

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

TESI DI LAUREA

**Studio sperimentale e numerico di materiali a
cambiamento di fase per il raffreddamento passivo di
componenti elettronici**

Relatore: Prof.ssa Luisa Rossetto

Correlatore: Ing. Simone Mancin

Laureando: Marco Cazzoli 1035301

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

INDICE

| | |
|---|----|
| SOMMARIO | 1 |
| 1. INTRODUZIONE | 3 |
| 2. STATO DELL'ARTE | 7 |
| 2.1 Materiali in cambiamento di fase | 7 |
| 2.2. Classificazione dei PCMs | 8 |
| 2.2.1. PCMs organici..... | 9 |
| 2.2.2. PCMs inorganici..... | 10 |
| 2.2.3. Eutettici | 12 |
| 2.3. Mezzi per l'incremento delle prestazioni dei PCMs..... | 12 |
| 2.3.1. Alette metalliche | 12 |
| 2.3.2. Nanofibre di grafite..... | 13 |
| 2.3.3. Schiume metalliche | 14 |
| 2.3.4. Incapsulamento..... | 18 |
| 2.4. Altre applicazioni..... | 19 |
| 2.4.1. Sistemi di riscaldamento solare dell'acqua..... | 19 |
| 2.4.2. Forni solari..... | 20 |
| 3. SVILUPPO E COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE | 21 |
| 3.1. ApparatI in letteratura | 21 |
| 3.2. Paraffine e schiume | 23 |
| 3.3. Strumentazione di laboratorio | 24 |
| 3.4. Calibrazione delle termocoppie | 24 |
| 3.5. Apparato di laboratorio..... | 30 |
| 3.6. Il sistema di acquisizione | 39 |
| 4. MISURE SPERIMENTALI | 43 |
| 4.1. Procedura sperimentale delle prove..... | 43 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.2. | Riduzione dei dati | 44 |
| 4.3. | Prove con sola paraffina | 45 |
| 4.4. | Influenza del tipo di paraffina sul comportamento termico..... | 54 |
| 4.5. | Scelta della paraffina per le prove con le schiume | 57 |
| 4.6. | Prove con paraffina e schiuma | 60 |
| 4.7. | Influenza della schiuma sulla temperatura della base..... | 67 |
| 4.8. | Visualizzazione del processo di liquefazione del PCM | 78 |
| 5. | MODELLAZIONE DEL SISTEMA | 81 |
| 5.1. | Costruzione del modello | 81 |
| 5.2. | Modello definitivo | 90 |
| 5.2.1. | Prove a 10 W | 94 |
| 5.2.2. | Prove a 20 W | 98 |
| 5.2.3. | Prove a 30 W | 101 |
| 5.2.4. | Risultati | 104 |
| 5.3. | Proposte per il futuro | 105 |
| | CONCLUSIONI | 107 |
| | NOMENCLATURA | 111 |
| | BIBLIOGRAFIA | 113 |
| | RINGRAZIAMENTI | 117 |

SOMMARIO

L'evoluzione che ha caratterizzato il settore della tecnologia negli ultimi due decenni ha portato ad un incredibile sviluppo della potenza di calcolo dei chip elettronici utilizzati oramai in moltissimi dispositivi, dallo smartphone al tablet, dal notebook al PC. Certamente ciò ha migliorato la qualità della nostra vita e ci ha dato accesso a numerose funzioni impensabili sino a qualche tempo fa, tuttavia ha portato alla luce un problema sempre più pressante: la dissipazione del calore prodotto. L'utente moderno richiede apparecchi sempre più potenti, ma allo stesso tempo sempre più piccoli nelle dimensioni: questo implica un calore specifico generato sempre maggiore. Oggi sono al vaglio diverse soluzioni per far fronte a questo problema, tra le quali sembra essere molto promettente l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCMs dall'acronimo inglese Phase Change Materials), eventualmente coadiuvati da mezzi per l'incremento delle prestazioni termiche quali le schiume metalliche.

In questo lavoro di tesi si studia il comportamento termico di due tipologie di dissipatori passivi: il primo costituito da solo PCM, il secondo contenente anche una schiuma metallica. Sono state sperimentalmente testate tre tipi di paraffine aventi differenti caratteristiche termofisiche e tre schiume metalliche in rame con diverse caratteristiche geometriche. Inoltre, è stato svolto uno studio numerico al fine di modellare il fenomeno fisico.

Nel capitolo 1 si introducono brevemente le basi teoriche sullo scambio di calore e i settori tecnici nei quali questo è usato per far fronte a diverse problematiche.

Nel capitolo 2 si distinguono le diverse tipologie di materiali a cambiamenti di fase, dando per ognuna una descrizione delle principali caratteristiche. Si trattano i principali mezzi con cui incrementarne le prestazioni e infine si espongono alcune applicazioni più significative.

Nel capitolo 3 si descrivono le diverse fasi della progettazione dell'apparato di misura sperimentale e se ne descrive la costruzione. Si caratterizzano le paraffine e le schiume utilizzate e si illustra il sistema di acquisizione dati.

Nel capitolo 4 si espone la procedura seguita per realizzare le prove di laboratorio con le tre paraffine e con le tre schiume e si illustrano i risultati ottenuti. Si discute su quale appaia essere rispettivamente la paraffina e la schiuma migliore dal punto di vista termico.

Nel capitolo 5 si discute la modellazione del sistema fisico mediante il software di simulazione numerica Fluent [1] esponendo i parametri caratterizzanti e la procedura iterativa necessaria a ricercarne i corretti valori. Si propongono poi future modifiche per migliorarne l'accuratezza.

Nel capitolo 6 si sintetizza il lavoro svolto, esponendo i risultati ottenuti e offrendo degli spunti per lavori successivi.

1. INTRODUZIONE

Lo stoccaggio di energia termica, o TES (dall'inglese *Thermal Energy Storage*) è stato oggetto di numerosi studi negli ultimi due decenni; le motivazioni principali sono legate alla possibilità sia di conseguire un risparmio di energia sia di ottimizzare l'uso di quest'ultima, nell'ottica dell'efficienza e della razionalità.

È possibile stoccare il calore in modo sensibile (SHS) e in modo latente (LHS): entrambe le tecnologie presentano vantaggi e svantaggi, per questa ragione la scelta tra le due va effettuata in base al campo d'applicazione.

La tecnologia SHS prevede di accumulare energia termica attraverso l'aumento di temperatura di un solido o di un liquido; il calore stoccato dipende dal calore specifico del mezzo, dalla variazione di temperatura e dalla massa del materiale secondo la (1.1):

$$Q = \int_{T_{iniz}}^{T_{fin}} m \cdot c_p \cdot dT \quad (1.1)$$

con Q calore accumulato in [J], T_{iniz} temperatura iniziale del mezzo in [K], T_{fin} temperatura finale dello stesso in [K], m massa del materiale in [kg], c_p calore specifico del mezzo in [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], dT variazione di temperatura del mezzo in [K]. Tra i materiali disponibili, l'acqua appare essere il migliore liquido in quanto è economica ed ha un elevato calore specifico; tuttavia, al di sopra dei 100°C sono più indicati metalli liquidi e sali fusi.

La tecnologia LHS è basata sull'assorbimento e sul rilascio di calore durante il cambiamento di fase di un materiale detto PCM (acronimo di *Phase Change Material*). La capacità di stoccaggio di questi materiali è espressa dalla (1.2):

$$Q = \int_{T_{iniz}}^{T_m} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_{fin}} m \cdot c_p \cdot dT \quad (1.2)$$

con Q calore accumulato in [J], T_{iniz} temperatura iniziale del mezzo in [K], T_m temperatura di fusione dello stesso in [K], m massa del materiale in [kg], c_p calore specifico del mezzo in [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], dT variazione di temperatura del mezzo in [K], a_m frazione fusa, Δh_m calore di fusione per unità di massa in [J kg^{-1}], T_{fin} temperatura finale del materiale in [K]. In questo contesto, il materiale PCM inizialmente aumenta la propria temperatura (primo termine a sinistra dell'equazione), raggiunta la

temperatura di fusione inizia la transizione di fase (secondo termine, che indica il calore latente assorbito dall'effettiva frazione fusa di materiale) e, se riscaldato ancora, torna ad aumentare la propria temperatura oltre quella di fusione (terzo termine).

Fra le due tecnologie, la LHS è particolarmente interessante per l'elevata densità di energia stoccata in gioco e per la possibilità di accumulare energia a temperatura costante, pari a quella di fusione del PCM. I cambiamenti di fase possibili sono:

- solido-solido: passaggio da una forma cristallina ad un'altra accompagnato da modeste entità di variazione di volume e di calore latente assorbito;
- solido-gas/liquido-gas: presenta un elevato calore latente assorbito, ma anche una variazione importante di volume;
- solido-liquido: il calore latente assorbito è modesto, come pure la variazione di volume.

Solamente l'ultima tipologia si presta ad applicazioni concrete e commerciabili, perché caratterizzata da variazione di volume contenuta. Ciò infatti consente di limitare da un lato le dimensioni del contenitore del PCM e dall'altro la pressione massima per la quale esso deve essere dimensionato; ciò porta ad una considerevole riduzione dei costi.

La tecnologia TES basata su sistemi LHS offre soluzioni in differenti macroaree:

- Produzione e consumo di energia non contemporanei;
- Sicurezza dei sistemi di fornitura dell'energia;
- Inerzia termica e protezione termica.

Il primo caso si riferisce generalmente alla produzione di energia da fonti rinnovabili, in special modo da radiazione solare, intrinsecamente intermittente; la possibilità di affiancare un sistema TES a PCM al classico serbatoio ad acqua, consente di utilizzare l'energia raccolta da un collettore solare anche nelle ore notturne, riducendo l'eventuale apporto richiesto ad un ausiliario a fonte fossile. Non è comunque insolito trovare questi sistemi applicati anche ad impianti cogenerativi, con lo scopo di ridurre i picchi di carico termico.

Classicamente il secondo caso prevede l'utilizzo di sistemi sovradimensionati o aggiuntivi in grado di fare fronte all'eventuale picco della domanda oppure al malfunzionamento di un gruppo generatore; l'utilizzo della tecnologia di stoccaggio può portare all'eliminazione o alla riduzione di questi equipaggiamenti supplementari.

L'ultima macroarea di applicazione è sicuramente quella su cui si concentrano la maggior parte delle ricerche attuali e dei prodotti oggi disponibili sul mercato. L'inserimento di PCM all'interno delle pareti di un edificio consente sia la riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione della temperatura interna sia il livellamento del carico richiesto per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'ambiente. Estremamente allettante risulta inoltre la possibilità di realizzare un sistema passivo di dissipazione del calore mediante materiali a cambiamento di fase, soprattutto nel settore dell'elettronica, che da un lato riduca il consumo di energia per lo smaltimento del calore e dall'altro elimini il rumore generato dai sistemi attivi.

Questo lavoro di tesi si focalizza proprio sull'utilizzo di PCM per il settore dell'elettronica: oggi giorno i dispositivi portatili presentano dimensioni sempre più ridotte, ma contemporaneamente hanno potenza di calcolo sempre maggiore. Questo implica un maggiore flusso termico per unità di superficie che deve essere dissipato per mantenere l'apparecchiatura al di sotto della temperatura operativa massima, generalmente pari a circa 85°C. I computer, ad esempio, utilizzano sistemi attivi costituiti da una ventola che soffia aria verso il processore: questa soluzione, oltre a consumare energia (che quindi riduce la durata della batteria del computer), produce anche un rumore non trascurabile. L'implementazione di un dissipatore passivo a PCM permetterebbe di eliminare entrambi questi problemi; tuttavia, nemmeno esso è esente da aspetti negativi, tra questi: la bassa conducibilità termica dei PCM e la variazione di volume durante la fusione.

2. STATO DELL'ARTE

2.1 *Materiali in cambiamento di fase*

I materiali a cambiamento di fase (PCMs) accumulano calore sotto forma di calore latente: questo processo avviene quando il mezzo cambia di fase, ossia quando passa da solido a liquido e viceversa. Inizialmente, il PCM assorbe calore come i materiali convenzionali e dunque accumula calore sensibile aumentando la propria temperatura; raggiunta la temperatura di fusione, incorre la transizione di fase, durante la quale la temperatura resta costante ed il mezzo assorbe calore latente. Il calore accumulato per unità di volume è 5÷14 volte maggiore rispetto ai sistemi SHS come quelli basati su acqua. Ad oggi sono conosciuti molti PCMs, le cui temperature di fusione coprono un range molto ampio; tuttavia, prima di essere classificati come commerciabili, devono presentare alcune caratteristiche che li rendano interessanti per un uso esteso [2], [3].

- Proprietà termiche:
 - temperatura di fusione adatta all'applicazione;
 - elevato calore latente di fusione;
 - buono scambio termico.

Nella scelta del PCM, la temperatura operativa di riscaldamento e raffreddamento deve essere accoppiata alla temperatura di fusione del materiale. Il calore latente di fusione volumetrico deve essere il più elevato possibile per ridurre lo spazio occupato. Una elevata conducibilità termica permette un incremento nelle prestazioni di carica e scarica del calore.

- Proprietà fisiche:
 - equilibrio di fase stabile;
 - elevata densità;
 - modesta variazione di volume;
 - bassa tensione di vapore.

La stabilità durante il cambiamento di fase aiuta nel dimensionamento dello scambio termico. L'elevata densità consente di ridurre i volumi occupati. Piccole variazioni di volume e bassa tensione di vapore permettono di ridurre il problema del contenimento.

- Proprietà cinetiche:
 - assenza di sottoraffreddamento;
 - velocità di cristallizzazione elevata.

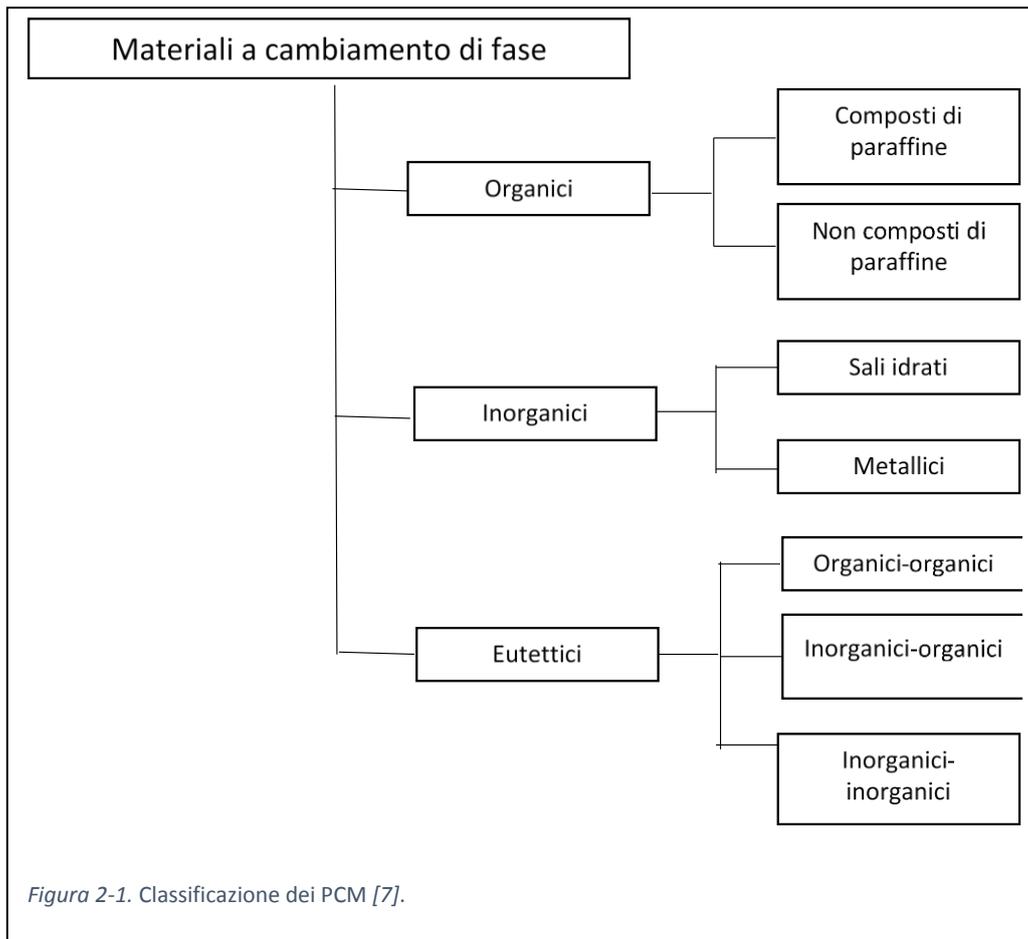
L'assenza di sottoraffreddamento e la velocità di cristallizzazione sostenuta permettono di mantenere costante la temperatura di fusione, evitando di incorrere in interferenze con lo scambio termico.

- Proprietà chimiche:
 - stabilità chimica a lungo termine;
 - compatibilità con i materiali costruttivi;
 - non tossicità;
 - non infiammabilità.
- Proprietà economiche:
 - abbondante;
 - disponibile;
 - poco costoso.

Nessun PCM ad oggi possiede tutte queste caratteristiche, quindi la scelta deve essere fatta sulla base dell'applicazione da soddisfare, cercando di trovare soluzioni per ovviare alle proprietà sfavorevoli.

2.2. Classificazione dei PCMs

La scelta del PCM deve essere fatta sulla base dell'applicazione, di modo che la temperatura di fusione ricada nel range operativo. Generalmente, i materiali che fondono al di sotto dei 15°C sono usati per lo stoccaggio di freddo nel condizionamento dell'aria, mentre quelli che fondono al di sopra dei 90°C vengono impiegati per i cicli frigoriferi ad assorbimento; i mezzi con temperatura di fusione compresa tra questi due valori trovano applicazione nel riscaldamento solare e nel livellamento del carico termico. Questi ultimi rappresentano la categoria più studiata negli ultimi quarant'anni, in quanto presentano la maggiore gamma di impiego. Una rassegna completa dei PCMs comprendente caratteristiche, vantaggi, svantaggi è stata data da Abhat et al. [2], Lane et al. [4] [5], Dincer e Rosen et al. [6]. Un'ottima classificazione è stata redatta da Sharma et al. [7], come schematizzato in Figura 2-1.



2.2.1. PCMs organici

I materiali organici sono suddivisi in paraffine e non paraffine; essi fondono in modo congruente, ossia non si ha segregazione di fase durante la fusione e perciò possono far fronte a molti cicli di transizione di fase senza degradazione del loro calore latente di fusione. Inoltre, solidificano con un modesto o senza sottoraffreddamento, quindi la temperatura di fusione si mantiene pressoché costante.

2.2.1.1. Paraffine

Le cere paraffine sono costituite da una miscela di catene di n-alcani del tipo $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2) - \text{CH}_3$. La cristallizzazione di queste rilascia una grande quantità di calore latente. Sia la temperatura di fusione che il calore latente aumentano al crescere della lunghezza della catena. Esistono molteplici paraffine, ciascuna con diversa temperatura di fusione, di modo che risulta essere molto semplice trovare quella che meglio si adatta alla temperatura operativa dell'applicazione alla quale si voglia

affiancare un sistema a PCM. Tuttavia, a causa del costo elevato della paraffina pura, essa viene generalmente utilizzata nelle versioni *technical grade*, ossia impure; in commercio si possono trovare cere con gradi di purezza molto variabili. Un valore medio di densità di stoccaggio è 200 kJ kg^{-1} . La paraffina è atossica, chimicamente inerte, non corrosiva, stabile sotto i 500°C , presenta variazione di volume modesta durante il cambiamento di fase e non dà luogo né a sottoraffreddamento né a segregazione di fase; per queste ragioni, essa è particolarmente indicata in sistemi che devono sottostare a molti cicli di fusione/solidificazione. Nondimeno è contraddistinta da caratteristiche negative, quali bassa conducibilità termica (mediamente pari a $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), incompatibilità con contenitori di plastica, infiammabilità moderata; esse possono essere ridotte od eliminate modificando opportunamente la cera od il contenitore.

Tra le paraffine, molto usata dai ricercatori risulta essere per le sue buone caratteristiche il modello P-116, con temperatura di fusione di 47°C e calore latente di fusione di 210 kJ kg^{-1} .

2.2.1.2. *Non paraffine*

Le non paraffine sono il gruppo più numeroso dei PCMs; ogni materiale ha le sue proprie caratteristiche, ma presentano comunque aspetti comuni: elevato calore di fusione, infiammabilità, bassa conducibilità termica, tossicità medio-alta, instabilità alle alte temperature. Sono divise in acidi grassi e altre non paraffine; una raccolta estensiva è stata fornita da Buddhi e Sawhney [3] e da Abhat et al. [8].

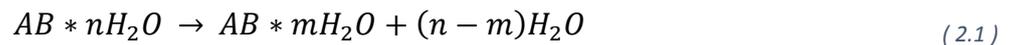
Tra gli acidi grassi si annoverano l'acido caprilico, laurico, palmitico, stearico; essi hanno temperatura di fusione che varia nell'intervallo $30\div 65^\circ\text{C}$, mentre il calore latente vale $153\div 182 \text{ kJ kg}^{-1}$. Feldman e Shapiro et al. [9] hanno analizzato le proprietà di questi ultimi e di alcune miscele binarie, giungendo alla conclusione che essi sono ottimi candidati per lo stoccaggio di calore latente nelle applicazioni spaziali.

2.2.2. *PCMs inorganici*

I materiali inorganici sono suddivisi in sali idrati e materiali metallici; essi possiedono un calore latente più elevato rispetto alle paraffine, tuttavia va degradando nel tempo, ragion per cui sono meno studiati di queste ultime, eccezion fatta per i sali idrati.

2.2.2.1. Sali idrati

I sali idrati sono leghe di sali inorganici e acqua che formano un solido cristallino descritto dalla formula generale $AB \cdot nH_2O$. Il processo di fusione in realtà è una disidratazione del sale, che porta alla formazione di un sale idrato e di acqua, secondo la (2.1):



Un problema dei sali idrati è la fusione incongruente, ossia la segregazione di fase, causata dal fatto che l'acqua di cristallizzazione non è sufficiente a dissolvere tutta la fase solida presente al momento della solidificazione; per la differenza di densità, infatti, il sale anidrato si dispone sul fondo del contenitore, di modo che al successivo ciclo la quantità di PCM effettivamente disponibile è diminuita: in questo modo il calore latente cala. Una possibile soluzione sembra essere quella di utilizzare degli agenti chimici volti ad aumentare la viscosità del sale, come la bentonite, anche se si hanno effetti negativi, quali riduzione della velocità di cristallizzazione e della conducibilità termica. Inoltre, molti sali idrati hanno basse velocità di nucleazione, che portano al fenomeno del sottoraffreddamento del liquido prima della completa solidificazione; si può porre rimedio a ciò utilizzando degli additivi nucleanti, come il borace.

Tra le principali caratteristiche positive si hanno: elevato calore latente per unità di volume, alta conducibilità termica (circa $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), piccola variazione di volume durante la fusione, bassa tossicità, compatibilità con contenitori plastici, costo modesto.

Molto utilizzato è il solfato di sodio $Na_2SO_4 \cdot H_2O$, in quanto è uno dei sali idrati meno costosi; presenta temperatura di fusione pari a 32.4°C e un calore latente di 254 kJ kg^{-1} .

2.2.2.2. Materiali metallici

Questa categoria include i metalli a bassa temperatura di fusione e i metalli eutettici; non sono largamente usati a causa delle restrizioni sul peso decisamente elevato in confronto ad altre soluzioni. In particolari situazioni nelle quali il volume occupato è un vincolo molto stretto, essi possono rappresentare una valida alternativa, soprattutto per l'elevato calore latente volumetrico. Tra le caratteristiche di questi materiali si hanno: basso calore latente per unità di peso, elevato calore latente per unità di volume, elevata conducibilità termica, basso calore specifico.

2.2.3. *Eutettici*

Un eutettico è una miscela di sostanze il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che la compongono. In un materiale eutettico tutti i suoi elementi fondono e solidificano congruentemente e simultaneamente, senza cioè segregazione. Sono dati dalla miscelazione di composti organici e inorganici; presentano caratteristiche molto simili ai materiali metallici.

2.3. *Mezzi per l'incremento delle prestazioni dei PCMs*

Uno dei problemi essenziali che caratterizza la maggior parte dei PCMs è il basso valore di conducibilità termica, tale per cui nella progettazione di qualunque sistema di stoccaggio di calore latente si rende necessario prevedere delle tecniche per migliorare la conduzione termica. Sono vari i metodi utilizzati, tra i quali alette metalliche, matrici metalliche o di grafite, incapsulamento.

La questione è di primaria importanza in quanto un basso valore di conducibilità equivale ad un elevato gradiente di temperatura all'interno del mezzo; in particolar modo la temperatura maggiore si registrerà in corrispondenza dell'elemento riscaldante: dovendo questo essere mantenuto al di sotto di una ben precisa temperatura, c'è il rischio che ciò non risulti possibile.

Nel seguito, i metodi di incremento delle prestazioni del PCM sono riferiti alle applicazioni elettroniche, fulcro di questo lavoro, sebbene trovino poi largo impiego anche in altri campi.

2.3.1. *Alette metalliche*

L'utilizzo di una superficie alettata metallica a contatto con il PCM permette di ottenere un duplice vantaggio:

- I. l'elevata conducibilità termica del metallo permette al calore di penetrare in maniera molto più efficace all'interno del mezzo, asportando il calore ad un tasso più elevato dal componente riscaldante;
- II. se la parte superiore del dissipatore alettato è aperta all'ambiente, ciò consente un ulteriore incremento del calore asportato dal componente riscaldante, in quanto vi è il contributo della convezione naturale.

Hosseinizadeh et al. [10] hanno indagato l'influenza di alcuni parametri, quali il numero di alette, lo spessore delle alette e la loro altezza, sulla temperatura del componente riscaldante posto al di sotto del dissipatore. L'apparato è costituito da un dissipatore cavo di alluminio, isolato ai lati,

riscaldato dal basso e aperto all'ambiente superiormente; il PCM è paraffina. Innanzitutto è importante far notare che quest'ultima ha una conducibilità pari a $0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, mentre per l'alluminio è $180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; ciò rende le alette buone conduttrici, mentre il PCM si comporta pressoché come un isolante.

Si è osservato che al crescere del numero di alette aumenta il tempo necessario a dare inizio alla fusione, in quanto è maggiore la massa di alluminio e quindi il sistema ha una accresciuta capacità termica; allo stesso tempo, diminuisce il tempo necessario a completare la fusione, essendo minore la quantità di PCM presente.

L'aumento di spessore porta solo un lieve incremento nelle prestazioni termiche; inoltre, esiste un valore ottimo oltre il quale non si ottengono benefici.

Con alette più alte si accresce la superficie di scambio aletta-PCM e quindi aumenta il flusso di calore ceduto a quest'ultimo; si ritarda l'inizio della fusione, per la maggior quantità di alluminio presente, e si riduce la sua durata, per la minor massa di PCM contenuta.

Kandasamy et al. [11] hanno investigato gli effetti della potenza dissipata sul comportamento del dissipatore alettato. L'apparato è costituito da un circuito elettrico installato su una scheda plastica al quale è connesso, a mezzo di una pasta termica ad alta conducibilità, un dissipatore ad alette metalliche aperto superiormente; il ruolo del riscaldatore è svolto dal circuito stesso.

E' emerso che al crescere del flusso termico ceduto al PCM si riducono sia il tempo necessario a raggiungere la fusione sia la durata della fusione stessa, come intuitivamente ci si aspettava.

Fok et al. [12] hanno analizzato l'influenza dell'orientamento del sistema LHS sulla temperatura dell'elemento riscaldante, arrivando alla conclusione che esso non vi apporta significativi effetti. L'apparato è costituito da un dissipatore ad alette metalliche nel quale è versata paraffina come PCM, riscaldato da un hot plate inferiore connesso mediante pasta termica; esso è isolato dall'esterno con Teflon, eccetto che nella parte superiore per permettere la convezione naturale.

In questo caso, lo studio è mirato in modo specifico ai dispositivi portatili, per i quali non è possibile ipotizzare un'unica posizione di utilizzo.

2.3.2. Nanofibre di grafite

Tra i metodi per incrementare la conducibilità termica del PCM, detti anche TCEs (dall'inglese *Thermal Conductivity Enhancers*), le nanofibre di grafite si sono dimostrate essere molto promettenti, in quanto permettono, in fase di riscaldamento del materiale, di ottenere prestazioni

molto simili a quelle delle alette metalliche, ma con il grande vantaggio di incrementare la massa del sistema di una quantità ben più modesta di queste. Esse difatti possiedono conducibilità comparabile con l'alluminio, ma densità molto inferiore.

Uno studio molto interessante è stato svolto da Sanusi et al. [13], che, dopo essersi accertati che le nanofibre conferissero prestazioni termiche migliori al sistema LHS durante la fase di accumulo di calore, hanno indagato l'influenza delle stesse sulla fase di solidificazione. Questo aspetto è certamente fondamentale per tutte quelle applicazioni di raffreddamento dell'elettronica che prevedono un uso intermittente del dispositivo che produce calore: se la solidificazione del PCM non è stata completata dopo l'ultimo ciclo di funzionamento dello strumento, all'avvio del successivo ciclo sarà presente una minor quantità di PCM solido che si farà carico di assorbire il calore prodotto e quindi c'è il concreto rischio che non si riesca a mantenere la temperatura del sistema al di sotto di limiti accettabili.

L'apparato utilizzato prevede l'uso di un contenitore di alluminio riscaldato da sotto e coperto nella parte superiore da un piatto freddo mantenuto a temperatura costante da un fluido per assicurare un flusso di calore unidimensionale dal basso verso l'alto. Le nanofibre utilizzate sono a fibra di spina di pesce, che si è rivelata essere la forma migliore per assicurare un buon incremento delle prestazioni in fase di fusione; esse vengono versate nel PCM fuso e poi mescolate, per assicurare una dispersione uniforme. Il PCM viene fatto surriscaldare per consentire lo studio anche del raffreddamento sensibile. I dati sperimentali dimostrano che le nanofibre migliorano la conduzione di calore per ogni valore di flusso riscaldante e massa di PCM.

2.3.3. *Schiume metalliche*

Una schiuma metallica è una struttura cellulare costituita da un metallo solido, in genere rame o alluminio, in cui buona parte del volume è costituita da pori d'aria; i pori possono essere chiusi (schiuma a celle chiuse), oppure possono formare una rete interconnessa (schiuma a celle aperte). Le prime solitamente sono utilizzate come isolanti termici, in quanto le bolle d'aria ivi contenute non sono in comunicazione tra di loro e quindi permettono di ottenere elevate prestazioni in termini di isolamento. Le seconde possono essere impiegate come scambiatori di calore: la matrice metallica viene riscaldata, anche elettricamente, ed un fluido passando attraverso di essa assorbe calore; grazie all'elevato rapporto superficie/volume questo scambio avviene in modo molto efficiente.

La caratteristica distintiva delle schiume metalliche è la porosità molto elevata: di solito il 75÷95% del volume è costituito da spazi vuoti.

I vantaggi della schiuma metallica risiedono nella bassa densità e nella alta resistenza della struttura: il metallo non è soggetto alle limitazioni sulla resistenza meccanica e sugli shock termici alle quali deve sottostare un materiale ceramico sia cellulare che reticolato. La bassa inerzia termica permette un trasferimento del calore più veloce che nei materiali ceramici. La grande varietà di metalli e leghe disponibile permette di adattare la struttura allo specifico compito da svolgere. Il materiale ha inoltre un alto rapporto tra area della superficie e caduta di pressione, fondamentale per applicazioni che richiedono il passaggio di un fluido attraverso la schiuma.

Tra le tecniche di produzione, quella più utilizzata è la decomposizione di schiumogeni in semisolidi [14]; questa modalità si basa sulla decomposizione di un agente schiumogeno all'interno di semisolidi. Si parte da una miscela, il più possibile uniforme, di polvere di metallo ed agente schiumogeno (idruro di titanio), sinterizzando poi a freddo le polveri miscelate, in modo da ottenere un cilindro compatto. Quindi, si estrude il cilindro ottenuto in modo da ottenere un semilavorato della forma voluta (solitamente barre, profilati o piastre). Le barre di materiale precursore vengono tagliate in spezzoni, a loro volta inseriti all'interno di una preforma sagomata con la forma del pezzo che si vuole ottenere. La forma viene poi inserita all'interno di un forno e riscaldata fino ad una temperatura prossima a quella di fusione del metallo base. L'agente schiumogeno uniformemente disperso nel precursore si decompone, liberando il gas che si espande formando la schiuma.

Il tempo necessario alla formazione della schiuma, a seconda delle condizioni di temperatura e dalla forma del precursore, va da pochi secondi a diversi minuti. La schiuma metallica rappresenta un materiale funzionale con proprietà importanti per applicazioni automotive, quali costruzioni leggere (ovvero che massimizzano la rigidità specifica), componenti per l'assorbimento di energia meccanica, componenti per il controllo delle vibrazioni meccaniche e di fenomeni termici e acustici.

2.3.3.1. Parametri caratterizzanti

Una schiuma metallica viene definita in base ad alcuni parametri peculiari, che influenzano il suo comportamento nelle applicazioni LHS:

- la porosità ϵ indica la frazione del volume occupata da gas rispetto al volume totale e si attesta generalmente a valori elevati 0,8÷0,95;
- la densità di pori ω indica il numero di pori presenti nell'unità di volume;

- il diametro dei pori d_p , legato alla densità dei pori secondo la (2.2):

$$d_p = \frac{25,4}{\omega} \quad (2.2)$$

- il diametro della fibra metallica d_f ;
- la superficie specifica a_{sf} , definita come l'area d'interfaccia solido-fluido per una matrice di cilindri paralleli che si intersecano nelle tre mutue direzioni perpendicolari secondo la (2.3):

$$a_{sf} = \frac{3\pi d_f}{d_p^2} \quad (2.3)$$

Per le schiume metalliche, questa espressione è modificata per tenere conto della sua particolare struttura, come le celle aperte a forma di dodecaedro e la sezione non circolare delle fibre; si ottiene perciò la (2.4) secondo Calmidi et al. [15]:

$$a_{sf} = \frac{3\pi d_f}{(0,59 * d_p)^2} \cdot (1 - e^{-\frac{1-e}{0,04}}) \quad (2.4)$$

- il coefficiente di tortuosità χ , definito da Ahmed et al. [16] come il rapporto tra la lunghezza effettiva L_e del percorso disponibile per il flusso del fluido entro la cella unitaria del mezzo poroso e la lunghezza apparente L dello stesso misurata nella direzione del flusso. Du Plessis e Comiti ne hanno dato una espressione nella (2.5), dipendente solo dalla porosità:

$$\chi = \frac{L_e}{L} = 2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1}(2\varepsilon - 1)\right) \quad (2.5)$$

- la permeabilità K indica l'attitudine della schiuma ad essere attraversata da un fluido ed è espressa dalla (2.6):

$$K = \frac{\varepsilon^2 \cdot d_p^2 \cdot \chi}{36 \cdot (\chi - 1) \cdot (3 - \chi)} \quad (2.6)$$

2.3.3.2. *Comportamento*

Le evidenze sperimentali permettono di studiare gli effetti dell'uso di schiume metalliche in sistemi LHS basati su PCM.

Qu et al. [17] hanno realizzato un dissipatore cavo con alette disposte superiormente: la cavità è stata riempita dapprima con sola paraffina, poi anche con una schiuma di alluminio. Si è studiato il comportamento in riscaldamento.

Le fibre della schiuma hanno elevata conducibilità e permettono quindi di asportare un flusso di calore maggiore dalla base riscaldata rispetto al caso con sola paraffina: ciò consente di mantenere la temperatura della base a valori inferiori. È di primaria importanza nelle applicazioni di raffreddamento poter conseguire basse temperature: nell'elettronica, questo significa allungare la vita utile dei circuiti e ridurre il numero di errori di calcolo. Allo stesso tempo, l'elevato valore di conducibilità termica delle fibre e la loro disposizione a rete capillare consente una distribuzione più uniforme del calore all'interno del PCM: la temperatura di quest'ultimo è così circa la stessa in tutto il materiale e non vi sono gli elevati gradienti che si presentano invece nel caso di pura paraffina. Da ciò ne consegue che la temperatura di fusione viene raggiunta in un tempo minore.

Durante la fusione, la temperatura, pur mantenendosi più bassa del caso senza schiuma, cresce con pendenza più ripida; nella fase liquida i moti convettivi che si instaurano permettono un incremento nel flusso di calore asportato: la presenza della schiuma impedisce questi moti e perciò penalizza lo scambio. Questo aspetto risulta però variabile a seconda del caso studiato: si tratta di valutare le entità dell'effetto positivo dovuto all'incremento della conduzione termica e dell'effetto negativo legato alla soppressione della convezione.

E' stato condotto uno studio anche sull'influenza dei parametri ε ed ω sulle prestazioni del sistema di raffreddamento.

Per densità di pori costante, al diminuire della porosità cresce il diametro della fibra e quindi l'area d'interfaccia, consentendo una maggiore comunicazione termica tra la paraffina e la schiuma; si ottiene perciò un abbassamento della temperatura della base.

Per porosità costante, al crescere della densità di pori diminuisce il diametro degli stessi e dunque la permeabilità K ; la convezione naturale è perciò sfavorita e si ottiene un incremento della temperatura della base.

Zhou et al. [18] hanno indagato l'effetto di una schiuma metallica sulle prestazioni termiche della paraffina, inserita all'interno di un contenitore rettangolare riscaldato dal fondo ed isolato dall'esterno.

Senza schiuma si è osservato che la temperatura del PCM sale lentamente nella fase prima della fusione, in quanto il regime è dominato dalla conduzione, che è sfavorita nella paraffina; in seguito, a fusione avviata, cresce rapidamente sia per l'instaurarsi di moti convettivi sia per il surriscaldamento della fase liquida dovuta alla bassa conducibilità della fase solida.

Con la schiuma, la temperatura sale più rapidamente prima della fusione, grazie alla matrice metallica che distribuisce il calore in tutta la paraffina contribuendo ad asportare un maggior flusso termico dalla base; durante il cambiamento di fase si mantiene pressoché costante al valore della temperatura di fusione, ad indicare che quest'ultima avviene in modo uniforme in tutto il materiale. La solidificazione, essendo un processo dominato dalla conduzione, risulta essere più rapida nel caso con schiuma; questa infatti apporta proprio un incremento alla conducibilità media del sistema PCM-schiuma.

2.3.4. Incapsulamento

Per incapsulamento si intende l'inclusione del PCM in un contenitore opportunamente progettato; i vantaggi sono molteplici: incremento dell'area di scambio termico, riduzione della reattività del PCM verso l'ambiente esterno, controllo del volume durante il cambiamento di fase.

Si distinguono due tipologie di incapsulamento in base alla dimensione caratteristica del contenitore:

- macroincapsulamento se essa è maggiore di 1 cm. L'inclusione avviene in tubi, sfere, pannelli che fungono direttamente da scambiatori o possono essere incorporati in altri elementi;
- microincapsulamento se essa è minore di 1 mm. L'inclusione avviene in particelle sferiche racchiuse in un film polimerico sottile con elevata massa molecolare.

Il contenitore ha generalmente forma a cilindro o a parallelepipedo ed è realizzato in plastica o metallo (acciaio, alluminio). Esso va progettato in base alla geometria desiderata ed ai parametri termici richiesti; questi fattori vanno ad influenzare: scambio termico, tempo di fusione, performance di accumulo del calore.

2.4. Altre applicazioni

I campi di applicazione dei PCM sono estremamente vari; una trattazione esauriente è data da Sharma et al. [7] e viene qui ripresa trattando schematicamente i più rilevanti.

2.4.1. Sistemi di riscaldamento solare dell'acqua

Negli ultimi anni, il riscaldamento dell'acqua a mezzo della radiazione solare ha acquistato popolarità, grazie alla semplicità di realizzazione degli annessi impianti ed al loro relativamente basso costo.

Gli impianti tradizionali prevedono l'utilizzo di un accumulo di acqua coibentato per far fronte alla richiesta di calore anche nelle ore in cui la radiazione è assente; tuttavia, in questo modo, la temperatura dell'acqua prelevata dal serbatoio va diminuendo nel tempo, mancando la sorgente riscaldante. È stato proposto l'inserimento di un PCM all'interno del contenitore: il Sole provvede a fornire l'energia necessaria alla fusione e quando esso scompare è il mezzo stesso a riscaldare l'acqua mediante il calore ceduto durante la fase di solidificazione. Esistono diverse versioni di questo sistema: una prevede di realizzare uno strato di paraffina sul fondo dell'accumulo, ma per il basso valore di conducibilità termica il calore trasmesso è molto modesto. Alcuni hanno perciò modificato questo progetto inserendo il PCM in tubi a diametro ridotto disposti verticalmente entro il serbatoio, così da aumentare l'area di scambio con l'acqua, che li lambisce riscaldandosi, come mostrato in Figura 2-2.

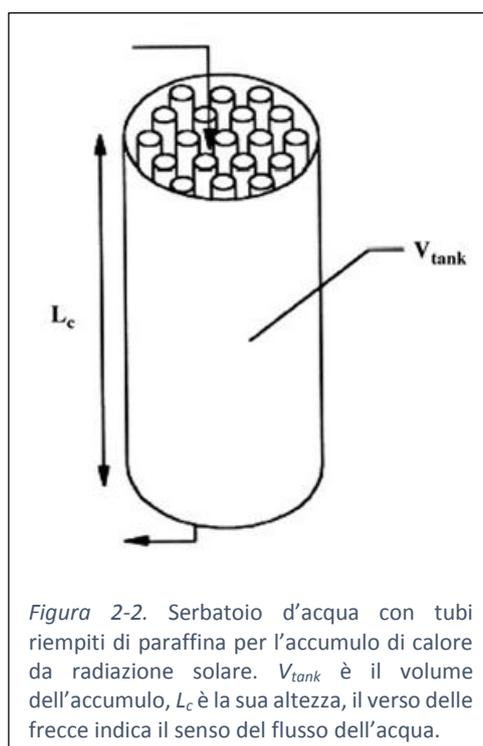
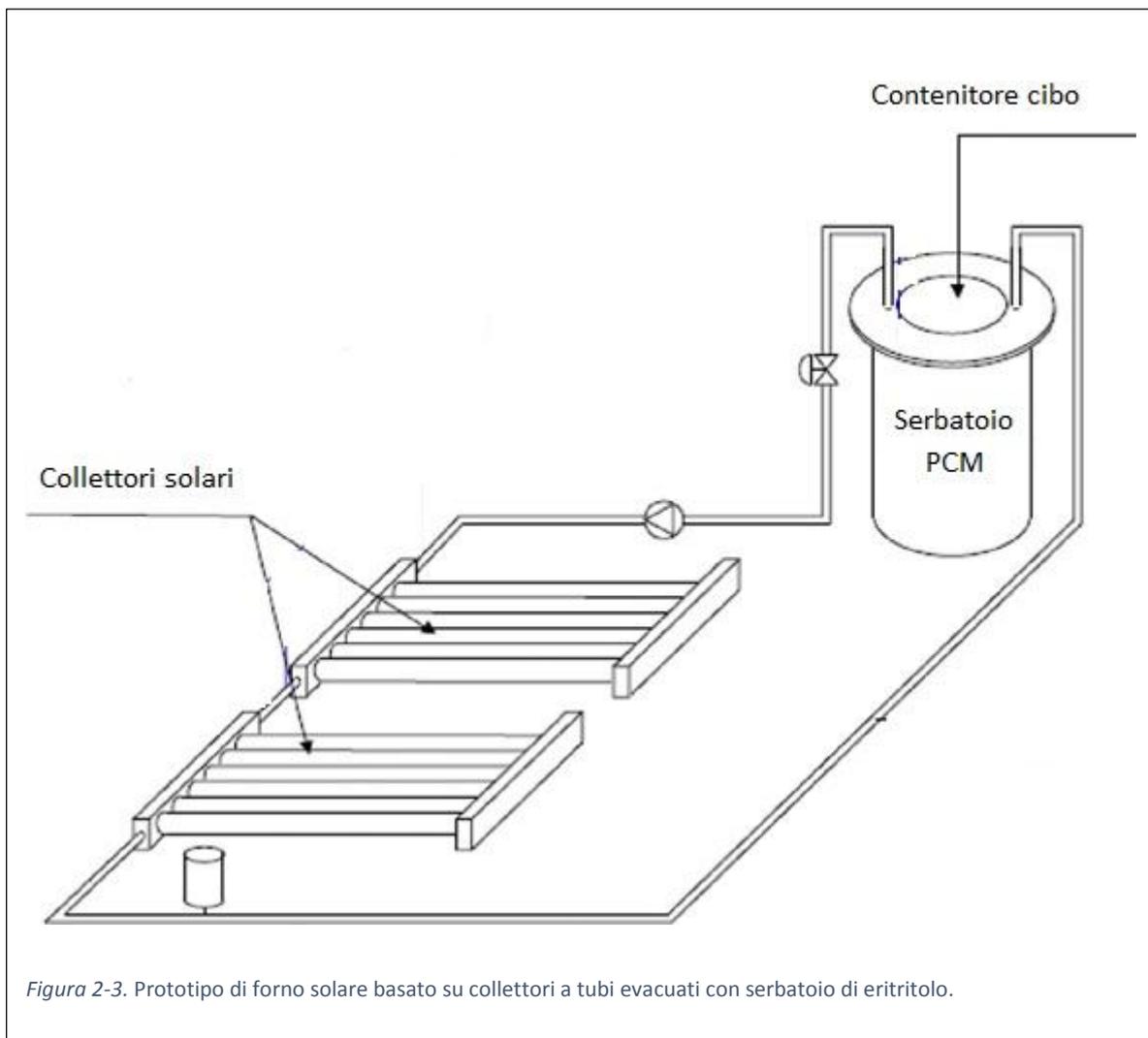


Figura 2-2. Serbatoio d'acqua con tubi riempiti di paraffina per l'accumulo di calore da radiazione solare. V_{tank} è il volume dell'accumulo, L_c è la sua altezza, il verso delle frecce indica il senso del flusso dell'acqua.

