura [6.1](#), con i relativi nomi. In questi punti sono stati quindi ricavati i grafici e i dati della temperatura al variare del tempo. In figura [6.2](#) si presenta il

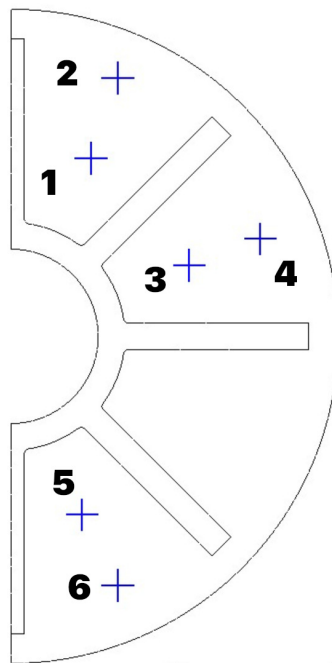


Figura 6.1: Punti valutazione CFD

grafico di comparazione tra la simulazione numerica condotta su *Fluent* e la relativa prova sperimentale eseguita in laboratorio. Per quanto riguarda la prova numerica si riporta la temperatura mediata nei sei punti di valutazione. Dalla comparazione si nota che il PCM nel CFD tende ad

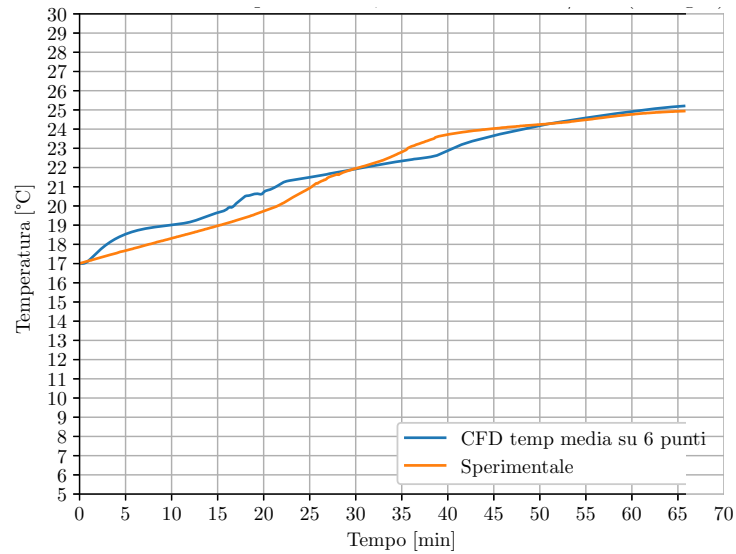
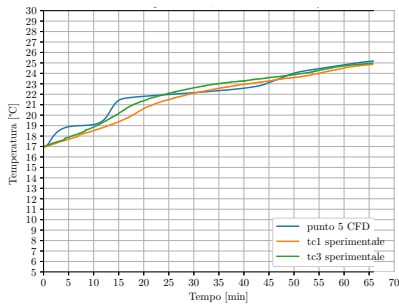
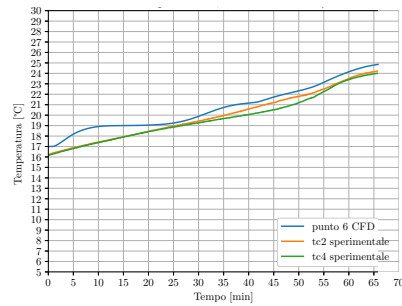


Figura 6.2: Comparazione CFD-Sperimentale carica

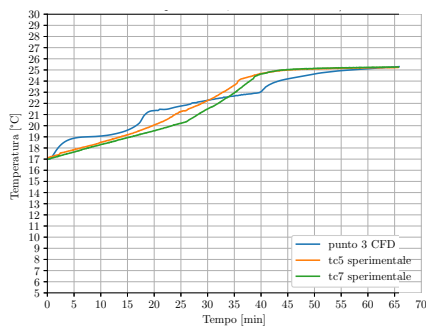
aumentare di temperatura nella parte iniziale di scambio sensibile più velocemente rispetto al test sperimentale, nella quale si nota un aumento di temperatura più lineare fino a circa 23.5°C. Nel CFD si riscontra inoltre il cambiamento di fase in maniera più marcata: dai circa 23 minuti ai 40 minuti si osserva un andamento a temperatura quasi costante, situazione che nella curva sperimentale si verifica a partire dai 27 minuti, protrandosi però solamente per 10 minuti. Le due prove tendono comunque a convergere a 50 minuti. Analizzando gli andamenti dei sei punti di valutazione in *Fluent* si nota che tutti superano la temperatura di 24°C dopo 3580 secondi, 6 minuti prima rispetto al test condotto in laboratorio. A fine prova, la temperatura media del PCM nella prova sperimentale risulta essere di 24.9°C; nel CFD, invece, di 25.2°C. Si riportano di seguito i grafici dei sei punti di valutazione creati in *CFD-Post*: nei grafici, per ogni punto, vengono riportati anche i valori di temperatura rilevata dalle termocoppie poste nella medesima posizione nelle due differenti sezioni radiali. Dai grafici 6.3b e 6.3d si nota l'errore di inizializzazione citato precedentemente; in questi due casi la simulazione numerica inizia da una temperatura leggermente superiore rispetto alle prove sperimentali. Al contrario, in 6.3e e 6.3f si nota invece come la prova in *Fluent* parta da una temperatura più bassa.