2.4.2. Forni solari

Uno dei maggiori impieghi dell'energia solare riguarda la cottura; tuttavia, questa non è possibile durante le ore notturne. L'utilizzo di un PCM permette di ovviare a questo problema: esso viene posto sul fuoco di specchi concentratori della radiazione solare, solitamente tre, in modo da causarne la fusione durante le ore diurne; alla sera, sfruttando il calore latente rilasciato durante la solidificazione, è possibile utilizzare il forno per cucinare. Si è sperimentalmente verificato che è preferibile utilizzare sali idrati come materiali a cambiamento di fase, con una temperatura di fusione pari a $105\div 110^{\circ}\text{C}$.

Un prototipo promettente prevede di utilizzare eritritolo e di sostituire gli specchi con collettori a tubi evacuati: grazie a questi si scalda l'acqua che procede in un contenitore di PCM portandolo a fusione. Il circuito chiuso del sistema è schematizzato in Figura 2-3.



3. SVILUPPO E COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

3.1. Apparati in letteratura

Prima di iniziare a progettare l'apparato sperimentale che sarebbe stato utilizzato per effettuare i test in laboratorio in questo lavoro di tesi è stata necessaria una ricerca bibliografica volta a conoscere gli apparati già realizzati in altri centri di ricerca e le loro caratteristiche. Di seguito si riporta una breve panoramica delle sezioni di misura più significative.

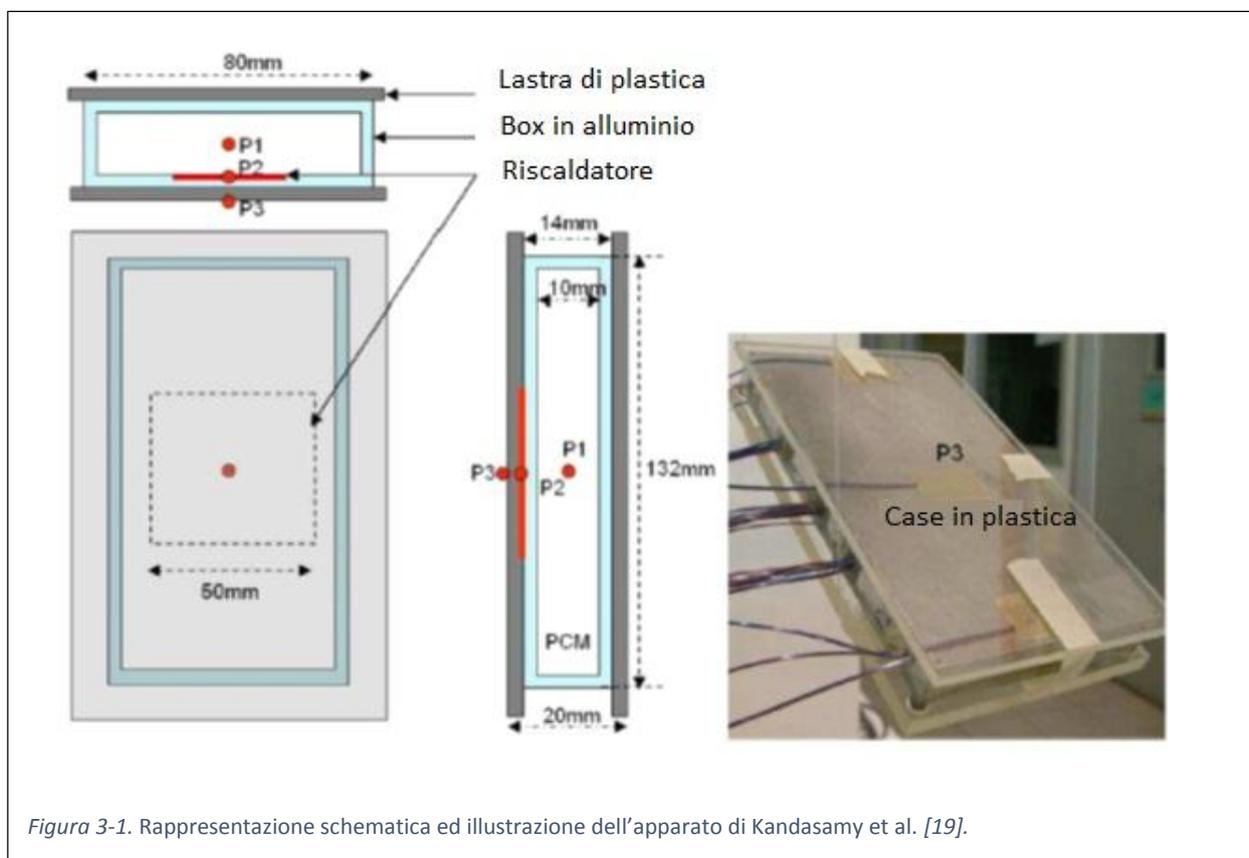


Figura 3-1. Rappresentazione schematica ed illustrazione dell'apparato di Kandasamy et al. [19].

In Figura 3-1 è riportato lo schema dell'apparato di Kandasamy et al. [19] realizzato per indagare l'effetto di materiali a cambiamento di fase nella dissipazione di calore per applicazioni elettroniche. L'apparato è stato sovradimensionato intenzionalmente in modo da garantire una elevata risoluzione del profilo di temperatura entro il PCM. Noto che il processo che si vuole simulare è di tipo transitorio e ha luogo nello spazio tridimensionale, sono state installate all'interno delle termocoppie per ricostruire l'andamento di temperatura nello spazio e nel tempo. Come visibile nella figura, la termocoppia P1 è stata utilizzata per rilevare la temperatura entro il PCM, la P2 per quella del riscaldatore e la P3 per quella del case in plastica. La dissipazione di calore da parte del

chip elettronico è stata simulata inserendo un riscaldatore elettrico su un lato dell'apparato; l'intero sistema è stato poi isolato termicamente con del Perspex, scelto sia per la sua bassa conducibilità termica che per la sua trasparenza che consente di osservare ciò che avviene all'interno del case. Per ogni livello di potenza vengono condotte almeno tre prove per verificare la riproducibilità dei dati.

Interessante è la possibilità di vedere ciò che avviene all'interno, in prospettiva di poter realizzare dei filmati del fenomeno fisico. Inoltre, le dimensioni elevate della sezione di misura possono facilitare la comprensione della fisica del problema, nonché consentire una modellazione semplificata.

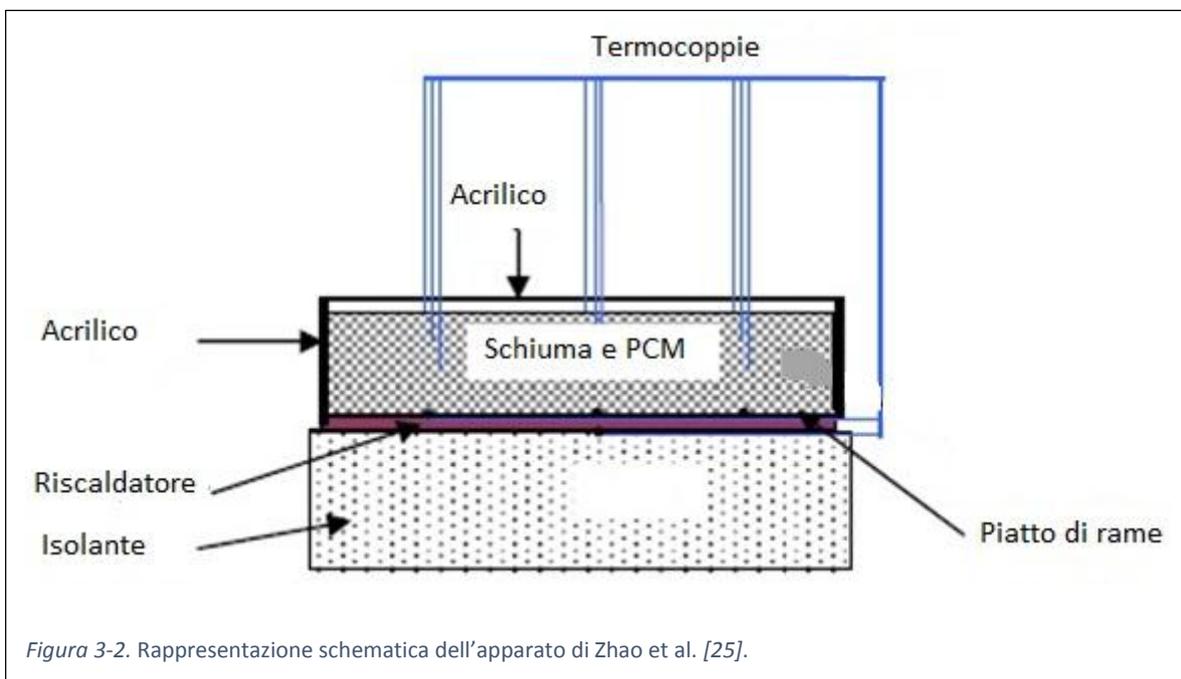


Figura 3-2. Rappresentazione schematica dell'apparato di Zhao et al. [25].

In Figura 3-2 è riportato lo schema dell'apparato realizzato da Zhao et al. [18] per indagare l'effetto della schiuma sulle prestazioni termiche di un PCM. Una schiuma rettangolare è impregnata con un PCM ed è saldobrasata ad un piatto di rame; sotto di questo vi è un riscaldatore elettrico che provvede a fornire un flusso costante di calore controllabile dall'utente. Nove termocoppie sono presenti entro il PCM per monitorare l'evoluzione della temperatura, mentre altre tre sono fissate sul piatto di rame. Il fondo dell'apparato è isolato con Armaflex, mentre tutti gli altri lati sono avvolti con materiale acrilico che permette l'osservazione del fenomeno di fusione.

Si riconfermano molti degli elementi già visti nell'apparato precedente, che sicuramente verranno ripresi.

3.2. Paraffine e schiume

Le paraffine disponibili per la sperimentazioni sono state fornite a titolo gratuito dalla compagnia tedesca Sasol; i tre modelli sono: Sasolwax 5203, Sasolwax 5603 e Sasolwax 5803. Le principali caratteristiche sono riportate in Tabella 3-1.

Tabella 3-1. Proprietà delle paraffine utilizzate per le prove (fonte: Sasol).

| Modello/Proprietà | ρ [kg m ⁻³] | c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹] | λ [W m ⁻¹ K ⁻¹] | T_{fus} [°C] |
|-------------------|------------------------------|---|--|----------------|
| 5203 | 920 a 20°C 777 a 70 °C | 1800 a 20°C 2400 a 70°C | 0.25 | 52÷54 |
| 5603 | 920 a 20°C 777 a 70 °C | 1800 a 20°C 2400 a 70°C | 0.25 | 56÷58 |
| 5803 | 920 a 20°C 777 a 70 °C | 1800 a 20°C 2400 a 70°C | 0.25 | 58÷60 |

Le schiume disponibili risultano essere caratterizzate da un fattore di grande rilevanza dal punto di vista tecnico, ossia la presenza di due basette di rame saldobrasate rispettivamente sopra e sotto la schiuma: su quella inferiore è praticato un foro a 5 mm dal fondo e di 20 mm di profondità. Nell'ottica delle applicazioni in elettronica, la basetta rappresenta l'hotspot che deve essere raffreddato e mantenuto al di sotto di una ben determinata temperatura; quest'ultima potrà essere valutata inserendo una termocoppia nel sopra citato foro. In questo modo, non vi è resistenza di contatto tra l'hotspot e la schiuma e dunque la resistenza termica tra quest'ultimo e l'ambiente calcolata a partire dai dati sperimentali risulta essere solamente quella del dissipatore paraffina-schiuma, non inficiata dalle caratteristiche di una pasta conduttiva eventualmente posta tra i due. Le tre schiume di rame disponibili hanno le proprietà elencate in Tabella 3-2.

Tabella 3-2. Proprietà delle schiume utilizzate per le prove.

| Schiuma/Proprietà | ε [-] | ω [PPI] |
|-------------------|-------------------|----------------|
| 1 | 0.935 | 5 |
| 2 | 0.935 | 10 |
| 3 | 0.936 | 40 |

3.3. *Strumentazione di laboratorio*

Le apparecchiature utilizzate durante questo lavoro sono:

- Agilent 34970A: è un multimetro digitale dotato di una scheda di acquisizione che riceve un segnale analogico di tensione, il quale viene trasformato in un segnale digitale; questo viene poi inviato mediante interfaccia GPIB al computer.
- Kaye K170: è un Ice Point Reference, ossia fissa i 0°C per le temperature misurate mediante le termocoppie. Il giunto caldo è all'interno del sensore della termocoppia, mentre il giunto freddo è posto entro lo strumento; tra i due è posto il multimetro, che legge il valore corrispondente di tensione.
- CEA ALN30.30: è un generatore di corrente continua dotato di due manopole atte a regolare il valore di tensione e di corrente da erogare.
- termocoppie tipo T (rame-costantana) con diametro 1 mm e incertezza $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

3.4. *Calibrazione delle termocoppie*

Questa fase si rende necessaria per determinare la curva di calibrazione delle termocoppie utilizzate nelle prove sperimentali, cioè la curva che descrive la relazione tra la tensione presente ai capi della termocoppia e la temperatura a cui essa si trova (o meglio la differenza di temperatura tra le due giunzioni della termocoppia).

I dispositivi utilizzati nel corso della prova sono:

- Techne RB-12A: è un bagno termostato, la cui temperatura può essere regolata mediante un regolatore digitale; essa viene mantenuta grazie alla presenza di resistenze e di un refrigeratore.
- Fasinternational M2801/IRTD-400: è una termoresistenza al platino Pt-100 con incertezza di $\pm 0.025^\circ\text{C}$ ed operante nel range $-180\div 420^\circ\text{C}$.

La Pt-100 serve per valutare la temperatura del bagno termostato con elevata precisione: presa questa a riferimento, si provvede a leggere le temperature misurate dalle termocoppie da calibrare e, in base alla differenza tra queste ed il valore di riferimento, si costruisce la curva di taratura per ciascuna.

La procedura sperimentale per la calibrazione è la seguente:

- I. la Pt-100 è collegata al proprio lettore che provvede a mostrare su uno schermo digitale la temperatura in °C da essa rilevata;
- II. le termocoppie vengono collegate al Kaye K170 e quindi all'Agilent 34970A, che fornisce a schermo le tensioni misurate dalle stesse in mV;
- III. con del nastro adesivo si fissano le termocoppie da calibrare alla Pt-100, in modo tale che i sensori delle prime e della seconda si trovino alla stessa altezza;
- IV. si immerge la Pt-100 con le termocoppie all'interno del bagno termostato: la prima funge da riferimento per la temperatura;
- V. si fissa la temperatura di partenza del bagno a 25°C;
- VI. dopo essersi assicurati di aver atteso un tempo sufficiente perché sia raggiunta la condizione di regime, si trascrivono le temperatura misurate dalla Pt-100 e dalle termocoppie;
- VII. si incrementa la temperatura del bagno con un passo di 2.5°C;
- VIII. si ripetono i punti VI e VII fino a che la temperatura del bagno raggiunge gli 80°C, oltre la quale il bagno termostato non può andare.

Le prime termocoppie calibrate sono state cinque, nel seguito indicate come TC 41, TC 42, TC 43, TC 44, TC 45. I dati ottenuti sono stati riportati in Tabella 3-3.

Tabella 3-3. Valori misurati durante la calibrazione: la prima colonna a sinistra indica la temperatura rilevata dalla Pt-100; le successive cinque indicano le tensioni in uscita dalle cinque termocoppie calibrate.

| Pt-100 | TC 41 [mV] | TC 42 [mV] | TC 43 [mV] | TC 44 [mV] | TC 45 [mV] |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 29.79 | 1.19 | 1.19 | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| 34.77 | 1.39 | 1.39 | 1.39 | 1.39 | 1.39 |
| 39.68 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 |
| 42.08 | 1.70 | 1.70 | 1.70 | 1.70 | 1.70 |
| 44.65 | 1.81 | 1.81 | 1.81 | 1.81 | 1.81 |
| 47.21 | 1.92 | 1.92 | 1.92 | 1.92 | 1.92 |
| 49.56 | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 2.02 |
| 52.16 | 2.13 | 2.13 | 2.13 | 2.13 | 2.13 |
| 54.47 | 2.23 | 2.23 | 2.23 | 2.23 | 2.23 |
| 57.13 | 2.34 | 2.34 | 2.34 | 2.34 | 2.34 |
| 59.33 | 2.44 | 2.44 | 2.44 | 2.44 | 2.44 |
| 62.05 | 2.56 | 2.56 | 2.56 | 2.56 | 2.56 |
| 64.25 | 2.66 | 2.66 | 2.65 | 2.65 | 2.66 |
| 67.07 | 2.78 | 2.78 | 2.78 | 2.78 | 2.78 |
| 69.16 | 2.87 | 2.87 | 2.87 | 2.87 | 2.87 |
| 72.03 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| 74.49 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 |
| 76.84 | 3.22 | 3.22 | 3.22 | 3.22 | 3.22 |
| 79.46 | 3.33 | 3.33 | 3.33 | 3.33 | 3.33 |

Si è utilizzato il polinomio di conversione da mV a °C per termocoppie di tipo T indicato nella (3.1):

$$T[^\circ\text{C}] = 0.01678956801 * T[\text{mV}]^4 - 0.03685919268 * T[\text{mV}]^3 - 0.6625435429 * T[\text{mV}]^2 + 25.96625448 * T[\text{mV}] + 0.01334110023 \quad (3.1)$$

Applicando questo polinomio si sono potute convertire le tensioni in uscita dalle termocoppie indicate in Tabella 3-3 nei corrispondenti valori di temperatura, indicati in Tabella 3-4.

Tabella 3-4. Utilizzando il polinomio di conversione della (3.1) si sono convertite le tensioni in uscita dalle termocoppie nei corrispondenti valori di temperatura.

| TC 41 [°C] | TC 42 [°C] | TC 43 [°C] | TC 44 [°C] | TC 45 [°C] |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 29.87 | 29.85 | 29.85 | 29.82 | 29.87 |
| 34.86 | 34.84 | 34.84 | 34.81 | 34.84 |
| 39.75 | 39.75 | 39.75 | 39.75 | 39.77 |
| 42.20 | 42.18 | 42.18 | 42.18 | 42.18 |
| 44.76 | 44.76 | 44.76 | 44.73 | 44.76 |
| 47.32 | 47.30 | 47.28 | 47.28 | 47.30 |
| 49.67 | 49.67 | 49.67 | 49.64 | 49.67 |
| 52.28 | 52.26 | 52.24 | 52.24 | 52.26 |
| 54.61 | 54.61 | 54.58 | 54.56 | 54.58 |
| 57.27 | 57.25 | 57.22 | 57.22 | 57.25 |
| 59.46 | 59.46 | 59.44 | 59.44 | 59.46 |
| 62.22 | 62.22 | 62.20 | 62.18 | 62.22 |
| 64.43 | 64.43 | 64.40 | 64.38 | 64.43 |
| 67.29 | 67.27 | 67.24 | 67.24 | 67.27 |
| 69.39 | 69.37 | 69.37 | 69.35 | 69.37 |
| 72.31 | 72.29 | 72.29 | 72.27 | 72.29 |
| 74.84 | 74.82 | 74.80 | 74.78 | 74.80 |
| 77.26 | 77.24 | 77.22 | 77.22 | 77.26 |
| 79.93 | 79.91 | 79.88 | 79.86 | 79.91 |

Note la temperatura misurata T_m per ogni termocoppia e la temperatura corretta T_c della Pt-100 (ci si riferisce a quest'ultima con la dicitura "corretta" in quanto l'incertezza della termoresistenza è molto piccola) è possibile calcolare lo scarto dT tra le due come nella (3.2).

$$dT = T_m - T_c \quad (3.2)$$

I valori di dT sono riportati in Tabella 3-5.

Tabella 3-5. Utilizzando la (3.2) si sono valutati gli scarti tra la temperatura misurata dalle termocoppie e quella corretta misurata dalla Pt-100.

| dT 41 [°C] | dt 42 [°C] | dt 43 [°C] | dt 44 [°C] | dt 45 [°C] |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.08 |
| 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.07 |
| 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.11 |
| 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.11 |
| 0.12 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.10 |
| 0.14 | 0.14 | 0.11 | 0.09 | 0.11 |
| 0.14 | 0.12 | 0.09 | 0.09 | 0.12 |
| 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.13 |
| 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.13 | 0.17 |
| 0.18 | 0.18 | 0.15 | 0.13 | 0.18 |
| 0.22 | 0.20 | 0.17 | 0.17 | 0.20 |
| 0.23 | 0.21 | 0.21 | 0.19 | 0.21 |
| 0.28 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.26 |
| 0.35 | 0.33 | 0.31 | 0.29 | 0.31 |
| 0.42 | 0.40 | 0.38 | 0.38 | 0.42 |
| 0.47 | 0.45 | 0.42 | 0.40 | 0.45 |

A partire dai dati della Tabella 3-5 si è realizzata la curva di taratura per ciascuna termocoppia: questa indica, per ogni valore di temperatura misurata dalla termocoppia, lo scarto presente fra quest'ultima e quella corretta; in Figura 3-3 sono riportate le curve di taratura delle cinque termocoppie calibrate.

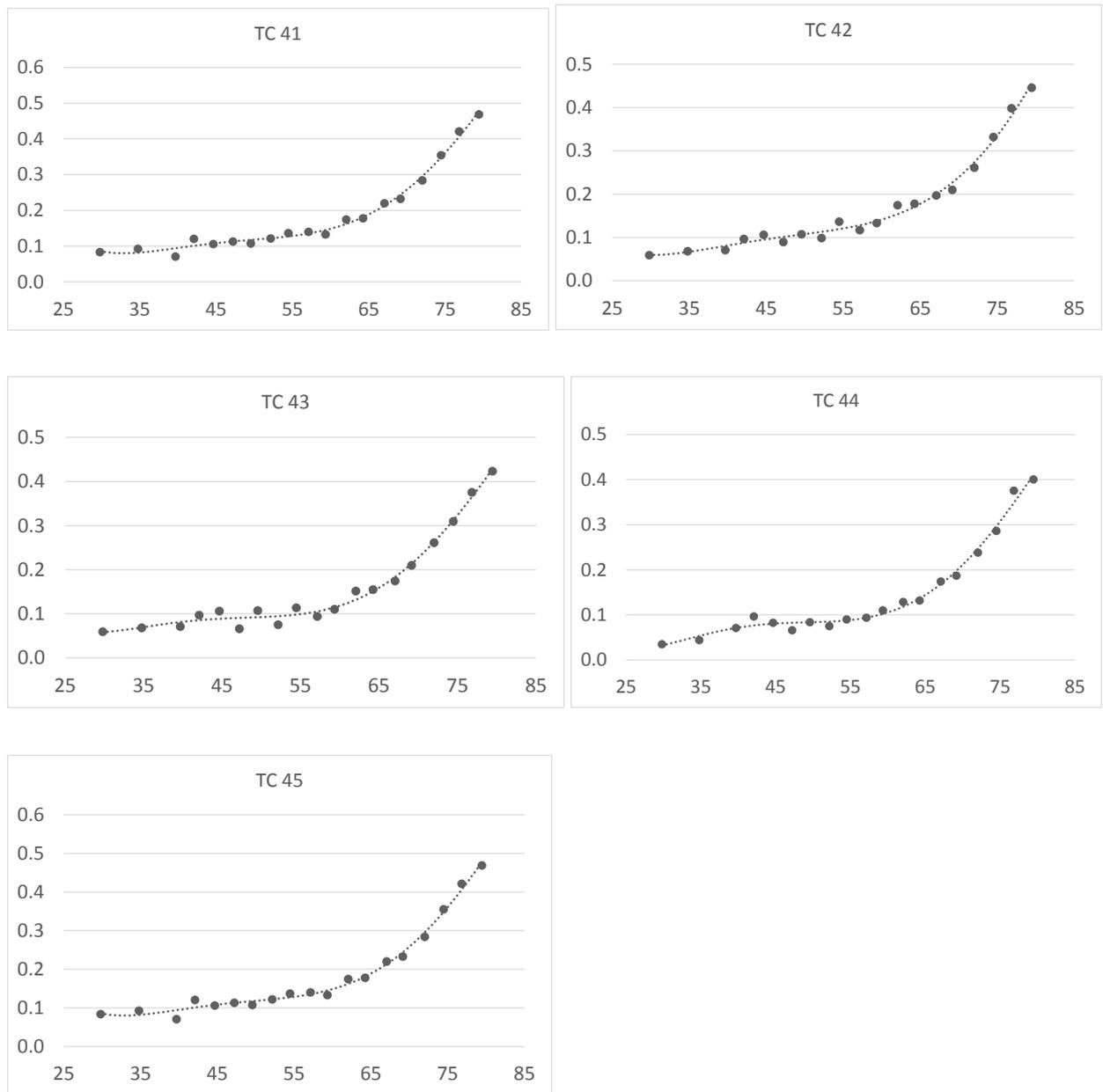


Figura 3-3. Curve di taratura delle cinque termocoppie calibrate; in ascissa la temperatura in °C ed in ordinata dT in °C.

Tabella 3-6. Curve di tendenza delle cinque termocoppie calibrate.

| Termocoppia | Polinomio |
|-------------|---|
| TC 41 | $dT = -0.0000000086 * T^5 + 0.0000024819 * T^4 - 0.0002709081 * T^3 + 0.0141963691 * T^2 - 0.3573559529 * T + 3.5429228098$ |
| TC 42 | $dT = -0.0000000035 * T^5 + 0.0000010901 * T^4 - 0.0001249854 * T^3 + 0.0067239809 * T^2 - 0.1698424532 * T + 1.6786899420$ |
| TC 43 | $dT = -0.0000000072 * T^5 + 0.0000019639 * T^4 - 0.0002015567 * T^3 + 0.0098166874 * T^2 - 0.2266415767 * T + 2.0487881821$ |
| TC 44 | $dT = -0.0000000074 * T^5 + 0.0000020049 * T^4 - 0.0002035400 * T^3 + 0.0097173898 * T^2 - 0.2164707790 * T + 1.8326615121$ |
| TC 45 | $dT = -0.0000000086 * T^5 + 0.0000024819 * T^4 - 0.0002709081 * T^3 + 0.0141963691 * T^2 - 0.3573559529 * T + 3.5429228098$ |

In Tabella 3-6 si riportano invece le curve di tendenza elaborate da Excel [20] come polinomi di quinto grado a partire dai punti sperimentali di Figura 3-1.

A questo punto, noto per ogni termocoppia lo scarto dT , è possibile calcolare il valore corretto di temperatura applicando la correzione attraverso il polinomio di taratura, secondo la (3.3):

$$T_c = T_m - dT \quad (3.3)$$

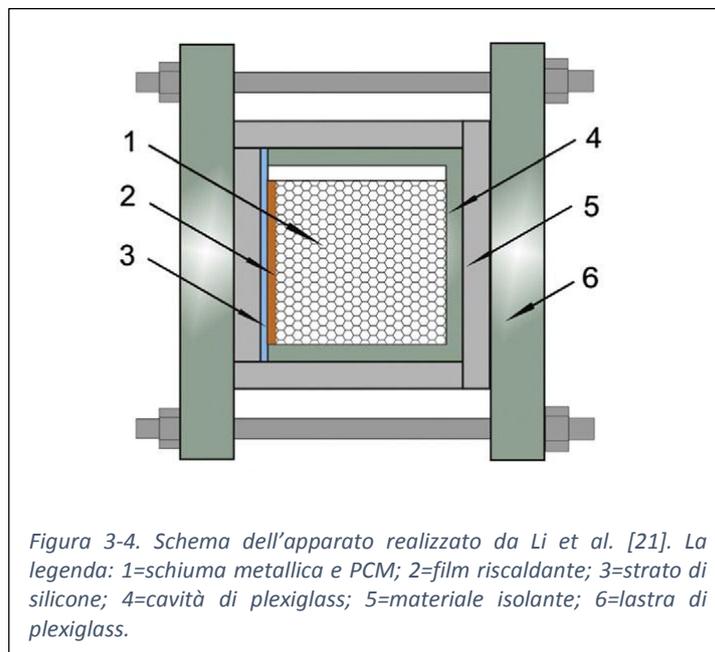
Questa correzione viene quindi implementata sui dati raccolti ad ogni prova da ogni termocoppia fino ad una temperatura letta di 80°C, pari cioè al limite superiore di taratura delle termocoppie. Per temperature maggiori si ipotizza un andamento lineare dell'errore dT e perciò si procede a considerare solamente gli ultimi tre punti per ciascuna curva di taratura e, a partire da questi, si

calcola la linea di tendenza lineare. Questa correzione si applica poi quindi per temperature superiori a 80°C.

3.5. Apparato di laboratorio

Come già precedentemente discusso, scopo di questo lavoro è lo studio comparativo del comportamento di un sistema LHS che utilizzi rispettivamente sola paraffina e una schiuma immersa entro la paraffina. Al fine di perseguire l'obiettivo della semplicità di realizzazione e di utilizzo dell'apparato, si è deciso di progettare quest'ultimo come composizione di due parti: una parte interna, che avrebbe contenuto il provino in esame (quindi la sola paraffina oppure l'insieme paraffina-schiuma), e una parte esterna, adibita all'isolamento termico verso l'esterno e al riscaldamento del provino. Inoltre, la parte interna avrebbe dovuto essere di facile estrazione da quella esterna, in modo tale da dover realizzare un solo esemplare di quest'ultima.

Si è preso spunto dallo studio di Li et al. [21] per realizzare una bozza dell'apparato, dato che questo incarnava tutte le idee appena esposte.

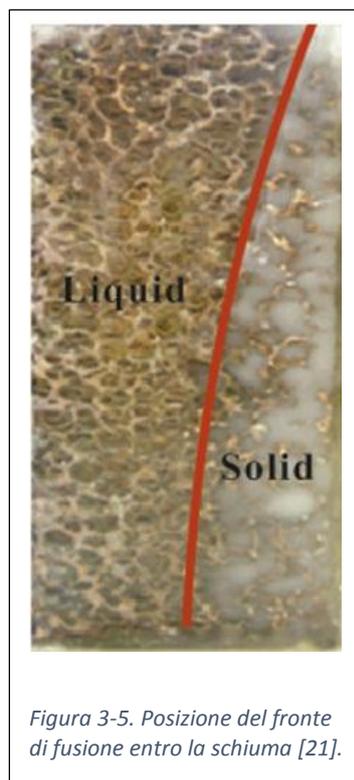


In Figura 3-4 è schematizzato l'apparato di cui sopra: la schiuma impregnata di paraffina è a contatto termico su un lato con un riscaldatore a film che provvede a fornire il flusso termico; entrambi sono racchiusi in una cavità di plexiglass che ha il compito di trattenere al suo interno il PCM. Tenendo in considerazione l'espansione volumetrica della paraffina durante la liquefazione, è stato lasciato uno

spazio di 5 mm tra la schiuma ed il plexiglass. L'isolamento termico sui quattro lati è garantito da uno strato di 30 mm di poliuretano; l'intero blocco è poi mantenuto compatto da due blocchi laterali di plexiglass fissati con appositi tiranti a bulloni. La misurazione della temperatura avviene in quattro distinti punti posti ad altezze differenti rispetto al film riscaldante.

Inizialmente si è pensato di realizzare un apparato sulla falsa riga di questo, tuttavia, anche sulla base dei risultati ottenuti da Li et al, si è preferito ricorrere all'orientamento verticale della schiuma. Difatti, nella variante orizzontale si pone il problema della non simmetria del fronte di fusione all'interno del provino rispetto all'asse dello stesso a causa della forza di gravità; questa ha principalmente due effetti indesiderati:

- la fase liquida tende a scendere verso il basso, facendo sì che il fronte di fusione si muova come in Figura 3-5; non procede in modo parallelo al film riscaldante e quindi la fisica del problema si complica notevolmente, venendo meno la simmetria del sistema;



- la paraffina liquida ha la possibilità di sovrastare quella ancora solida a causa del gap presente tra schiuma e plexiglass e dell'aumento di volume che accompagna la fusione, facendo sì che il riscaldamento della stessa avvenga anche dall'alto.

Lo studio di questo sistema, pur interessante, appare quindi prematuro come progetto primigenio sul comportamento di un sistema LHS a paraffina.

Per le considerazioni fatte nel Par. 3.2, una termocoppia sarà posizionata al centro della base di rame nel caso di sola paraffina, o al centro della basetta inferiore nel caso di schiuma. Data l'elevata conducibilità del rame, una volta riscaldato si suppone che questo si porti uniformemente alla stessa temperatura: per questa ragione se ne installa una soltanto.

All'interno dello spazio che verrà occupato dalla paraffina o dalla schiuma si è deciso di inserire quattro termocoppie a partire da 5 mm dalla base e poi con passo di 10 mm. La scelta è stata dettata dalla volontà di avere una buona risoluzione dell'andamento della temperatura entro il blocco; di conseguenza, quattro sono sembrate essere sufficienti a garantire ciò. Un numero maggiore avrebbe provocato problemi di natura tecnica, in quanto i fori sarebbero stati molto ravvicinati e sarebbe risultato difficile fissare adeguatamente i sensori.

Il dimensionamento della parte interna non è potuto prescindere dalle dimensioni delle schiume disponibili, rappresentate in Figura 3-6, dovendo essa essere modulare. Per questa ragione, le sue dimensioni interne sono state fissate a 40x40x60 mm (lunghezza x larghezza x altezza).



Nella versione per la sola paraffina si sono utilizzati i seguenti componenti:

- una base di rame 40x40x10 mm; il rame ha una elevata conducibilità termica, tale da garantire una propagazione uniforme del calore in direzione verticale e una temperatura omogenea in tutta la base.
- tre pareti di bachelite: due laterali 50x10x60 mm e una posteriore 60x10x60; questo materiale svolge il ruolo di isolante termico per prevenire dispersioni di calore verso l'esterno.
- una lastra di vetro 40x10x60; permette la visione del fronte di fusione entro la paraffina.

Tabella 3-7. Proprietà dei materiali utilizzati.

| Materiale/Proprietà | ρ [kg m ⁻³] | c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹] | λ [W m ⁻¹ K ⁻¹] |
|---------------------|------------------------------|---|--|
| Rame | 8900 | 371 | 390 |
| Bachelite | 1280 | 1600 | 0.25 |
| Vetro | 2200 | 850 | 1 |
| Teflon | 2200 | 1400 | 0.1÷0.35 |

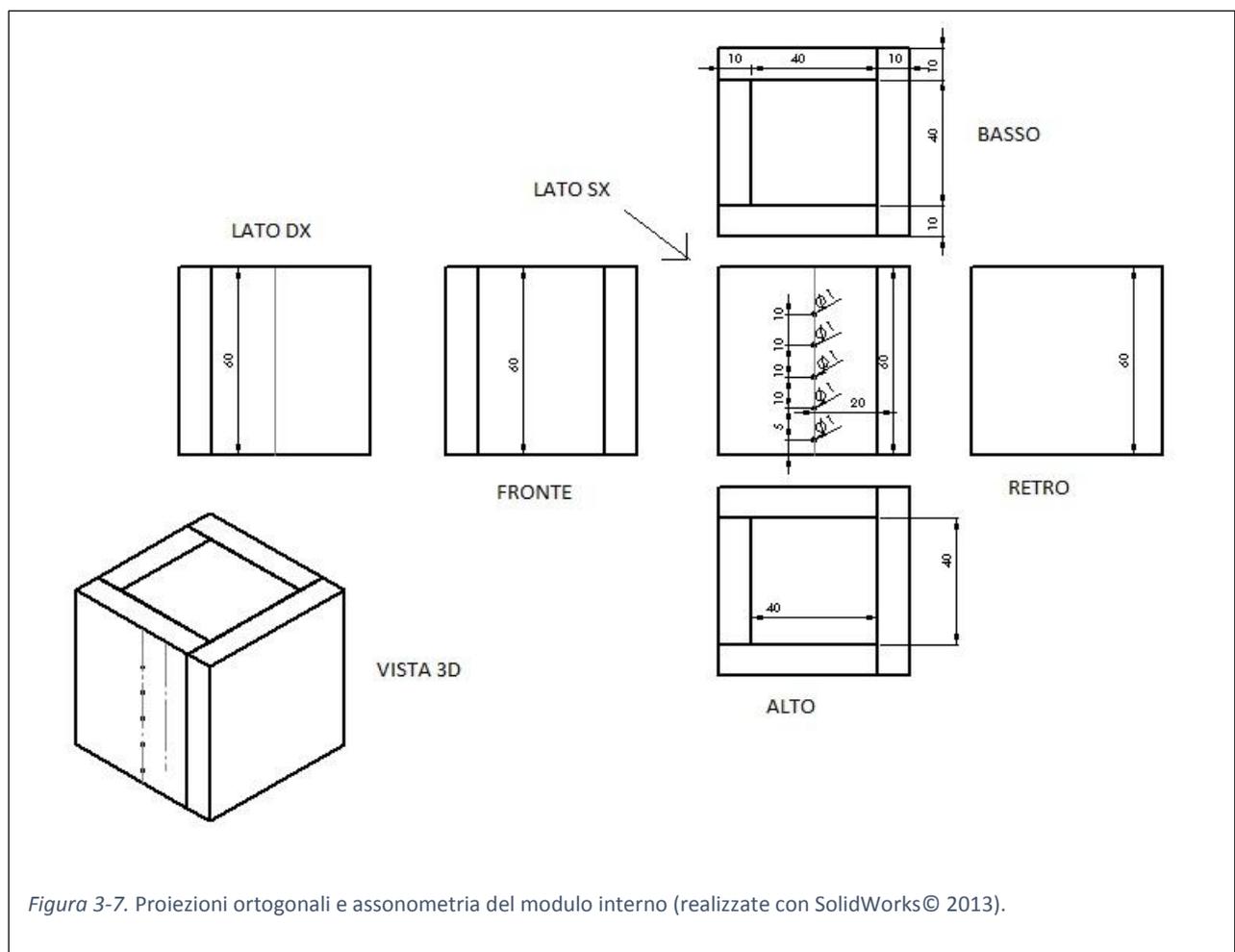
In Tabella 3-7 si elencano le proprietà dei materiali utilizzati, compreso il Teflon che verrà impiegato per la parte esterna.

L'assemblaggio è avvenuto nel seguente ordine:

- I. la base di rame è stata lavorata con carta vetrata a grana fine per assicurarsi la planarità di tutte le facce e l'assenza di sostanze estranee;
- II. è stato praticato un foro di diametro 1.5 mm su una faccia laterale della base di rame ad una altezza di 5 mm dal fondo; servirà per l'alloggiamento della termocoppia;
- III. si sono praticati 5 fori di diametro 1.5 mm su una delle pareti di bachelite a partire da 5 mm dal fondo e poi con passo 10 mm; serviranno per l'alloggiamento delle termocoppie;
- IV. si è applicata una resina epossidica Pattex© Marmo&Ferro sulle due facce laterali e su quella frontale della base;
- V. si è applicata la medesima resina sulle due facce laterali del vetro e su una striscia di altezza 10 mm a partire dal fondo;
- VI. si è applicata le medesima resina sulle due pareti laterali di bachelite: su una striscia di altezza 10 mm dal fondo e su una di spessore 10 mm dal lato;

- VII. utilizzando un riscontro, si sono assemblati la base di rame, la lastra di vetro e le due pareti laterali di bachelite;
- VIII. si è atteso un periodo di 24 ore per far solidificare completamente la resina;
- IX. si è applicata la resina sulla parete posteriore di bachelite: su una striscia di altezza 10 mm dal fondo e su due di spessore 10 mm dal lato;
- X. utilizzando un riscontro, si sono assemblati la parete posteriore ed il resto del modulo.

Per assicurare un buon incollaggio delle parti, si sono eseguiti dei fori ciechi con un trapano Dremel® sulla bachelite in corrispondenza delle strisce di applicazione della resina.



In Figura 3-7 sono riportate le proiezioni ortogonali e un'assonometria del modulo interno realizzate con il software di CAD Solidworks© 2013.

Per l'installazione delle termocoppie, si è innanzitutto realizzato un supporto costituito da una base di alluminio, al centro della quale è stato realizzato un foro filettato; questo è servito per bloccare un'asta di metallo anch'essa filettata di altezza 150 mm. La testa delle termocoppie è stata quindi

forata ed avvitata all'asta; per assicurarne il bloccaggio sono stati fissati due bulloni rispettivamente sopra e sotto ad essa. Le termocoppie sono state quindi inserite nei fori precedentemente eseguiti sulla bachelite e sulla base di rame: il sensore destinato a quest'ultima è stato precedentemente cosparso di pasta conduttiva per assicurare un ottimo contatto termico con il rame. Esse sono state bloccate lungo l'asse del modulo, quindi a 30 mm di profondità dal lato, con resina epossidica Pattex® Marmo&Ferro, sia esternamente che internamente al modulo. Si è previsto un periodo di 24 ore per permettere la completa asciugatura della resina.

A questo punto la paraffina è stata portata a surriscaldamento entro un pentolino metallico riscaldato da un fornello elettrico e poi versata entro il modulo con un cucchiaio fino a sommergere completamente le termocoppie. Dopo alcune ore, si è notata la formazione di un menisco molto marcato sulla superficie della paraffina: ciò è dovuto alla notevole variazione di volume che accompagna il cambiamento di fase solido-liquido del suddetto PCM. Per ovviare a ciò, si è sempre prevista una seconda versata di paraffina nel modulo, in modo da riempire il menisco e garantire una superficie libera quanto più orizzontale possibile.

Una delle fasi più complesse della progettazione del modulo con la schiuma ha riguardato la modalità di impregnamento di quest'ultima con la paraffina.

Inizialmente si è ipotizzato di versare semplicemente la paraffina sulla schiuma; tuttavia, essendo essa una cera, quindi supponendo avesse una viscosità piuttosto elevata similmente ad un olio, durante l'atto del versare era lecito aspettarsi che delle bolle d'aria venissero incluse nel flusso e intrappolate all'interno della schiuma. Se questo fosse accaduto, le prestazioni termiche del modulo sarebbero state influenzate negativamente dalla presenza di aria, che avrebbe creato una ulteriore resistenza termica.

È divenuto quindi di primaria importanza poter eseguire questo processo in assenza di aria: si è deciso perciò di realizzare un contenitore a tenuta in cui porre la paraffina liquida e la schiuma in essa completamente immersa; collegando al recipiente una pompa da vuoto si sarebbe eliminata l'aria. Altresì si sarebbe potuto utilizzare un forno sotto vuoto in cui svolgere la medesima operazione.

Inaspettatamente, tuttavia, durante una delle prime prove di fusione della paraffina, si è osservato che la viscosità di quest'ultima risulta essere molto inferiore di quella ipotizzata. Ciò ha portato a concludere che le tecniche sopra esposte non erano più necessarie e si è dunque tornati all'idea di partenza. A questo punto si sono supposti due differenti approcci:

1. portare a fusione in un contenitore di metallo una quantità di paraffina sufficiente a sommergere completamente la schiuma; a solidificazione avvenuta, la paraffina in eccesso sarebbe stata eliminata con taglierino e carta vetrata;
2. inserire la schiuma entro il modulo e versare la paraffina dall'alto.

Il primo metodo presenta il problema tecnico di dover utilizzare molta paraffina per sovrastare completamente la schiuma ed inoltre è richiesto uno sforzo notevole per eliminare tutto il PCM in eccesso.

Il secondo metodo, d'altro canto, è molto più immediato e di facile realizzazione, in quanto versando la paraffina nel modulo con la schiuma si elimina del tutto il problema di rimuovere l'eccesso. Queste considerazioni hanno portato a optare per quest'ultimo procedimento. L'accortezza da prestare, tuttavia, si rivela nel dover tagliare la basetta superiore dalla schiuma, per permettere all'operatore di versare la paraffina. L'operazione è stata svolta con una sega circolare a piatto sottile.

La parte interna per l'insieme paraffina-schiuma è stata realizzata con la stessa tipologia di componenti della parte per la sola paraffina; in questo caso, però, la base di rame non è stata necessaria, essendo essa già parte integrante della schiuma.

L'assemblaggio è avvenuto nel seguente ordine:

- I. si è applicata una resina epossidica Pattex© Marmo&Ferro sulle due facce laterali e su quella frontale della basetta inferiore della schiuma;
- II. si sono praticati 5 fori di diametro 1.5 mm su una delle pareti di bachelite a partire da 5 mm dal fondo e poi con passo 10 mm; serviranno per l'alloggiamento delle termocoppie;
- III. si è applicata la medesima resina sulle due facce laterali del vetro e su una striscia di altezza 10 mm a partire dal fondo;
- IV. si è applicata la medesima resina sulle due pareti laterali di bachelite: su una striscia di altezza 10 mm dal fondo e su una di spessore 10 mm dal lato;
- V. utilizzando un riscontro, si sono assemblati la schiuma, la lastra di vetro e le due pareti laterali di bachelite;
- VI. si è atteso un periodo di 24 ore per far asciugare completamente la resina;
- VII. si è applicata la resina sulla parete posteriore di bachelite: su una striscia di altezza 10 mm dal fondo e su due di spessore 10 mm dal lato;
- VIII. utilizzando un riscontro, si sono assemblati la parete posteriore ed il resto del modulo.

Un blocco di paraffina è stato fuso all'interno di un pentolino metallico ad opera di un fornello elettrico; dopo essersi assicurati che il liquido fosse sufficientemente surriscaldato, si è proceduto a

versarlo entro il modulo sopra la schiuma con un cucchiaio metallico, fino a sommergere completamente il mezzo poroso. Per evitare che la paraffina solidificasse immediatamente a contatto con la schiuma, questa è stata precedentemente scaldata con un phon ad aria.

Anche in questo caso si è formato un menisco sulla superficie della paraffina: il fenomeno risulta comunque molto meno marcato rispetto al caso senza mezzo poroso in quanto quest'ultimo rende più uniforme il raffreddamento della paraffina, che di conseguenza si contrae in modo più omogeneo. Similmente a prima, si prevede comunque una seconda versata di paraffina.

L'installazione delle termocoppie è avvenuta in modo molto simile al caso con sola paraffina; tuttavia, dopo aver impregnato la schiuma e aver fatto solidificare la paraffina, si sono eseguiti nuovamente i fori sulla bachelite per penetrare anche all'interno della schiuma. In questo caso, si sono potute fissare le termocoppie solo esternamente.

La parte esterna è stata progettata sulla base delle dimensioni del modulo interno; si è scelto il Teflon per il suo basso valore di conducibilità termica e per la relativa facilità di lavorazione. Un cilindro di 107 mm di altezza e 100 mm di diametro è stato scavato all'interno con una fresa al fine di creare al centro dello stesso una cavità di sezione quadrata di dimensioni 60x60 mm e di profondità 80 mm a partire dalla faccia superiore del blocco: questa avrà il compito di alloggiare il modulo interno. Inoltre, a partire dal fondo di questa cavità, ne è stata ricavata un'altra di dimensioni 40x40 mm e profondità 7 mm, allo scopo di alloggiare il riscaldatore.

Sono state realizzate due aperture sul blocco:

- una frontale di altezza 87 mm dal bordo superiore e larghezza 10 mm al fine di permettere la visione del fronte di fusione attraverso la parete di vetro del modulo interno; benché fosse tecnicamente possibile realizzare una larghezza maggiore (fino a 40 mm pari a quella del vetro), si è optato per questa ridotta per evitare di accrescere le dispersioni termiche verso l'esterno data l'elevata conducibilità termica del vetro;
- una laterale di profondità 87 mm e larghezza 5 mm per permettere la corretta installazione delle termocoppie entro il modulo.

Per permettere il passaggio del filo del riscaldatore sono stati eseguiti due fori sul fondo.

Per il riscaldatore si è intagliata una lastra di rame di dimensioni 40x40x5 mm che è stata successivamente fresata in superficie per creare un percorso a serpentino; su questo è stata applicata una pasta conduttiva ed in seguito è stato alloggiata la resistenza elettrica. Questa è stata

poi saldata alle due estremità con due fili metallici con guaina termoindurente al fine di prevenire un contatto elettrico con la lastra. In corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita del filo così ottenuto si è applicata della resina epossidica Pattex© Marmo&Ferro per bloccare il pezzo. Con la stessa resina si è incollata una lastra di alluminio di dimensioni 40x40x2 mm al di sotto di quella di rame. Realizzati i tre componenti dell'apparato, il loro assemblaggio è risultato essere piuttosto semplice, come volevasi che fosse. Innanzitutto si è inserito il riscaldatore con la lastra di rame verso l'alto nell'apposito alloggiamento, facendo attenzione a far scorrere i due fili nei fori; si è poi applicata una pasta conduttiva sopra di esso, per garantire un ottimo contatto termico con il modulo. Questo è stato quindi inserito nel blocco di Teflon e premuto verso il basso al fine di far aderire nel modo migliore la pasta termica.

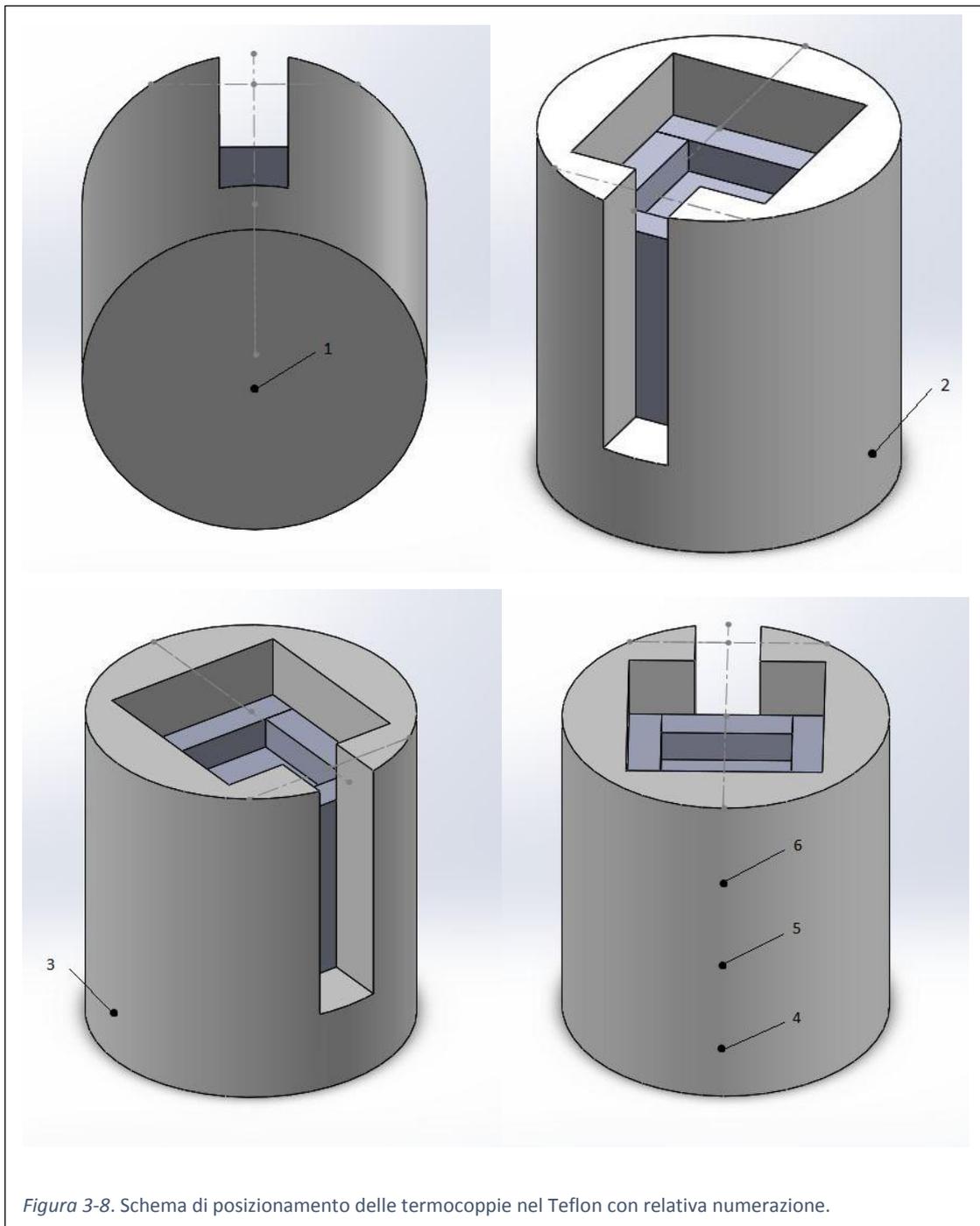
Per assicurare un miglior isolamento termico verso l'esterno, il blocco di Teflon è stato avvolto in uno strato di spessore 20 mm di Armflex, scelto per la sua bassa conducibilità termica e per la sua flessibilità che ha consentito un adattamento perfetto alla forma dell'apparato. Oltre che ai lati, l'ulteriore isolante è stato posto anche al di sotto del blocco con uno spessore di 40 mm e al di sopra: di questo, una parte a riempire il gap di aria tra la superficie libera della paraffina e la sommità del Teflon ed una parte circolare di spessore 10 mm per ricoprire interamente la superficie del blocco di Teflon.

Tasselli in Armflex di dimensioni ridotte sono stati applicati anche in corrispondenza dell'apertura frontale e di quella laterale. Tutte le parti sono state realizzate per poter essere agilmente apposte e rimosse con semplicità; la rimozione si rende infatti necessaria ad ogni cambio del modulo interno.

A completamento dell'apparato, si sono installate sei ulteriori termocoppie nel blocco di Teflon, ad una profondità di 5 mm dalla superficie. Non essendo nota esattamente la conducibilità termica del Teflon, queste serviranno in fase di simulazione per valutare la correttezza del modello: esse difatti costituiscono un indice della dispersione di calore verso l'esterno.

Le termocoppie sono state installate in fori eseguiti con un Dremel©, riempiti con una polvere al fine di garantire l'assenza di aria; essi sono stati posizionati come in Figura 3-8:

- un foro sul fondo al centro;
- tre fori a 20 mm dal fondo, due ai lati e uno sul retro (considerando come frontale il lato con l'apertura per la visione del fronte di fusione);
- due fori sul retro con passo 30 mm verso l'alto a partire dal foro del punto precedente.



3.6. Il sistema di acquisizione

Il multimetro digitale Agilent 34970A è dotato di tre slot per altrettante schede di acquisizione; durante le nostre prove si sono utilizzate due schede e di queste 13 canali. Cinque canali sono stati utilizzati per acquisire il voltaggio in uscita dalle termocoppie del modulo collegate al Kaye 170; sei canali sono stati collegati alle termocoppie nel Teflon. Un canale è stato adibito alla lettura del

voltaggio presente ai capi del cavo elettrico del riscaldatore. L'ultimo canale si è reso necessario per valutare il valore della corrente che scorre nel suddetto cavo; in questo caso, dato che il segnale letto dal multimetro è sempre di tensione, si è posta una resistenza shunt di valore noto in serie al riscaldatore: misurando il valore di tensione ai capi di questa e dividendolo per il valore della resistenza si ricava la corrente elettrica. I valori di tensione e di corrente sono poi stati utilizzati per calcolare la potenza elettrica fornita dal riscaldatore.

Il multimetro è stato collegato mediante interfaccia GPIB/USB ad un computer, che ha letto i dati mediante il software Labview© della National Instruments. E' stata elaborata l'interfaccia di Figura 3-9.

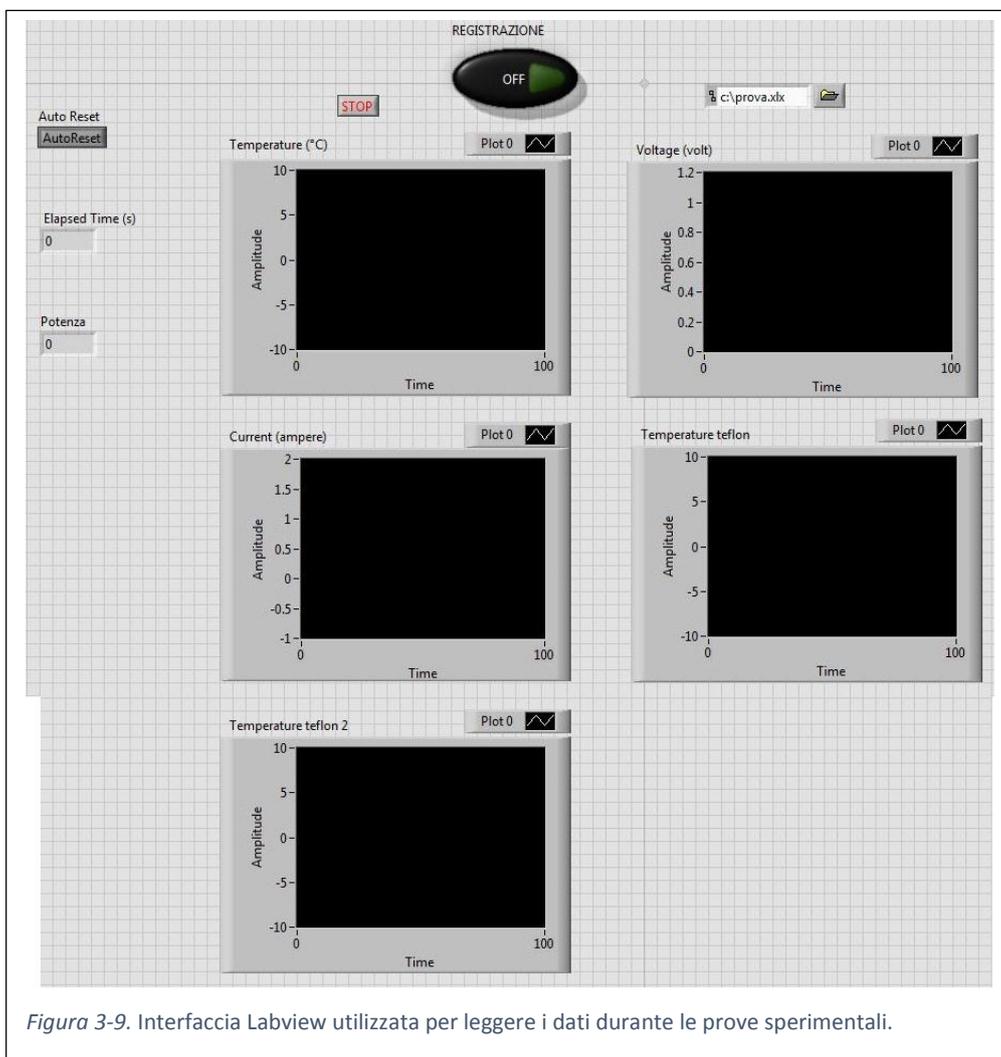


Figura 3-9. Interfaccia Labview utilizzata per leggere i dati durante le prove sperimentali.

Le caratteristiche principali dell'interfaccia sono:

- un contatore che permette di valutare il tempo trascorso dall'inizio della prova;
- un pulsante che abilita la scrittura dei dati su un file di testo per la successiva elaborazione;

- un indicatore della potenza erogata dal riscaldatore, ottenuta come prodotto della tensione e della corrente acquisiti;
- due grafici che riportano l'andamento della tensione e della corrente nel filo riscaldante;
- tre grafici che mostrano l'andamento della temperatura rilevata da ogni termocoppia.

4. MISURE SPERIMENTALI

4.1. Procedura sperimentale delle prove

Le prove si sono suddivise in due fasi.

Durante la prima, si è studiato il comportamento del sistema con sola paraffina; si è deciso di eseguire tre prove per ciascun modello con diversi livelli di potenza. Il minimo è stato fissato a 10 W, essendo questo il tipico flusso termico prodotto da hotspots aeronautici, mentre il massimo a 30 W, che rappresenta la potenza termica prodotta da un processore Intel® Core i7; come valore ultimo si è presa una potenza intermedia di 20 W. Si sono raccolti i dati durante il riscaldamento e, per comprendere meglio la propagazione del fronte di fusione, si è realizzato un filmato durante il riscaldamento per un solo modello di paraffina e per un unico livello di potenza; la ripresa si è focalizzata sulla lastra di vetro appositamente creata nel modulo.

La seconda fase ha avuto come oggetto lo studio del comportamento del sistema schiuma-paraffina; le modalità di prova sono state identiche a quelle della fase precedente. Tutte e tre le schiume sono state impregnate con lo stesso modello di paraffina: è stata scelta la paraffina SasolWax 5203 per le considerazioni esposte nel Par. 4.4. Si sono eseguite tre prove ai sopra citati livelli di potenza per ognuna delle tre schiume disponibili. Si è realizzato un solo filmato per la schiuma a 5 PPI.

Le prove per entrambe le fasi si sono eseguite nel seguente modo:

- I. accensione del Kaye 170 e attesa di circa 30 minuti per il raggiungimento delle condizioni di equilibrio;
- II. accensione dell'Agilent 34970A e del generatore di corrente;
- III. accensione del PC e del software di raccolta dati Labview®;
- IV. controllo dello strato di Armflex per verificare che sia ben aderente al Teflon;
- V. avvio di Labview®;
- VI. regolazione della potenza del generatore ed avvio dell'erogazione;

A questo punto la prova ha inizio; essa si considera conclusa quando la termocoppia superiore nel modulo raggiunge la temperatura di regime. A tal istante:

- VII. stop della raccolta di dati e chiusura di Labview®;
- VIII. sollevamento dello strato superiore di Armflex al fine di poter osservare la superficie libera della paraffina;

- IX. si continua ad erogare potenza dal generatore fino a che la paraffina è completamente fusa: in questo modo non si corre il rischio che si formino spazi vuoti entro il PCM durante il raffreddamento;
- X. a generatore spento, si lascia il sistema a riposo fino a che la paraffina si è solidificata;
- XI. si provvede ad una seconda versata di paraffina per eliminare il menisco sulla superficie del PCM (se necessaria);
- XII. a solidificazione avvenuta si appone nuovamente lo strato superiore di Armflex cosicché l'apparato sia pronto per la successiva prova.

Una procedura a parte viene seguita per effettuare il cambio del modulo interno dell'apparato, nel momento in cui si debbano testare altre paraffine o altre schiume:

- I. si rimuovono gli strati superiore e laterale di Armflex;
- II. si estrae il modulo interno;
- III. si rimuove la pasta termica dal riscaldatore e si pulisce l'apparato;
- IV. si stende nuova pasta termica sul riscaldatore;
- V. si inserisce dall'alto il nuovo modulo e lo si preme sul fondo per ottenere un buon contatto con la pasta;
- VI. si collegano al Kaye 170 le termocoppie del modulo;
- VII. si ricollocano gli strati di Armflex.

4.2. Riduzione dei dati

Il file di testo in uscita da Labview© contiene organizzati in colonne i seguenti dati:

- tempo in [s] conteggiato a partire dall'istante in cui si è premuto il pulsante di avvio sull'interfaccia del software;
- temperature in [°C] misurate dalle 11 termocoppie: 5 nel modulo e 6 nel Teflon;
- tensione V_{risc} in [V] ai capi del riscaldatore a film;
- corrente I_{risc} in [A] ai capi del riscaldatore a film.

I valori di tensione e di corrente, costanti durante la prova, vengono utilizzati per il calcolo della potenza elettrica P_{risc} effettivamente ceduta al modulo, secondo la (4.1):

$$P_{risc} = V_{risc} * I_{risc} \quad (4.1)$$

Si realizza un grafico per ognuna delle cinque termocoppie presenti nel modulo ponendo sull'asse delle ascisse il tempo t e sull'asse delle ordinate la temperatura T ; parimenti si fa per le sei termocoppie presenti nel Teflon.

4.3. Prove con sola paraffina

Le prove sono state suddivise in due categorie: la prima contiene quelle eseguite con la sola paraffina, mentre la seconda considera quelle compiute con la schiuma.

Le termocoppie nel modulo vengono identificate con le lettere da A ad E procedendo dall'alto verso il basso all'interno del modulo stesso seguendo lo schema di Figura 3-7; quelle nel Teflon sono numerate da 1 a 6 secondo la precedente Figura 3-8.

La prima paraffina ad essere testata è la Sasolwax 5803; nelle Figure 4-2, 4-3 e 4-4 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

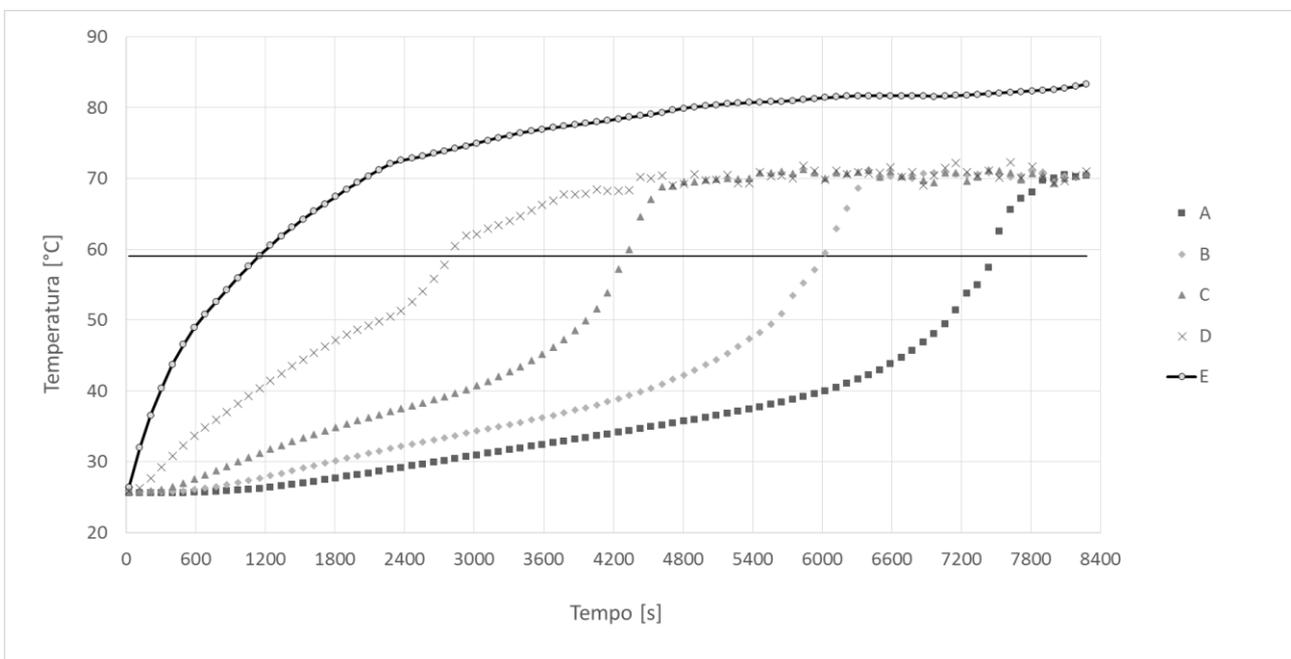


Figura 4-1. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5803 con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

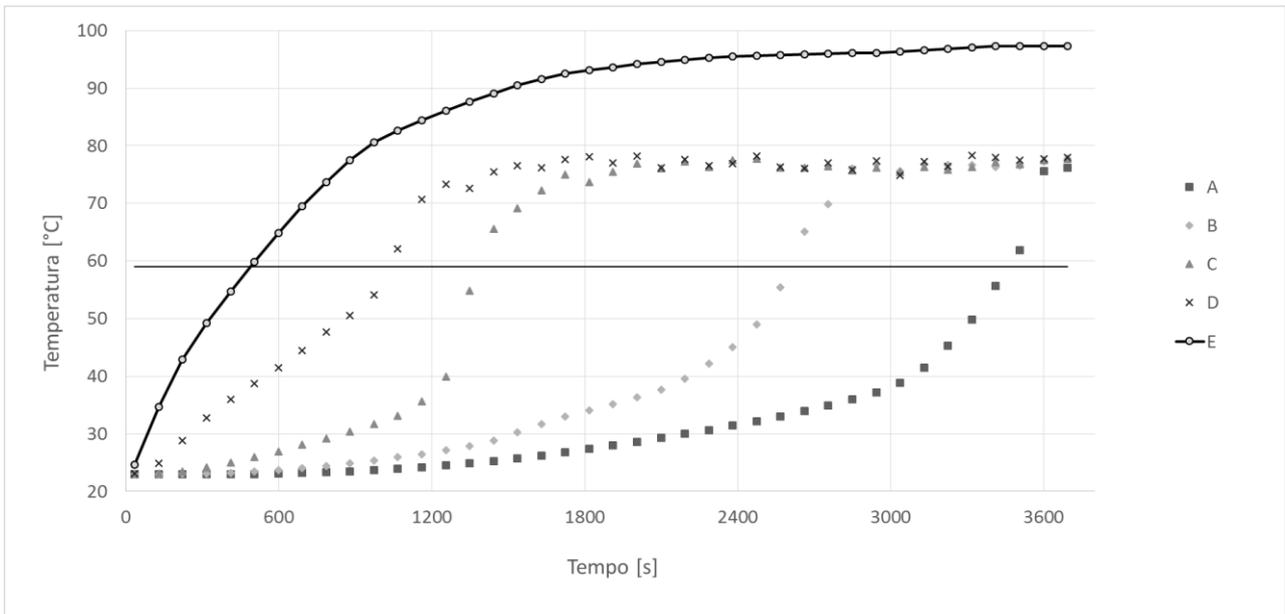


Figura 4-2. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5803 con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

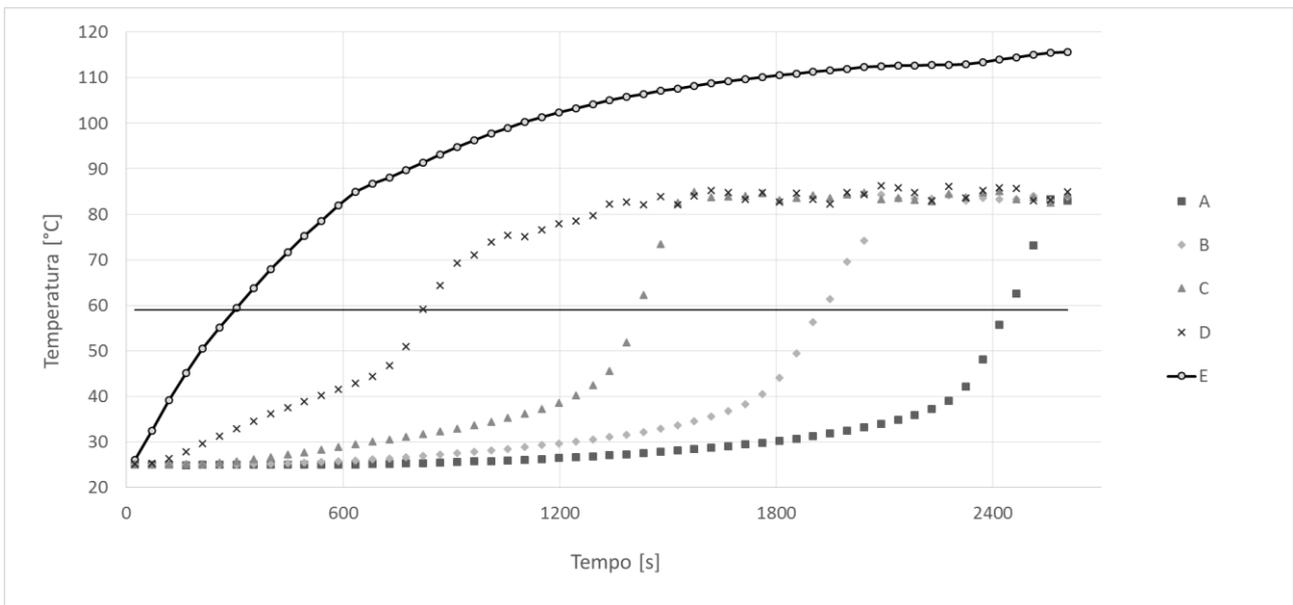


Figura 4-3. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5803 con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Tutte le curve hanno come origine il punto che corrisponde a $\tau=0$ e T pari alla temperatura dell'ambiente in cui la prova è stata effettuata.

Si può notare che, al variare della potenza elettrica fornita dal riscaldatore a film, gli andamenti delle temperature registrate da ciascuna termocoppia entro il modulo sono molto simili fra di loro; questo consente perciò di effettuare un'unica discussione per commentare i grafici.

Per le curve corrispondenti alle termocoppie A, B, C è possibile suddividere l'area del grafico in tre fasce verticali, ciascuna delle quali è caratterizzata da un diverso andamento della temperatura nel tempo, come in Figura 4-5.

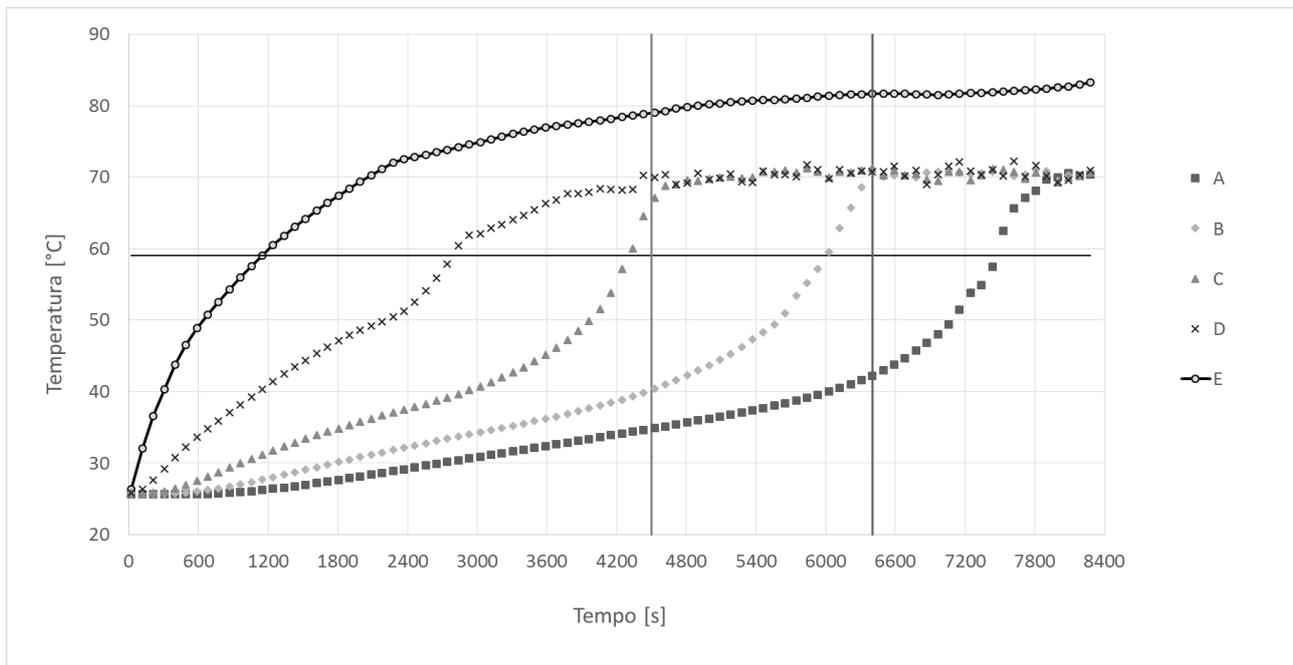


Figura 4-4. Suddivisione in tre fasce verticali del grafico di Figura 4-2 per la sola termocoppia B a titolo esemplificativo; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Le due rette verticali che delimitano le tre zone sono state tracciate laddove la curva corrispondente alla termocoppia B varia sensibilmente la sua pendenza.

Per quanto concerne le termocoppie A, B, C, esse mostrano nel tratto iniziale una pendenza leggermente positiva: essa va crescendo passando da A a C, ossia spostandosi verso il basso all'interno del modulo. La paraffina, difatti, ha una conducibilità termica pari a $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, tale per cui la si può considerare in buona sostanza un isolante termico. Per questa ragione, il calore fornito dal basso al blocco solido di paraffina impiega un tempo apprezzabile per diffondersi all'interno del blocco stesso, e questo tempo chiaramente aumenta al diminuire della potenza elettrica fornita. Ciò spiega perché, ad esempio in Figura 4-4, per $P=30\text{W}$ e all'istante $\tau = 1200 \text{ s}$ la termocoppia C registri una temperatura $T=38.6^\circ\text{C}$, mentre la termocoppia A si trovi solamente a $T=26.4^\circ\text{C}$, considerando che la temperatura iniziale è di 25°C .

In questa zona, la paraffina si riscalda in modo sensibile aumentando la propria temperatura e si trova ancora allo stato solido, tuttavia le sue proprietà iniziano a mutare.

$$\frac{q}{m \cdot c_p} = \frac{dT}{d\tau} \quad (4.2)$$

L'Eq. 4.2 esprime la legge di conservazione dell'energia: si indicano q il flusso di calore in $[W \cdot m^{-2}]$ fornito alla paraffina, m la massa in $[kg]$ di paraffina, c_p il calore specifico in $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ della paraffina, dT l'incremento di temperatura in $[K]$ del PCM, $d\tau$ l'intervallo temporale infinitesimo in $[s]$ nel quale si valuta dT .

Il secondo membro dell'equazione esprime il coefficiente angolare della retta con la quale si può approssimare il tratto iniziale delle curve A, B, C: la pendenza cala procedendo entro la prima fascia e ciò si può interpretare come una diminuzione del calore specifico della paraffina, in quanto il flusso termico e la massa rimangono invariati durante il processo.

Il passaggio alla seconda fascia si ha quando si presenta una variazione sensibile di pendenza in senso positivo, ossia a parità di intervallo temporale, la paraffina accresce la sua temperatura più di quanto facesse nella precedente zona. Ciò non avviene in corrispondenza della temperatura di fusione T_{fus} , ma a temperatura leggermente inferiore. Il fluido surriscaldato che giace al di sotto dello strato di paraffina controllato dalla termocoppia raggiunge una temperatura tale da avere effetto sugli strati superiori, che aumentano marcatamente la loro temperatura. Durante la fusione, non è più possibile considerare il solo calore sensibile, ma bisogna tenere conto anche di quello latente, assorbito dalla frazione fusa di PCM.

Complessivamente, la seconda fascia è caratterizzata da una pendenza positiva molto marcata ed al suo interno vi è la zona di transizione di fase da solido a liquido.

Il passaggio alla terza zona è segnato dal raggiungimento di una temperatura di regime T_{reg} , a cui corrisponde quindi un andamento pressoché orizzontale delle curve in esame. Ciò si può spiegare assumendo che, raggiunta questa temperatura (il cui valore è legato alle proprietà termiche della paraffina stessa), si crei un equilibrio tra il calore ricevuto dal riscaldatore, quello disperso verso le pareti e quello ceduto agli strati superiori di paraffina solidi o in fase di fusione. Seguendo questo ragionamento, ci si aspetta che, riproducendo la prova continuando ad erogare potenza anche dopo la completa fusione di tutta la paraffina nel modulo, la temperatura della paraffina inizi a salire oltre il valore di regime. Al crescere della potenza erogata, aumenta anche il valore della temperatura di regime, come ci si poteva aspettare essendo esso legato ad un equilibrio dinamico che coinvolge il flusso termico in ingresso al PCM.

Per le stesse considerazioni fatte sopra sulla natura prevalentemente isolante della paraffina, il raggiungimento di questa temperatura avviene più in avanti nel tempo spostandosi verso l'alto all'interno del modulo.

Una trattazione a se stante va fatta per la curva corrispondente alla termocoppia D. Il suo andamento appare simile a quello delle tre curve precedentemente descritte, tuttavia vi sono alcune differenze legate al fatto che questa termocoppia si trova a soli 5 mm dalla base di rame e dunque risente marcatamente degli effetti del riscaldatore. Questo provoca un aumento spiccato della temperatura fin dall'inizio della prova; anche se in misura meno sensibile, è comunque presente la variazione di pendenza nell'intorno della temperatura di fusione e, a regime, si raggiunge la stessa temperatura delle altre termocoppie superiori.

La curva relativa alla termocoppia E presenta un andamento crescente con pendenza che va diminuendo nel tempo. Al sopraggiungere della fusione, difatti, la paraffina inizia ad assorbire un flusso termico maggiore rispetto alla fase di riscaldamento sensibile sotto forma di calore latente necessario a spezzare i legami chimici fra le molecole per effettuare la transizione di fase da solido a liquido. Questo fa sì che l'aumento di temperatura divenga meno marcato.

In Tabella 4-1 sono elencati i valori dei parametri più interessanti delle prove effettuate a diversi livelli di potenza con la paraffina 5803; si indicano τ_v il tempo in [s] a cui avviene il passaggio dalla prima alla seconda fascia per la termocoppia B, τ_{eg} il tempo in [s] a cui la termocoppia B raggiunge la temperatura di regime, T_{reg} la temperatura di regime in [°C], T_{base} la temperatura della base in [°C] a fine prova. Questi valori vengono letti dal grafico, cercando di valutarli nel modo più accurato possibile. Si è presa a riferimento la termocoppia B in quanto essa si trova in una posizione intermedia all'interno del modulo: non è né troppo vicina alla base di rame da risentire degli effetti del riscaldatore né troppo vicina alla superficie libera della paraffina da essere influenzata dall'eventuale presenza di un menisco residuo.

Tabella 4-1. Riassunto dei valori caratteristici per le prove eseguite con la paraffina Sasolwax 5803.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| τ_v [s] | 4500 | 2200 | 1700 |
| τ_{reg} [s] | 6400 | 3000 | 2100 |
| T_{reg} [°C] | 70.5 | 77.5 | 84.0 |
| T_{base} [°C] | 83.3 | 97.3 | 115.7 |

La seconda paraffina ad essere testata è la Sasolwax 5603; nelle Figure 4-6, 4-7 e 4-8 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

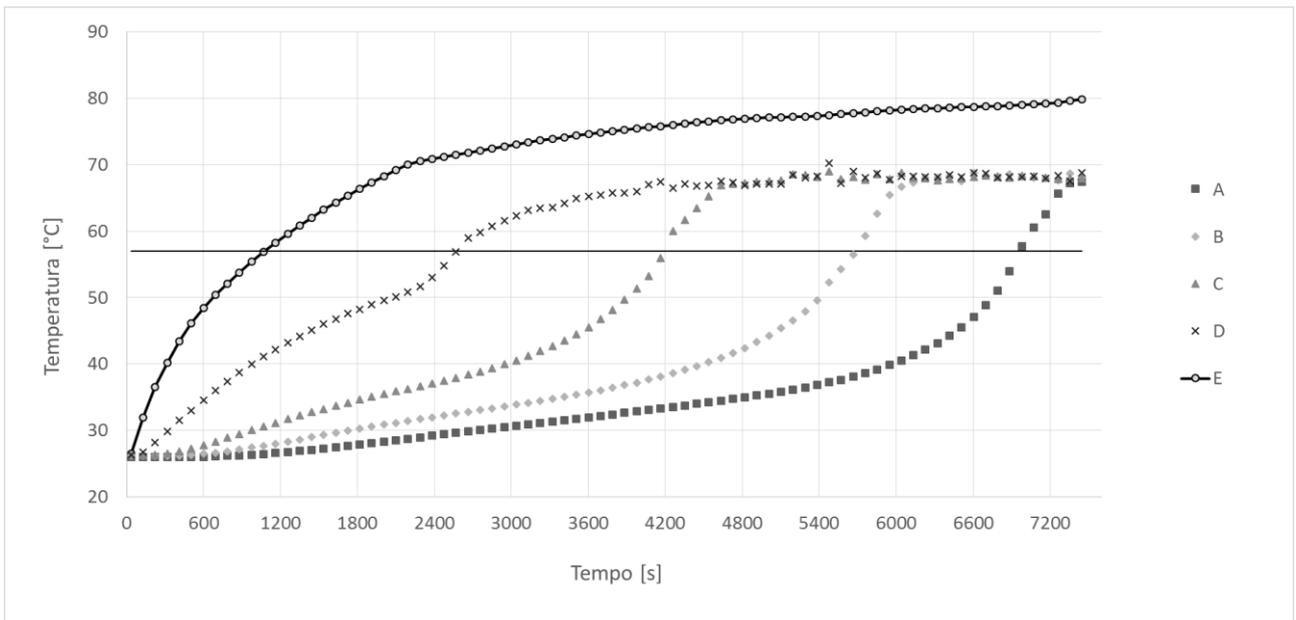


Figura 4-5. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5603 con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

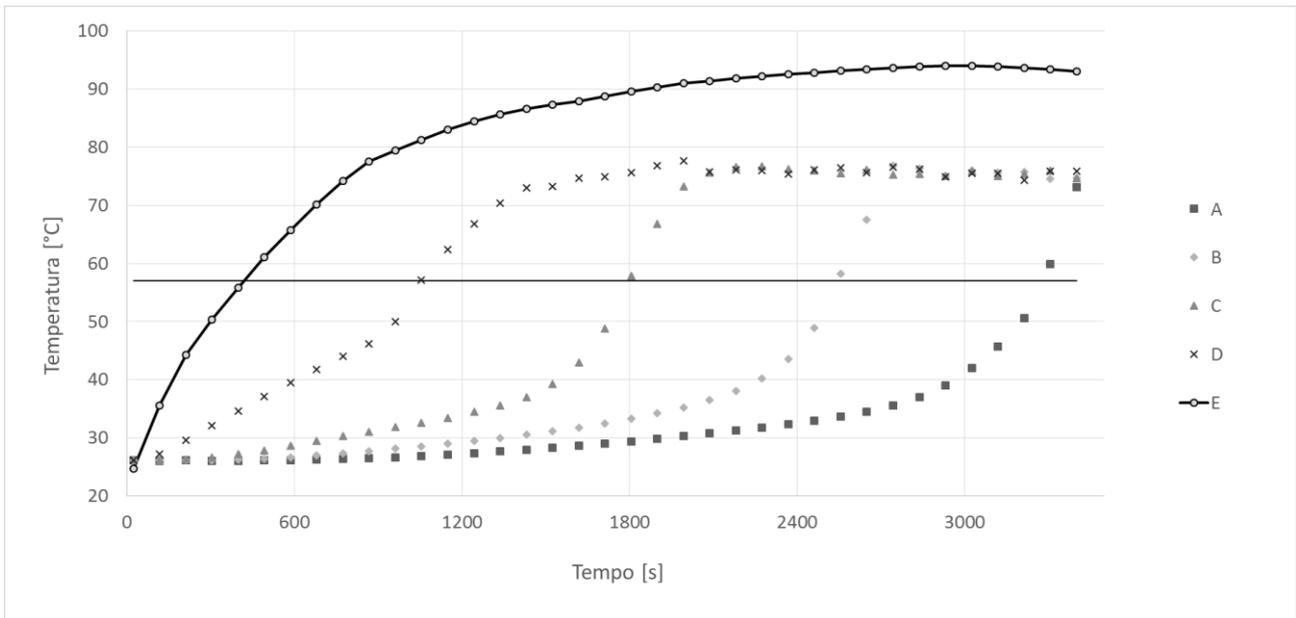


Figura 4-6. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5603 con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

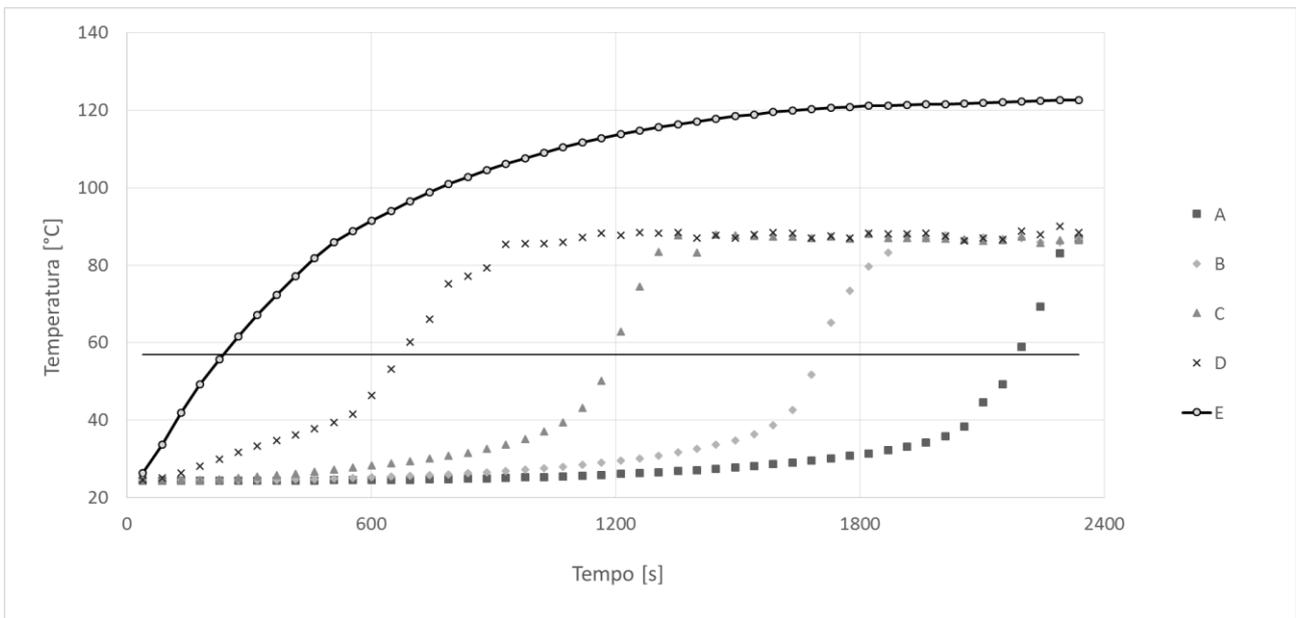


Figura 4-7. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5603 con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Per il commento delle Figure 4-6, 4-7 e 4-8 si rimanda alle considerazioni fatte per la paraffina SasolWax 5803.