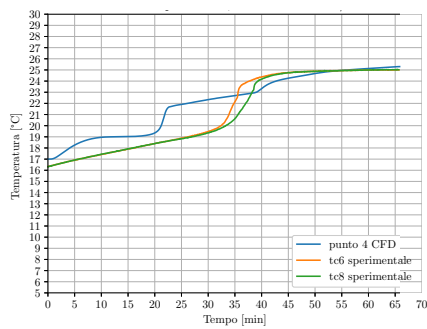
(a) TC 1-3; CFD punto 5



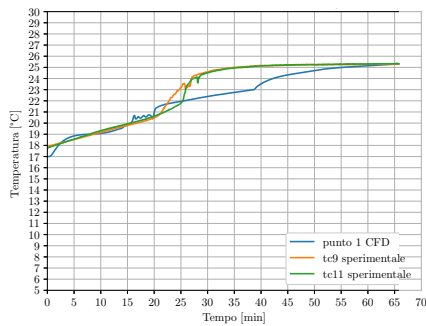
(b) TC 2-4; CFD punto 6



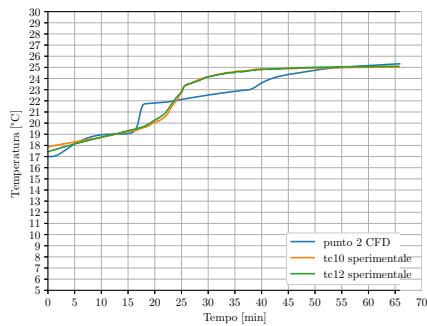
(c) TC 5-7; CFD punto 3



(d) TC 6-8; CFD punto 4



(e) TC 9-11; CFD punto 1



(f) TC 10-12; CFD punto 2

Figura 6.3: Confronto punti CFD-Sperimentale

Una parziale soluzione a questo problema sarebbe quella di estendere la simulazione, inizializzando il dominio del PCM a temperature più basse (15°C ad esempio). In tal modo sarebbe possibile individuare il punto di partenza della prova ottimale. Tale correzione però estenderebbe ulteriormente il tempo necessario al calcolo della soluzione.

Nel gruppo di immagini in figura [6.4](#) vengono riportate dei contour a diversi istanti di simulazione. In particolare: nella porzione sinistra di ogni

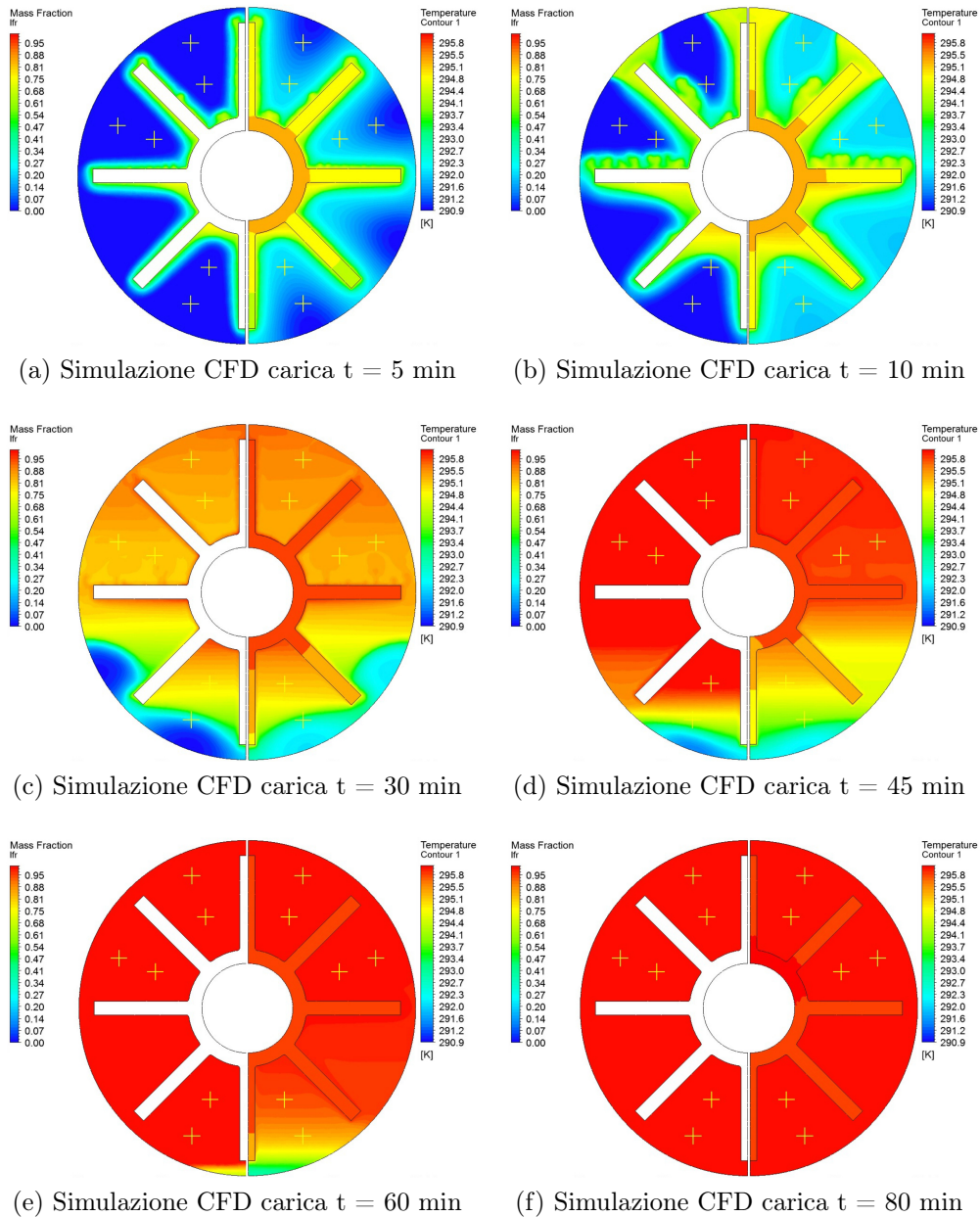


Figura 6.4: Frazione liquida e temperatura

immagine viene riportata la frazione liquida, nella porzione destra, invece, è presente il contour di temperatura di alluminio e PCM. Per confronto si riporta una foto, in figura [6.5](#), della prova sperimentale di carica a 6 l/min dopo circa 30 minuti dall'inizio della prova. L'immagine deve essere