In Tabella 4-2 sono elencati i valori dei parametri più interessanti delle prove effettuate a diversi livelli di potenza con la paraffina 5603.

Tabella 4-2. Riassunto dei valori caratteristici per le prove eseguite con la paraffina Sasolwax 5603.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| τ_v [s] | 4200 | 1800 | 1600 |
| τ_{reg} [s] | 6100 | 2800 | 2000 |
| T_{reg} [°C] | 68 | 74.5 | 87.1 |
| T_{base} [°C] | 79.8 | 95.5 | 122.6 |

La terza paraffina ad essere testata è la Sasolwax 5203; nelle Figure 4-9, 4-10 e 4-11 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

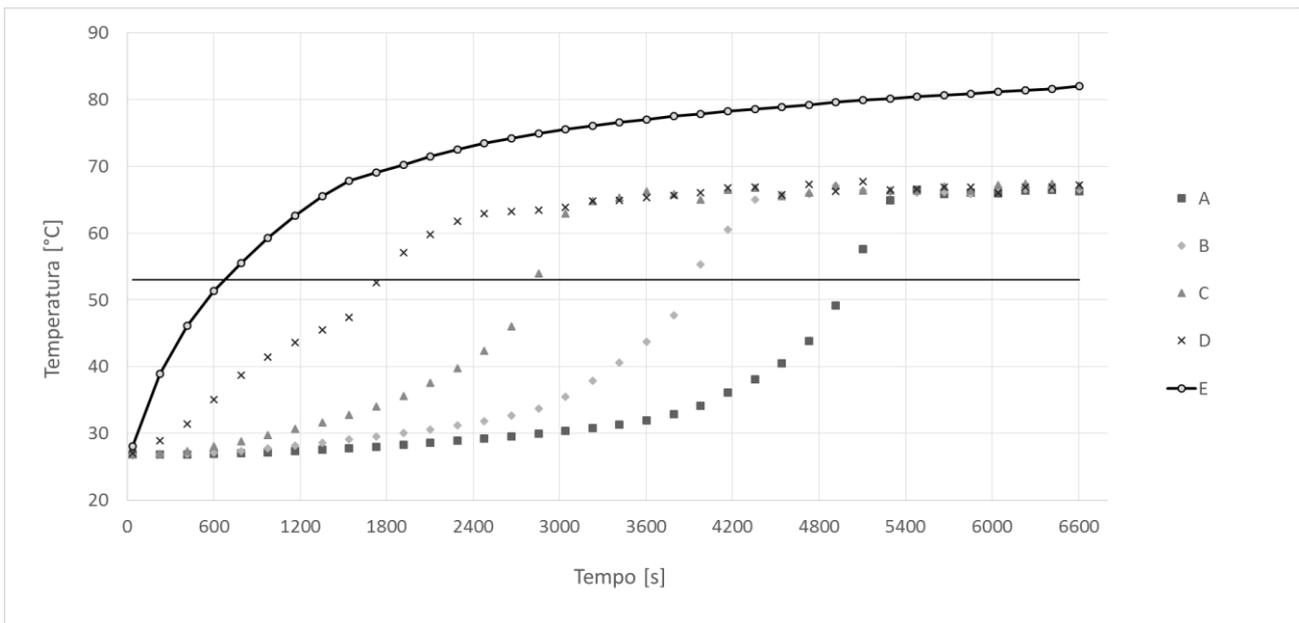


Figura 4-8. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

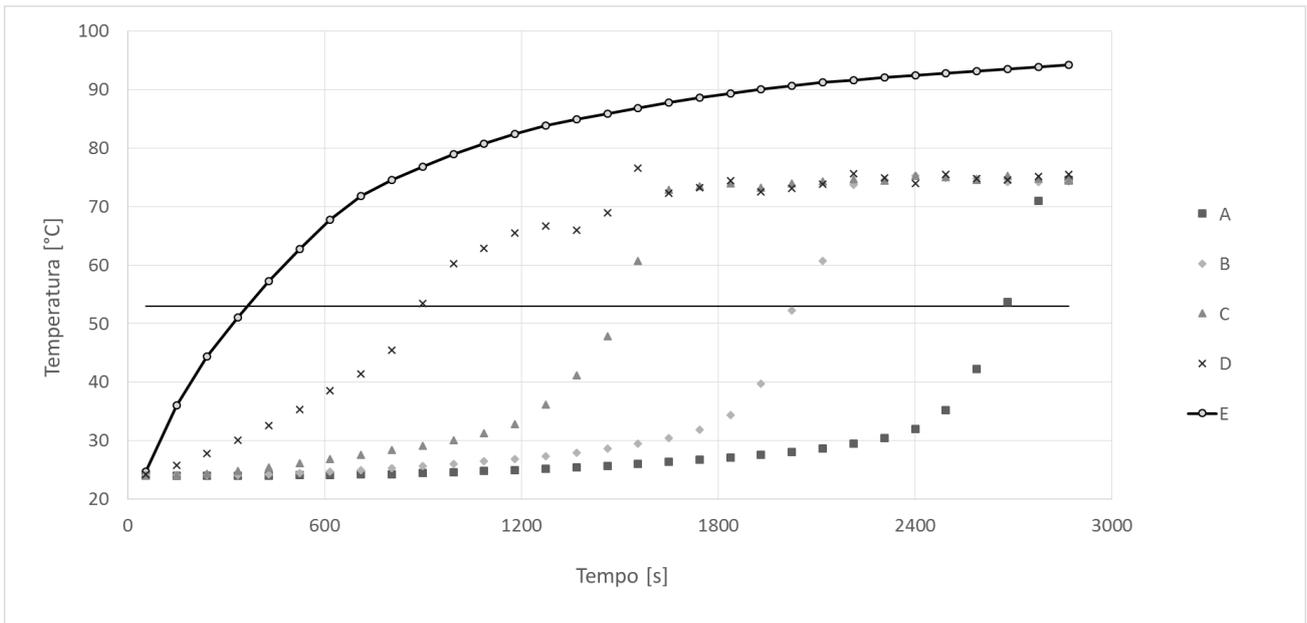


Figura 4-9. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

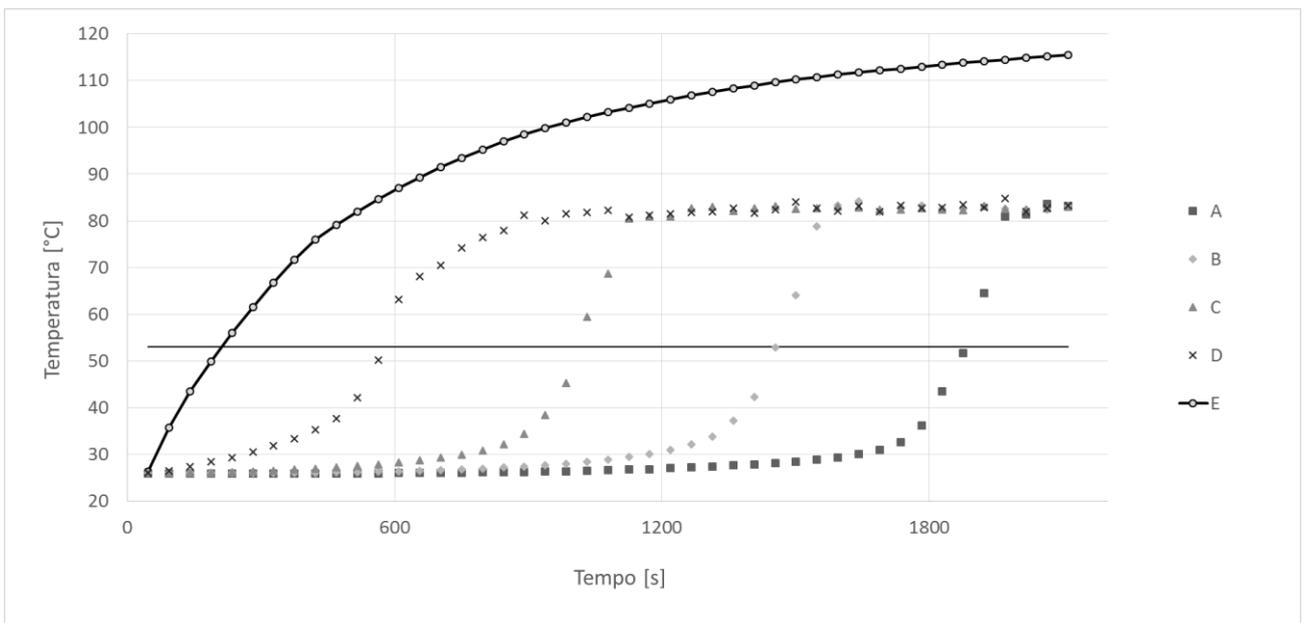


Figura 4-10. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Per il commento delle Figure 4-9, 4-10 e 4-11 si rimanda alle considerazioni fatte per la paraffina SasolWax 5803.

In Tabella 4-3 sono elencati i valori dei parametri più interessanti delle prove effettuate a diversi livelli di potenza con la paraffina 5203.

Tabella 4-3. Riassunto dei valori caratteristici per le prove eseguite con la paraffina Sasolwax 5203.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| τ_v [s] | 3000 | 1800 | 1300 |
| τ_{reg} [s] | 4400 | 2300 | 1600 |
| T_{reg} [°C] | 66.8 | 74.7 | 83.1 |
| T_{base} [°C] | 80.0 | 94.2 | 115.5 |

4.4. Influenza del tipo di paraffina sul comportamento termico

Risulta interessante ai fini della comprensione del fenomeno fisico che avviene all'interno del modulo con sola paraffina studiare l'andamento delle temperature registrate dalle termocoppie da A a D. Dall'analisi dei risultati delle prove si è constatato (come dichiarato nel Par. 4.3) che gli andamenti rimangono pressoché invariati al variare della potenza elettrica erogata dal riscaldatore; per questa ragione, si commentano solo i grafici relativi ad una potenza di 10 W. Le considerazioni si potranno poi estendere anche ai valori superiori.

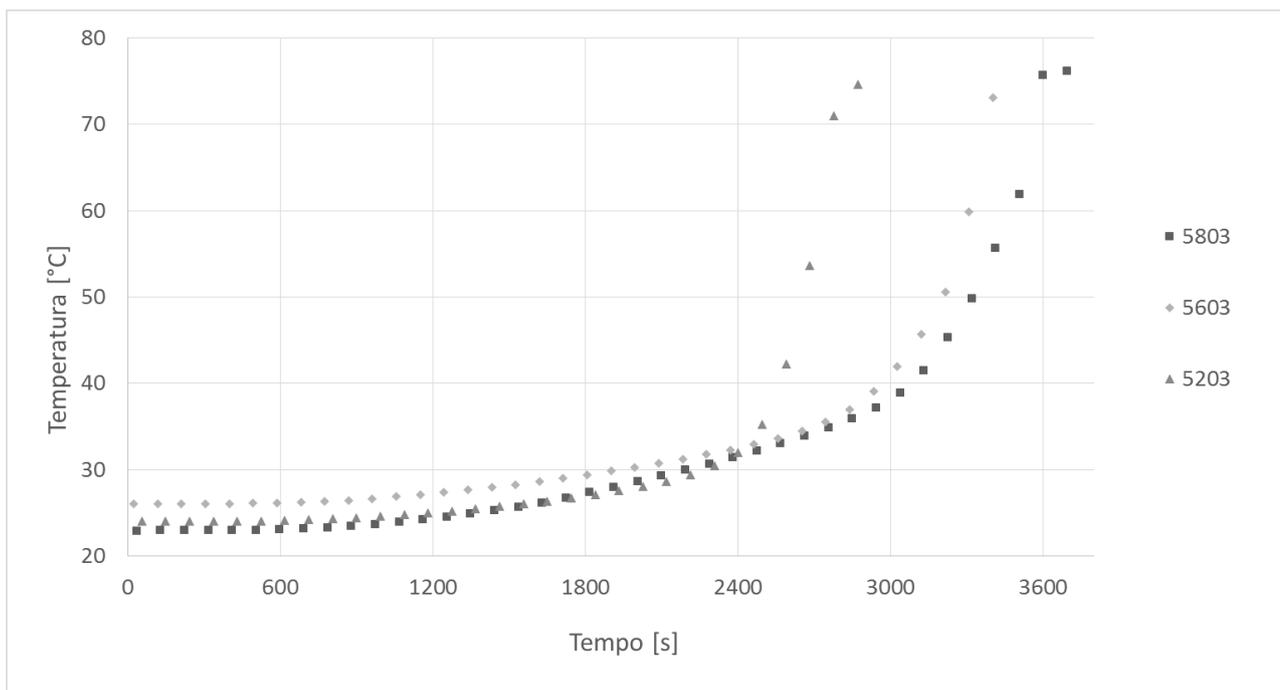


Figura 4-11. Andamenti di temperatura registrati dalla termocoppia A ad una potenza di 30 W per diversi tipi di paraffina.

In Figura 4-11 la curva relativa alla paraffina 5203 sale con anticipo rispetto alle altre due, in quanto ha una temperatura di fusione inferiore e ciò implica un minor intervallo di tempo necessario alla completa transizione di fase. Segue la 5603 e poi la 5803: tra queste vi è poco distacco in termini di istante di risalita in quanto le loro temperature di fusione sono simili (rispettivamente 57°C e 59°C).

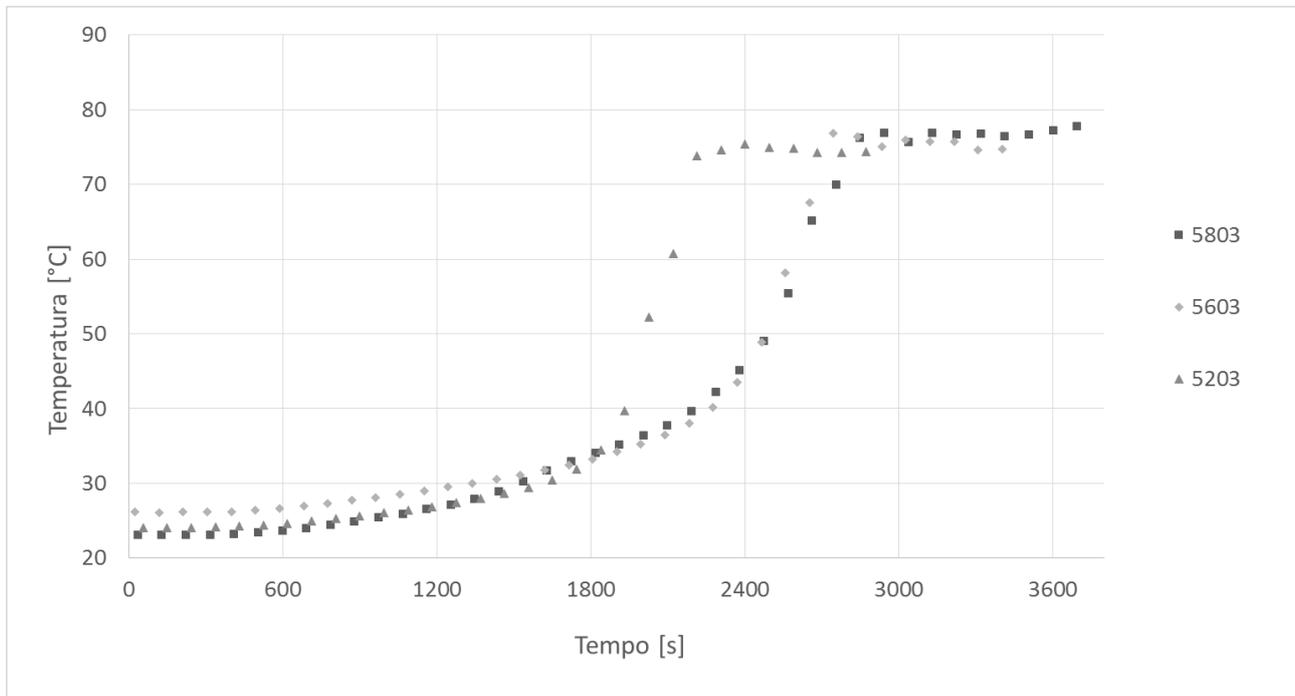


Figura 4-12. Andamenti di temperatura registrati dalla termocoppia B ad una potenza di 30 W per diversi tipi di paraffina.

In Figura 4-12 anche in questo caso la curva relativa alla paraffina 5203 sale prima rispetto alle altre due; valgono le medesime considerazioni di cui sopra. La temperatura di regime è la stessa per tutte e tre le paraffine; i valori di questa sono presenti nel Par. 4.3.

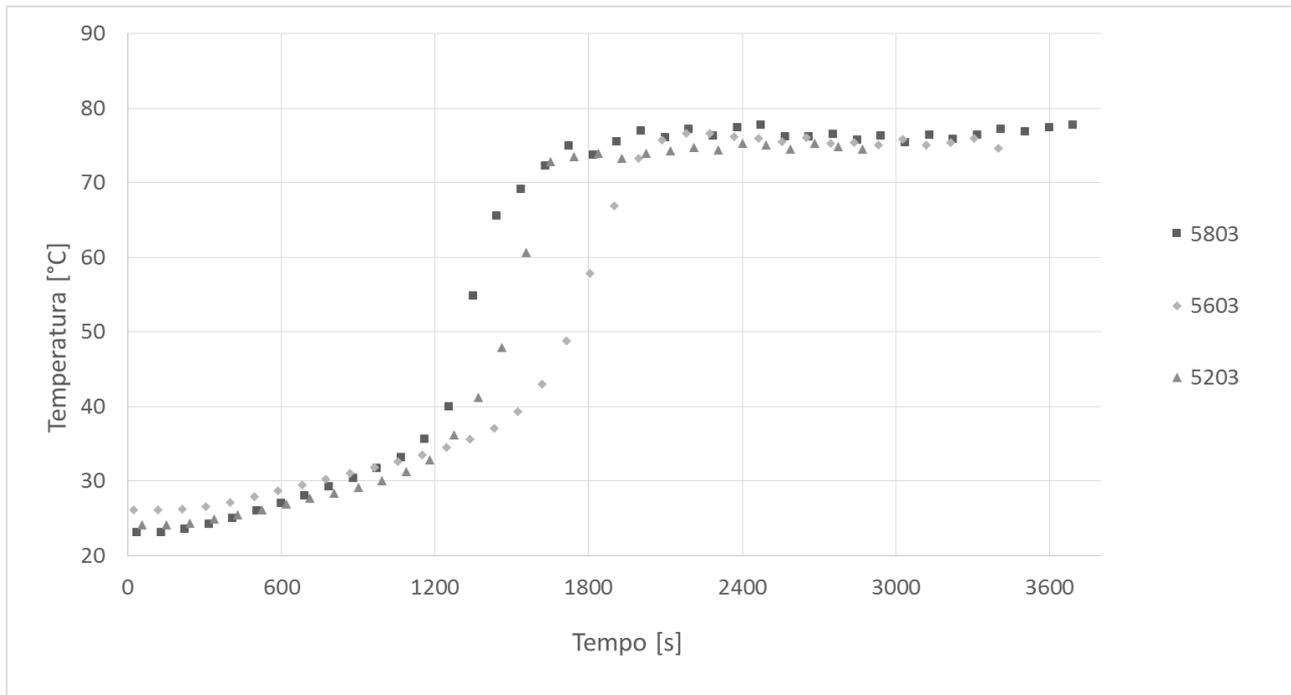


Figura 4-13. Andamenti di temperatura registrati dalla termocoppia C ad una potenza di 30 W per diversi tipi di paraffina.

In Figura 4-14 la curva relativa alla paraffina 5803 sale in anticipo se confrontata con le altre due, differentemente rispetto alle termocoppie A e B; probabilmente si sono instaurati in questa zona dei moti convettivi di intensità maggiore che hanno portato ad un più repentino aumento di temperatura.

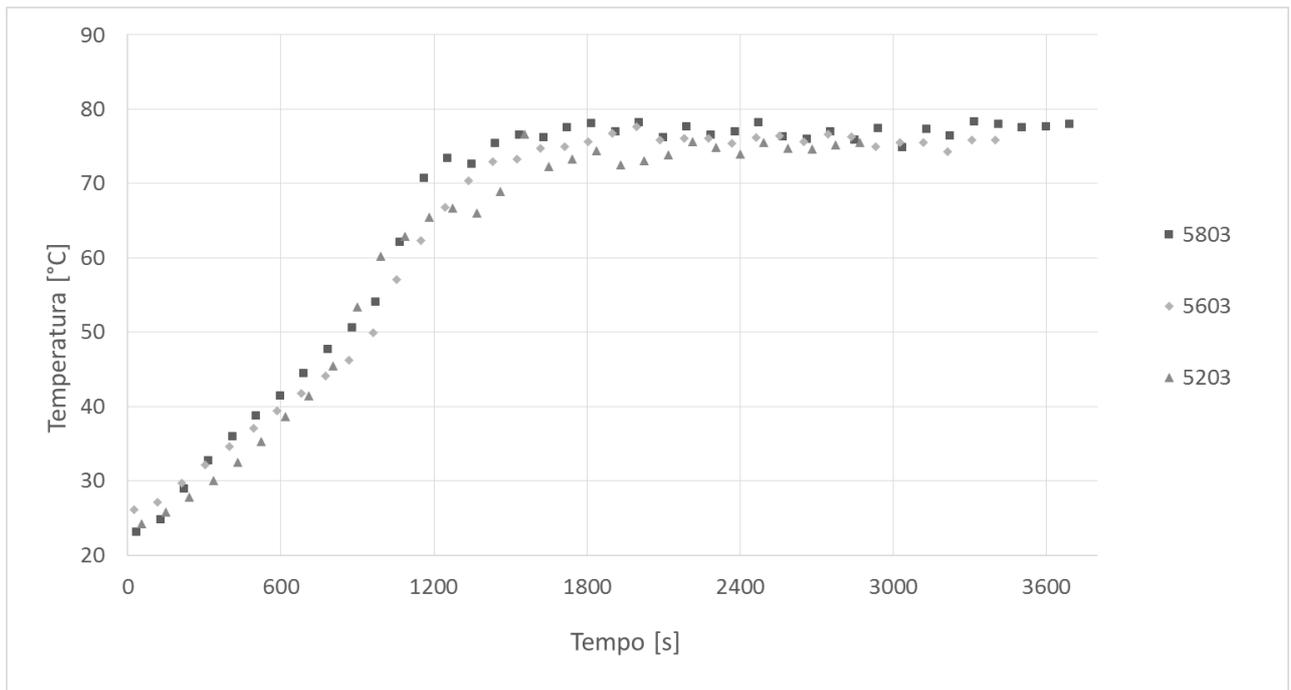


Figura 4-14. Andamenti di temperatura registrati dalla termocoppia D ad una potenza di 30 W per diversi tipi di paraffina.

In Figura 4-15 gli andamenti sono ancora in salita, ma si notano gli effetti marcati della vicinanza alla base di rame, di cui si è discusso nel Par. 4.3. Le curve salgono molto rapidamente per poi stabilizzarsi nell'intorno di una temperatura di regime.

4.5. Scelta della paraffina per le prove con le schiume

Tutte le prove con le schiume sono state eseguite con la paraffina SasolWax 5203, in quanto vi era la volontà di lavorare con il PCM che si fosse dimostrato il più performante durante i test in assenza di mezzo poroso. Il termine 'performante' fa riferimento alla capacità di questa paraffina di mantenere la temperatura della base ad un valore inferiore se confrontato con quelli ottenuti con le altre due. Si ricorda infatti che il settore applicativo in cui si immagina l'utilizzo di questi mezzi per la dissipazione del calore è principalmente l'elettronica, ergo mantenere la base ad una bassa temperatura significa allungare la vita del componente elettrico prevenendo malfunzionamenti o danni legati ad un insufficiente asporto di calore.

Dall'osservazione dei grafici riportati nel Par. 4.3 si nota che, a parità di potenza elettrica erogata dal riscaldatore a film, la durata delle prove diminuisce progressivamente passando dalla paraffina 5803 alla 5603 ed infine alla 5203. Ad una temperatura di fusione minore corrisponde, a parità di potenza fornita, un minor tempo necessario a raggiungere la transizione di fase; essendo uguali per le tre paraffine gli altri parametri fisici (calore specifico, densità, conducibilità termica) e la massa, ciò significa anche che la fusione completa impiega lo stesso tempo per tutte e tre. La durata della prova decresce, in quanto essa è stata definita come l'intervallo di tempo che intercorre tra il primo istante di erogazione della potenza elettrica e l'istante in cui l'ultima termocoppia posta in alto (quella denominata A) raggiunge la temperatura di regime.

Si tiene a precisare che con il termine 'massa' si fa riferimento non all'effettiva massa presente all'interno del modulo, ma a quella contenuta entro il modulo fino ad un'ideale superficie orizzontale in corrispondenza della termocoppia A. In questo modo, si evita il problema di dover calcolare per ogni prova la massa realmente presente nel modulo; questo calcolo risulterebbe difatti piuttosto laborioso non tanto dal punto di vista matematico, ma piuttosto da quello pratico. Essendo difatti sempre presente un leggero menisco sulla superficie libera della paraffina, non è possibile considerare il blocco di PCM come un parallelepipedo regolare e quindi si dovrebbero adottare altre tecniche di misurazione. Tra queste, ad esempio, riempire il volume libero del modulo con una

massa nota di acqua e risalire, tramite la densità di quest'ultima, al volume occupato, che poi andrebbe sottratto a quello dell'intera cavità del modulo.

Dovendo scegliere la paraffina che consente di mantenere la base di rame alla temperatura inferiore, si è reso necessario scegliere un istante di tempo uguale per tutte al quale valutarne il valore. La durata della prova inferiore si è avuta, per le considerazioni fatte sopra, con la paraffina 5203 e quindi si è scelto di utilizzare l'istante di fine prova di quest'ultima come valore di riferimento, come si vede nelle Figure 4-16, 4-17 e 4-18.

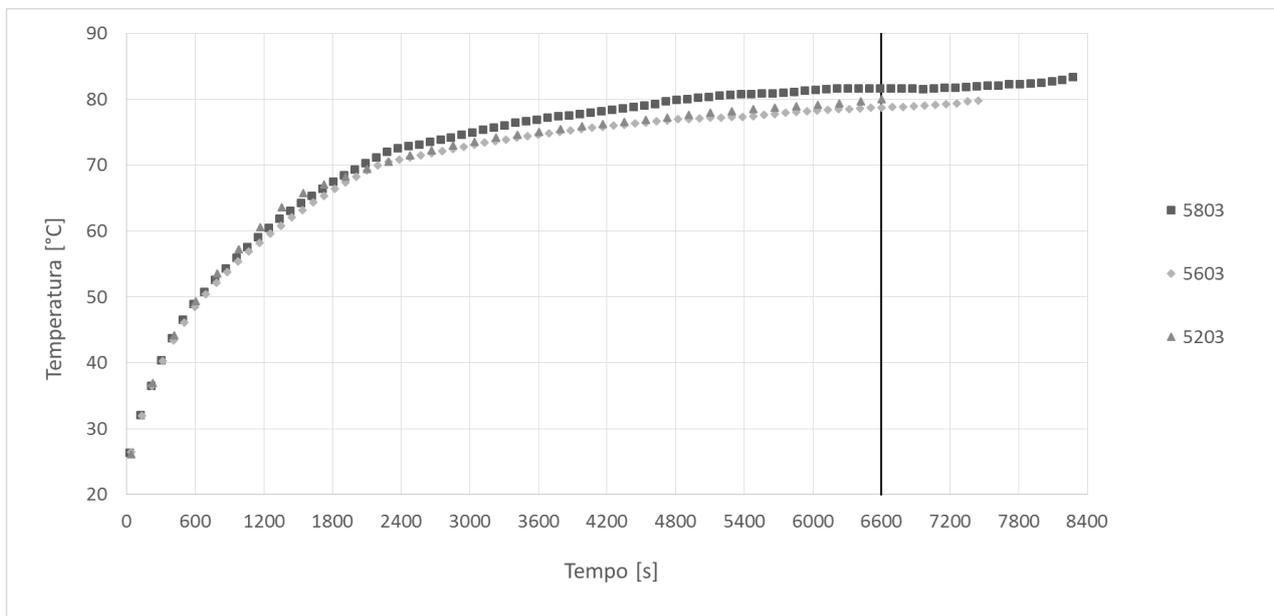


Figura 4-15. Temperatura registrata dalla termocoppia E nella base di rame con potenza erogata 10W per tre differenti paraffine; la linea verticale indica l'istante temporale di valutazione della temperatura della base raggiunta.

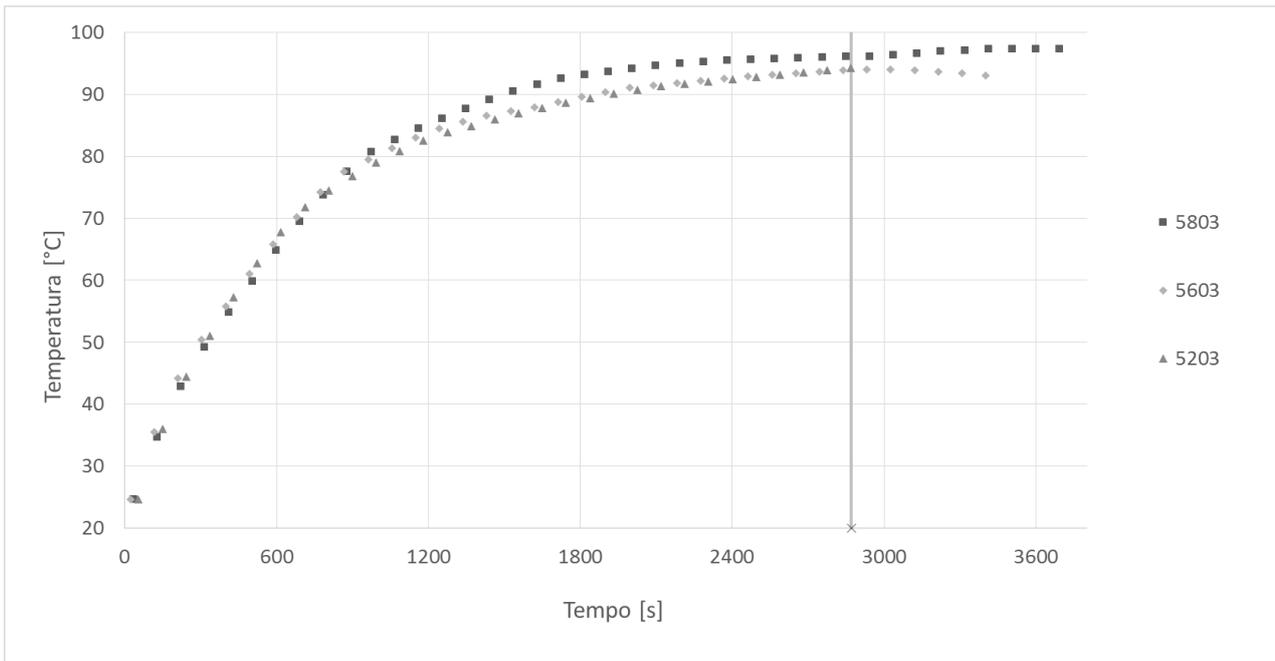


Figura 4-16. Temperatura registrata dalla termocoppia E nella base di rame con potenza erogata 20W per tre differenti paraffine; la linea verticale indica l'istante temporale di valutazione della temperatura della base raggiunta.

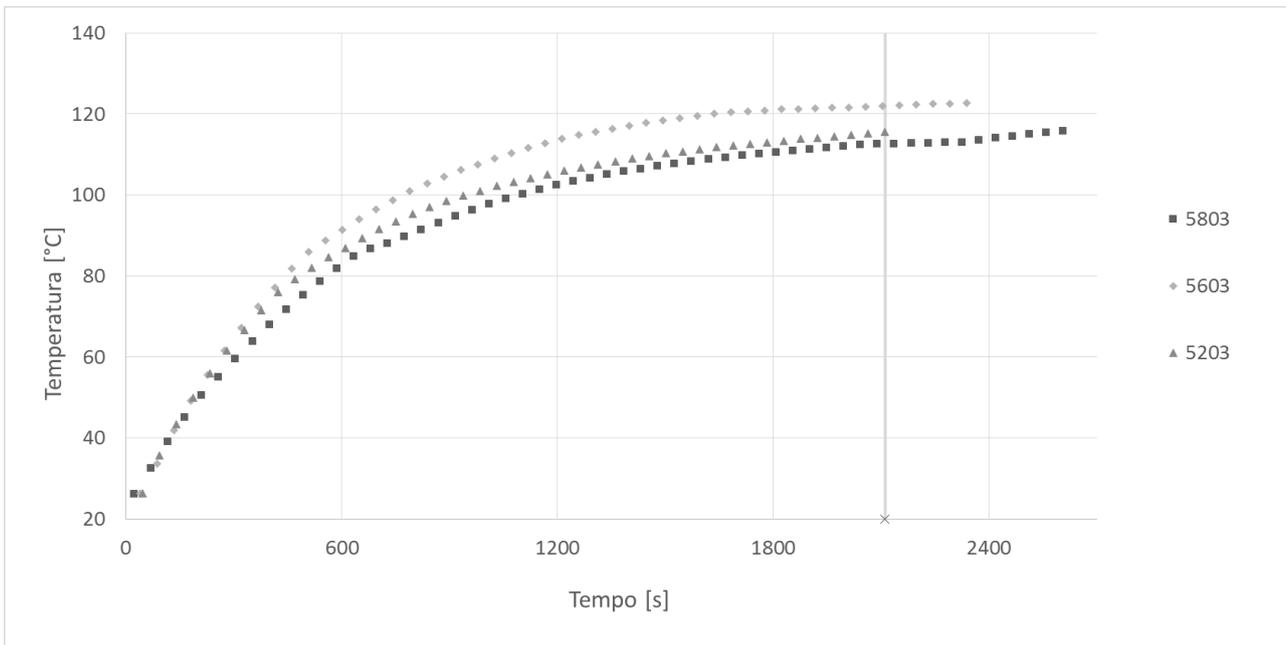


Figura 4-17. Temperatura registrata dalla termocoppia E nella base di rame con potenza erogata 30W per tre differenti paraffine; la linea verticale indica l'istante temporale di valutazione della temperatura della base raggiunta.

In Tabella 4-4 sono riportati in formato più accessibile i parametri interessanti di cui ai grafici sopra:

τ_{rif} è l'istante in cui è stata valutata per ciascuna paraffina la temperatura della base di rame, P è la

potenza elettrica fornita dal riscaldatore, T_E rappresenta il valore della temperatura della base registrata dalla termocoppia E.

Tabella 4-4. Istante di riferimento e temperatura rilevata dalla termocoppia E per ogni paraffina testata a tre livelli di potenza.

| | τ_{rif} [s] | $T_{E,5803}$ [°C] | $T_{E,5603}$ [°C] | $T_{E,5203}$ [°C] |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $P=10$ W | 6600 | 81.7 | 78.7 | 80.0 |
| $P=20$ W | 2870 | 96.1 | 94.0 | 94.0 |
| $P=30$ W | 2110 | 112.6 | 121.9 | 115.5 |

Si nota immediatamente che nessuna delle tre paraffine mantiene la base di rame ad una temperatura più bassa rispetto alle altre due in ciascuna delle tre prove:

- durante la prova a 10 W, la 5603 prevale sulle altre con una riduzione della temperatura della base di 3 K rispetto alla 5803 e di 1.3 K rispetto alla 5203;
- durante la prova a 20 W, prevalgono sia la 5203 che la 5603 con una riduzione della temperatura della base di 2.1 K rispetto alla 5803;
- durante la prova a 30 W, prevale la 5803 con una riduzione della temperatura della base di 9.3 K rispetto alla 5603 e di 2.9 K rispetto alla 5203.

La prova a 30 W risulta insolita rispetto alle altre due per la paraffina 5803: generalmente essa mantiene la base ad una temperatura sempre superiore rispetto al caso con le altre due paraffine, mentre questa volta la mantiene a temperatura inferiore.

Tenendo conto di ciò, si valuta che sia la paraffina 5203 la migliore: sebbene a 10 W mantenga la base ad una temperatura leggermente superiore, a 20 W ottiene le stesse performance della 5603, ma a 30 W dimostra un importante riduzione della temperatura rispetto alle altre.

4.6. Prove con paraffina e schiuma

La prima schiuma ad essere testata è stata la 5 PPI, impregnata della paraffina SasolWax 5203; nelle Figure 4-19, 4-20 e 4-21 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

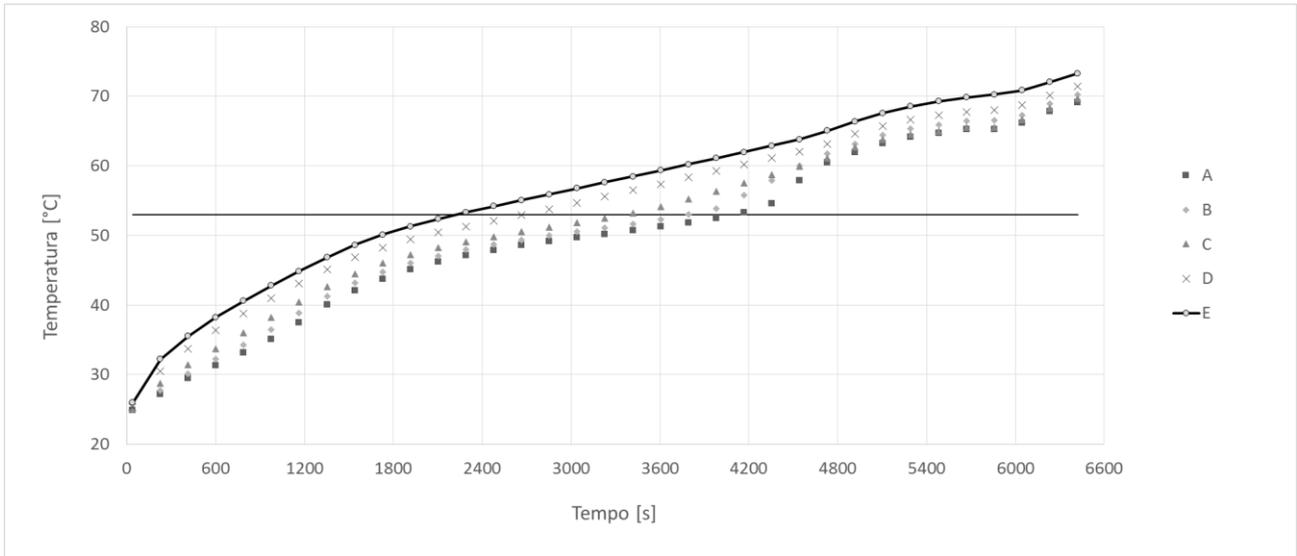


Figura 4-18. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 5 PPI con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

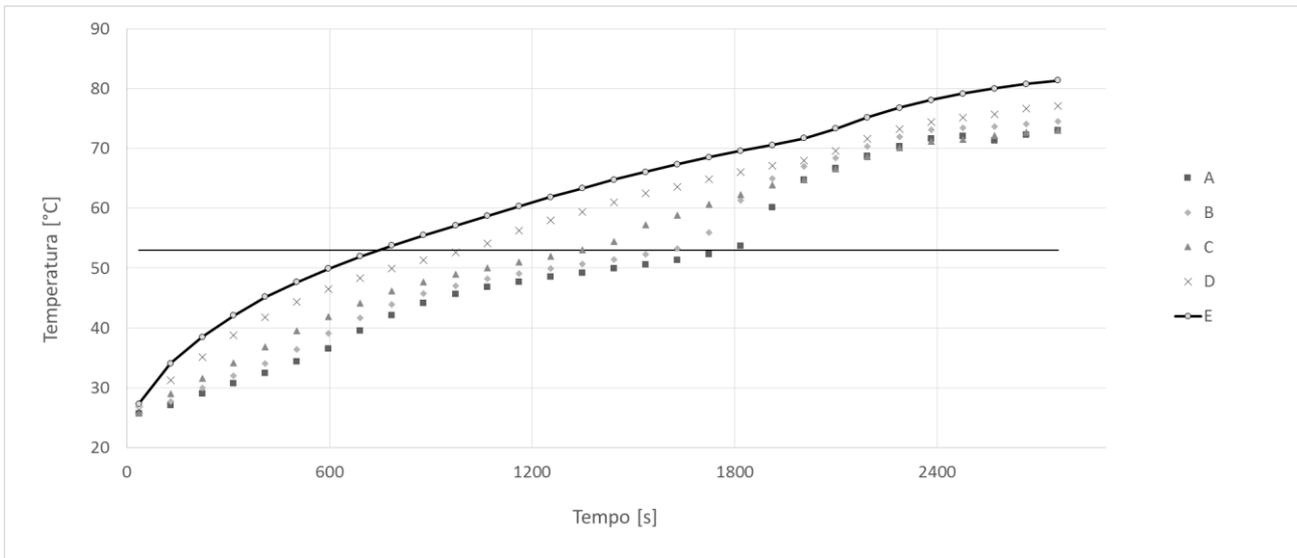


Figura 4-19. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 5 PPI con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

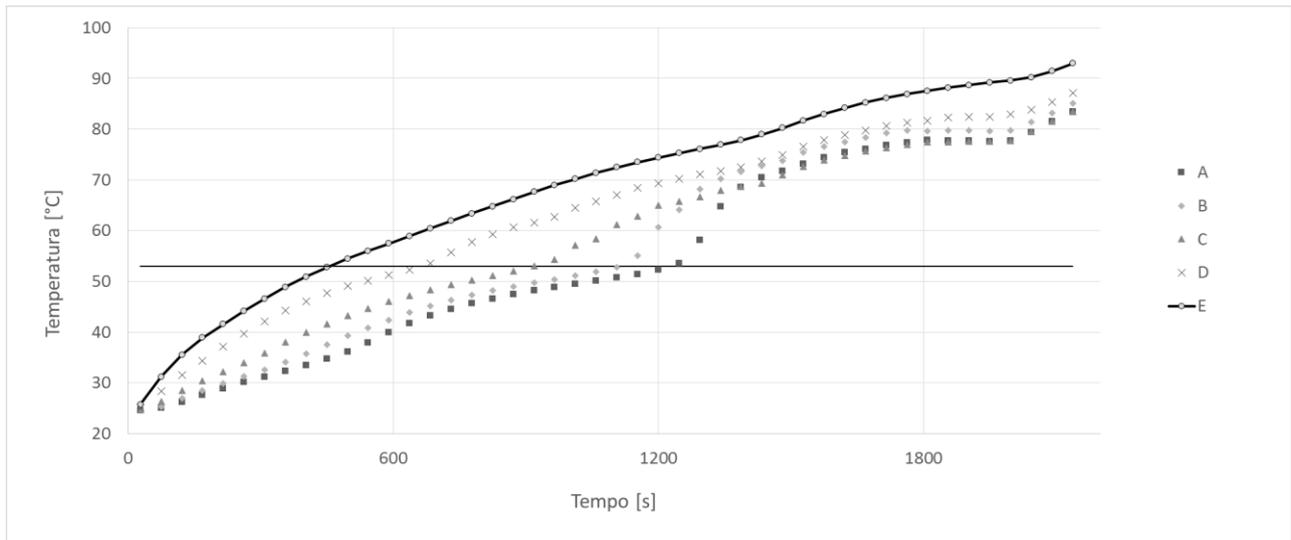


Figura 4-20. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 5 PPI con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Come si può notare, gli andamenti sono pressoché gli stessi al variare della potenza: mentre nel caso con sola paraffina le temperature registrate dalle termocoppie erano molto diverse ad un istante fissato, in questo caso esse aumentano circa allo stesso modo e ciò fa sì che il gradiente di temperatura entro il modulo si mantenga a valori modesti. Questo è possibile grazie alla schiuma, che permette al calore generato dal riscaldatore di distribuirsi uniformemente entro il PCM; la conducibilità media dell'intero blocco PCM e schiuma aumenta secondo la relazione di Bhattacharya et al. [22]:

$$\lambda_{medio} = \lambda_{PCM} \cdot \varepsilon_{schiuma} + \lambda_{rame} \cdot (1 - \varepsilon_{schiuma})$$

Questo significa che, rispetto al caso con sola paraffina, il calore asportato nell'unità di tempo dalla base di rame è maggiore e quindi quest'ultima si mantiene ad una temperatura inferiore.

Inizialmente la temperatura cresce linearmente con una pendenza costante; successivamente, la pendenza delle curve di temperatura subisce una variazione positiva in corrispondenza della temperatura di fusione, come evidenziato dalla retta orizzontale; da qui in poi la pendenza aumenta, come accadeva nel caso senza schiuma, ad indicare una variazione delle proprietà termiche della paraffina (Eq. 4.2). Superata questa fase transitoria, le proprietà si stabilizzano e le curve mantengono una pendenza inferiore alla fase pre-fusione, giustificata dal maggiore valore del calore specifico della fase liquida rispetto a quella solida.

Si nota, in modo più evidente per potenze maggiori, l'intersezione di alcune curve: si ipotizza che ciò sia dovuto alla vicinanza del sensore della termocoppia alla fibra di metallo. Dopo la fusione, difatti, è plausibile che la termocoppia si trovi ad essere influenzata dalla temperatura della fibra;

una conferma di ciò può essere il fatto che nei diversi casi siano sempre gli stessi misuratori (A e B) ad essere caratterizzati da un incremento più marcato della temperatura. La conferma di ciò si avrà con le successive prove, nelle quali si evidenzia sempre un'intersezione tra alcune delle curve, che mutano da un modulo all'altro.

In Tabella 4-5 è riportato il valore della temperatura della base di rame a fine prova per il caso in esame a diversi livelli di potenza. I tempi di fine prova sono: 6500 s per 10 W, 2800 s per 20 W e 2100 s per 30; questi si mantengono per tutte e tre le schiume.

Tabella 4-5. Temperatura della base a fine prova per il caso di paraffina 5203 con schiuma 5 PPI a diversi livelli di potenza.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $T_{base}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ | 73 | 81 | 93 |

La seconda schiuma ad essere testata è stata la 10 PPI, impregnata della paraffina SasolWax 5203; nelle Figure 4-22, 4-23 e 4-24 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

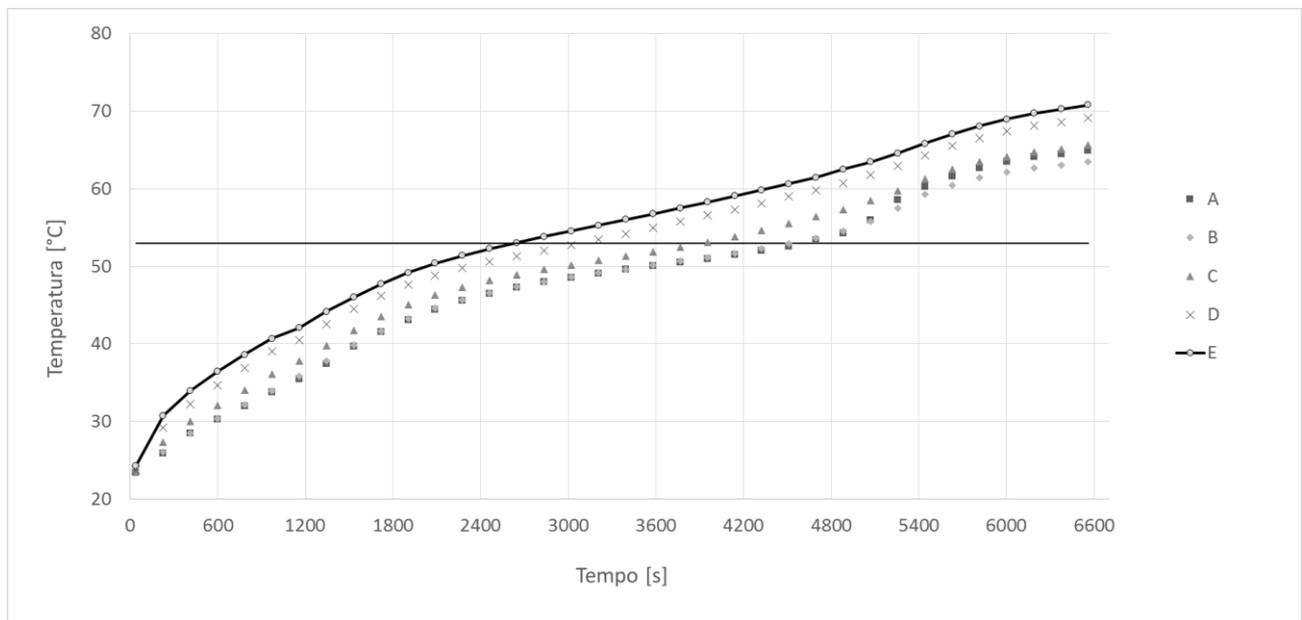


Figura 4-21. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 10 PPI con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

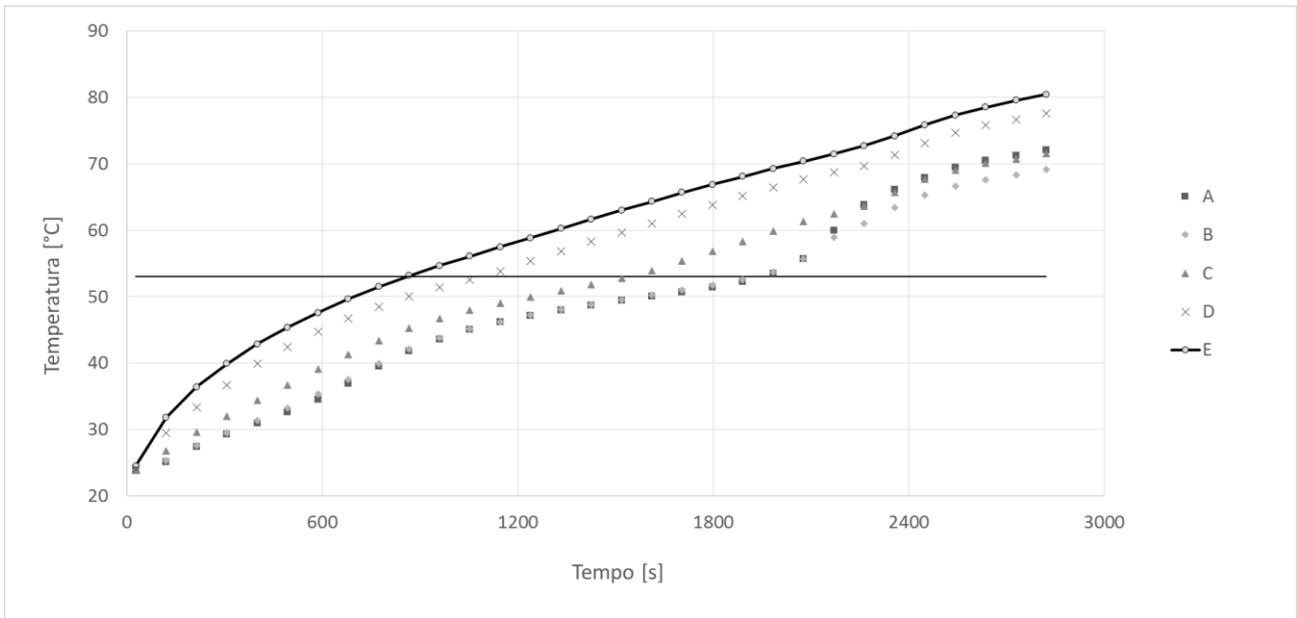


Figura 4-22. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 10 PPI con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

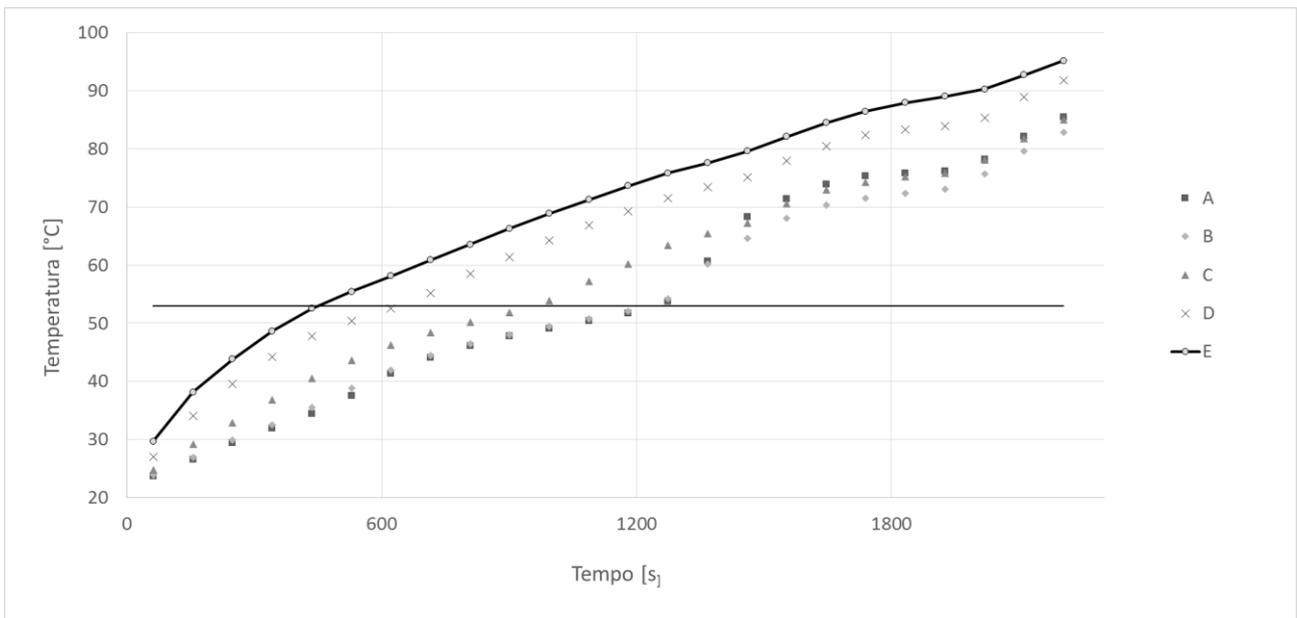


Figura 4-23. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 10 PPI con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Le considerazioni in merito all'influenza della schiuma sull'andamento di temperatura entro il modulo sono le stesse del caso a 5 PPI.

In Tabella 4-6 è riportato il valore della temperatura della base di rame a fine prova per il caso in esame a diversi livelli di potenza.

Tabella 4-6. Temperatura della base a fine prova per il caso di paraffina 5203 con schiuma 10 PPI a diversi livelli di potenza.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $T_{base}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ | 71 | 80 | 95 |

La terza schiuma ad essere testata è stata la 40 PPI, impregnata della paraffina SasolWax 5203; nelle Figure 4-25, 4-26 e 4-27 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore.

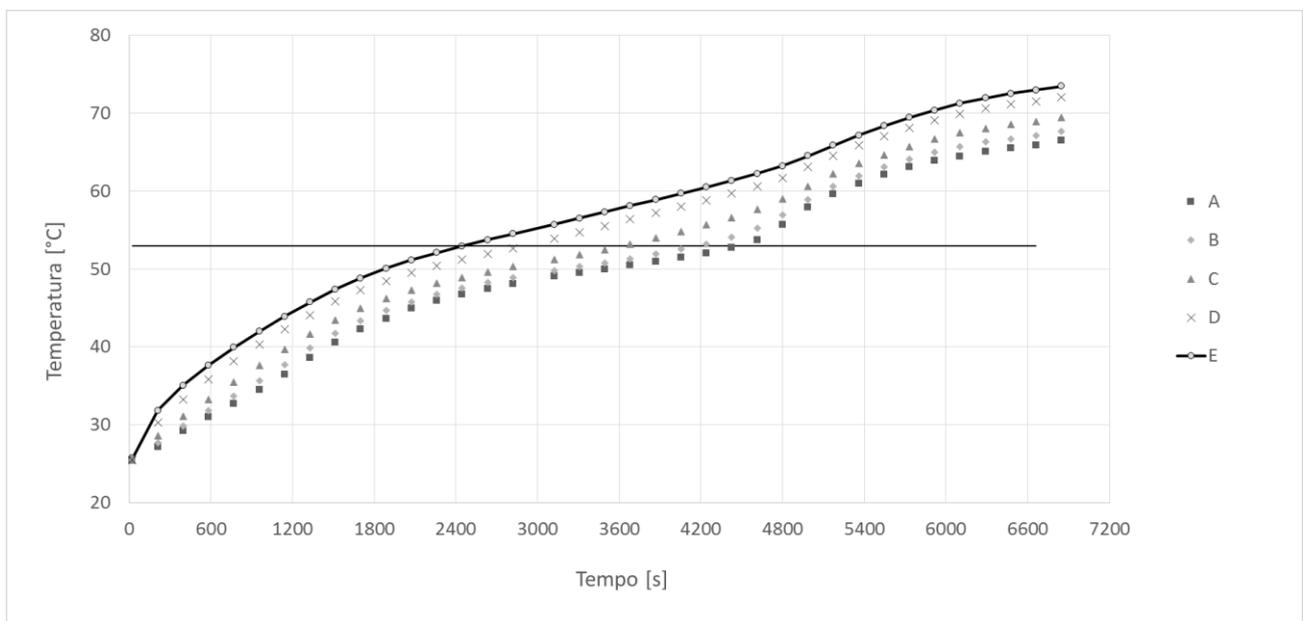


Figura 4-24. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 40 PPI con potenza elettrica erogata di 10W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

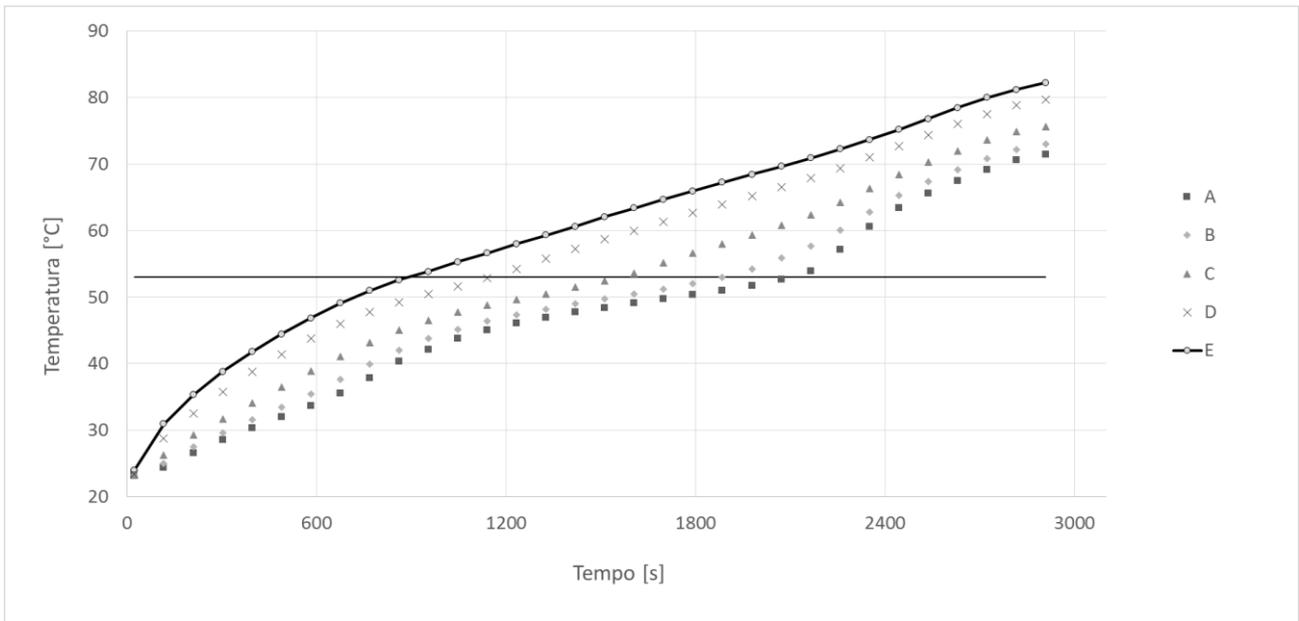


Figura 4-25. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 40 PPI con potenza elettrica erogata di 20W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

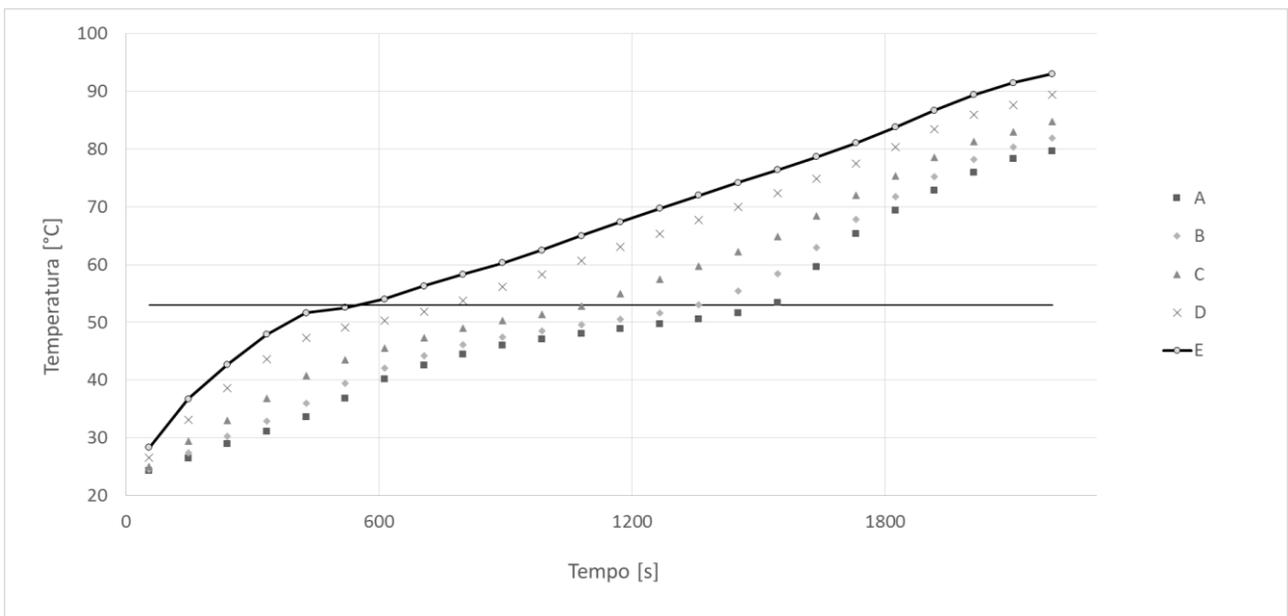


Figura 4-26. Andamento delle temperature nel tempo per la paraffina 5203 e schiuma 40 PPI con potenza elettrica erogata di 30W; la retta orizzontale indica la temperatura di fusione della paraffina usata.

Le considerazioni in merito all'influenza della schiuma sull'andamento di temperatura entro il modulo sono le stesse del caso a 5 PPI.

In Tabella 4-7 è riportato il valore della temperatura della base di rame a fine prova per il caso in esame a diversi livelli di potenza.

Tabella 4-7. Temperatura della base a fine prova per il caso di paraffina 5203 con schiuma 40 PPI a diversi livelli di potenza.

| | $P=10\text{ W}$ | $P=20\text{ W}$ | $P=30\text{ W}$ |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $T_{base}\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ | 72.6 | 82.2 | 91.5 |

4.7. Influenza della schiuma sulla temperatura della base

La schiuma funge da matrice metallica capace di distribuire uniformemente il calore ricevuto dalla base di rame in tutto il blocco di paraffina; questo consente di ridurre il problema della bassa conducibilità termica del PCM. In tal modo, il calore inizia a diffondersi fin da subito nell'intero blocco grazie alla presenza delle fibre metalliche che fungono da via trasportatrici, anziché rimanere concentrato negli strati inferiori di paraffina causando uno spiccato aumento della temperatura della base. In assenza di schiuma, difatti, si crea un gradiente di temperatura entro la paraffina molto marcato e perciò, potendo solo una frazione minima del calore procedere verso l'alto, la maggior parte rimane a riscaldare la base di rame. La schiuma, saldobrasata direttamente alla base di rame, costituisce per il calore una via preferenziale di diffusione attraverso le sue fibre metalliche ad alta conducibilità: il calore quindi si diffonde nell'intero modulo e quindi tutta la paraffina in prossimità delle fibre inizia prima il riscaldamento sensibile, poi la fusione. Aumentando quindi la frazione di paraffina che assorbe calore, unita al fatto che anche le fibre ne stanno assorbendo, la base di rame raggiunge una temperatura inferiore rispetto al caso senza schiuma: il calore in ingresso è difatti sempre lo stesso (legato alla potenza elettrica fornita dal riscaldatore a film), ma quello in uscita è accresciuto per le ragioni di cui sopra. Ciò comporta che la base di rame aumenta la sua temperatura seguendo un andamento a pendenza inferiore rispetto al caso di sola paraffina.

In termini pratici, questo risulta essere estremamente importante per il settore applicativo di studio: mantenere un componente elettronico (il cui ruolo è svolto dalla base di rame) ad una temperatura inferiore di un certo valore di sicurezza per un tempo superiore significa poterne fare un utilizzo maggiore in termini di tempo.

Nelle Figure 4-28, 4-29 e 4-30 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore nel caso di schiuma 5 PPI impregnata con la paraffina 5203.

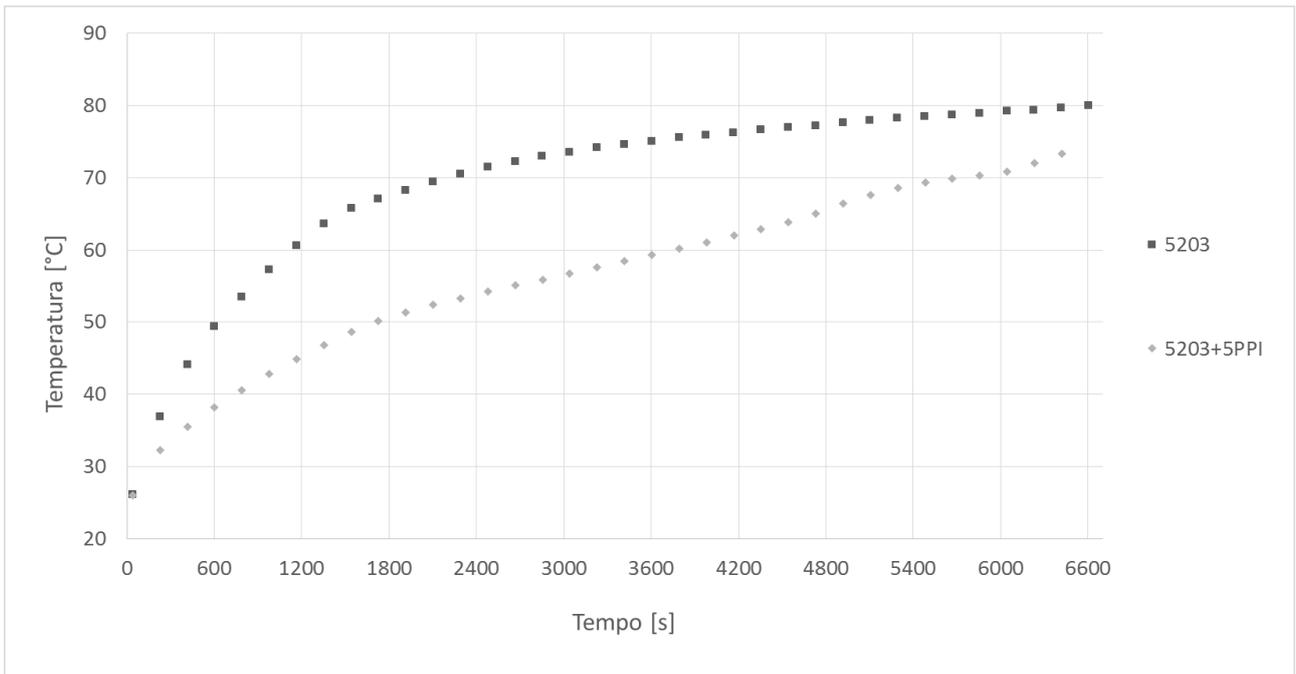


Figura 4-27. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 5 PPI a 10 W.

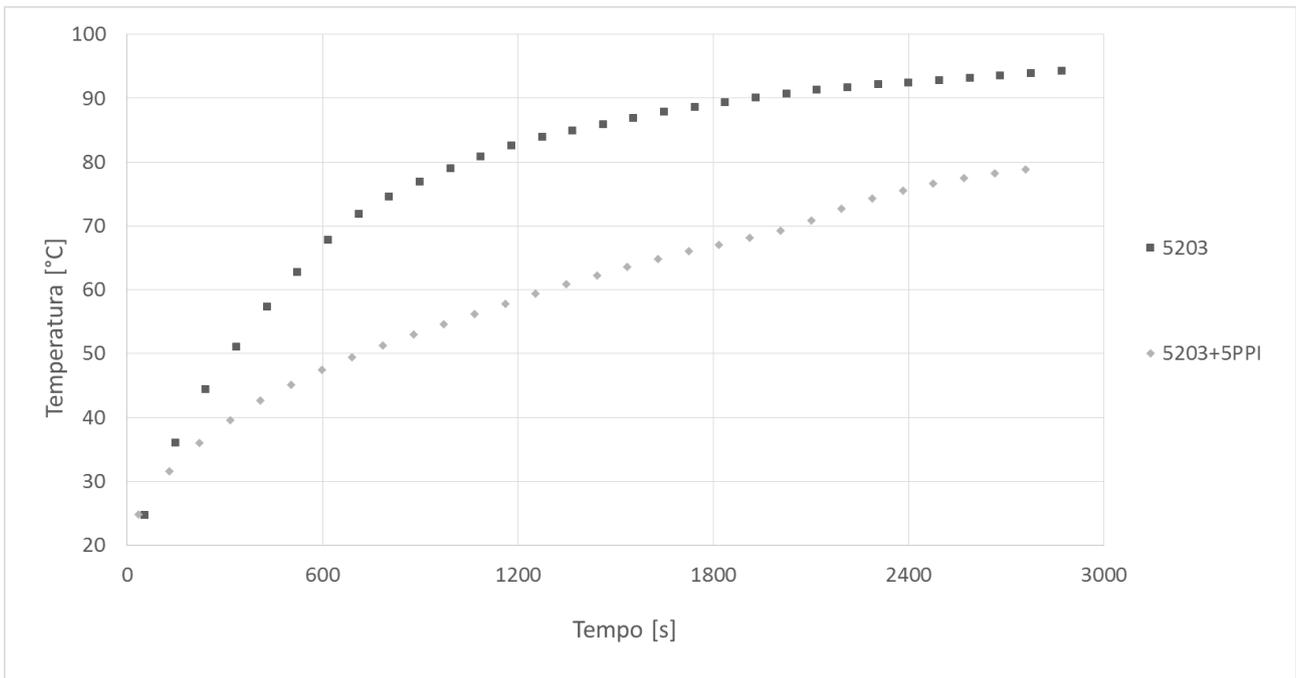


Figura 4-28. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 5 PPI a 20 W.

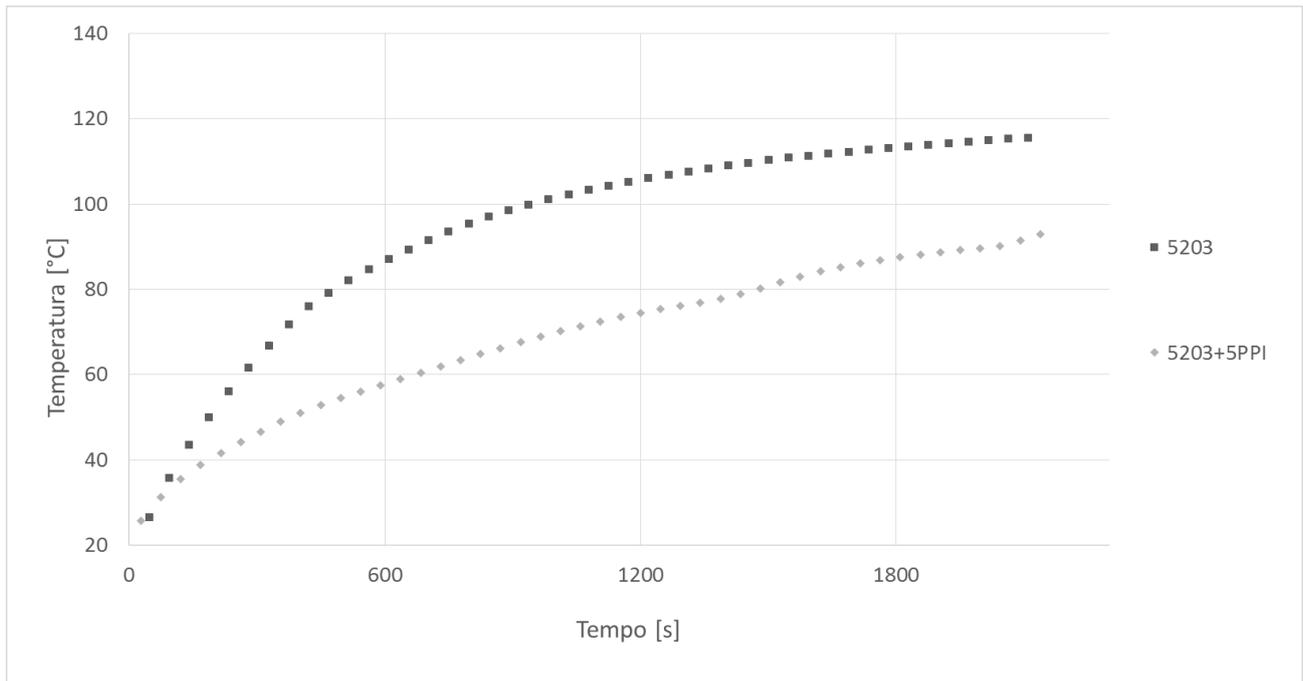


Figura 4-29. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 5 PPI a 30 W.

Si nota chiaramente come per tutti e tre i livelli di potenza elettrica la schiuma consente di mantenere per tutta la prova una temperatura della base di rame inferiore.

In Tabella 4-8 sono presenti i valori di temperatura estratti dai grafici soprastanti per il caso senza schiuma ed il caso con schiuma 5 PPI; si indicano T_{5203} la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova dalla base di rame senza schiuma, $T_{5203+5 PPI}$ la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova dalla base di rame con schiuma 5 PPI, ΔT la differenza di temperatura ottenuta rispetto al caso senza schiuma.

Tabella 4-8. Confronto tra le temperature raggiunte a fine prova per i due casi senza e con schiuma.

| | T_{5203} [°C] | $T_{5203+5 PPI}$ [°C] | ΔT [K] |
|----------|-----------------|-----------------------|----------------|
| $P=10 W$ | 80.0 | 74.4 | -5.6 |
| $P=20 W$ | 99.7 | 81.8 | -17.9 |
| $P=30 W$ | 115.5 | 92.9 | -22.6 |

La schiuma 5 PPI consente una riduzione che va aumentando al crescere della potenza elettrica fornita dal riscaldatore a film, passando da -5.6 K a 10 W fino a -22.6 K a 30 W.

Si ipotizza che ciò sia legato alla bassa conducibilità termica della paraffina: al crescere della potenza elettrica, la quantità di calore che gli strati inferiori di paraffina riescono a smaltire verso l'alto va, in termini relativi, diminuendo. A potenze più elevate difatti si creano gradienti di temperatura verticali via via maggiori e la temperatura della base va ovviamente crescendo maggiormente rispetto ai casi con potenza inferiori. Tutto ciò porta ad avere, a fine prova, una temperatura più elevata della base di rame.

Per contro, la schiuma al crescere della potenza elettrica fornita diminuisce le sue prestazioni, in quanto la riduzione percentuale che permette di conseguire passando da 10 W a 20 W è ben più marcata rispetto a quella che si ottiene nel passaggio da 20 W a 30 W. Si ipotizza che l'ostacolo sia legato ancora una volta alla paraffina ed alla sua natura di isolante termico: le fibre permettono un trasporto di calore in modo costante con la potenza, tuttavia incontrano il PCM che, per le stesse considerazioni fatte pocanzi, ad elevate potenze non riesce a smaltire in tempi brevi il calore, che perciò si ferma nell'intorno della fibra (come prima si attestava negli strati inferiori). La conseguenza è che il calore, non potendo diffondersi ampiamente dalla fibra alla paraffina, si accumula nella base di rame ad elevata conducibilità, che aumenta la sua temperatura più di quanto non facesse a potenze elettriche inferiori.

Nonostante quindi si riveli un andamento a pendenza positiva che diminuisce al crescere della potenza elettrica fornita, l'utilizzo di una schiuma a 5 PPI impregnata di paraffina risulta essere sicuramente un metodo valido ed efficace per ottenere una diminuzione marcata di temperatura della base di rame.

Nelle Figure 4-31, 4-32 e 4-33 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore nel caso di schiuma 10 PPI impregnata con la paraffina 5203.

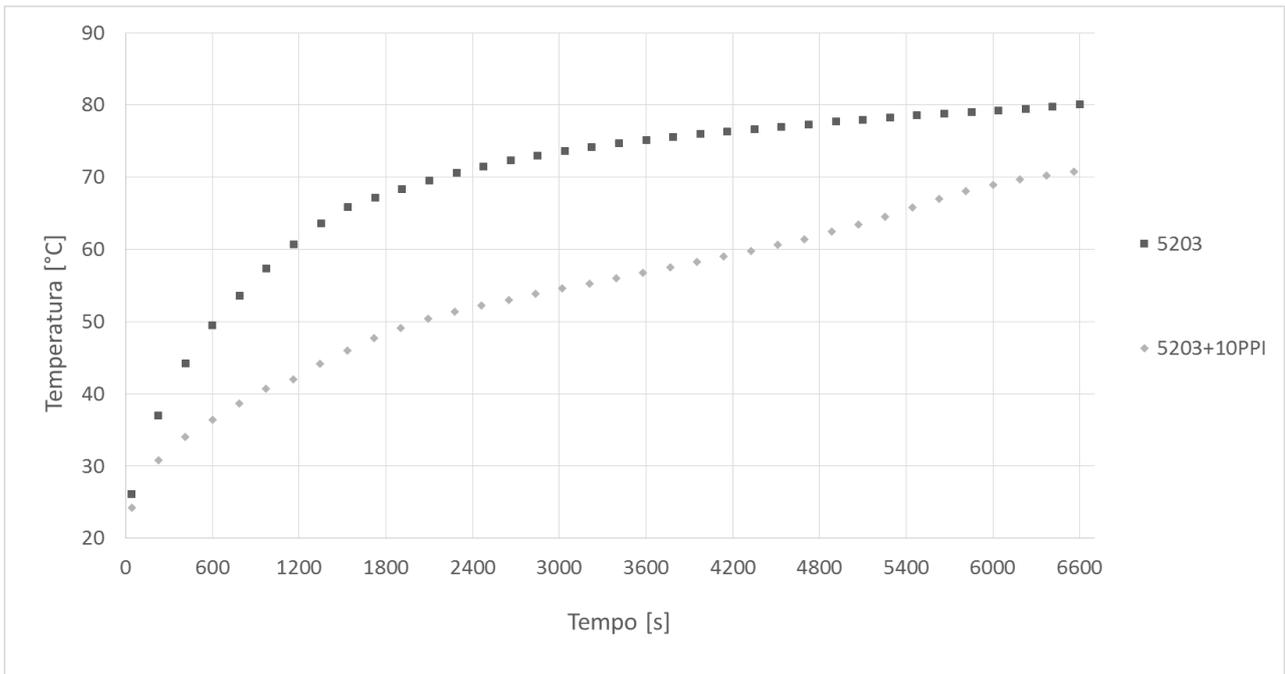


Figura 4-30. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 10 PPI a 10 W.

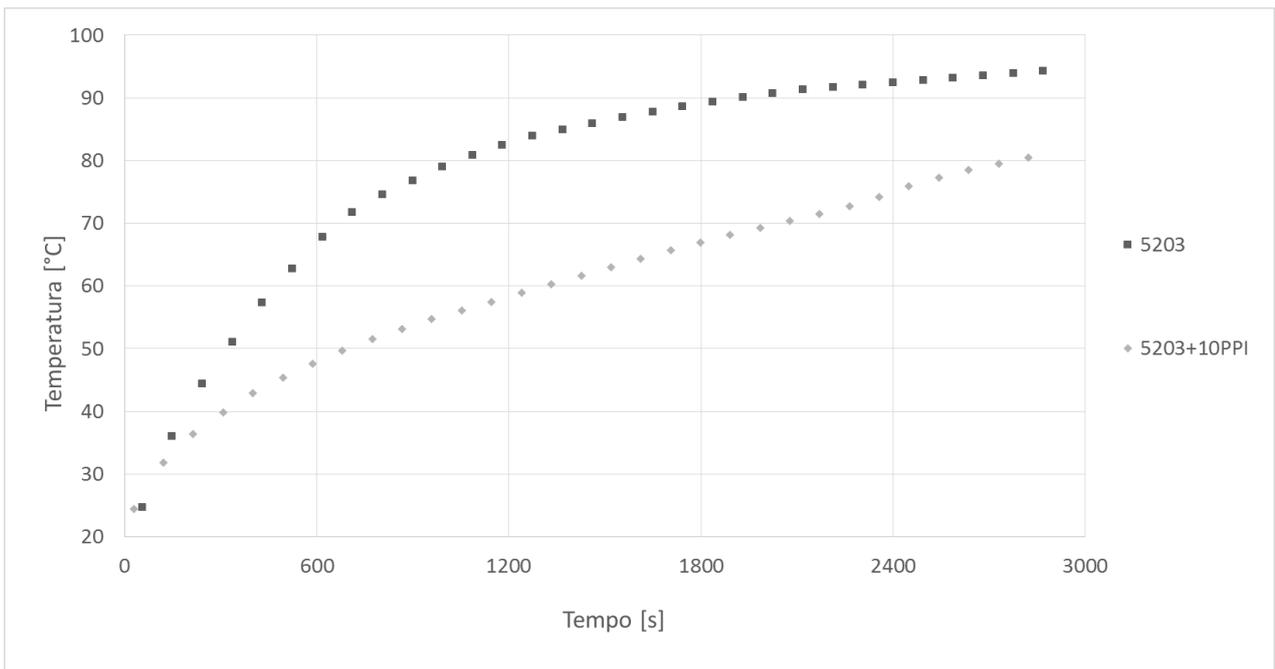


Figura 4-31. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 10 PPI a 20 W.

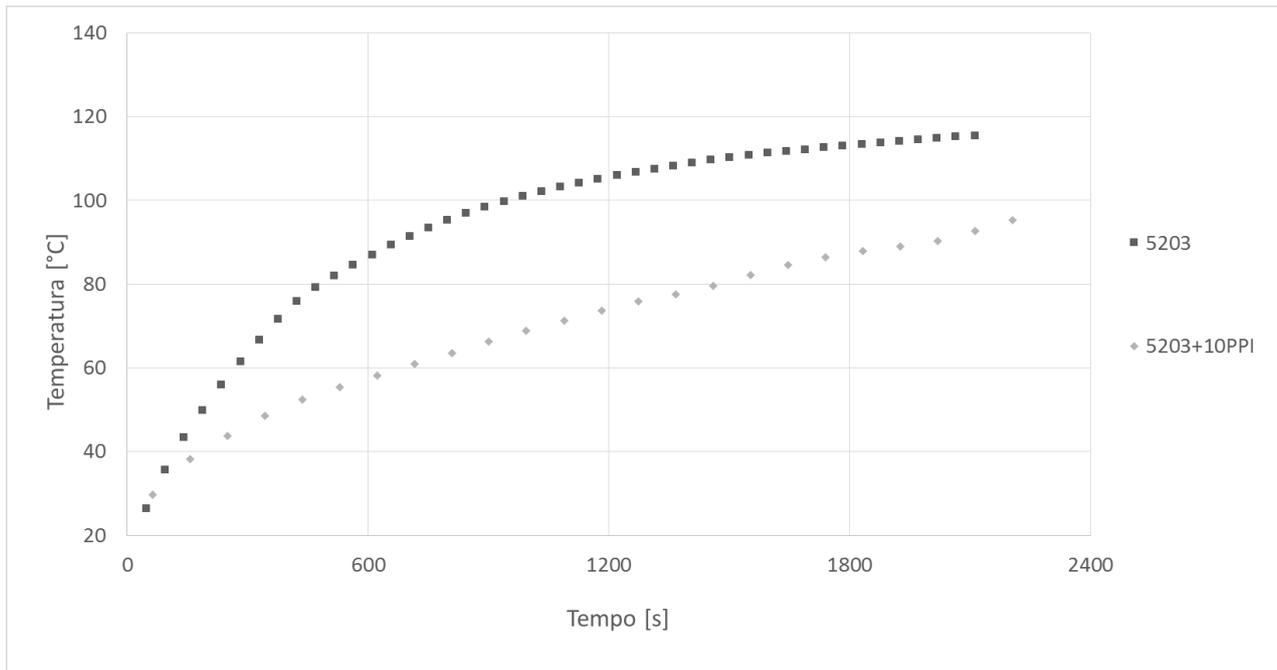


Figura 4-32. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 10 PPI a 30 W.