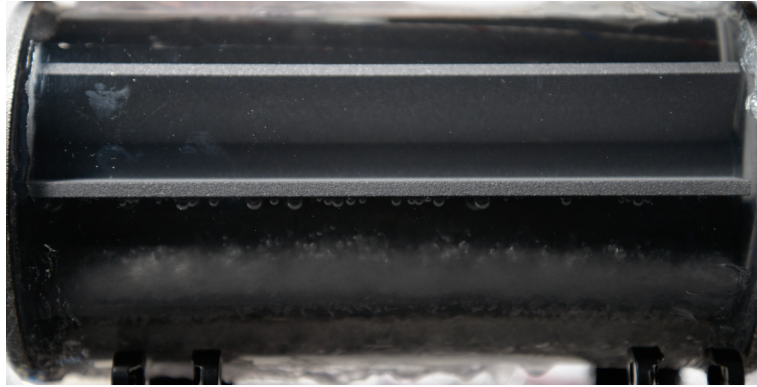


Figura 6.5: Foto prova sperimentale $t \approx 30$ min

confrontata con il contour della frazione liquida in [6.4c](#). Dalla foto della prova sperimentale si nota PCM solido nella parte inferiore del provino, in particolar modo tra l'aletta orizzontale e quella posta a -45° , ma anche tra quest'ultima e la verticale. Osservando la simulazione effettuata in *Fluent* si trova una quantità di PCM in zone comparabili con la prova sperimentale. In figura [6.6](#) si riporta una foto scattata dopo circa 56 minuti

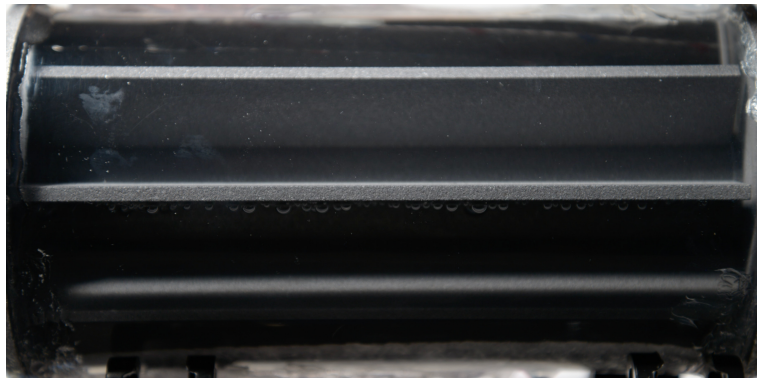


Figura 6.6: Foto prova sperimentale $t \approx 56$ min

dall'inizio della prova. Qui si nota della frazione solida nella parte inferiore del provino, compatibile con quanto simulato in *Fluent* nell'immagine [6.4e](#).

6.2 La solidificazione

La presente sezione è dedicata alla presentazione della prova numerica di solidificazione condotta in *Ansys Fluent*. Le condizioni al contorno risultano essere identiche alla prova di fusione ad eccezione del parametro riguardante la temperatura dell'acqua. Per questa prova la *free stream temperature* è stata impostata a 15.8°C , pari alla temperatura media dell'acqua rilevata durante la prova sperimentale condotta in laboratorio. Per la prova di solidificazione sono stati osservati problemi di divergenza della simulazione numerica a partire dal secondo minuto. Per circoscrivere il problema è stato abbassato il *time-step* a 0.01 secondi per i primi 600 secondi di simulazione. Il problema, infatti, risultava nella prima parte di simulazione dove si verifica un repentino calo di temperatura durante lo scambio termico sensibile. Per il resto della simulazione, dai 10 minuti in poi, il *time-step* è stato riportato a 0.1 secondi; nonostante il cambiamento la simulazione garantiva il rispetto del calcolo dei residui impostati. La

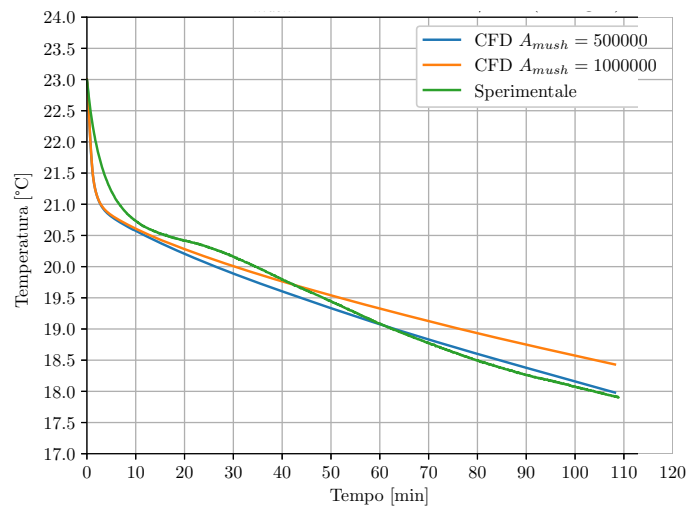


Figura 6.7: Confronto tra A_{mush}

scelta di riportare il passo di simulazione a 0.1 secondi è stata dettata dal lungo tempo di computazione richiesto dal *time-step* ridotto; per i primi 600 secondi di simulazione, infatti, sono state necessarie circa 24 ore di calcolo.

Una seconda differenza tra la presente simulazione e quella di carica è legata al calore latente di fusione impostato in *Fluent*. Nella prova precedente il PCM risultava inizialmente tutto solido, non occupando del tutto il volume del contenitore; tale situazione obbligava a considerare un valore di

calore latente specifico più basso. Nel caso della prova di scarica, invece, la paraffina a inizio prova è completamente liquida, occupando del tutto il volume offerto dall'accumulo. Questa condizione permette quindi di non dover abbassare il valore del parametro *Pure solvent melting heat*, bensì di utilizzare il valore a catalogo pari a 129 kJ/kg.

Successivamente, causa di numerose simulazioni che riportavano risultati insoddisfacenti, è stata valutata l'influenza di A_{mush} sulla dinamica di solidificazione. I valori investigati sono pari a 500000 e 1000000; i risultati sono riportati nel grafico 6.7. Dal grafico delle temperature medie sull'intero dominio è possibile osservare che il valore più basso della costante permette un miglior inseguimento della curva sperimentale.