Si nota chiaramente come per tutti e tre i livelli di potenza elettrica la schiuma consente di mantenere per tutta la prova una temperatura della base di rame inferiore.

In Tabella 4-9 sono presenti i valori di temperatura estratti dai grafici soprastanti per il caso senza schiuma ed il caso con schiuma 10 PPI; si indicano T_{5203} la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova dalla base di rame senza schiuma, $T_{5203+10 PPI}$ la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova dalla base di rame con schiuma 10 PPI, ΔT la differenza di temperatura ottenuta rispetto al caso senza schiuma.

Tabella 4-9. Confronto tra le temperature raggiunte a fine prova per i due casi senza e con schiuma.

| | T_{5203} [°C] | $T_{5203+10 PPI}$ [°C] | ΔT [K] |
|----------|-----------------|------------------------|----------------|
| $P=10 W$ | 80.0 | 70.8 | -9.2 |
| $P=20 W$ | 99.7 | 80.5 | -19.2 |
| $P=30 W$ | 115.5 | 92.7 | -22.8 |

La schiuma 10 PPI consente una riduzione che va aumentando al crescere della potenza elettrica fornita dal riscaldatore a film, passando da -9.2 K a 10 W fino a -22.8 K a 30 W, per le stesse ragioni che sono occorse nel caso a 5 PPI.

Anche in questo caso, l'andamento ha pendenza calante al crescere della potenza, tuttavia l'utilizzo di una schiuma a 10 PPI si rivela sensato.

Nelle Figure 4-34, 4-35 e 4-36 si riportano i grafici (τ, T) ottenuti per diversi livelli di potenza elettrica erogata dal riscaldatore nel caso di schiuma 40 PPI impregnata con la paraffina 5203.

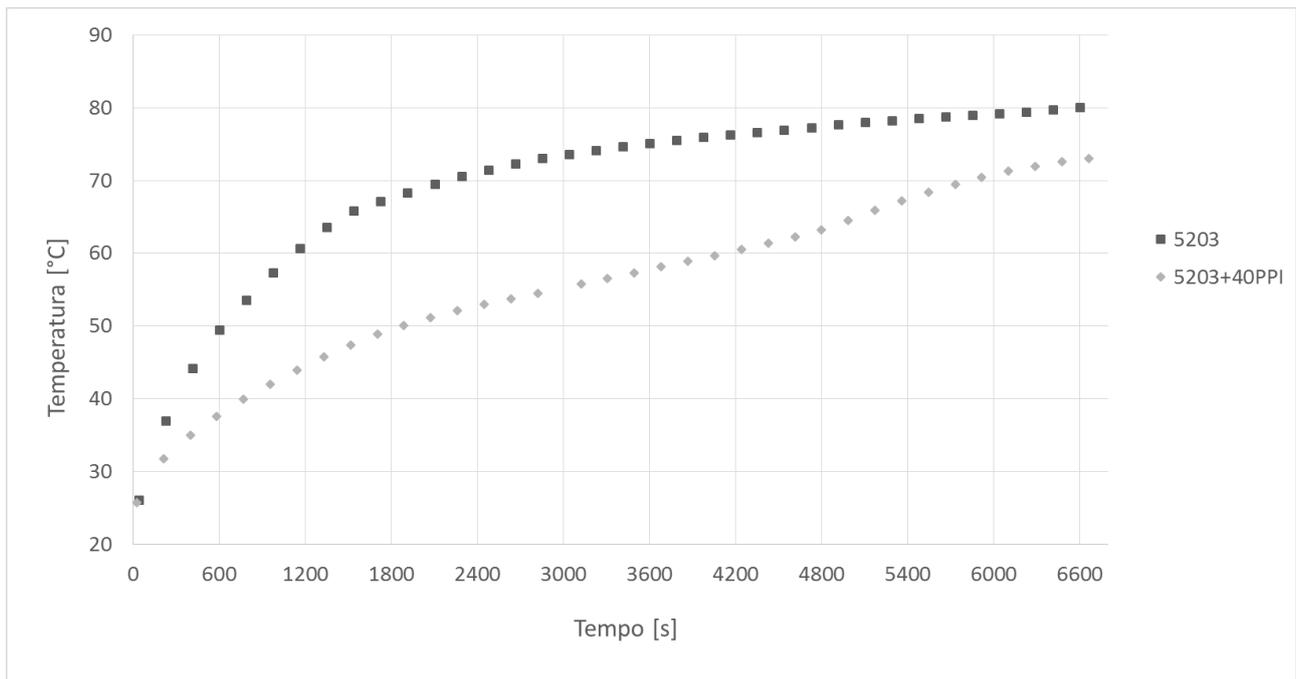


Figura 4-33. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 40 PPI a 10 W.

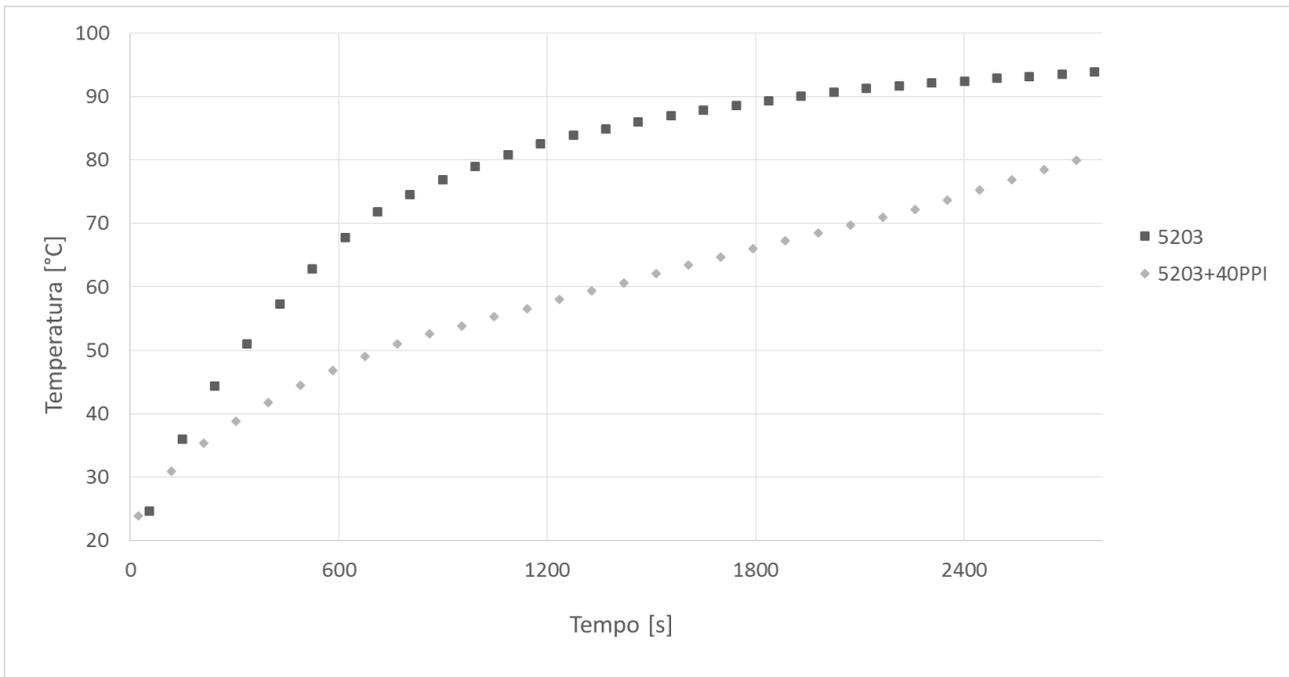


Figura 4-34. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 40 PPI a 20 W.

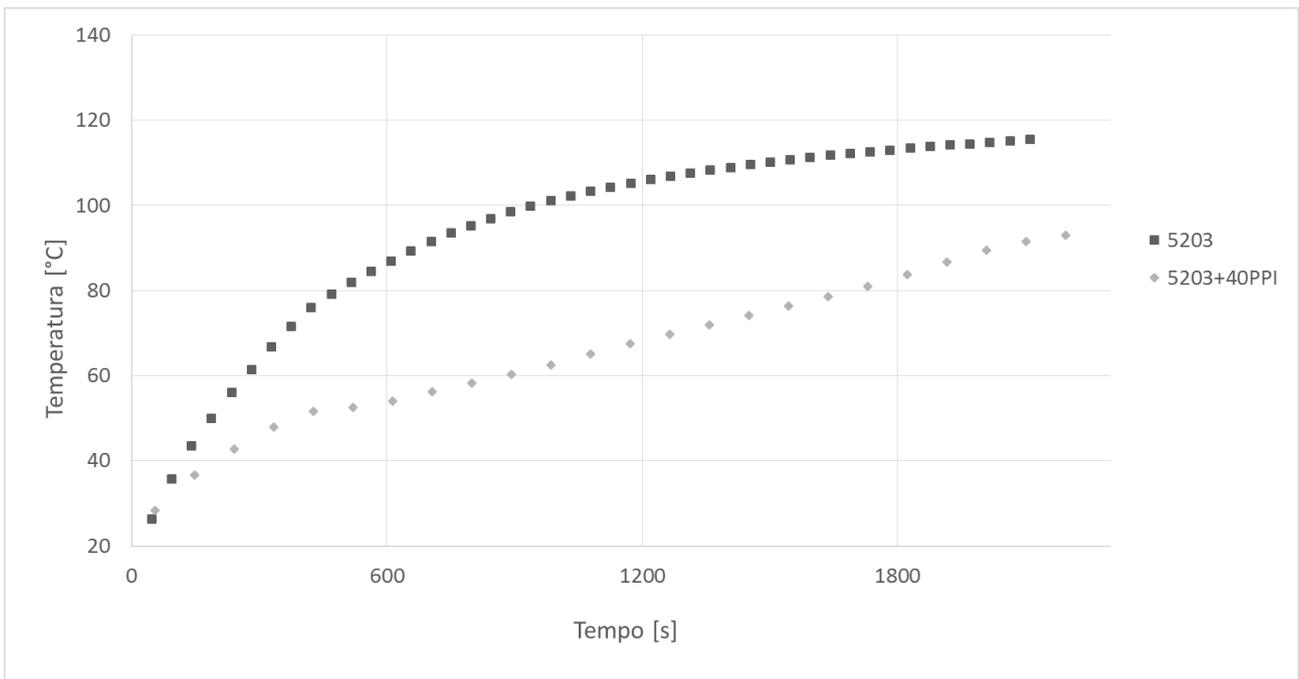


Figura 4-35. Temperatura registrata dalla termocoppia E nei casi con e senza schiuma 40 PPI a 30 W.

Si nota chiaramente come per tutti e tre i livelli di potenza elettrica la schiuma consente di mantenere per tutta la prova una temperatura della base di rame inferiore.

In Tabella 4-10 sono presenti i valori di temperatura estratti dai grafici soprastanti per il caso senza schiuma ed il caso con schiuma 40 PPI; si indicano T_{5203} la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova

dalla base di rame senza schiuma, $T_{5203+40\text{ PPI}}$ la temperatura in [°C] raggiunta a fine prova dalla base di rame con schiuma 40 PPI, ΔT la differenza di temperatura ottenuta rispetto al caso senza schiuma.

Tabella 4-10. Confronto tra le temperature raggiunte a fine prova per i due casi senza e con schiuma.

| | T_{5203} [°C] | $T_{5203+40\text{ PPI}}$ [°C] | ΔT [K] |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| $P=10\text{ W}$ | 80.0 | 72.8 | -7.2 |
| $P=20\text{ W}$ | 99.7 | 82.2 | -17.5 |
| $P=30\text{ W}$ | 115.5 | 91.5 | -24.0 |

La schiuma 40 PPI consente una riduzione che va aumentando al crescere della potenza elettrica fornita dal riscaldatore a film, passando da -7.2 K a 10 W fino a -24.0 K a 30 W, per le stesse ragioni che sono occorse nel caso a 5 PPI.

Anche in questo caso, l'andamento ha pendenza calante al crescere della potenza, tuttavia l'utilizzo di una schiuma a 40 PPI si rivela sensato.

Tutte e tre le schiume testate risultano essere ampiamente soddisfacenti in termini di diminuzione della temperatura della base, come illustrato dai grafici sovrastanti. Per comprendere quale sia la migliore soluzione è però preferibile confrontare direttamente, a parità di potenza, gli andamenti della temperatura della base di rame ottenuti con ciascuna schiuma.

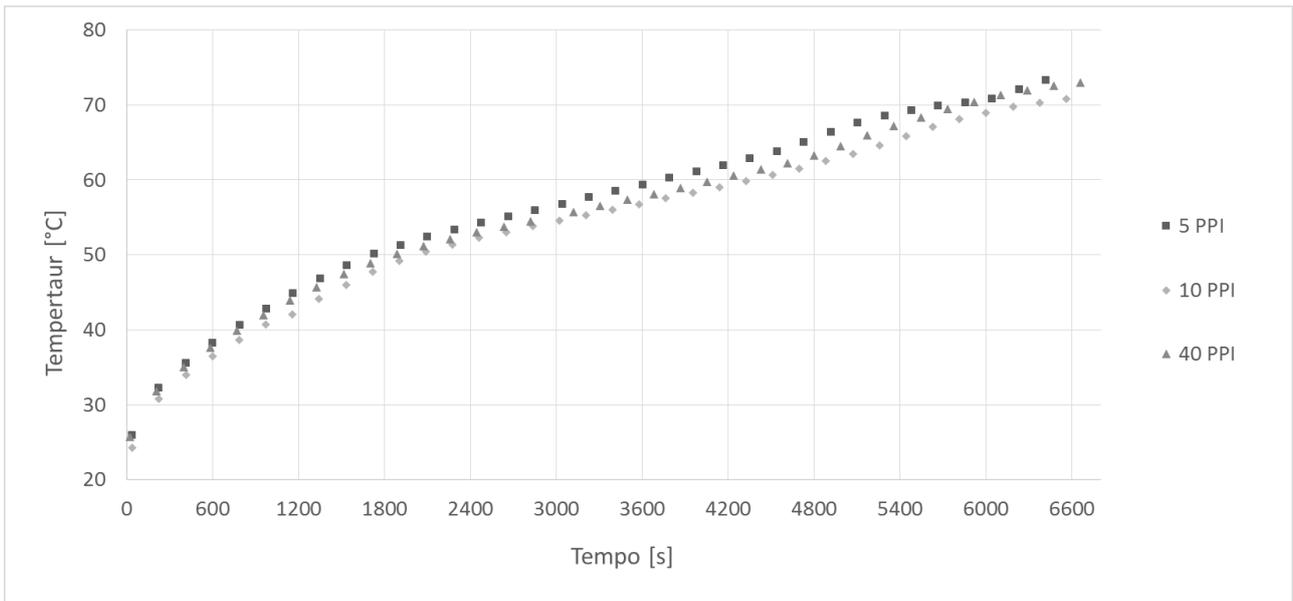


Figura 4-36. Andamento della temperatura della base di rame ottenuto con le tre schiuma impregnate di paraffina 5203 per una potenza di 10 W.

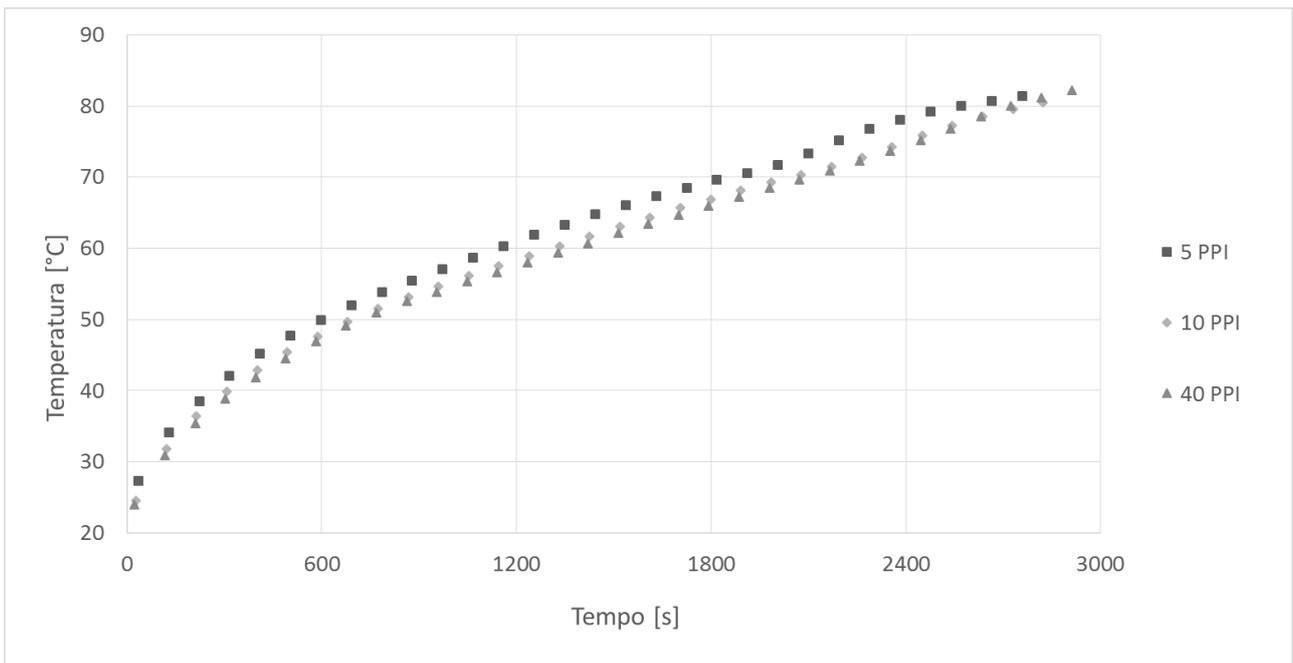


Figura 4-37. Andamento della temperatura della base di rame ottenuto con le tre schiuma impregnate di paraffina 5203 per una potenza di 20 W.

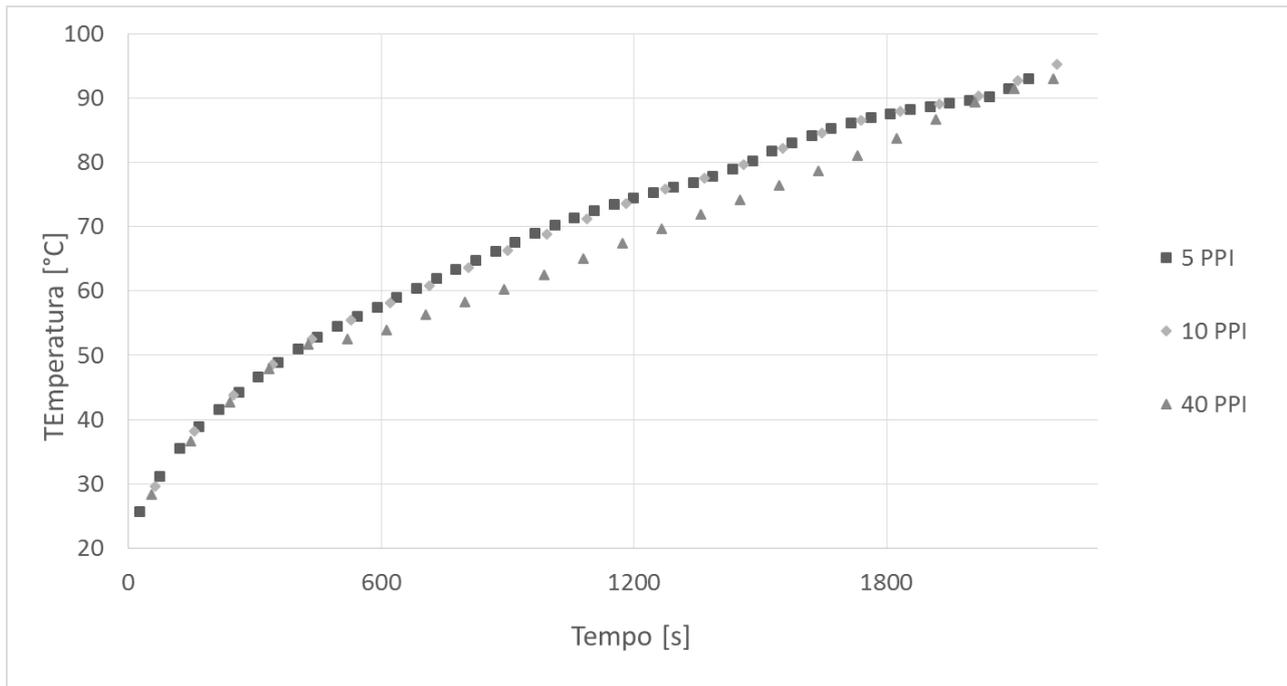


Figura 4-38. Andamento della temperatura della base di rame ottenuto con le tre schiuma impregnate di paraffina 5203 per una potenza di 30 W.

In Tabella 4-11 sono riportate le temperature raggiunte a fine prova per diversi livelli di potenza al variare della schiuma utilizzata.

Tabella 4-11. Confronto tra le temperature raggiunte a fine prova al variare della schiuma utilizzata.

| | $T_{E, 5 \text{ PPI}} [^{\circ}\text{C}]$ | $T_{E, 10 \text{ PPI}} [^{\circ}\text{C}]$ | $T_{E, 40 \text{ PPI}} [^{\circ}\text{C}]$ |
|----------|---|--|--|
| P = 10 W | 73.4 | 70.8 | 72.8 |
| P = 20 W | 81.5 | 80.5 | 82.2 |
| P = 30 W | 91.5 | 92.7 | 91.5 |

Si nota immediatamente che le differenze tra le temperature raggiunte a fine prova con le varie schiume sono alquanto modesti; inoltre, nessuna schiuma ha un comportamento migliore delle altre a tutti e tre i livelli di potenza:

- a 10 W prevale la 10 PPI, con uno scarto di 2.6 K rispetto alla 5 PPI e di 2 K rispetto alla 40 PPI;

- a 20 W prevale la 10 PPI, con uno scarto di 1 K rispetto alla 5 PPI e di 1.7 K rispetto alla 40 PPI;
- a 30 W sono equiparabili la 5 PPI e la 40 PPI, con uno scarto di 1.2 K rispetto alla 10 PPI.

Ciò può essere spiegato considerando il fatto che tutte e tre le schiume presentano il medesimo valore di porosità (0.935) e pertanto la conducibilità termica effettiva del blocco schiuma-paraffina è la stessa.

4.8. Visualizzazione del processo di liquefazione del PCM

La presenza della finestra nella parte frontale del blocco di Teflon ha permesso la realizzazione di alcuni filmati atti alla visione effettiva di ciò che accade entro il modulo, in particolar modo del fenomeno di fusione. Ne sono stati girati due con la paraffina 5203 ad una stessa potenza pari a 20 W rispettivamente con sola paraffina e con schiuma a 5 PPI impregnata di paraffina.



Figura 4-39. Progressione temporale della prova con paraffina 5203 e potenza di 20 W: le immagini sono state scattate rispettivamente a 0, 20, 30 40, 50 minuti dall'inizio della prova.

In Figura 4-40 sono riportate le immagini tratte dal video per la prova effettuata con paraffina 5203 e potenza di 20 W. Si nota come il tempo necessario a sciogliere tutta la paraffina fino all'ultima termocoppia in alto sia pari a 50 minuti, quindi un tempo piuttosto elevato.

La superficie lungo la quale avviene la fusione che procede verso l'alto non è costituita da un piano, ma è piuttosto una superficie curva con la concavità rivolta verso il basso: questo perché le pareti di bachelite sono più fredde rispetto alla paraffina.



In Figura 4-41 sono riportate le immagini tratte dal video per la prova effettuata con paraffina 5203 e schiuma a 5 PPI con potenza di 20 W. Si nota come il tempo richiesto per la fusione completa del PCM sia inferiore rispetto al caso senza schiuma, in quanto si passa da 50 a 40 minuti, con una riduzione quindi del 20%. Inoltre, come già illustrato precedentemente, a ciò si accompagna una diminuzione marcata della temperatura della base di rame.

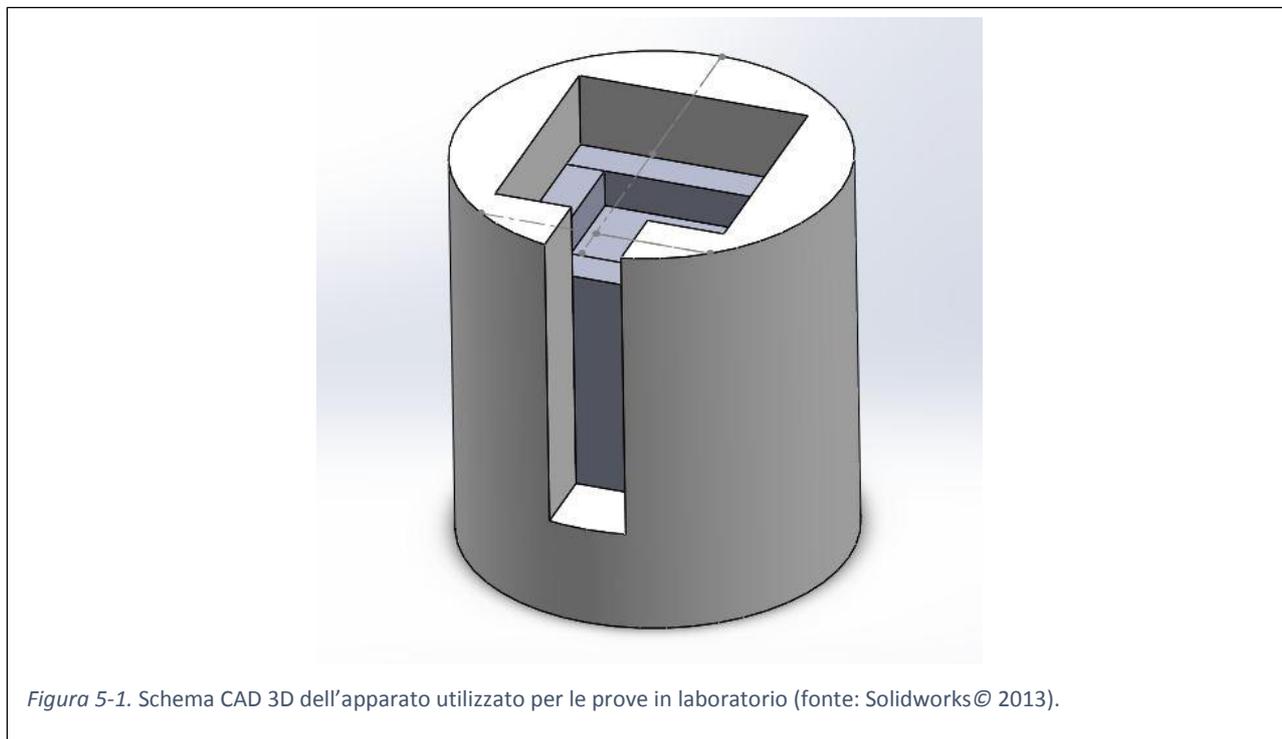
In questo caso non si può parlare di fronte di fusione in quanto la schiuma fa sì che la paraffina inizi a fondere in modo distribuito in tutto il suo volume, grazie al calore trasportato dalle fibre metalliche.

5. MODELLAZIONE DEL SISTEMA

5.1. Costruzione del modello

L'analisi delle misure condotta nel Cap. 4 è stata necessaria per motivare i risultati ottenuti ed ottenere una visione d'insieme della trasformazione fisica studiata. Tuttavia, per poter comprendere più in profondità la reale struttura del processo fisico in esame e i fattori che lo influenzano, si è fatto un passo in più decidendo di ricercare un modello numerico per il sistema progettato. Questo dovrà essere tale sia da fornire risultati teorici in buon accordo con quelli sperimentali sia da prevedere il comportamento dell'intero apparato in condizioni diverse da quelle a cui è stato sottoposto durante le prove in laboratorio.

Il primo passo per la costruzione di un modello consiste nella realizzazione di una rappresentazione grafica CAD tridimensionale dell'apparato, riportata in Figura 5-1; per fare ciò si è utilizzato il software Solidworks [23].



Per la modellazione del fenomeno fisico è stato utilizzato il software Ansys© Fluent 2013 [1], che permette di simulare problemi di termofluidodinamica mediante il metodo ai volumi finiti. Il metodo numerico dei volumi finiti è un metodo utile nell'integrazione di equazioni differenziali alle derivate

parziali: tali equazioni vanno integrate in un volume sui cui confini sono imposte le condizioni al contorno. L'interno di tale dominio viene suddiviso in tanti volumi elementari, quindi tramite la forma integrale delle equazioni del problema considerato vengono scritte le relazioni che intercorrono tra i vari volumi elementari adiacenti così da poter essere risolte per via numerica con l'ausilio del calcolatore. L'approssimazione risiede nel fatto che tali volumi hanno dimensione finita e non infinitesima.

Il software ricerca, per ogni grandezza esaminata durante la simulazione, la convergenza: questa si ottiene nel momento in cui lo scarto tra il valore della grandezza x all'iterazione n ed il valore della stessa grandezza all'iterazione $(n-1)$ è inferiore ad un certo errore che può essere definito dall'utente.

L'ambiente di lavoro Fluent [1] è programmato in modo tale da risolvere ad ogni iterazione le equazioni di continuità, di conservazione del momento e dell'energia, come riportato nelle Eq. 5.1, 5.2 e 5.3.

$$\frac{\delta\rho}{\delta\tau} + \nabla(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\delta(\rho \cdot \vec{v})}{\delta\tau} + \nabla(\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla\rho + \mu * \nabla^2\vec{v} + \rho \cdot \vec{g} \quad (5.2)$$

$$\frac{\delta(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\delta\tau} + \nabla(\rho \cdot c_p \cdot T \cdot \vec{v}) = \nabla\lambda \cdot \nabla T + H \quad (5.3)$$

Si sono indicate: ρ è la densità in $[\text{kg m}^{-3}]$, τ è il tempo in $[\text{s}]$, \vec{v} è il vettore velocità in $[\text{m s}^{-1}]$, μ è la viscosità dinamica in $[\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}]$, \vec{g} è il vettore accelerazione di gravità in $[\text{m s}^{-2}]$, c_p è il calore specifico in $[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$, T è la temperatura in $[\text{K}]$, H è il flusso di energia scambiato con l'esterno in $[\text{W}]$.

A questo punto si fornisce in input al software Design Modeler della suite Ansys il file CAD precedentemente creato; esso permette di convertire quest'ultimo in un formato leggibile per Fluent [1] e di effettuare delle modifiche al disegno laddove sia necessario.

Successivamente si definisce nel software Mesh della stessa suite la mesh poligonale: questa è una collezione di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto poliedrico nella computer grafica 3D e nella modellazione solida; le facce consistono solitamente di triangoli, quadrilateri od altri semplici poligoni convessi, dal momento che ciò semplifica il rendering, ma possono essere composti anche da poligoni concavi più generici, o poligoni con buchi. La sua caratterizzazione consente di decidere il numero degli elementi in cui suddividere il volume dell'apparato e la forma di questi. Al crescere del numero di elementi aumenta la precisione con la quale si modella il sistema e dunque, in linea teorica, si ottengono risultati migliori; tuttavia, ciò comporta una maggiore potenza di calcolo necessaria, oltre che un periodo di tempo maggiore per completare la simulazione. Spetta ovviamente all'utente trovare una configurazione ottima, a seconda delle particolari esigenze. Bisogna precisare che spesso una delle ragioni per cui la simulazione non procede a convergenza è proprio la mesh: se essa è inadeguata alla discretizzazione del problema, il software non riesce a modellare correttamente il sistema e quindi restituisce risultati molto dissimili da quelli sperimentali.

La definizione della mesh è complessa in quanto sono molte le voci che la compongono: una grande difficoltà nella simulazione di un fenomeno sta nel trovare i valori corretti per queste voci, che permettano al problema di raggiungere la convergenza e di ritrovare un buon accordo con i risultati sperimentali. Per quanto concerne questo lavoro di tesi, si è agito solamente sulla dimensione degli elementi della mesh.

Prima di passare alla simulazione fisica, è stato necessario identificare le superfici rilevanti dell'apparato, ossia quelle aree alle quali successivamente associare delle condizioni particolari; nel caso in esame esse sono:

- la base del blocco di Teflon;
- le superfici superiori dell'apparato, quali Teflon, paraffina, vetro, bachelite;
- la superficie laterale del blocco di Teflon;
- la base inferiore del riscaldatore.

Alle prime tre verranno associate le condizioni al contorno, mentre all'ultima verrà imposto il flusso termico specifico della prova.

All'interno dell'ambiente di lavoro di Fluent [1] si devono imporre i valori di numerosi parametri per poter effettuare una simulazione: alcuni di questi hanno carattere puramente tecnico e sono legati

al tipo di problema che si vuole risolvere; non verranno presentati perché non rilevanti ai fini di questo lavoro; per una trattazione esaustiva si rimanda alla Guida dell'Utente [24] resa disponibile da Ansys®. I parametri che non ricadono nella categoria precedente sono invece fondamentali per la corretta simulazione del problema fisico e si suddividono in due categorie: parametri noti e parametri da ricercare. Mentre i valori dei primi si possono imporre fin da subito, perché tipici del problema in esame, quelli dei secondi vanno ricercati in modo iterativo, procedendo fino a che non si arriva ad un risultato soddisfacente.

Di seguito si elencano i parametri noti.

Regime. Il problema che si vuole studiare non è stazionario nel tempo, ergo bisogna effettuare la simulazione in regime transitorio. Per poter andare a convergenza, tuttavia, il software richiede che la prima iterazione venga svolta in regime stazionario, avendo precedentemente imposto nullo il flusso di calore erogato dal riscaldatore. In questo modo, si fornisce alla simulazione un punto ben definito di partenza.

Gravità. Il fenomeno di fusione prevede il passaggio di stato da solido a liquido; in quest'ultima fase si possono formare moti convettivi, il cui comportamento varia a seconda della presenza o meno della gravità. Per questa ragione essa viene presa in considerazione.

Fase. Per ogni parte che compone l'apparato ne va specificata la fase della materia; in questo caso, tutte le parti sono solide ad eccezione del blocco di paraffina, che viene definito come liquido fornendo al software la temperatura di fusione. Alla temperatura iniziale, inferiore a quella di fusione, esso quindi viene automaticamente considerato un solido, per poi passare allo stato liquido durante la prova.

Condizioni iniziali. Si impongono la temperatura e la pressione (considerata pari a 101325 Pa) all'inizio della prova.

I parametri da ricercare costituiscono il fulcro della modellazione del sistema, in quanto essa consiste proprio nell'indagare su quali siano i valori corretti da assegnare loro affinché i risultati previsti dal calcolatore siano in buono accordo con quelli sperimentali. La procedura consiste nel imporre dei valori iniziali plausibili per tutti questi parametri, basandosi sull'osservazione dell'apparato; si procede ad avviare la simulazione e, al termine, si studiano i risultati ottenuti confrontandoli con quelli sperimentali. Si propongono quindi delle modifiche ai valori precedenti e,

ripetendo la simulazione, si valuta se il cambiamento ha portato ad una migliore accuratezza o meno dei risultati. Si prosegue quindi iterativamente fino a raggiungere l'obiettivo cercato.

Di seguito si esaminano i parametri da ricercare.

Mesh. Una corretta impostazione della mesh consente di modellare efficacemente il sistema fisico studiato, tuttavia non risulta affatto semplice raggiungere questo obiettivo. Chiaramente la prima idea che si ha è quella di imporre una mesh estremamente fitta, ossia di suddividere il provino su cui si eseguono le misure sperimentali in un numero molto elevato di elementi poligonali, così da avere una valutazione il più puntuale possibile di tutte le grandezze fisiche interessanti. Quando si parla di numeri elevati si precisa che ci si riferisce a numeri dell'ordine di 10^6 . Certamente questa è una strada percorribile, tuttavia bisogna scontrarsi con le conseguenze di ciò. Innanzitutto, questa imposizione richiede una potenza di calcolo molto elevata, sia a livello di numero e frequenza di core sia in termini di memoria RAM disponibile: questi fattori influenzano rispettivamente la velocità alla quale procede la simulazione ed il numero massimo di elementi della mesh. E' necessario perciò avere in dotazione un calcolatore adatto a questo scopo. In secondo luogo, all'aumentare del numero di elementi della mesh, cresce il tempo richiesto per svolgere ogni singola iterazione e quindi cresce il tempo necessario a valutare la bontà di ogni singolo set di parametri imposti al simulatore. Anche in questo caso, dunque, è necessario avere a disposizione un adatto periodo di tempo per raggiungere buoni risultati.

Considerando questi due fattori, si è optato inizialmente per un modello che utilizzasse una mesh a maglia mediamente fitta, ossia con un numero di elementi non troppo elevato ed automaticamente imposto dal software, e senza fare uso di body sizing. Quest'ultimo strumento permette di imporre una mesh più fitta rispetto al resto dell'apparato solo in una ben specifica porzione del provino, ad esempio laddove sia necessaria una maggiore accuratezza nella descrizione delle condizioni fisiche del sistema. Bisogna precisare che comunque il body sizing influisce anche sulla mesh degli elementi adiacenti a quello sul quale esso è stato imposto: per ragioni geometriche, difatti, non è possibile passare da un elemento poligonale di una certa dimensione ad uno di dimensione maggiore attraverso una singola superficie. Il passaggio deve essere graduale e quindi, negli elementi adiacenti a quello nel quale il body sizing è stato imposto, ci sarà un certo spessore nel quale la mesh si adatterà utilizzando poligoni che permettano di passare da una dimensione minore ad una maggiore. Così facendo si ottiene un risparmio in termini di potenza di calcolo e di tempo, in quanto si evita di dover lavorare con una mesh più fitta in tutto l'apparato.

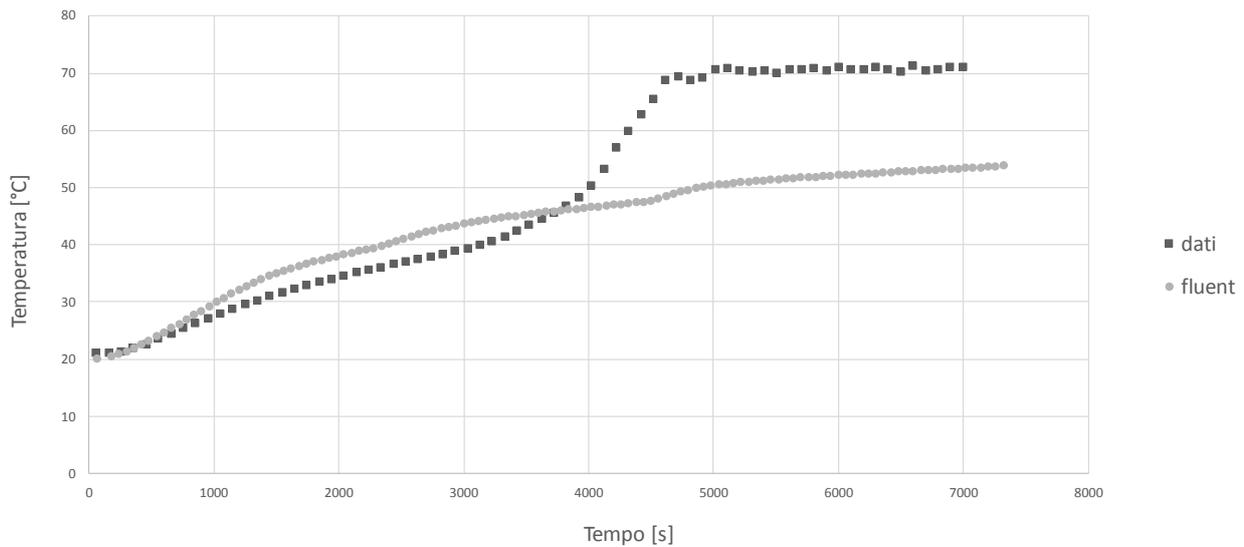


Figura 5-2. Andamento della temperatura in funzione del tempo per la termocoppia C durante la prova a 10 W con la paraffina 5803; in evidenza il confronto tra quello sperimentale (serie “dati”) e quello previsto dal modello (serie “fluent”) con mesh medium e senza body sizing.

In Figura 5-2 è riportato come esempio il confronto tra l’andamento di temperatura nel tempo registrato dalla termocoppia C durante la prova a 10 W con la paraffina 5803 e quello previsto dal modello costruito con una mesh medium e senza body sizing. E’ evidente la difformità tra le curve, in quanto Fluent [1] nemmeno prevede che si raggiunga una temperatura di regime nella paraffina. Per questa ragione, si è deciso di utilizzare una mesh più fitta, cioè con una dimensione degli elementi minore rispetto al caso precedente, per migliorare l’accuratezza del risultato. Inoltre si è compreso come sia fondamentale la valutazione corretta delle grandezze all’interno del blocco di paraffina, che va ad influenzare direttamente la temperatura della base di rame. In questa zona, difatti, si instaurano moti convettivi ed avviene il cambiamento di fase: si è reso perciò necessario infittire qui ancor di più la mesh e per fare ciò si è utilizzato il body sizing. Si sono imposti elementi di lato 1e-03 m, dimensione inferiore a quella degli altri elementi nel resto del provino. Questa impostazione è presente nel modello finale.

Time step. Il software di simulazione opera calcolando ad ogni iterazione il valore delle grandezze di interesse in ogni elemento di volume in cui si è suddiviso il provino. E’ l’utente a decidere il time step TS , ossia l’intervallo temporale che intercorre tra un’iterazione e l’altra, in base alle seguenti considerazioni. A parità di tempo da simulare, se il time step diminuisce aumenta il numero di iterazioni e quindi cresce il tempo necessario a completare la simulazione. E’ anche pur vero che in questo modo si va ad aumentare la precisione dei risultati del modello, in quanto le grandezze di interesse vengono calcolate ad intervalli di tempo più brevi, quindi si tende verso un andamento

continuo di queste piuttosto che discreto. In secondo luogo, vi è un valore massimo per il time step oltre il quale il modello restituisce risultati fisicamente impossibili. Ciò è legato al fatto che, aumentando troppo il time step, il software non riesce più a simulare correttamente il fenomeno fisico. Questo valore è legato al particolare caso studiato e può essere ricercato solo per tentativi.