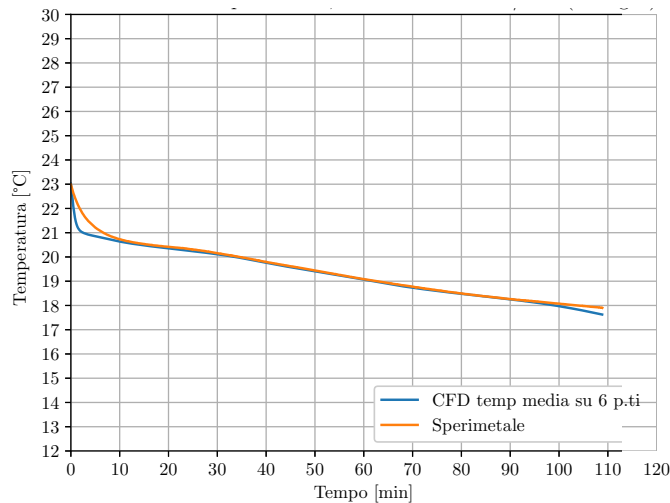


Figura 6.8: Comparazione CFD-Sperimentale scarica

Si riporta quindi, nel grafico 6.8, la comparazione tra prova sperimentale e simulazione CFD. Per valutare la temperatura nello studio numerico, come per la prova di carica, è stata mediata la temperatura ricavata dai 6 punti di valutazione. Dal grafico si nota che il risultato offerto da *Fluent* tenda a sottostimare leggermente la temperatura a inizio prova, determinando un brusco abbassamento di temperatura del PCM prima dell'inizio del cambiamento di fase. Durante il passaggio da liquido a solido, però, si ottengono ottimi risultati, con la simulazione che replica in maniera ottimale anche l'andamento quasi costante dettato dal cambiamento di fase fino ai 30 minuti. La simulazione condotta su *Fluent* quindi risulta ben tarata sul caso reale, nonostante una leggera divergenza nella fase finale dopo i 100 minuti di simulazione.

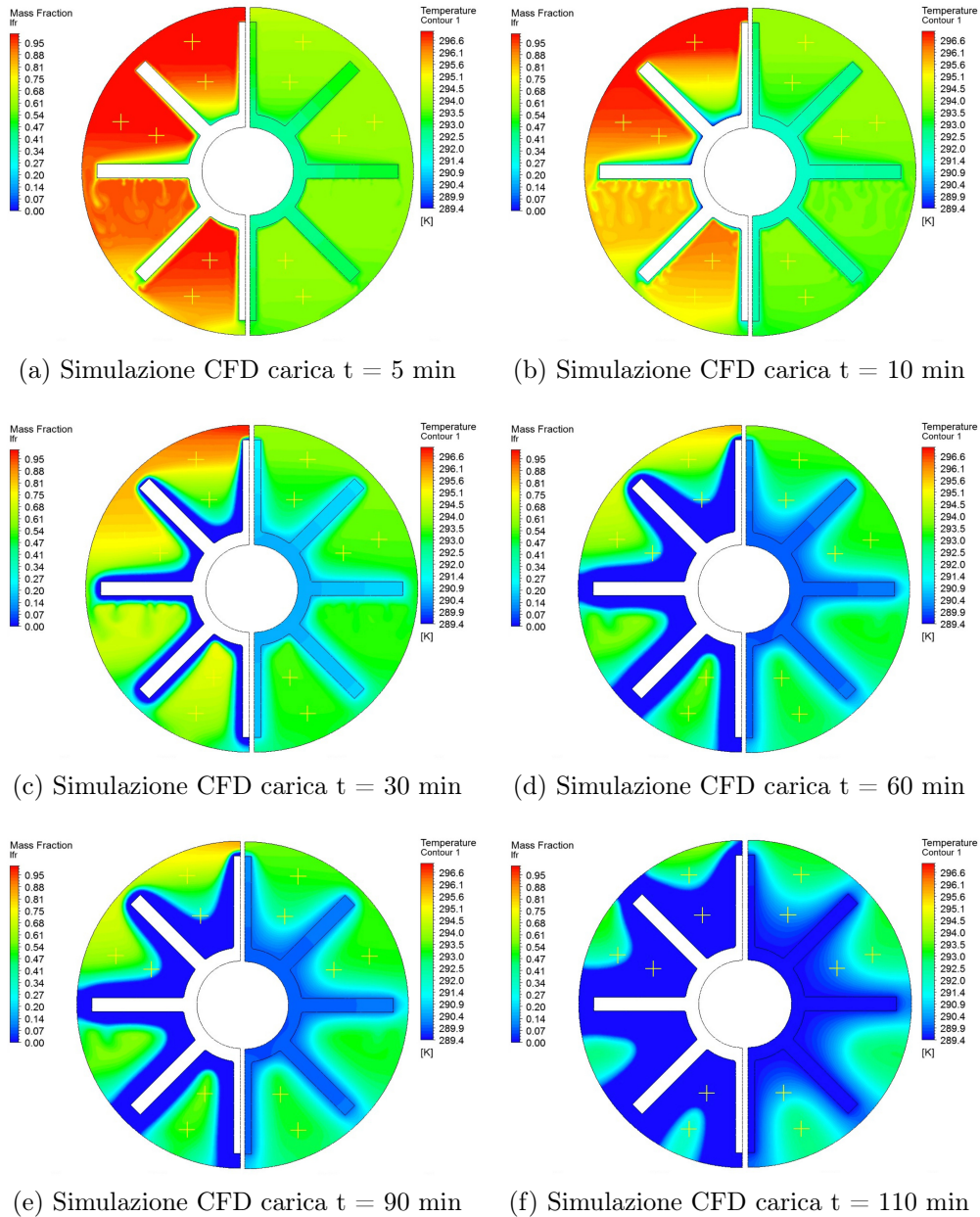


Figura 6.9: Frazione liquida e temperatura

Nelle sei figure presenti in [6.9](#) vengono riportati contour di temperatura e frazione liquida a diversi istanti di simulazione, in particolare a 5, 10, 30, 60, 90 e 110 minuti. Nelle varie figure la sezione è divisa a metà rispetto l'asse verticale; nella porzione destra è presente la mappa di temperatura,

con la relativa legenda in Kelvin. Sulla parte sinistra, invece, è presente il contour della frazione liquida.

In conclusione, è possibile quindi affermare che entrambe le analisi numeriche, condotte in *Fluent*, sono in grado di riprodurre in modo fedele e accurato le prove sperimentali.

6.3 In sintesi

In sintesi, in questo capitolo sono stati presentati gli studi numerici condotti sul provino *Straight* per la prova a ΔT 5°C e portata 6 l/min. Per la prova di fusione è stato considerato un range di cambio fase compreso tra i 19°C e i 23°C con un calore latente di fusione specifico pari a 135 kJ/kg; tale valore risulta essere più basso rispetto al dato riportato a catalogo, a causa di una penalizzazione necessaria a compensare la contrazione volumetrica del 14% del PCM in fase solida. Per valutare in maniera accurata la temperatura sono stati inseriti in *CFD-Post* sei punti in cui rilevare la temperatura del PCM, nelle stesse posizioni delle termocoppie del caso reale. La comparazione tra prova numerica e sperimentale mostra andamenti del tutto comparabili. Il tempo di carica restituito dal software, infatti, risulta inferiore del 9% se comparato al caso reale, ma con errore di temperatura pari a 0.3°C. Tale valore è comparabile con la tolleranza di misura delle termocoppie impiegate.

Per quanto concerne la prova di solidificazione sono state necessarie alcune modifiche da apportare alla simulazione. Il time step di 0.1s impiegato per la prova di carica portava l'analisi numerica a divergere a inizio prova, dove è presente un brusco abbassamento di temperatura. Per i primi 600 s di analisi, quindi, è stato impiegato un passo di simulazione pari a 0.01 secondi, che garantiva il rispetto dei residui di calcolo impostati. Una seconda modifica necessaria per questa prova è stata la variazione del valore di A_{mush} . Il parametro standard offerto da *Fluent*, che risulta pari a 1000000, non garantiva ottimi risultati, soprattutto all'aumentare della frazione solida. Il parametro utilizzato per la prova di solidificazione è stato quindi $A_{mush} = 500000$. La comparazione tra caso numerico e reale mostra per la seconda un abbassamento brusco della temperatura che risulta più morbido nella prova di laboratorio. Dall'inizio del cambiamento di fase però, intorno al minuto 8, le due curve tendono a sovrapporsi, confermando la bontà della prova condotta in *Ansys-Fluent*.

Sia per la prova di carica, che per quella di scarica sono stati ricavati dei contour di temperatura e frazione liquida a diversi istanti di simulazione. Le due tipologie di mappa sono state affiancate per valutare al meglio le

dinamiche di temperatura legate, per esempio, alla presenza di frazione liquida.

Sia per la prova di carica, che per la prova di scarica, è possibile affermare di essere in possesso di un modello accurato e validato dell'accumulo ad alette dritte che permette eventuali studi numerici futuri su sistemi a diversa configurazione di superficie estesa.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi mirava a studiare sperimentalmente e numericamente varie superfici estese, ottenute mediante ottimizzazione topologica per applicazioni di accumulo termico latente. Ad oggi i dispositivi LTES (*Latent Thermal Energy Storage*) rappresentano una grande opportunità di miglioramento dell'efficienza di sistemi in numerosi settori, dalla climatizzazione degli ambienti domestici alle celle frigorifere. Tali sistemi, inoltre, si accoppiano perfettamente alle fonti di energia rinnovabile permettendo di dividere la produzione dall'impiego della risorsa. In questo tipo di accumulo si sfrutta l'energia necessaria a far avvenire un cambiamento di fase a dei materiali, detti *phase change materials*. I PCM possono essere di varia natura, ma la loro caratteristica comune è quella di possedere elevati valori di entalpia di fusione, parametro che quantifica la capacità di accumulare energia per chilogrammo di materia. I materiali a cambiamento di fase più diffusi sono le paraffine, disponibili in un'ampia gamma di temperature di cambio fase e adattabili in molti scenari richiesti dal mercato attuale. L'aspetto negativo di questi materiali è la loro bassa conducibilità termica, comparabile a quella di isolanti termici; ciò rappresenta una grande limitazione, dato che porta spesso a incompleti cicli di fusione/solidificazione. Questo lavoro di tesi nasce appunto dalla necessità di studiare nuovi tipi di superficie estesa per aumentare l'efficienza di tali dispositivi. Le superfici testate sperimentalmente sono state tre. La prima, denominata *Straight*, rappresenta il riferimento per i successivi test ed è caratterizzata da alette longitudinali a sezione rettangolare. La seconda, chiamata *Fillet2*, è la prima superficie ottenuta tramite un'ottimizzazione topologica; essa presenta alette più sottili con fitte diramazioni che ricordano i rami di un albero. Il terzo ed ultimo accumulo, a cui ci si riferisce nel presente lavoro con il nome *Eccentrico*, presenta alette che ricordano il provino precedente, ma il condotto in cui scorre l'acqua risulta posto più in basso. Tutti i provini sono stati ricavati mediante tecnologie di *additive manufacturing* impiegando una lega di alluminio AlSi10Mg, caratterizzata da elevati valori di conducibilità termica.