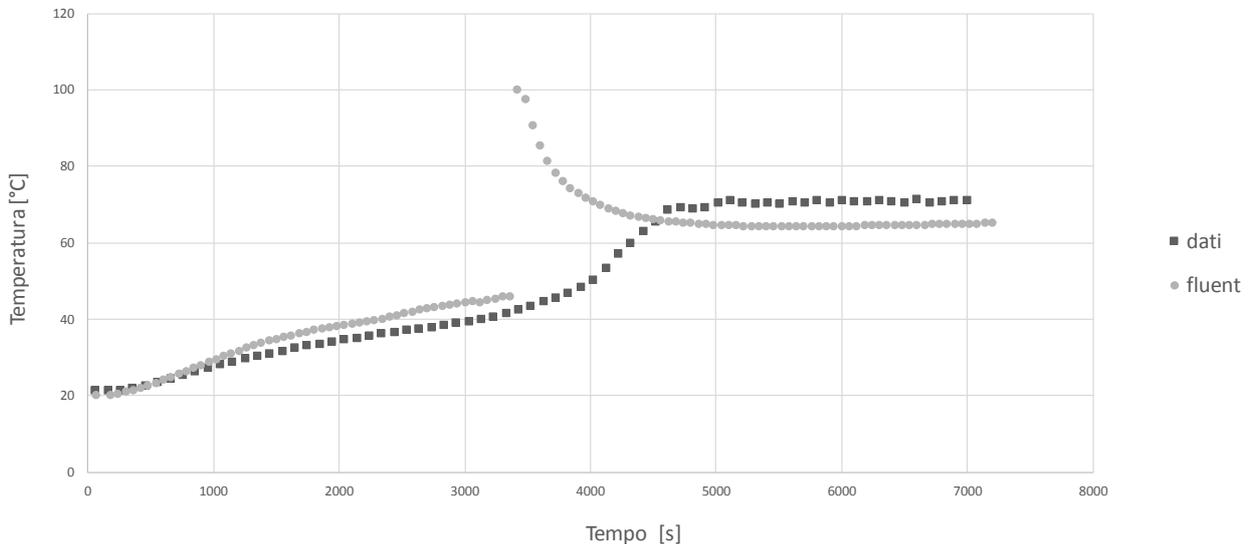


Figura 5-3. Andamento della temperatura in funzione del tempo per la termocoppia C durante la prova a 10 W con la paraffina 5803; in evidenza il confronto tra quello sperimentale (serie “dati”) e quello previsto dal modello (serie “fluent”) con time step pari a 60 secondi.

In Figura 5-3 è riportato come esempio il confronto tra l’andamento di temperatura nel tempo registrato dalla termocoppia C durante la prova a 10 W con la paraffina 5803 e quello previsto dal modello costruito con un time step di 60 secondi. E’ evidente come questo valore sia troppo elevato, in quanto dà luogo ad una discontinuità marcata lungo la curva. E’ interessante notare come questa si trovi circa in corrispondenza della temperatura di fusione della paraffina: richiamando quanto pocanzi detto, il software molto probabilmente si trova a calcolare le grandezze poco prima della fusione e poco dopo, non riuscendo quindi a simulare ciò che avviene nel mezzo. Si nota infatti come, prima e dopo la discontinuità, l’andamento previsto sia alquanto simile a quello sperimentale. Partendo da queste basi, dopo il tentativo infelice di utilizzare un time step pari a 60 secondi, si è utilizzato un valore di 15 secondi; questo però non ha portato i benefici voluti in quanto non ha eliminato la discontinuità, ma ne ha solamente ridotto l’entità. Scendendo a 10 secondi essa è invece stata eliminata completamente.

Questa impostazione è presente nel modello finale.

Condizioni al contorno. Per poter simulare correttamente il fenomeno fisico il software necessita di conoscere quali siano le condizioni presenti in corrispondenza delle superfici a contatto con l'ambiente esterno. Per l'apparato studiato esse sono:

- la base del blocco di Teflon;
- le superfici superiori dell'apparato, quali Teflon, paraffina, vetro, bachelite;
- la superficie laterale del blocco di Teflon.

Queste condizioni dipendono da molti fattori, quali ad esempio la presenza di uno strato isolante oppure di correnti d'aria nell'ambiente. Nel caso in esame, il blocco di Teflon è avvolto in uno strato di spessore 10 mm di Armflex ed è immerso in un ambiente privo di correnti d'aria sensibili. Per tali ragioni si è supposto inizialmente che il sistema fosse perfettamente adiabatico verso l'esterno e di conseguenza si è imposto a Fluent [1] di considerare nulla il flusso di calore che dalle superfici sopra citate procede verso l'ambiente esterno. Le simulazioni hanno confermato questa ipotesi.

Alla superficie del riscaldatore è stato invece imposto di volta in volta il flusso termico specifico proprio della prova da simulare; esso è stato ottenuto come rapporto tra la potenza elettrica fornita dall'alimentatore e l'area della base di rame.

Questa impostazione è presente nel modello finale.

Proprietà dei materiali. Un passo fondamentale per la buona riuscita del modello è la corretta definizione delle caratteristiche dei materiali di cui l'apparato è composto. Per quanto riguarda il rame, il vetro e la bachelite, le loro proprietà sono univoche e quindi ci si è limitati ad utilizzare i dati trovati in letteratura, come mostrato in Tab 3.7. Il Teflon è risultato invece essere più complesso da caratterizzare, in quanto è presente in molte varianti che differiscono tra di loro per il valore assunto dalla conducibilità termica, compresa nell'intervallo $0.1 \div 0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Non essendo possibile con i mezzi a disposizione calcolare questo valore, lo si è ricercato iterativamente. Come già accennato nel Cap. 3, durante la costruzione dell'apparato si sono installate sei termocoppie a 5 mm di profondità sulla superficie del Teflon; ad ogni prova, dunque, oltre ai dati registrati dalle termocoppie nella paraffina e nella base di rame, si sono raccolti anche i dati di queste. Una fase della modellazione è perciò consistita nell'imporre un certo valore di conducibilità termica per il Teflon e nel confrontare, per ognuna di queste sei termocoppie, gli andamenti di temperatura in funzione del tempo sperimentale e simulato. Un buon accordo tra questi si è ritrovato con un valore di $0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Questa impostazione è presente nel modello finale.

Iterazioni per time step. In regime transitorio Fluent [1] permette di imporre il numero di iterazioni disponibili per ogni time step. Questo appare essere un metodo alternativo al fissare uno scarto al di sotto del quale fermare il calcolo, come viene fatto in regime stazionario. Inizialmente si dava un valore 10 a questo parametro, ma si è osservato come, per la temperatura entro la paraffina, il software prevedeva un andamento oscillante. Per questa ragione si è progressivamente aumentato questo valore fino a 50: l'oscillazione è ancora presente, sebbene in modo leggero. Questa impostazione è presente nel modello finale.

Resistenza di contatto. Il riscaldatore e la base di rame sono a contatto mediante una pasta termica, volta a favorire lo scambio di calore tra i due. Tuttavia, la presenza stessa della pasta e la discontinuità spaziale tra i due corpi è sufficiente per l'esistenza di una resistenza di contatto. Questa non è nota e quindi si è proceduto anche in questo caso per iterazioni. Inizialmente si è pensato di trascurarla, tuttavia si è notato fin dalle prime simulazioni che il modello sovrastimava in modo molto marcato la temperatura della base e al tempo stesso sottostimava in modo altrettanto importante la temperatura raggiunta dalla termocoppia 1 nel Teflon. Di conseguenza si è compreso che qualcosa andava mutato per far sì che la frazione di flusso termico che procede verso la base di rame nel modello diminuisse avvicinandosi a ciò che accade nella realtà. Si sono considerati due plausibili valori di spessore s per lo strato di pasta, pari a 0.5 mm e 1 mm; mentre cinque sono stati i valori considerati per la conducibilità termica λ della pasta, ritrovati in letteratura: 1, 3, 5, 8, 10 W m⁻¹ K⁻¹. Queste due serie di dati sono state combinate fra di loro ottenendo dieci valori di possibile resistenza di contatto R , secondo l'Eq. 5.4.

$$R = \frac{s}{\lambda} \quad (5.4)$$

Nel software Fluent [1] è stata quindi imposta la presenza di una resistenza di contatto in corrispondenza della superficie di separazione tra riscaldatore e base di rame e si sono effettuate simulazioni per tutti i valori sopra citati di resistenza. L'accordo migliore tra i risultati sperimentali e quelli del modello si è ottenuto per $R=0.000125 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, ossia con $s=1 \text{ mm}$ e $\lambda=8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Questa impostazione è presente nel modello finale.

5.2. Modello definitivo

Utilizzando le impostazioni del Par. 5.1 si è giunti ad un modello che si considera definitivo, ossia che prevede i risultati sperimentali per la base di rame con uno scarto massimo di ± 5 K. Si prende in esame solamente la base in quanto scopo del lavoro è valutare l'affidabilità di questi sistemi di dissipazione per applicazioni elettroniche: in quest'ottica, la base funge da componente elettronico ed è per essa che si rende fortemente necessario prevedere l'andamento di temperatura nel tempo. Di seguito si riportano gli andamenti delle temperature che il modello numerico prevede registrino le cinque termocoppie all'interno del modulo per le prove con la paraffina 5803 ed ai tre livelli di potenza studiati.

Solamente per il caso con paraffina 5803 e potenza erogata di 10 W vengono discussi anche i grafici relativi al confronto tra l'andamento di temperatura effettivo e previsto per le sei termocoppie inserite nel Teflon; come già espresso in precedenza, esse sono state utili in fase di aggiustamento del modello per trovare la conducibilità termica del Teflon che fornisce i risultati migliori.

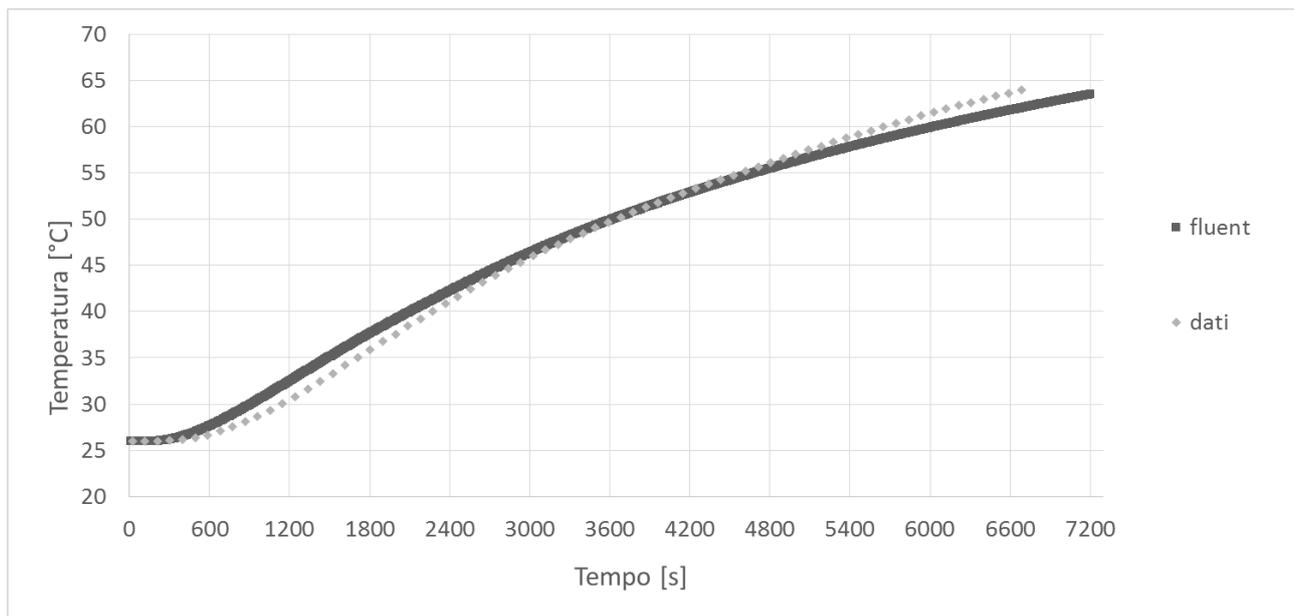


Figura 5-4. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 1 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-4 relativa alla termocoppia 1 mostra come i due andamenti effettivo e previsto siano quasi sovrapposti. Lo scarto ΔT tra quella effettiva di 64°C e quella sperimentale di 62°C è pari a 2 K. Questa termocoppia è stata fondamentale per ricercare il valore finale di conducibilità termica del Teflon, in quanto si trova proprio sotto il riscaldatore e quindi più di tutte le altre è indice di come effettivamente di disperde il calore intorno ad esso.

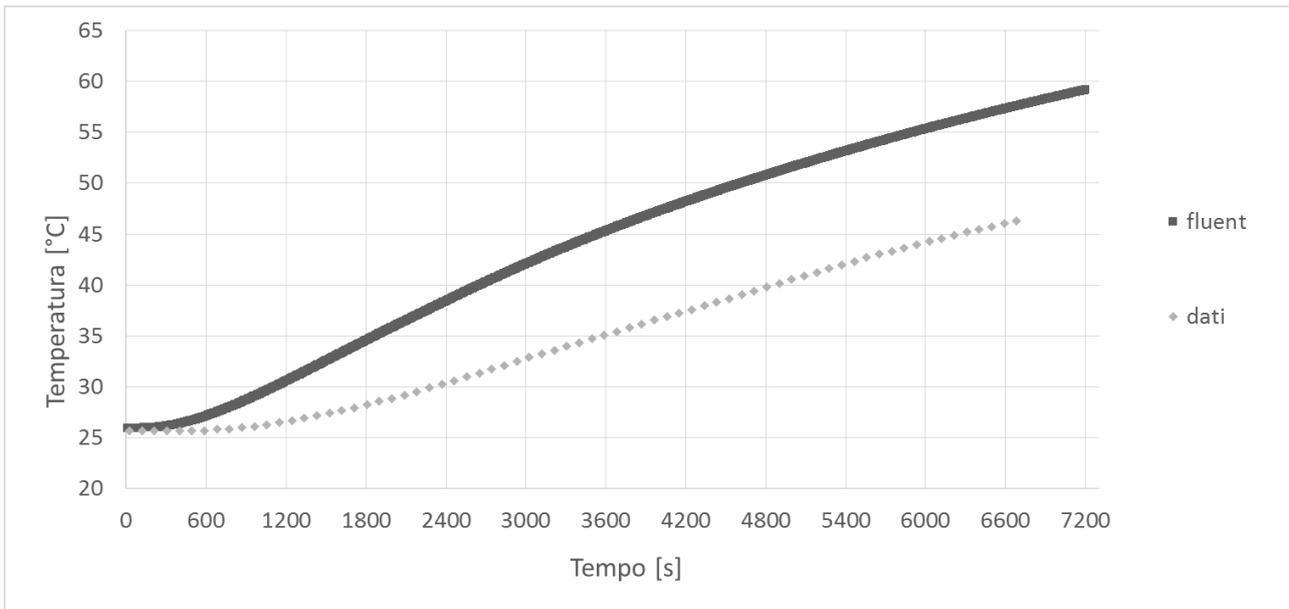


Figura 5-5. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 2 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

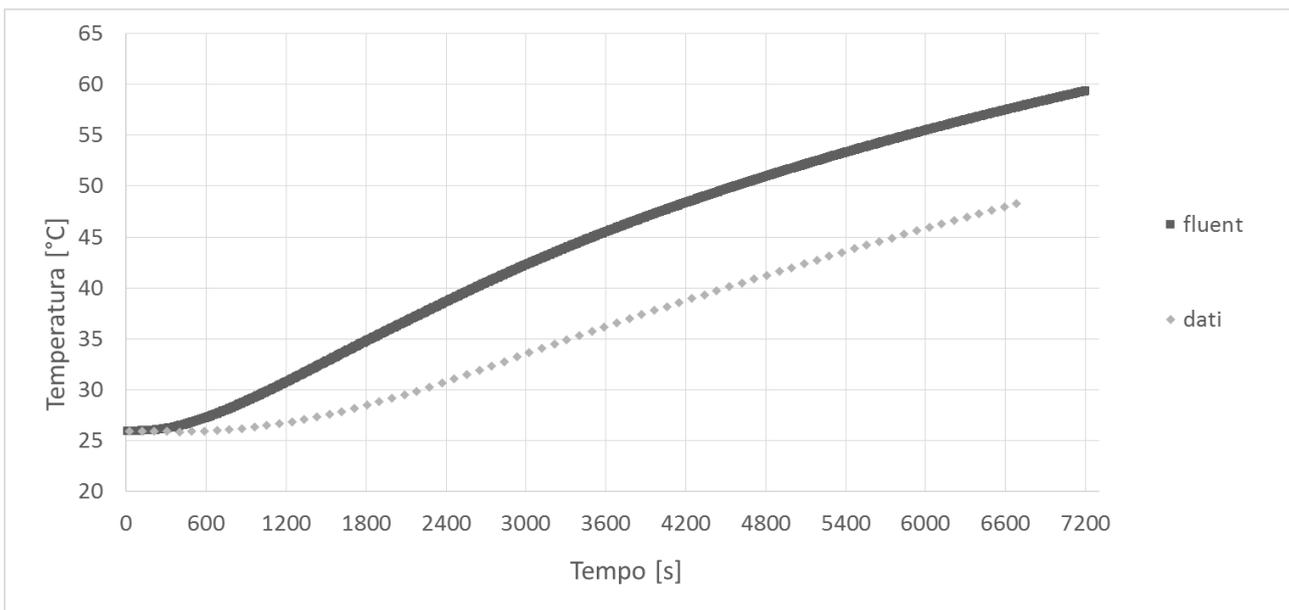


Figura 5-6. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 3 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

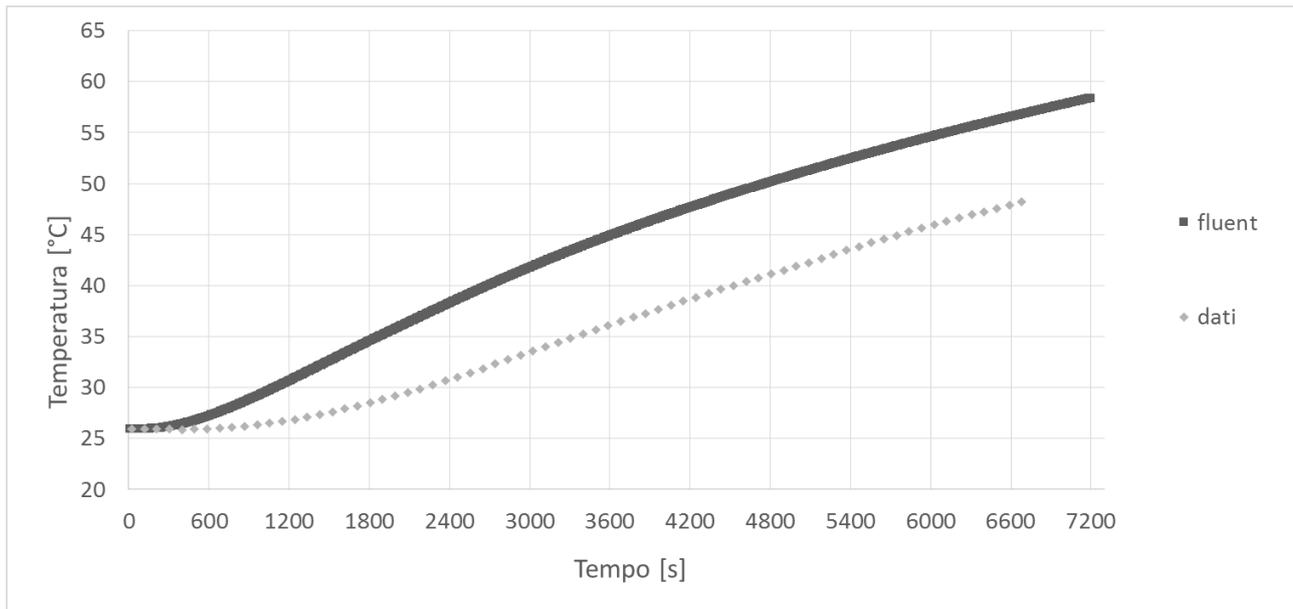


Figura 5-7. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 4 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

Le Figure 5-5, 5-6 e 5-7 relative alle termocoppie 2, 3 e 4 mostrano un andamento previsto di temperatura che non coincide con quello sperimentale. Le due curve si mantengono, dopo un certo periodo dall'inizio della prova, parallele tra di loro con uno scarto ΔT pari a 10 K. Si è rilevato che, con il modello in uso, qualunque spostamento dal valore definitivo di conducibilità termica del Teflon al fine di diminuire questo scarto, porta ad un aumento notevole di quello della termocoppia 1. L'ottimo allora è apparso essere questo, in quanto è quest'ultima termocoppia a costituire un indice privilegiato per la dispersione verso il basso del calore nel Teflon. Si suppone che la ragione per la quale non si riesce ad ottenere una accordanza migliore dei risultati sia legata alla definizione della resistenza di contatto in Fluent [1]: essa è stata imposta utilizzando una funzione standard nel software. Risulterebbe molto più trasparente e interessante inserire invece un parallelepipedo di spessore noto (ad esempio 1 mm) tra il riscaldatore e la base di rame, in modo che possa fare le veci dello strato di pasta termica effettivamente presente. Si potrebbe a questo punto definirne le proprietà quali densità e calore specifico e imporre diverse conducibilità termiche fino a trovare quella che fornisce i risultati previsti in migliore accordo con quelli sperimentali. Nella pratica dunque di ripercorre l'iter già illustrato nel Par. 5.1, ma evitando di utilizzare la funzione predefinita di Fluent [1]. Queste tre termocoppie si trovano circa alla stessa altezza del riscaldatore e quindi questa spiegazione appare logica.

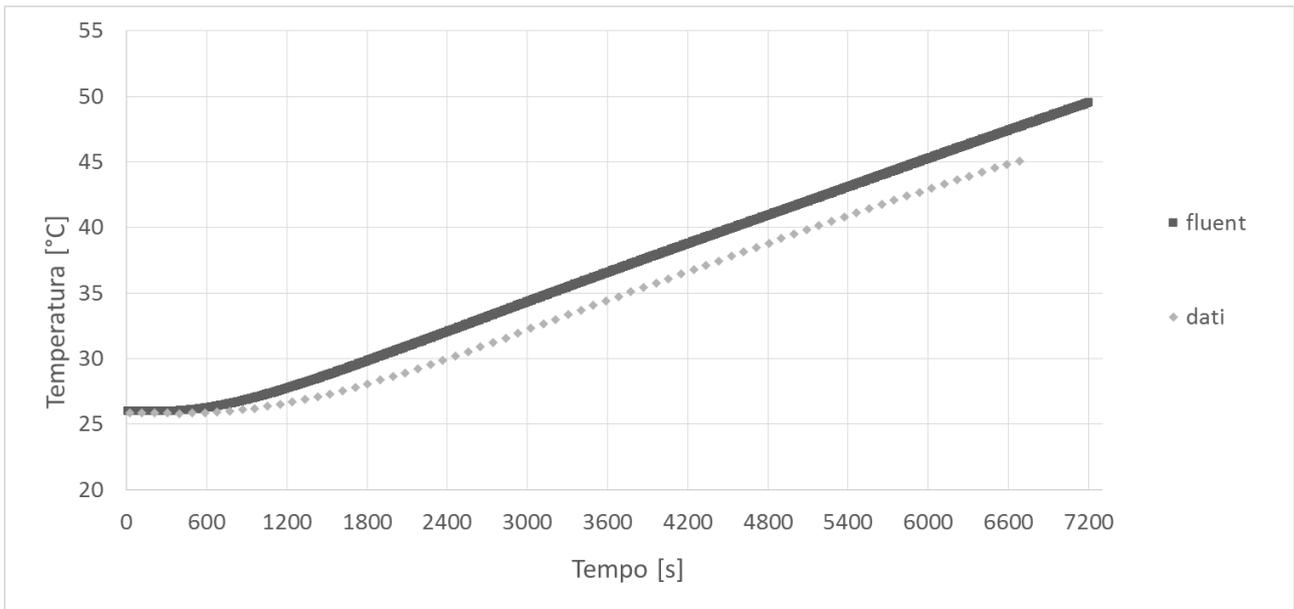


Figura 5-8. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 5 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

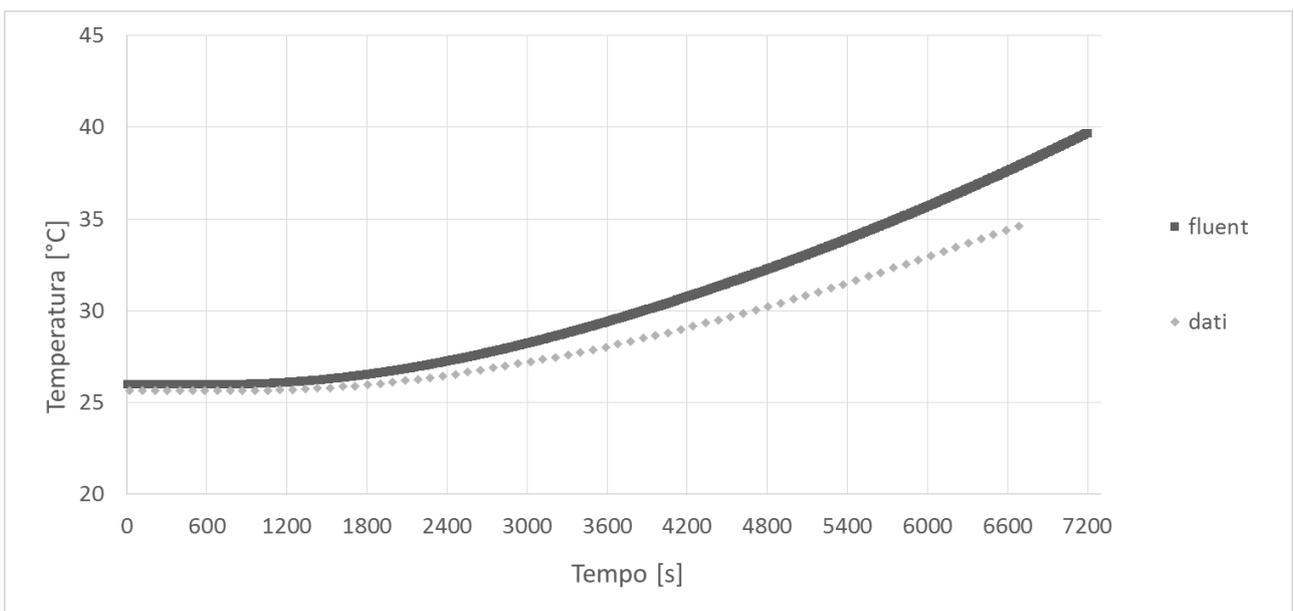


Figura 5-9. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia 6 previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

Le Figure 5-8 e 5-9 relative alle termocoppie 5 e 6 mostrano un andamento previsto molto vicino a quello effettivo, con uno scarto ΔT a fine prova rispettivamente di 2.5 K e 3 K. Sebbene quindi esso sia leggermente maggiore rispetto a quello della termocoppia 1, appare comunque in buon accordo con l'evidenza sperimentale.

5.2.1. Prove a 10 W

Di seguito il caso a 10 W con la paraffina 5803.

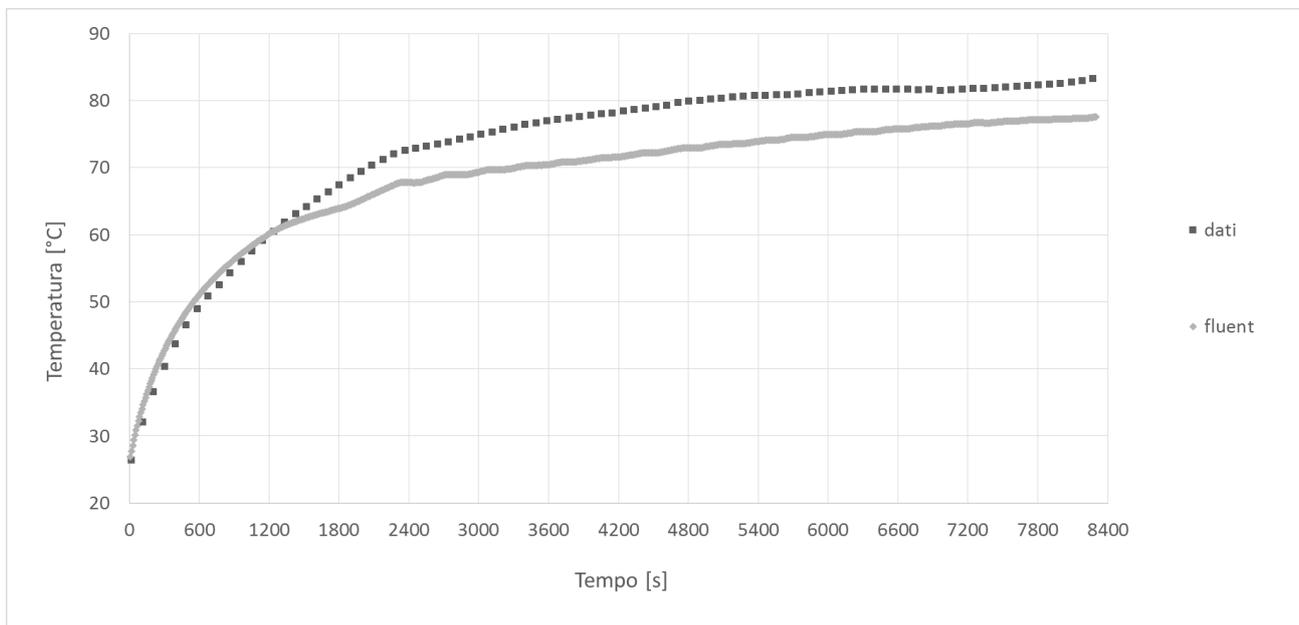


Figura 5-10. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia E previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-10 relativa alla termocoppia E posta nella base di rame mostra come il modello preveda molto bene l'aumento di temperatura fino a 1200 s, in quanto la curva ad esso relativa va quasi a sovrapporsi a quella sperimentale. Dopo questo istante temporale, invece, la temperatura prevista aumenta in modo meno marcato rispetto a quanto accada nella realtà, mantenendosi comunque circa parallelo alla curva dei dati sperimentali fino al termine della prova. A questo istante, pari a 8400 s, la base si trova a 83.3°C ed il modello prevede 78.4°C, con uno scarto tra effettiva e prevista ΔT pari a 4.9 K.

Il fatto che il modello sottostimi la temperatura della base può essere legato principalmente a due fattori: da un lato, le perdite di calore nel Teflon potrebbero essere minori di quanto previsto, dall'altro, la resistenza di contatto potrebbe avere un valore leggermente inferiore a quanto imposto. Entrambe le possibilità andrebbero indagate ulteriormente effettuando altre simulazioni in cui imporre tutte le combinazioni possibili di questi valori fino a trovare quella che fornisce i risultati migliori.

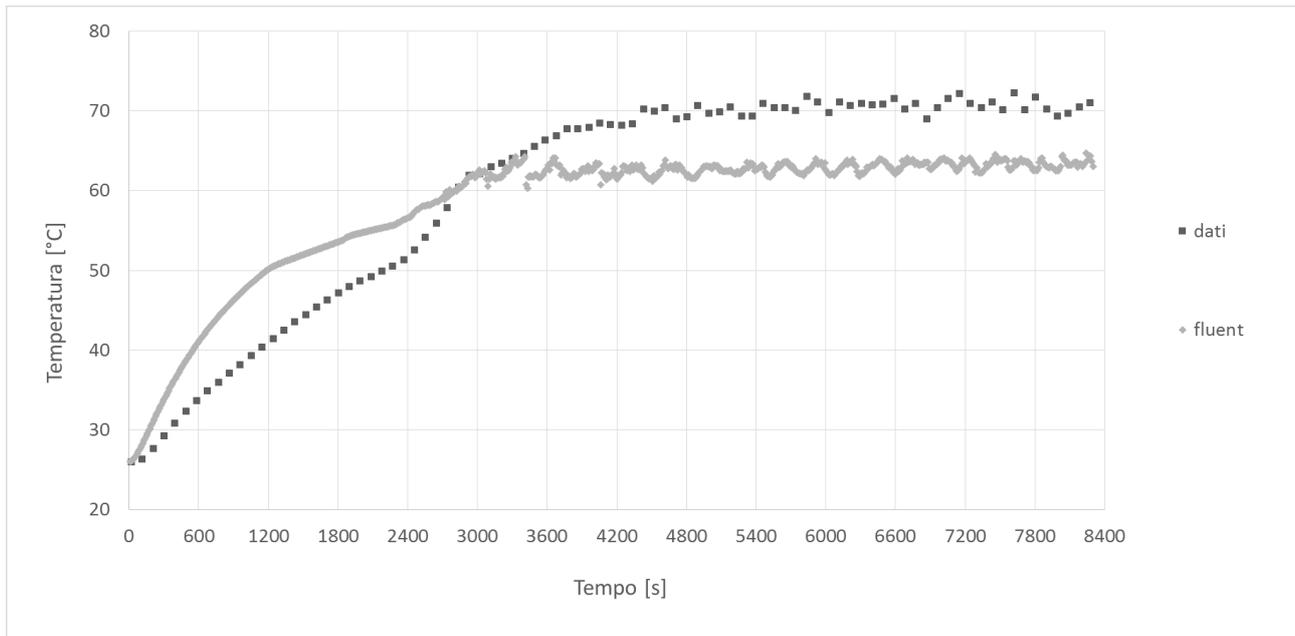


Figura 5-11. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia D previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-11 relativa alla termocoppia D posta a 5 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 3000 s. Nella prima parte, si nota come il modello abbia un andamento alquanto differente da quello sperimentale; ciò è dovuto alla mancanza di una conoscenza precisa delle proprietà della paraffina. Si ricorda infatti che essa è definita solamente tramite due punti, quindi chiaramente il software tra questi due effettua un'interpolazione lineare che però non è detto rispecchi la realtà e l'evidenza lo dimostra. Per ottenere una precisa modellazione anche del comportamento della paraffina è necessario effettuare uno studio profondo della variazione delle sue proprietà con la temperatura; può essere altresì interessante ricercare in letteratura modelli analitici con questo scopo. Nella seconda parte, il modello prevede il raggiungimento di una temperatura di regime, che permane fino al termine della prova; tuttavia lo scarto ΔT tra quella effettiva di 70°C e quella sperimentale di 63°C è pari a 7 K. La sottostima della temperatura di regime può avere le stesse cause trattate nel commento di Figura 5-4. Una soluzione proposta per ridurre l'oscillazione della temperatura prevista è di aumentare il numero di iterazione per time step, che porta ad una maggiore precisione di calcolo del modello.

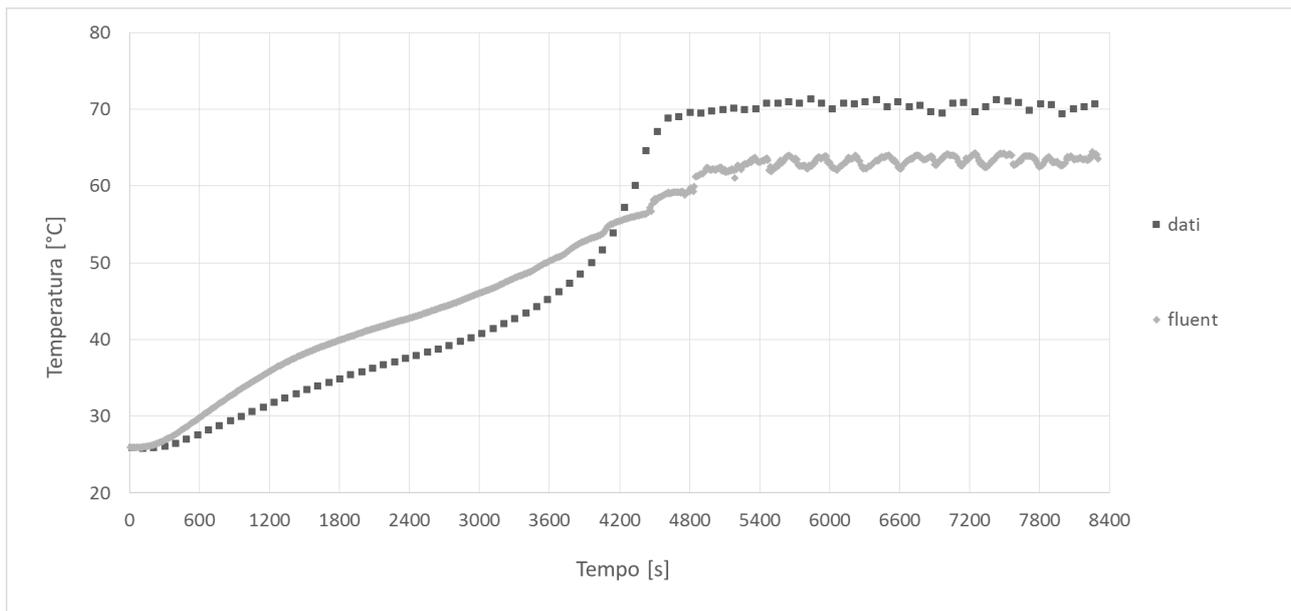


Figura 5-12. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia C previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-12 relativa alla termocoppia C posta a 15 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 4200 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-11.

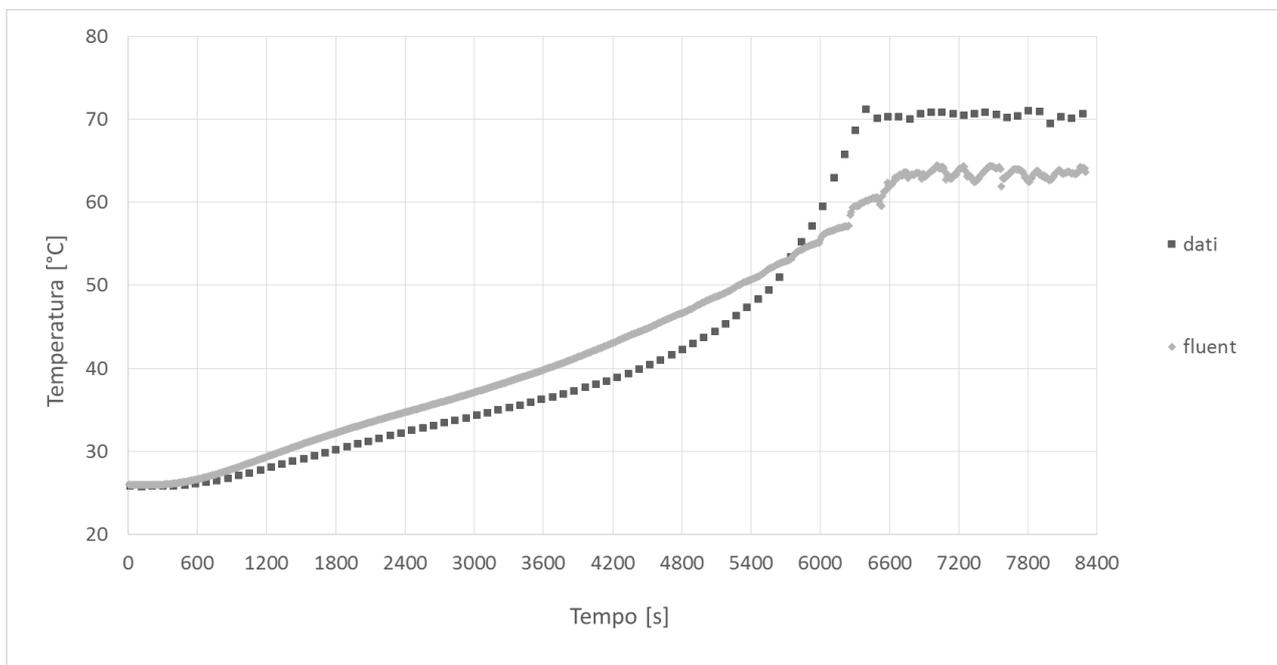


Figura 5-13. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia B previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-13 relativa alla termocoppia B posta a 25 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 5700 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-11.

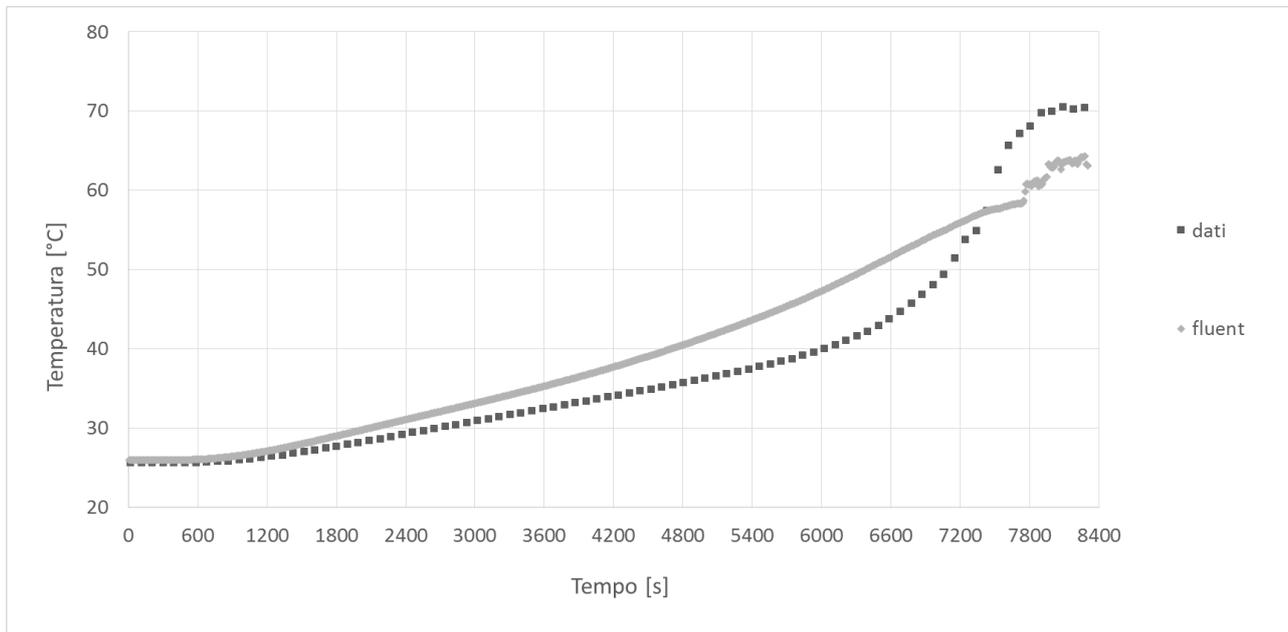


Figura 5-14. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia A previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 10 W.

La Figura 5-14 relativa alla termocoppia D posta a 35 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 7400 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-11.

5.2.2. Prove a 20 W

Di seguito il caso a 20 W con la paraffina 5803.

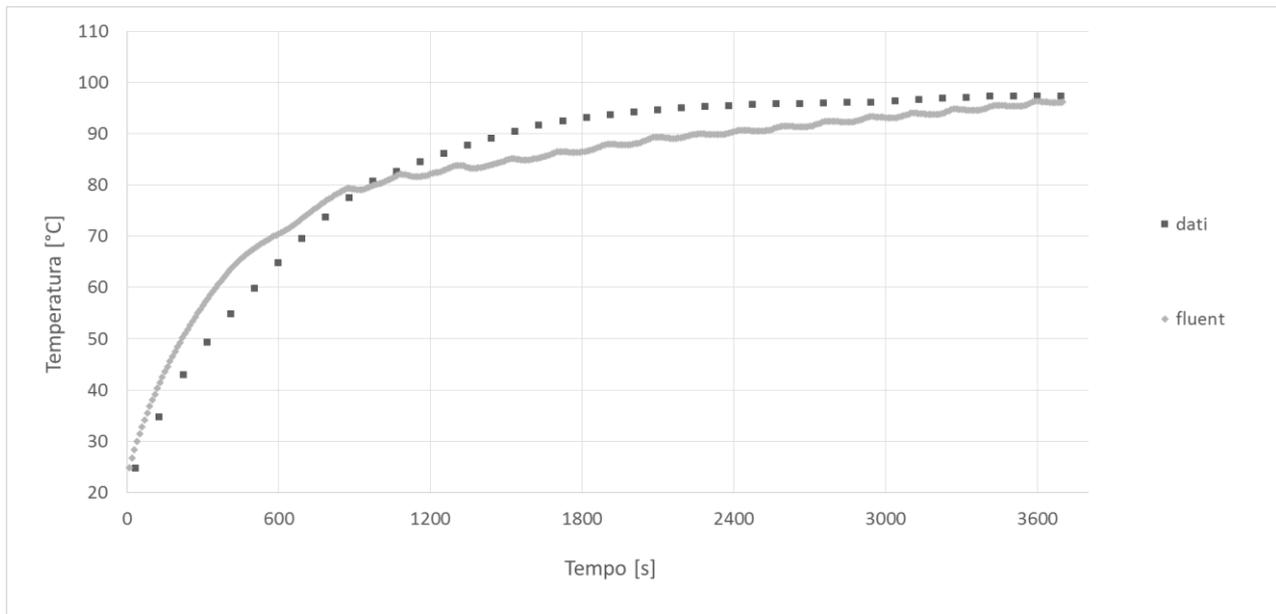


Figura 5-15. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia E previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 20 W.