Le prove sperimentali sono state divise in due categorie principali, secondo le temperature dell'acqua nelle fasi di carica e scarica: ΔT 5°C, dove per la fusione del PCM l'acqua all'ingresso è mantenuta a una temperatura di 25.5°C e, per la solidificazione a 15.5°C; ΔT 10°C, poi, indica temperature di fusione e solidificazione pari rispettivamente a 30.5°C e 10.5°C. Per entrambe le categorie e per ogni provino sono state testate varie portate d'acqua: 1.2, 2, 6 e 10 l/min. I risultati di tutte le prove suggeriscono che aumentare le performance di fusione è molto complesso: le superfici ottimizzate, in tale fase, non dimostrano grandi miglioramenti rispetto alla superficie di riferimento. Il problema maggiore si verifica spesso nella parte inferiore dell'accumulo dove la fusione del PCM risulta essere molto lenta; tale problematica ha portato in alcuni casi a rilevare nelle prove del *Fillet2* tempi di carica superiori al provino di riferimento. Il provino Eccentrico permette di mitigare parzialmente il problema della fusione nella parte inferiore, con conseguenti dinamiche di cambiamento di fase lente nella parte superiore.

Dalle prove sperimentali in solidificazione si rileva invece che le superfici ottimizzate rendono molto di più rispetto alle classiche alette longitudinali. Il risparmio di tempo per portare a completa solidificazione il PCM nella prova ΔT 5°C e portata a 6 l/min, risulta essere oltre il 40% se si compara *Fillet2* con *Straight*. Per la scarica, che risulta essere un fenomeno dominato dalla conduzione termica, i risultati confermano che le alette sottili e con molte diramazioni rappresentano la miglior scelta per fronteggiare i noti problemi di scarsa conducibilità dei PCM. Per quanto riguarda il provino con conformazione eccentrica del condotto, si rilevano tempi di scarica inferiori mediamente del 15% rispetto all'accumulo con alette dritte.

Il lavoro si è successivamente concentrato nello sviluppare e validare un modello numerico di riferimento, replicabile per future analisi, dell'accumulo termico ad alette dritte in *Ansys-Fluent*. Sono quindi state condotte prove numeriche di carica e scarica bi-dimensionali che miravano a replicare le prove condotte in laboratorio con temperatura dell'acqua di 25.5°C e 15.5°C, a portata 6 l/min. La prima fase di studio numerico è stata dedicata all'analisi della mesh, conducendo varie simulazioni a parità di condizioni e variando il parametro che definisce la grandezza minima del dominio discretizzato. Successivamente, impostando il parametro di 0.5mm per la grandezza minima della cella, sono stati studiati tre diversi *time step*: 0.5, 0.25 e 0.1 secondi. Per le prove di carica il parametro designato per il passo di simulazione è stato di 0.1 secondi. Al fine di valutare la temperatura media del PCM nella simulazione CFD sono stati replicati i punti di rilevazione di temperatura delle prove sperimentali. Per

la prova numerica di solidificazione è stato necessario abbassare il passo di simulazione a 0.01 secondi, a causa di problemi legati alla divergenza della simulazione. Rispetto al caso precedente è stato utilizzato inoltre un valore della costante A_{mush} più basso, pari a 500000. I risultati numerici ottenuti in entrambe le prove, permettono di affermare che queste replicano fedelmente le prove sperimentali condotte in laboratorio, con un massimo errore riferito al tempo di carica pari al 9%.

In futuro, sarebbe opportuno condurre prove numeriche tridimensionali del provino di riferimento ad alette dritte. Tali analisi permetterebbero di entrare in possesso di un modello completo, in grado di descrivere precisamente le dinamiche di fusione e solidificazione. Successivamente, mediante tale modello, sarebbe possibile studiare in maniera approfondita strutture in grado di aumentare le performance di fusione del PCM negli accumuli termici latenti.

Bibliografia

- [1] “European Green Deal.” Online available https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, 2019.
- [2] “Accordo di Parigi.” Online available <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement>.
- [3] “Next Generation EU.” Online available https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/whats-new_en.
- [4] “Risparmio energetico: l’azione dell’UE per ridurre il consumo energetico.” Online available <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20221128ST058002/risparmio-energetico-1-azione-dell-ue-per-ridurre-il-consumo-energetico>.
- [5] “Building Stock Observatory.” Online available <https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings>.
- [6] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, and C. Bonacina, *Trasmissione del calore / Cesare Bonacina, Alberto Cavallini, Lino Mattarolo*. Padova: CLEUP, 3. ed ed., c1989.
- [7] “Istituto Barolo, misura della temperatura mediante termocoppie.” Online available http://www.istitutobartolo.it/public/didattica/6_termocoppie.pdf.
- [8] “Produttore termocoppie Moncavi SRL.” Online available <http://moncavi.it/prodotti.html>.
- [9] “World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Pathway, International Renewable Energy Agency.” Online available

- <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023#:~:text=The%20World%20Energy%20Transitions%20Outlook%20outlines%20a%20vision%20for%20the,net%20zero%20by%20mid%2Dcentury> 2023.
- [10] M. Mobedi, K. Hooman, and W. Tao, *Solid-liquid Thermal Energy Storage: Modeling and Applications*. CRC Press, 2022.
- [11] “Irena (2020), innovation outlook: Thermal energy storage, international renewable energy agency, abu dhabi.” Online available [irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook.pdf).
- [12] S. Zhang, S. Mancin, and L. Pu, “A review and prospective of fin design to improve heat transfer performance of latent thermal energy storage,” *Journal of Energy Storage*, vol. 62, p. 106825, 2023.
- [13] “European association for storage of energy and european energy research alliance, 2013.” Online available <https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=312>.
- [14] L. Seyitini, B. Belgasim, and C. C. Enweremadu, “Solid state sensible heat storage technology for industrial applications â a review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 62, p. 106919, 2023.
- [15] D. MacPhee and I. Dincer, “Performance assessment of some ice tes systems,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 12, pp. 2288–2299, 2009.
- [16] A. A. Khosa, T. Xu, B. Xia, J. Yan, and C. Zhao, “Technological challenges and industrial applications of caco3/cao based thermal energy storage system â a review,” *Solar Energy*, vol. 193, pp. 618–636, 2019.
- [17] E. Oro, A. de Gracia, A. Castell, M. Farid, and L. Cabeza, “Review on phase change materials pcms for cold thermal energy storage applications,” *Applied Energy*, vol. 99, pp. 513–533, 2012.
- [18] “European Platform on Life Cycle Assessment (LCA).” Online available <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.html>.
- [19] A. Nematpour Keshteli and M. Sheikholeslami, “Nanoparticle enhanced pcm applications for intensification of thermal performance in building: A review,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 274, pp. 516–533, 2019.

- [20] D. Ghosh, J. Ghose, P. Datta, P. Kumari, and S. Paul, "Strategies for phase change material application in latent heat thermal energy storage enhancement: Status and prospect," *Journal of Energy Storage*, vol. 53, p. 105179, 2022.
- [21] "Catalogo paraffine Rubitherm ." Online available <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>.
- [22] L. Yang, U. Villalobos, B. Akhmetov, A. Gil, J. O. Khor, A. Palacios, Y. Li, Y. Ding, L. F. Cabeza, W. L. Tan, *et al.*, "A comprehensive review on sub-zero temperature cold thermal energy storage materials, technologies, and applications: State of the art and recent developments," *Applied Energy*, vol. 288, p. 116555, 2021.
- [23] S. Kim, J. Chen, T. Cheng, A. Gindulyte, J. He, S. He, Q. Li, B. A. Shoemaker, P. A. Thiessen, B. Yu, *et al.*, "Pubchem 2019 update: improved access to chemical data," *Nucleic acids research*, vol. 47, no. D1, pp. D1102–D1109, 2019.
- [24] J. Pereira da Cunha and P. Eames, "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials â a review," *Applied Energy*, vol. 177, pp. 227–238, 2016.
- [25] N. R. Jankowski and F. P. McCluskey, "A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1525–1561, 2014.
- [26] G. Zhang, J. Li, Y. Chen, H. Xiang, B. Ma, Z. Xu, and X. Ma, "Encapsulation of copper-based phase change materials for high temperature thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 128, pp. 131–137, 2014.
- [27] H. Michels and R. Pitz-Paal, "Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants," *Solar Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 829–837, 2007.
- [28] H. Nazir, M. Batool, F. J. Bolivar Osorio, M. Isaza-Ruiz, X. Xu, K. Vignarooban, P. Phelan, Inamuddin, and A. M. Kannan, "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 129, pp. 491–523, 2019.

- [29] A. Verma and D. Rakshit, "Performance analysis of pcm-fin combination for heat abatement of li-ion battery pack in electric vehicles at high ambient temperature," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 32, p. 101314, 2022.
- [30] R. Kalbasi, B. Samali, and M. Afrand, "Taking benefits of using pcms in buildings to meet energy efficiency criteria in net zero by 2050," *Chemosphere*, vol. 311, p. 137100, 2023.
- [31] H. Yin, D. Yang, G. Kelly, and J. Garant, "Design and performance of a novel building integrated pv/thermal system for energy efficiency of buildings," *Solar Energy*, vol. 87, pp. 184–195, 2013.
- [32] B. Rismanchi, R. Saidur, G. BoroumandJazi, and S. Ahmed, "Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (ctes) systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5741–5746, 2012.
- [33] H. S. A. Hasan, A. Alnoman, "Energy efficiency enhancement of photovoltaics by phase change materials through thermal energy recovery," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [34] V. Goel, A. Dwivedi, R. Kumar, R. Kumar, A. Pandey, K. Chopra, and V. Tyagi, "Pcm-assisted energy storage systems for solar-thermal applications: Review of the associated problems and their mitigation strategies," *Journal of Energy Storage*, vol. 69, p. 107912, 2023.
- [35] C. Veerakumar and A. Sreekumar, "Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications â a review," *International Journal of Refrigeration*, vol. 67, pp. 271–289, 2016.
- [36] R. Karami and B. Kamkari, "Experimental investigation of the effect of perforated fins on thermal performance enhancement of vertical shell and tube latent heat energy storage systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 210, p. 112679, 2020.
- [37] Y. Tao and Y. He, "Effects of natural convection on latent heat storage performance of salt in a horizontal concentric tube," *Applied Energy*, vol. 143, pp. 38–46, 2015.
- [38] S. M. Hashem Zadeh, M. Ghodrat, K. Ayoubi Ayoubloo, N. Seda-ghatizadeh, and R. A. Taylor, "Partial charging/discharging of bio-based latent heat energy storage enhanced with metal foam sheets,"

- International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 130, p. 105757, 2022.
- [39] A. Pizzolato, A. Sharma, K. Maute, A. Sciacovelli, and V. Verda, “Topology optimization for heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 113, pp. 875–888, 2017.
- [40] A. Pizzolato, A. Sharma, K. Maute, A. Sciacovelli, and V. Verda, “Design of effective fins for fast pcm melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization,” *Applied Energy*, vol. 208, pp. 210–227, 2017.
- [41] V.R.Voller, M. Cross, and N. Markatos, “An enthalpy method for convection-diffusion phase change,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. Vol.24, pp. 271–284, 01 1987.
- [42] “ANSYS inc., Ansys Fluent User Manual.” Online available <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node349.htm>, 2009.
- [43] M. Fadl and P. C. Eames, “Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter $amush$ on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 151, pp. 90–99, 2019.
- [44] F. Tan, S. Hosseinizadeh, J. Khodadadi, and L. Fan, “Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (pcm) inside a spherical capsule,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 15, pp. 3464–3472, 2009.
- [45] J. M. Mahdi and E. C. Nsofor, “Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination,” *Energy*, vol. 126, pp. 501–512, 2017.
- [46] H. Shmueli, G. Ziskind, and R. Letan, “Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 19, pp. 4082–4091, 2010.
- [47] G. A. Longo, S. Mancin, G. Righetti, and C. Zilio, “Experimental measurement of thermophysical properties of some commercial phase change materials (pcm) for air conditioning applications,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 144, pp. 202–210, 2022.