La Figura 5-15 relativa alla termocoppia E posta nella base di rame mostra come il modello sovrastimi leggermente la temperatura; la temperatura prevista risulta essere più bassa di quella effettiva, tendendo comunque a questa. Al termine della prova, pari a 3700 s, la base si trova a 97.3°C ed il modello prevede 96.1°C, con uno scarto tra effettiva e prevista ΔT pari a 1.2 K.

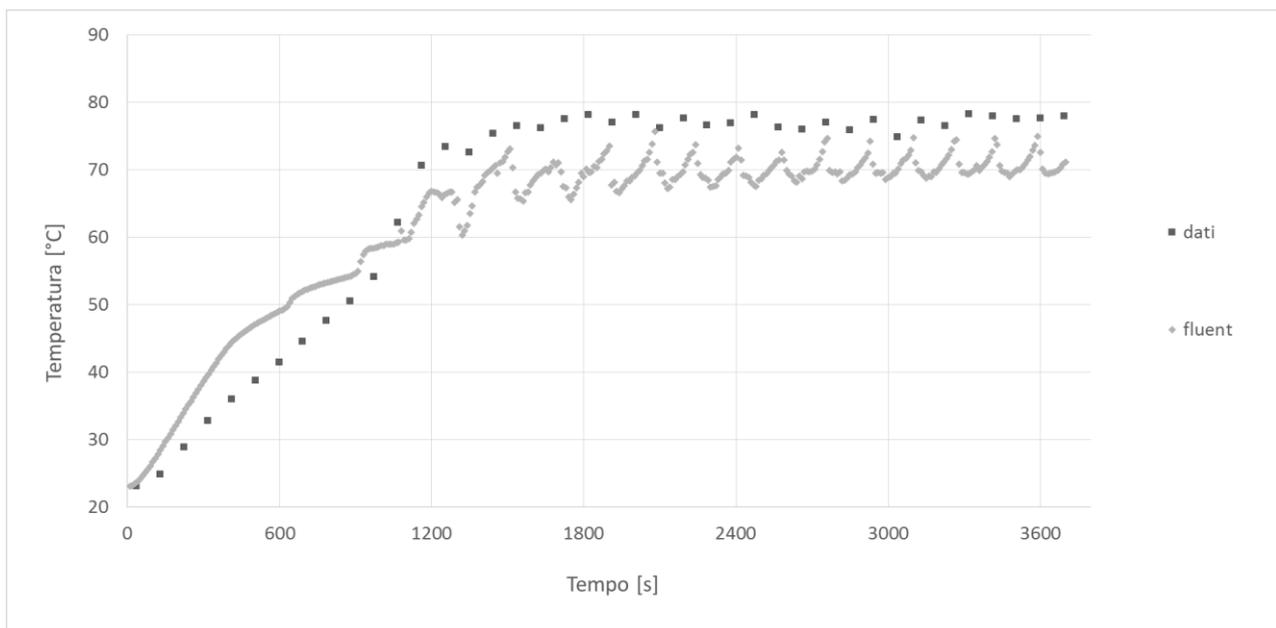


Figura 5-16. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia D previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 20 W.

La Figura 5-16 relativa alla termocoppia D posta a 5 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 1000 s. Nella prima parte, si nota come il modello abbia un andamento alquanto differente da quello sperimentale; ciò è dovuto alla mancanza di una conoscenza precisa delle proprietà della paraffina. Si ricorda infatti che essa è definita solamente tramite due punti, quindi chiaramente il software tra questi due effettua un'interpolazione lineare che però non è detto rispecchi la realtà e l'evidenza lo dimostra. Per ottenere una precisa modellazione anche del comportamento della paraffina (che comunque non è l'obiettivo di questa tesi) è assolutamente necessario effettuare uno studio profondo della variazione delle sue proprietà con la temperatura; può essere altresì interessante ricercare in letteratura modelli analitici con questo scopo. Nella seconda parte, il modello prevede il raggiungimento di una temperatura di regime, che permane fino al termine della prova; tuttavia lo scarto ΔT tra quella effettiva di 78°C e quella sperimentale di 71°C è pari a 7 K. La sottostima della temperatura di regime può avere le stesse cause trattate nel commento di Figura 5-11. Una soluzione proposta per ridurre l'oscillazione della temperatura prevista è di aumentare il numero di iterazione per time step, che porta ad una maggiore precisione di calcolo del modello.

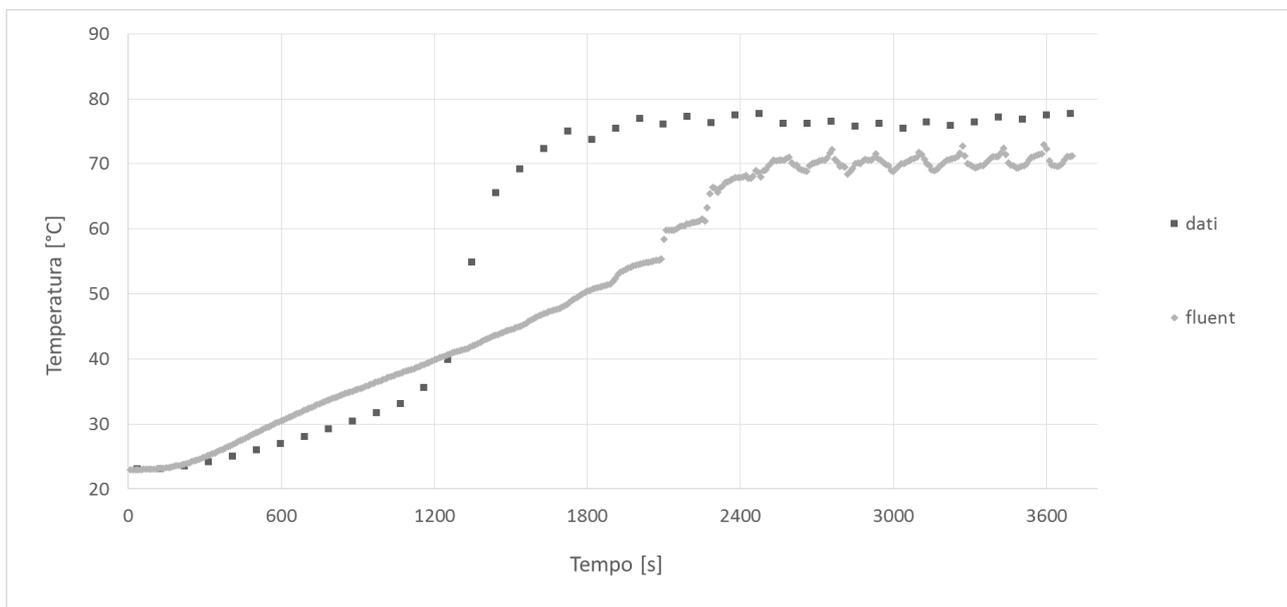


Figura 5-17. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia C previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 20 W.

La Figura 5-17 relativa alla termocoppia C posta a 15 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 1300 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-16.

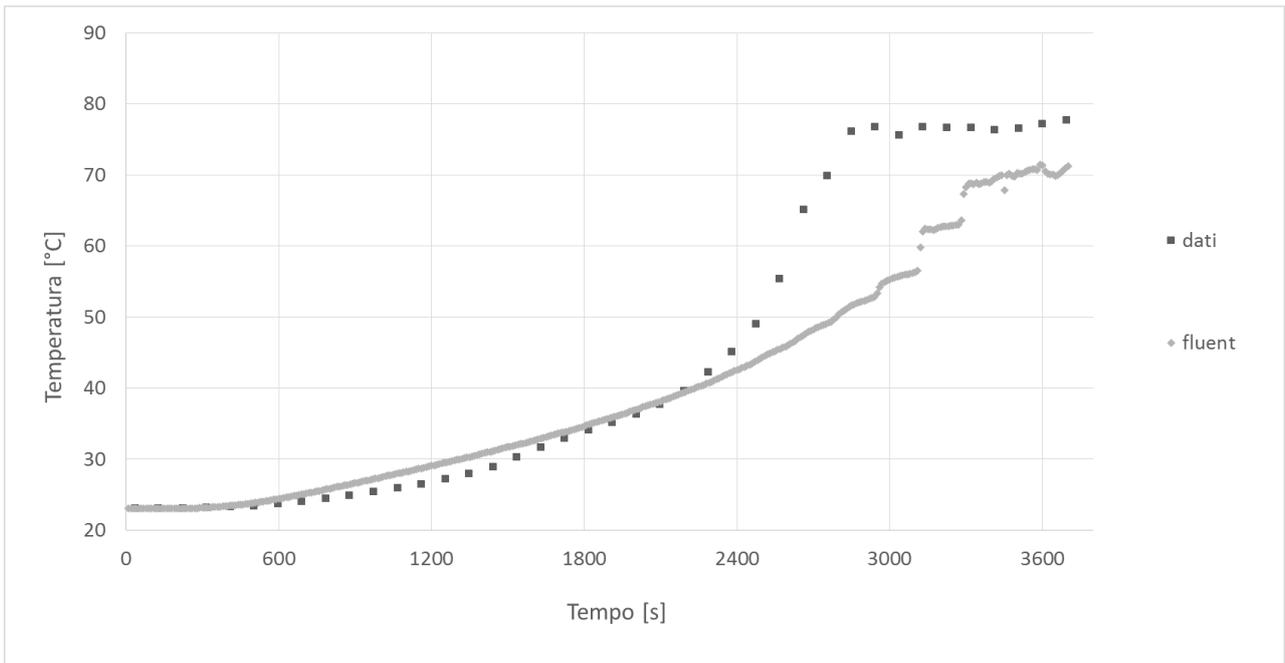


Figura 5-18. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia B previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 20 W.

La Figura 5-18 relativa alla termocoppia B posta a 25 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 2300 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-16.

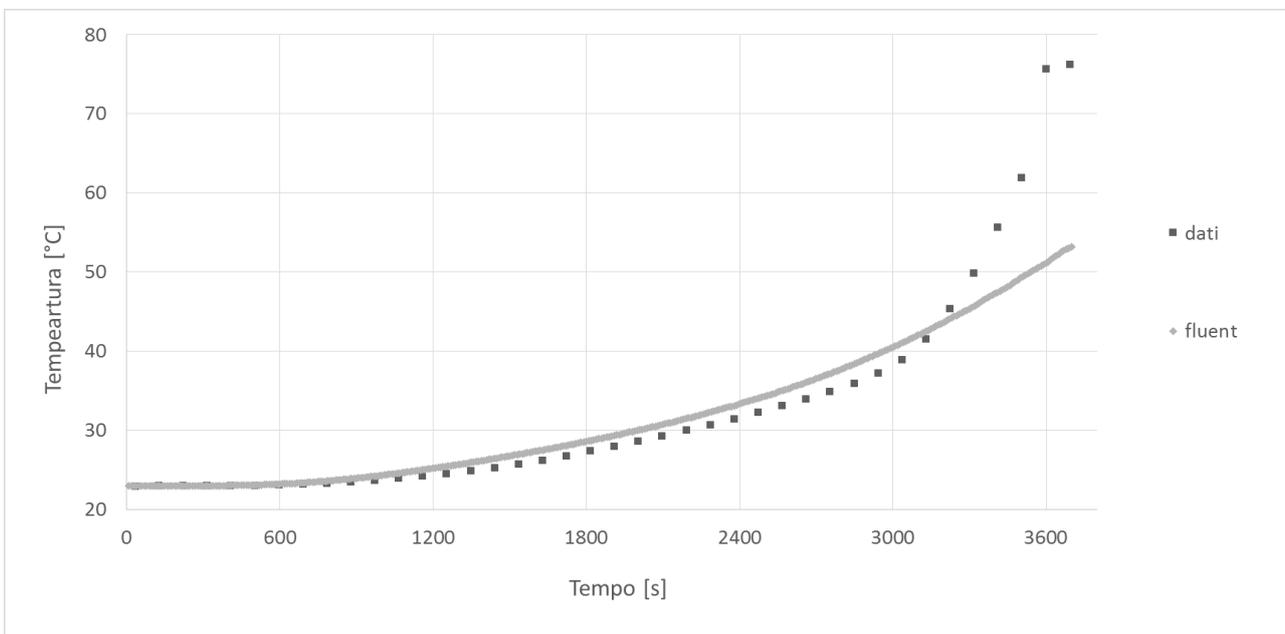


Figura 5-19. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia A previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 20 W.

La Figura 5-19 relativa alla termocoppia A posta a 35 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 3200 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-16.

5.2.3. Prove a 30 W

Di seguito il caso a 30 W con la paraffina 5803.

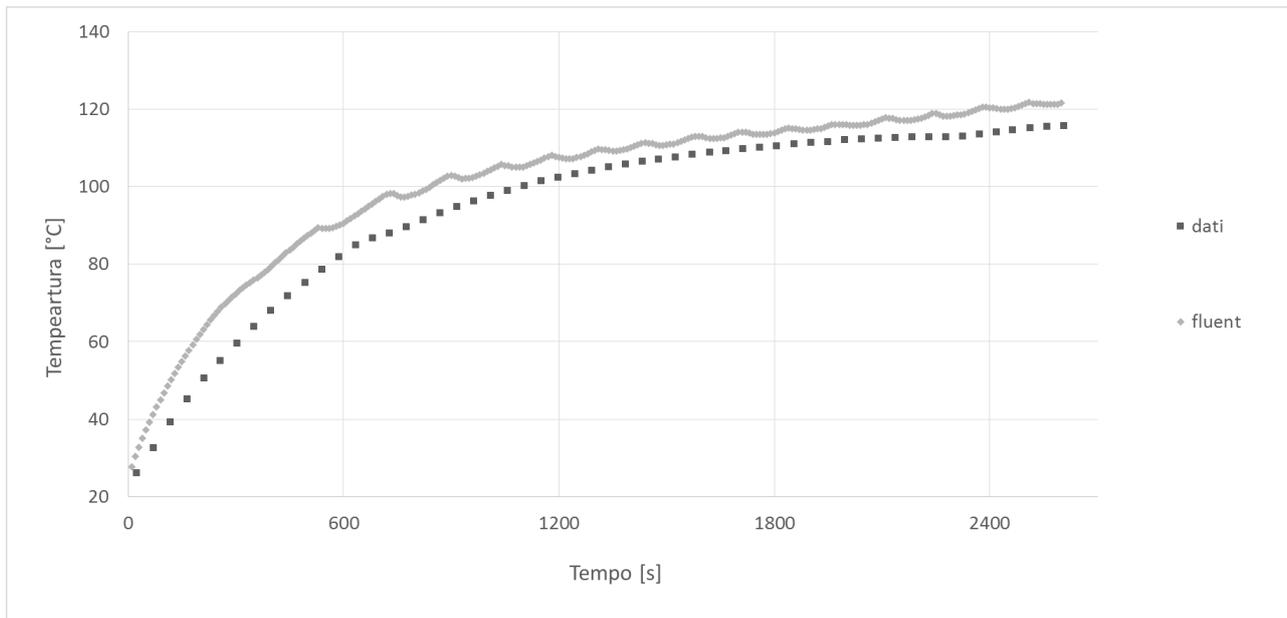


Figura 5-20. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia E previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 30 W.

La Figura 5-20 relativa alla termocoppia E posta nella base di rame mostra come il modello sovrastimi leggermente la temperatura, tendendo comunque a questa. Al termine della prova, pari a 2600 s, la base si trova a 116.0°C ed il modello prevede 121.0°C, con uno scarto tra effettiva e prevista ΔT pari a -5 K.

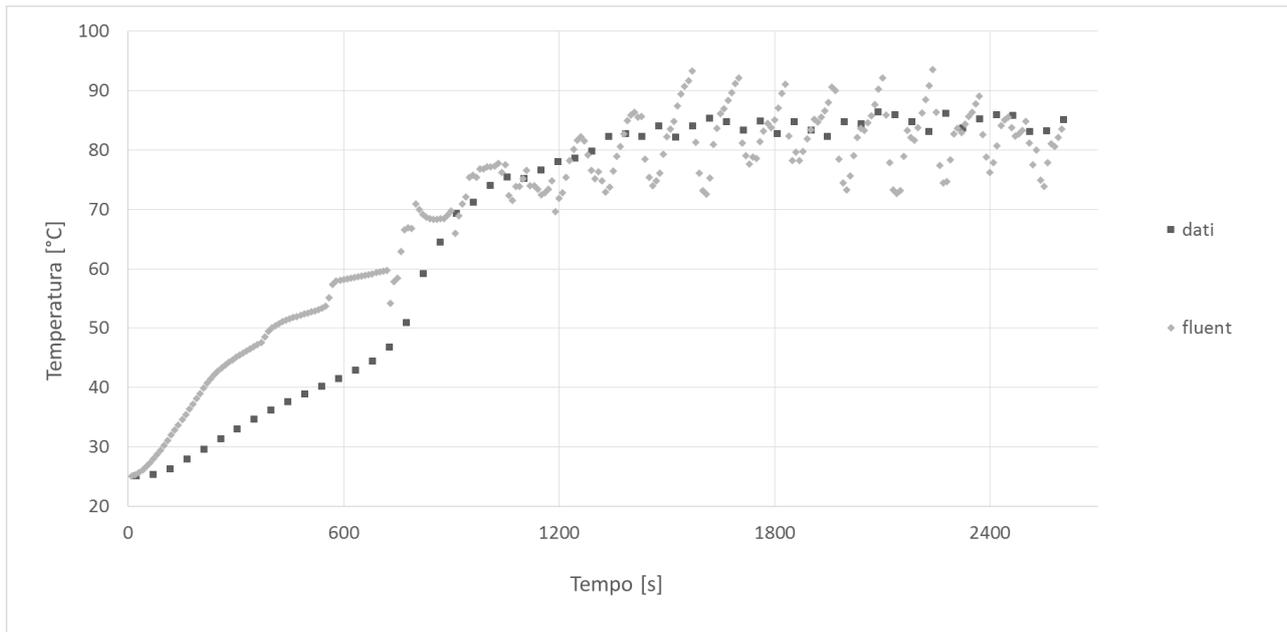


Figura 5-21. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia D previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 30 W.

La Figura 5-21 relativa alla termocoppia D posta a 5 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 800 s. Nella prima parte, si nota come il modello abbia un andamento alquanto differente da quello sperimentale; ciò è dovuto alla mancanza di una conoscenza precisa delle proprietà della paraffina. Si ricorda infatti che essa è definita solamente tramite due punti, quindi chiaramente il software tra questi due effettua un'interpolazione lineare che però non è detto rispecchi la realtà e l'evidenza lo dimostra. Per ottenere una precisa modellazione anche del comportamento della paraffina (che comunque non è l'obiettivo di questa tesi) è assolutamente necessario effettuare uno studio profondo della variazione delle sue proprietà con la temperatura; può essere altresì interessante ricercare in letteratura modelli analitici con questo scopo. Nella seconda parte, il modello prevede il raggiungimento di una temperatura di regime, che permane fino al termine della prova; tuttavia lo scarto ΔT tra quella effettiva di 85°C e quella sperimentale di 81°C è pari a 4 K. La sottostima della temperatura di regime può avere le stesse cause trattate nel commento di Figura 5-11. Una soluzione proposta per ridurre l'oscillazione della temperatura prevista è di aumentare il numero di iterazione per time step, che porta ad una maggiore precisione di calcolo del modello.

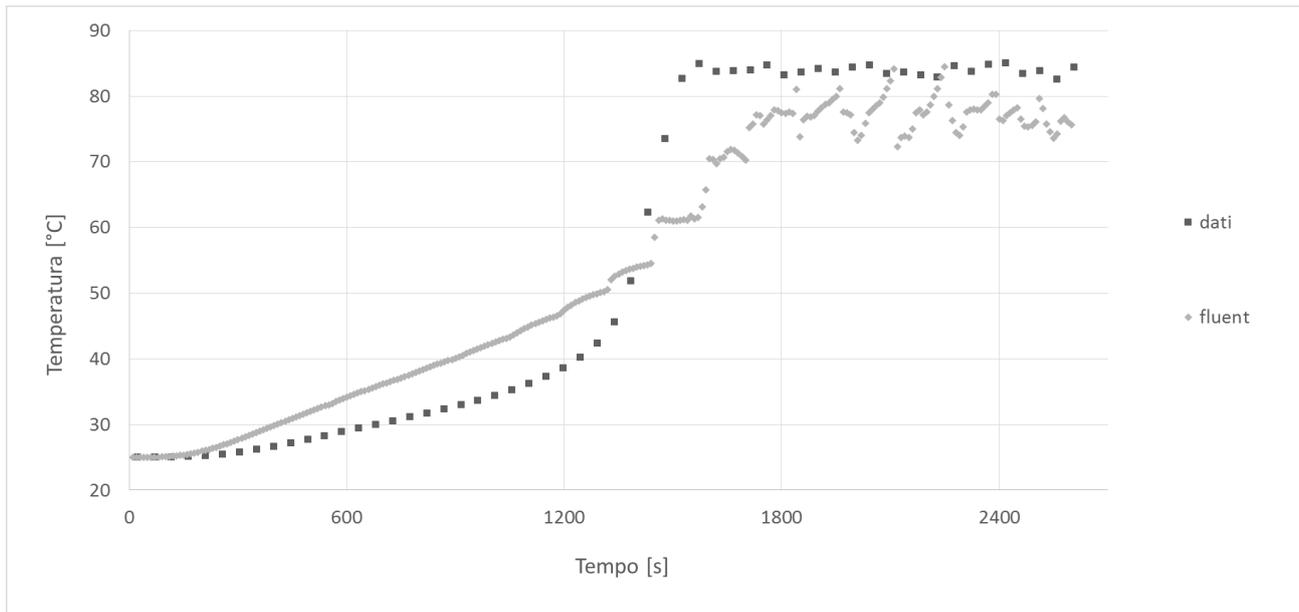


Figura 5-22. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia C previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 30 W.

La Figura 5-22 relativa alla termocoppia C posta a 15 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 1400 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-21.

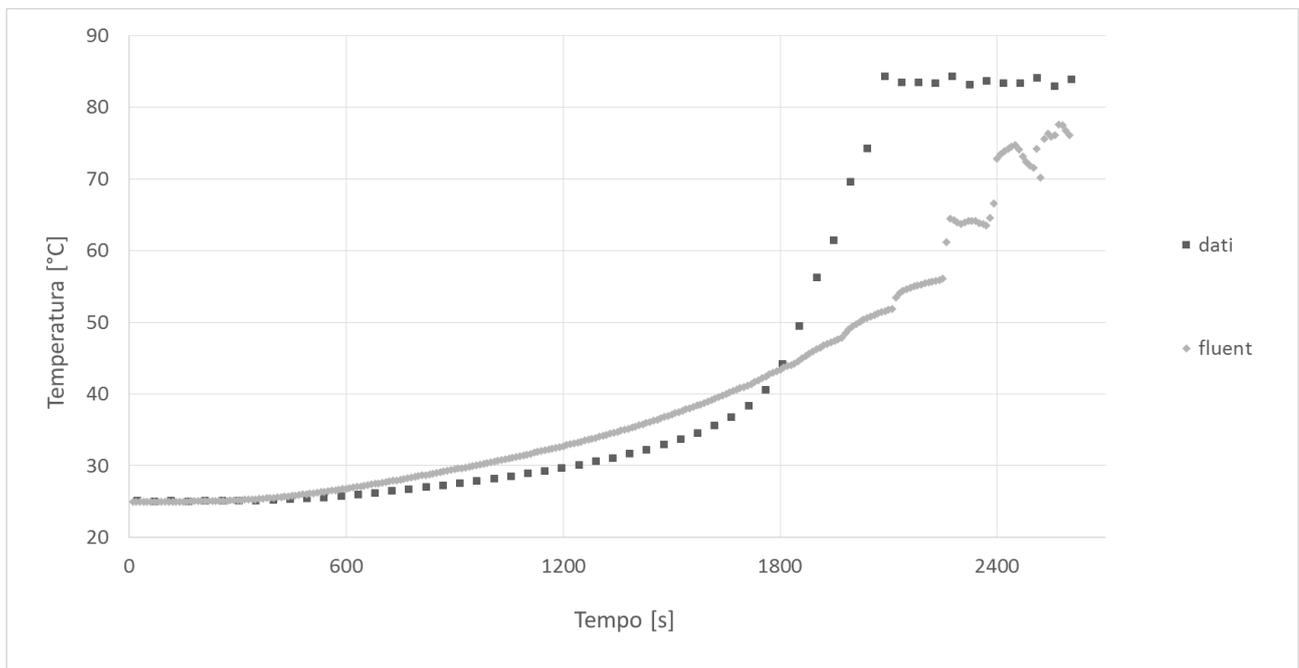


Figura 5-23. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia B previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 30 W.

La Figura 5-23 relativa alla termocoppia B posta a 25 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 1800 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-21.

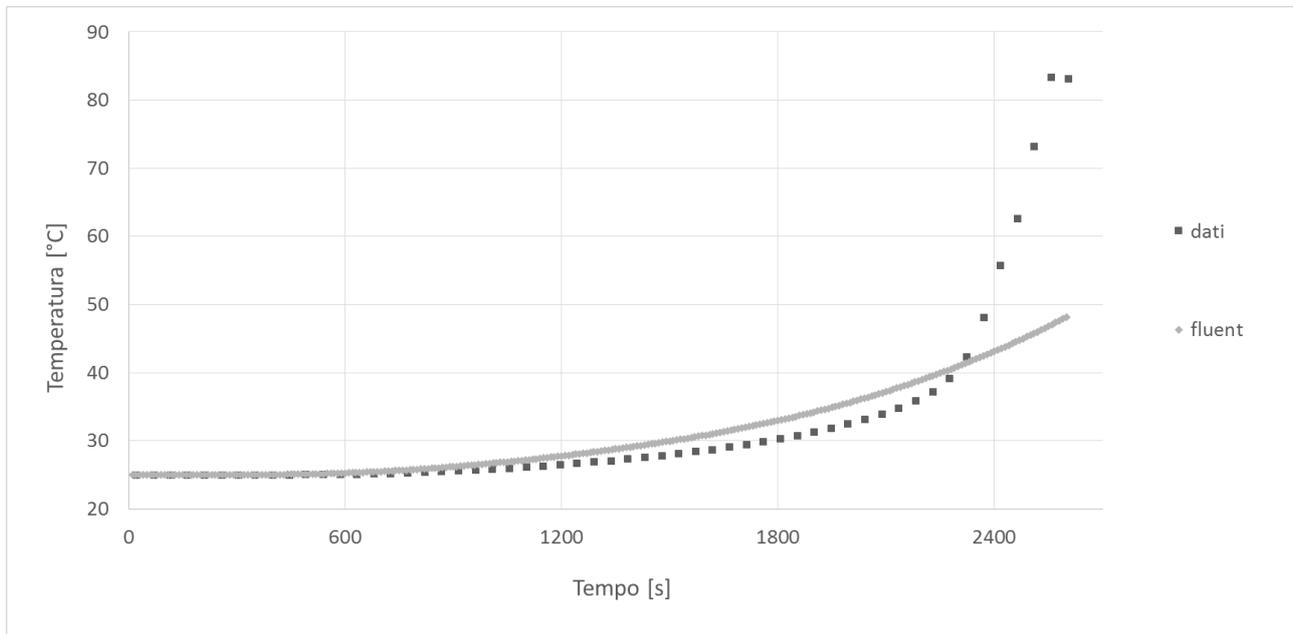


Figura 5-24. Confronto tra l'andamento di temperatura della termocoppia A previsto dal modello (serie "fluent") e quello sperimentale (serie "dati") per la paraffina 5803 a 30 W.

La Figura 5-24 relativa alla termocoppia A posta a 35 mm dalla base di rame si può suddividere in due parti in corrispondenza dell'istante temporale a 2300 s. Valgono le stesse considerazioni espresse nel commento di Figura 5-21.

5.2.4. Risultati

I grafici relativi al confronto tra l'andamento previsto e quello effettivo per le paraffine 5603 e 5203 non vengono riportati perché qualitativamente uguali a quelli della paraffina 5803; vengono però riassunti nelle Tab. 5.1, 5.2 e 5.3 i valori assunti dagli scarti per ciascuna termocoppia.

Tabella 5-1. Valori degli scarti tra dati sperimentali e risultati previsti per la paraffina 5803.

| | ΔT_A [K] | ΔT_B [K] | ΔT_C [K] | ΔT_D [K] | ΔT_E [K] |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| P = 10 W | 7 | | | | 4.9 |
| P = 20 W | 7 | | | | 1.2 |
| P = 30 W | 4 | | | | -5 |

Tabella 5-2. Valori degli scarti tra dati sperimentali e risultati previsti per la paraffina 5603.

| | ΔT_A [K] | ΔT_B [K] | ΔT_C [K] | ΔT_D [K] | ΔT_E [K] |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| P = 10 W | 8 | | | | 4.3 |
| P = 20 W | 7.5 | | | | 4.7 |
| P = 30 W | 5.1 | | | | 5 |

Tabella 5-3. Valori degli scarti tra dati sperimentali e risultati previsti per la paraffina 5203.

| | ΔT_A [K] | ΔT_B [K] | ΔT_C [K] | ΔT_D [K] | ΔT_E [K] |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| P = 10 W | 7 | | | | 3.6 |
| P = 20 W | 6.8 | | | | 4 |
| P = 30 W | 4.3 | | | | 4.1 |

5.3. Proposte per il futuro

Il modello attuale fornisce buoni risultati, ossia prevede in modo sufficientemente accurato i risultati sperimentali; tuttavia, per essere definitivo, esso deve avere un grado di dettaglio ancora maggiore,

fornendo un errore massimo di 1 K. Numerosi sono i modi attraverso i quali questo modello può essere migliorato; nel seguito si vogliono presentare alcuni spunti da cui partire.

Per simulare in modo più realistico la presenza della resistenza di contatto, essa va inserita come un vero e proprio solido all'interno del software di modellazione 3D Solidworks®; in tal modo si evita di usare una funzione predefinita di Fluent, in quanto non è perfettamente noto come essa operi. Per dare la possibilità al software di generare in questo nuovo solido un gradiente di temperatura, come accade nella realtà, è necessario creare in esso un body sizing di dimensione massima pari a un decimo del suo spessore. Al di sopra di questo valore, si rischia di non avere una modellazione fedele della realtà.

La mesh va certamente resa più fitta, lavorando con elementi di dimensione al massimo pari a un decimo di millimetro, ossia inferiore a quella usata per il modello attuale. Come si è notato, le perdite nel Teflon non sono state ancora stimate correttamente e quindi sarebbe interessante poter operare con un body sizing anche in esso, così da ricostruire più accuratamente la distribuzione di temperatura al suo interno.

Il passo temporale, a rigore, dovrebbe essere molto piccolo, dell'ordine del decimo di secondo, in quanto un fenomeno transitorio come questo necessita di una ricostruzione molto precisa essendoci in gioco anche una trasformazione fisica.

Il numero di iterazioni per time step va portato perlomeno a 100, così da assicurare una convergenza al sistema eliminando l'oscillazione della temperatura a regime prevista dal modello.

Fondamentale è la conoscenza accurata delle proprietà dei materiali utilizzati nell'apparato, in modo da evitare di dover procedere iterativamente rischiando di incappare in falsi positivi.

CONCLUSIONI

La tecnologia ha compiuto un enorme balzo in avanti negli ultimi decenni in qualunque settore; i dispositivi quali cellulari e computer sono divenuti rispettivamente smartphone e ultrabook, raggiungendo prestazioni fino a qualche anno fa impensabili persino per apparecchi a postazione fissa. La potenza di calcolo è cresciuta esponenzialmente, in linea con la domanda del consumatore che chiede sempre di più: multitasking, connessioni veloci, esperienza videoludica. Contestualmente a ciò le dimensioni si fanno sempre più piccole, tendendo all'obiettivo di poter avere questi dispositivi sempre con sé. La potenza richiesta per queste operazioni diviene quindi sempre maggiore e inevitabilmente ciò provoca una crescita del calore prodotto, che deve essere smaltito per evitare danni permanenti all'unità. Le soluzioni adottate in passato divengono obsolete e difficilmente applicabili: si pensi solo per esempio all'impossibilità di usare una ventola per raffreddare un tablet.

Tra i sistemi oggi al vaglio per far fronte a questa onnipresente difficoltà, i materiali a cambiamento di fase occupano una posizione di rilievo. La loro capacità di assorbire un elevato flusso di calore, mantenendo ridotte le dimensioni di ingombro, unita al loro costo estremamente competitivo caratterizzano questi materiali come una soluzione più che valida. Un dissipatore standard a PCM può essere costituito da un contenitore metallico cavo al cui interno è versato il materiale in questione, ad esempio una paraffina; il calore fornito dal chip riscalda questa che sensibilmente aumenta la propria temperatura fino a giungere a quella di fusione: a questo punto, inizia ad assorbire il calore latente e quindi controlla l'aumento di temperatura del chip, il cui trend positivo vede una diminuzione della sua pendenza.

La soluzione migliore appare essere l'utilizzo di una paraffina in quanto la transizione solido-liquido permette da un lato un elevato calore latente e dall'altro un aumento di volume dovuto al cambiamento di stato non troppo marcato, generalmente entro il limite del 10%. Inoltre, le paraffine non sono tossiche né infiammabili. Ad oggi, inoltre, si conoscono decine di paraffine differenti, ciascuna con diversa temperatura di fusione, che complessivamente spazia da -50°C a $+210^{\circ}\text{C}$: nota che sia l'applicazione a cui accoppiare il PCM, non v'è quindi dubbio che sarà possibile trovare la cera con la temperatura di fusione che meglio si vi si adatta.

Ovviamente anche questa soluzione ha degli aspetti da migliorare, primo fra tutti la bassa conducibilità termica della paraffina, pari a circa $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Fino alla fusione, quindi, essa si comporta come un isolante: è necessario studiare sistemi di incremento delle prestazioni termiche,

che conducano ad un aumento di questo valore. Tra i sistemi più promettenti vi sono le schiume metalliche: matrici di rame o alluminio costituite prevalentemente da spazi vuoti che però, una volta impregnate di paraffina, con le loro fibre riescono a trasportare il calore uniformemente in tutto il materiale, permettendo un maggiorato asporto di calore dall'elemento riscaldante. Complessivamente, dunque, il sistema paraffina-schioma risulta avere una conducibilità fittizia molto più elevata di quella della singola cera. Non trascurabile sono il relativamente basso costo di queste ed il loro peso specifico molto modesto, che non porta ad un incremento sostanziale della massa totale del dissipatore.

In questo lavoro di tesi si è dimensionata una nuova sezione sperimentale per lo studio del comportamento di diverse paraffine per il raffreddamento di componenti elettronici.

Le misure condotte hanno riguardato due sistemi: il primo ha visto l'impiego di un dissipatore costituito di solo PCM, il secondo ha previsto l'utilizzo congiunto di PCM e schiuma metallica.

Nel primo caso si sono testate tre diverse paraffine, fisicamente uguali ad eccezione della temperatura di fusione (pari rispettivamente a 53°C, 57°C e 59°C), a tre diversi livelli di potenza (ossia 10 W, 20 W e 30 W). I dati ottenuti hanno dimostrato come la cera che permette di mantenere la base a temperatura inferiore sia quella a temperatura di fusione minore. Questo risultato appare essere più evidente al crescere della potenza erogata.

Nel secondo caso si è utilizzata questa paraffina per impregnare tre diverse schiume che differivano solamente per densità di pori. I dati hanno mostrato come a potenze fino a 20 W prevalga la schiuma a 10 PPI, mentre al crescere di essa si ottengono migliori prestazioni sia con la 5 PPI che con la 40 PPI. Si specifica comunque che gli scarti tra le temperature ottenute sono molto modesti e comunque inferiori a 2.6 K.

Complessivamente quindi, l'esito finale ha visto prevalere la paraffina a temperatura di fusione inferiore, utilizzata congiuntamente con una schiuma a 10 PPI.

Si sono realizzati due filmati ad uso solamente qualitativo per vedere direttamente il fenomeno di fusione. Nel caso di sola paraffina, esso appare molto lento, a causa della natura di isolante della cera, tuttavia è apparso interessante notare la forma ricurva del fronte di fusione nel suo incedere verso l'alto. Con la schiuma, invece, la durata della prova si è ridotta notevolmente (il 20% a parità di potenza erogata e tipologia di paraffina usata); chiaramente non vi è alcun fronte di fusione in questo caso, distribuendosi il calore uniformemente in tutto il PCM.

Un lavoro aggiuntivo è stato svolto per ottenere un modello del fenomeno fisico che avviene entro il dissipatore; l'obiettivo è stato duplice: da un lato cercare conferma dei dati sperimentali, dall'altro riuscire a prevedere il comportamento del sistema in condizioni diverse da quelle utilizzate in laboratorio. Il processo è stato condotto per iterazioni, imponendo dei valori iniziali plausibili e modificandoli di volta in volta ricercando la migliore accuratezza in base ai risultati ottenuti. Le difficoltà maggiori si sono incontrate con il settaggio della mesh e delle proprietà del Teflon. Per la prima si è ovviamente ricercato un compromesso tra precisione dei risultati e potenza di calcolo disponibile, nonché il tempo a disposizione. La seconda è stata risolta utilizzando delle termocoppie appositamente installate nel Teflon per avere un riscontro effettivo delle perdite di calore in esso. Il modello ottenuto consente di prevedere i risultati sperimentali con uno scarto di ± 5 K, in linea con gli obiettivi prefissati.

In sintesi, l'utilizzo di un materiale a cambiamento di fase per la dissipazione passiva di calore in applicazioni elettroniche appare essere una soluzione certamente valida, in forza dei risultati sperimentali ottenuti. Si sconsiglia, tuttavia, l'uso della sola paraffina, preferendo senza ombra di dubbio l'accostamento ad una schiuma metallica, che consente una riduzione della temperatura del chip di $5.6 \div 24.0$ K a seconda della densità di pori della schiuma e della potenza erogata.

Il costo relativamente contenuto della schiuma e della paraffina pongono poi questo sistema su una corsia preferenziale per lo smaltimento del calore, surclassando diverse altre soluzioni.

Tra i consigli per il futuro certamente vi è il lo studio sperimentale di schiume metalliche a diversa porosità, fattore che sicuramente influenza in modo non trascurabile la temperatura dell'elemento riscaldante; inoltre, compresi i meccanismi di base del fenomeno, è possibile passare allo stadio successivo ricreando un reale dissipatore compatibile ad esempio con un processore per notebook, testando effettivamente quali configurazioni offrono una valida soluzione. Non ci si può dispensare inoltre dalla creazione di un modello più accurato, sia dal punto di vista fisico che tecnico.

NOMENCLATURA

Simboli latini

a_m frazione fusa di materiale [-]

a_{sf} area d'interfaccia [$m^2 m^{-3}$]

c_p calore specifico [$J kg^{-1} K^{-1}$]

d_f diametro della fibra [mm]

d_p diametro dei pori [mm]

e numero di Nepero [-]

H flusso di energia scambiata con l'esterno [W]

Δh_m calore di fusione per unità di massa [$J kg^{-1}$]

K permeabilità [mm^2]

L lunghezza apparente del mezzo poroso misurata nella direzione perpendicolare al flusso [m]

L_e lunghezza effettiva del percorso disponibile per il flusso del fluido entro la cella unitaria del mezzo poroso [m]

m massa [kg]

P potenza [W]

Q calore [J]

q flusso termico [W]

R resistenza di contatto [$m^2 s W^{-1}$]

T temperatura [K]

TS time step [s]

dT differenza di temperatura [$^{\circ}C$]

ΔT variazione di temperatura [K]

Simboli greci

ϵ porosità [-]

λ conducibilità [$W m^{-1} K^{-1}$]

μ viscosità [$kg s^{-1} m^{-1}$]

ρ densità [$kg m^{-3}$]

τ tempo [s]

$d\tau$ intervallo di tempo [s]

χ coefficiente di tortuosità [-]

ω densità di pori [PPI]

Pedici

A relativo a termocoppia A

B relativo a termocoppia B

base base

C relativo a termocoppia C

c misurata da Pt-100

D relativo a termocoppia D

E relativo a termocoppia E

fus fusione

m misurata da termocoppia

medio previsto da Bhattacharaya

rame rame

reg regime

rif di riferimento

schiuma schiuma metallica

v passaggio da prima a seconda fascia per la termocoppia B

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ansys, «Fluent 13».
- [2] A. A., "Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials," *Solar Energy*, p. 313–32, 1981.
- [3] S. R. Buddhi D, "Proceedings on thermal energy storage and energy conversion," *In*, 1994.
- [4] G. Lane, "Solar Heat Storage: Latent Heat Material," *Background and Scientific Principles*, 1983.
- [5] G. Lane, "Solar Heat Storage: Latent Heat Material," *Technology*, 1986.
- [6] M. R. I. Dincer, "Thermal energy storage," *Systems and Applications*, 2002.
- [7] V. T. C. C. D. B. Atul Sharma, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 318–345, 2009.
- [8] e. a. Abhat A, "Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage," *Germany Ministry of Science and Technology Bonn*, 1981.
- [9] S. M. Feldman D, "Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage.," *Solar Energy Mater*, p. 18:201–16, 1989.
- [10] F. T. b. S. M. S.F. Hosseinizadeh, "Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins," *Applied Thermal Engineering*, pp. 3827-3838, 2011.
- [11] X.-Q. W. A. S. M. Ravi Kandasamy, "Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks," *Applied Thermal Engineering*, p. 1047–1057, 2008.
- [12] W. S. F. T. S.C. Fok, "Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks," *International Journal of Thermal Sciences*, p. 109–117, 2010.

- [13] R. W. A. S. F. Omar Sanusi, "Energy storage and solidification of paraffin phase change material embedded with graphite nanofibers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, p. 4429–4436, 2011.
- [14] A. Rossi, «Applicazione delle schiume metalliche,» *A&L*, pp. 68-72, 2011.
- [15] R. L. M. V. V. Calmidi, "Forced Convection in High Porosity Metal Foams," *CAMPmode*, 2008.
- [16] C. P.-H. E. Jouane Ahmed, "A predictive model based on tortuosity for pressure drop estimation in 'slim' and 'fat' foams," *Chemical Engineering Science*, p. 4771–4779, 2011.
- [17] W. J. W. W. Z.G.Qu, "Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, pp. 1546-1549, 2012.
- [18] C. Z. D. Zhou, "Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials," *Applied Thermal Engineering*, pp. 970-977, 2011.
- [19] X.-Q. W. A. S. M. Ravi Kandasamy, «Application of phase change materials in thermal management of electronics,» *Applied Thermal Engineering*, 2007.
- [20] Microsoft, «Excel 2013».
- [21] Z. Q. Y. H. W. T. W.Q. Li, "Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin," *Applied Thermal Engineering*, pp. 1-9, 2012.
- [22] V. C. R. M. A. Bhattacharya, «Thermophysical properties of high porosity metal foams,» *International journal of heat and mass transfer*, 2002.
- [23] «Solidworks 2013».
- [24] «Ansys Fluent User Guide,» [Online]. Available:
<http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node1.htm>.

[25] W. L. Y. T. C.Y. Zhao, «Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs),» *Solar Energy*, 2010.

RINGRAZIAMENTI

Lo svolgimento di una tesi in laboratorio mi ha permesso di fare una nuova esperienza, imparando quelli che sono i fondamenti per un buon approccio al lavoro di ricerca. Ho potuto apprendere numerose nuove conoscenze sia a livello teorico, in particolar modo in relazione al fenomeno fisico studiato, sia a livello tecnico, come la capacità di costruire un modello computerizzato per la simulazione fisica.

Ringrazio per questa possibilità la prof. Rossetto, l'ing. Mancin e l'ing. Diani che mi hanno pazientemente accompagnato per tutta la durata di questo percorso.

Un grazie va anche ad amici, parenti e ai miei genitori per il sostegno e l'aiuto che mi hanno sempre confermato.