-
- [48] H. Zhang, J. Baeyens, G. Caceres, J. Degreve, and Y. Lv, “Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 53, pp. 1–40, 2016.
- [49] V. Joshi and M. K. Rathod, “Experimental and numerical assessments of thermal transport in fins and metal foam infused latent heat thermal energy storage systems: A comparative evaluation,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 178, p. 115518, 2020.
- [50] L. Lamport, *LaTeX: A Document Preparation System*. Addison Wesley Professional, 2nd ed., June 1994. ISBN: 0-201-52983-1.
- [51] A. Baudoin, “Impara L^AT_EX!” documentazione online di Latex, 1998.
- [52] T. Oetiker, “The not so short introduction to L^AT_EX 2_ε.” documentazione online di Latex, 1999.
- [53] Latex project team, “L^AT_EX 2_ε for authors.” online documentation, 1999. directory: /usr/share/texmf/doc/latex/base/, file: userguide.dvi.
- [54] “BibConverter – a tool for converting citations.” Online available <http://www.bibconverter.net/>, 2007.
- [55] “BibConverter – a tool for converting citations: demo page.” Online available <http://www.bibconverter.net/demo/bmdemo.htm>, 2007.

Elenco delle tabelle

1.1	Valori tipici c_p a 20 °C	4
1.2	Valori tipici di λ	5
1.3	Valori tipici di λ [6]	7
1.4	Ordini di grandezza α [6]	8
2.1	Proprietà termofisiche di alcuni PCM organici [22] [23]	22
2.2	Proprietà termofisiche di alcuni PCM inorganici [24] [25]	24
2.3	Proprietà termofisiche di alcuni PCM eutettici [27] [28]	25
2.4	Confronto delle proprietà tra le tipologie di PCM [10]	27
3.1	Proprietà del PCM (dichiarate dal produttore [21])	42
4.1	Tabella esecuzione prove	45
5.1	Simboli utilizzati	79
5.2	Coefficienti regressione lineare per RT5HC [47]	85
5.3	Dati mesh	86

Elenco delle figure

1.1	Curva generica di riscaldamento	5
1.2	Schema di una termocoppia rame - costantana [7]	10
1.3	Schema di una termocoppia rame - costantana [8]	10
2.1	Piano di azione IRENA per la transizione ecologica del 2050 [9]	13
2.2	Range di temperatura e tempo di esercizio di varie tecnologie di TES [12]	16
2.3	Range di funzionamento per tipologia di PCM [11]	17
2.4	Classificazione dei PCM [19]	21
2.5	Cera di paraffina solida	21
2.6	Pannelli solari con sistema di accumulo tramite PCM [31]	26
2.7	Forma delle alette ottimizzate	29
2.8	Confronto tra ottimizzazioni topologiche [40]	30
2.9	Confronto tra ottimizzazioni	31
3.1	Sezioni provini	34
3.2	Visualizzazione 3D provino eccentrico	35
3.3	Confronto tra provini ottimizzati e standard	35
3.4	Setup sperimentale	37
3.5	Provino collegato al circuito dell'acqua	38
3.6	Screenshot programma LabView	38
3.7	Foto setup durante una prova	39
3.8	Posizioni termocoppie	40
3.9	Provino con termocoppie	40
3.10	Dettaglio di due termocoppie	41
3.11	Distribuzione calore sensibile e latente per temperatura	42
4.1	Carica ΔT 5°C 1.2 l/min	47
4.2	Scarica ΔT 5°C 1.2 l/min	47
4.3	Carica ΔT 5°C 2 l/min	48

4.4 Scarica ΔT 5°C 2 l/min	48
4.5 Carica ΔT 5°C 6 l/min	49
4.6 Scarica ΔT 5°C 6 l/min	50
4.7 Carica ΔT 5°C 10 l/min	50
4.8 Scarica ΔT 5°C 10 l/min	51
4.9 Posizioni termocoppie	52
4.10 Grafici TC 1-6 carica	53
4.11 Grafici TC 7-12 carica	54
4.12 Grafici TC 1-6 carica	55
4.13 Grafici TC 7-12 carica	56
4.14 Confronto portate ΔT 5°C Straight	57
4.15 Confronto portate ΔT 5°C Fillet2	57
4.16 Confronto portate ΔT 5°C eccentrico	58
4.17 Tempi totali di ciclo ΔT 5°C	59
4.18 Carica 1.2 l/min	60
4.19 Scarica 1.2 l/min	60
4.20 Carica 2 l/min	61
4.21 Scarica 2 l/min	61
4.22 Carica 6 l/min	62
4.23 Scarica 6 l/min	62
4.24 Carica 10 l/min	63
4.25 Scarica 10 l/min	63
4.26 Tempi totali di ciclo ΔT 10°C	64
4.27 Grafici TC 1-6 carica	66
4.28 Grafici TC 7-12 carica	67
4.29 Grafici TC 1-6 scarica	68
4.30 Grafici TC 7-12 carica	69
4.31 Grafici TC 1-6 carica	70
4.32 Grafici TC 7-12 carica	71
4.33 Foto prova a 25 minuti	72
4.34 Grafici TC 1-6 scarica	73
4.35 Grafici TC 7-12 carica	74
4.36 Confronto portate ΔT 10°C Straight	75
4.37 Confronto portate ΔT 10°C Fillet2	75
4.38 Confronto portate ΔT 10°C eccentrico	76
5.1 Suddivisione del dominio 41	81
5.2 Geometria ottenuta in <i>Design Modeler</i>	86
5.3 Confronto mesh	87
5.4 Confronto andamento temperatura	87
5.5 Confronto andamento temperatura al variare del <i>time-step</i>	88

6.1	Punti valutazione CFD	92
6.2	Comparazione CFD-Sperimentale carica	93
6.3	Confronto punti CFD-Sperimentale	94
6.4	Frazione liquida e temperatura	95
6.5	Foto prova sperimentale $t \approx 30$ min	96
6.6	Foto prova sperimentale $t \approx 56$ min	96
6.7	Confronto tra A_{mush}	97
6.8	Comparazione CFD-Sperimentale scarica	98
6.9	Frazione liquida e temperatura	99