

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL DOUTORADO**

FÁBIO BECKER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA MUDANÇA DE FASE DE BIOPCM EM ESPUMA
METÁLICA DE GEOMETRIA RETANGULAR E PERFILADA**

**São Leopoldo
2025**

FÁBIO BECKER

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA MUDANÇA DE FASE DE BIOPCM EM ESPUMA
METÁLICA DE GEOMETRIA RETANGULAR E PERFILADA**

Projeto de Tese apresentado como
requisito para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Mecânica, pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade do Vale do Rio
dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof.^a Dra. Jacqueline Biancon Copetti
Coorientadora: Prof.^a Dra. Elaine Maria Cardoso

São Leopoldo
2025

B396a Becker, Fábio.

Análise experimental da mudança de fase de bioPCM em espuma metálica de geometria retangular e perfilada / Fábio Becker. – 2025.

111 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

“Orientadora: Prof.^a Dra. Jacqueline Biancon Copetti

Coorientadora: Prof.^a Dra. Elaine Maria Cardoso”.

1. Materiais de Mudança de Fase (PCM). 2. Espuma metálica. 3. Fusão. 4. Solidificação. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, pela compreensão, paciência e apoio prestado.

Às Prof.^a Dra. Rejane De Césaro Oliveski, Prof.^a Dra. Jacqueline Biancon Copetti e Prof.^a Dra. Elaine Maria Cardoso, pelas orientações prestadas durante a realização do doutorado, bem como para desenvolvimento desta pesquisa.

À banca avaliadora, pelos conselhos prestados na avaliação.

Aos meus amigos e colegas do PPG em Engenharia Mecânica da UNISINOS.

Aos colegas de iniciação científica e laboratoristas, pelo suporte prestado no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS, por toda a estrutura acadêmica disponibilizada.

“Não é valente o que não tem medo,
mas sim o que sabe dominá-lo.
(Nelson Mandela)

RESUMO

Em consequência à gradual transição energética, com o crescente uso de fontes de energia mais limpas, o armazenamento de energia torna-se inevitável, principalmente devido a sazonalidade de geração de tais fontes. Neste contexto, entre as principais alternativas existentes está o armazenamento de energia por meio do calor latente. Como principal característica deste tipo de armazenamento, cita-se a elevada densidade de armazenamento de energia em temperatura praticamente constante, ou seja, na temperatura em que ocorre a mudança de fase, o que torna possível sua utilização em inúmeras aplicações. Os materiais que se baseiam nesta forma de armazenamento são conhecidos como Materiais de Mudança de Fase (PCM). Pela vasta possibilidade de aplicação dos mesmos, torna-se importante a utilização de PCM de base biológica (bioPCM), para que se possa amenizar possíveis impactos ambientais. No entanto, os PCM em geral apresentam baixa condutividade térmica, o que pode restringir algumas aplicações. Com isso, faz-se necessária a utilização de métodos que possam melhorar a transferência térmica, sendo a incorporação de espumas metálicas, de diferentes características morfológicas ao PCM, uma alternativa eficiente que vem sendo pesquisada por apresentar elevada área de superfície de troca de calor e melhorar a condutividade térmica. Neste contexto, esta pesquisa propõe um estudo com diferentes geometrias de espuma, juntamente com a utilização da cera de palma como bioPCM. Desta forma, foram utilizadas duas geometrias de espuma de níquel, sendo uma retangular e outra perfilada, a qual remete a geometria de aletas. Deste modo, pode-se aumentar a transferência de calor e a eficiência com menor volume de espuma. Além disso, a influência da modificação da orientação do reservatório, análoga a inclinação de um módulo fotovoltaico, também foi analisada. Os principais resultados mostraram que o caso contendo espuma de geometria retangular reduziu em 7,5% o tempo de carga (fusão) e em 4% o tempo de descarga (solidificação), comparado ao caso sem espuma, enquanto o caso contendo a geometria perfilada reduziu em 7,1% o tempo de carga e aumentou em 10% o tempo de descarga. A inclusão da espuma também melhorou a taxa de armazenamento de energia em aproximadamente 8,1% para a geometria retangular e em 7,6% para a geometria perfilada.

Palavras-chave: Materiais de Mudança de Fase (PCM), Espuma Metálica, Fusão, Solidificação.

ABSTRACT

As a result of the gradual energy transition, with the increasing use of cleaner energy sources, energy storage becomes inevitable, mainly due to the seasonality of generation from such sources. In this context, one of the main existing alternatives is energy storage through latent heat. The main characteristic of this type of storage is its high energy storage density at a virtually constant temperature—that is, at the temperature at which the phase change occurs—which makes it possible to use it in numerous applications. Materials based on this form of storage are known as Phase Change Materials (PCMs). Due to their wide range of applications, the use of bio-based PCMs (bioPCMs) is important to mitigate potential environmental impacts. However, PCMs generally have low thermal conductivity, which may limit some applications. Therefore, methods that can improve heat transfer are necessary. The incorporation of metallic foams with different morphological characteristics into PCM is an efficient alternative that has been investigated due to its high heat exchange surface area and improved thermal conductivity. In this context, this research proposes a study with different foam geometries, along with the use of palm wax as bioPCM. Thus, two nickel foam geometries were used: one rectangular and the other profiled, which resembles a fin geometry. This allows for increased heat transfer and efficiency with a smaller foam volume. Furthermore, the influence of changing the reservoir orientation, analogous to the tilt of a photovoltaic module, was also analyzed. The main results showed that the case containing rectangular foam reduced the charging (fusion) time by 7.5% and the discharging (solidification) time by 4%, compared to the case without foam, while the case containing the profiled geometry reduced the charging time by 7.1% and increased the discharging time by 10%. The inclusion of foam also improved the energy storage rate by approximately 8.1% for the rectangular geometry and by 7.6% for the profiled geometry.

Keywords: Phase Change Material (PCM), Metal Foam, Melting, Solidification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Armazenamento de energia através de calor sensível.....	21
Figura 2.2 - Armazenamento de energia através do calor latente.....	22
Figura 2.3 - Classificação dos PCMs quanto à composição química.....	24
Figura 2.4 - Termograma <i>DSC</i> para amostra de PCM - ácido esteárico.....	26
Figura 2.5 - Sistema de ensaio do método da curva de temperatura ou <i>T-history</i>	27
Figura 2.6 - Curva temperatura versus tempo do método <i>T-history</i> aplicado à amostra de PCM.....	27
Figura 2.7 - Processo de fusão de PCM em cavidade retangular.....	29
Figura 2.8 - Processo de fusão de PCM em esfera.....	29
Figura 2.9 - Fusão de contato em PCM fundido em esfera.....	30
Figura 2.10 - Processo de solidificação de PCM em um trocador de calor.....	31
Figura 2.11 - Espuma metálica: a) célula aberta e b) célula fechada.....	36
Figura 2.12 – Representação do poro e da fibra de uma espuma metálica.....	36
Figura 2.13 – Diferentes densidades de poro: a) 5 PPI, b) 10 PPI e c) 25 PPI.....	37
Figura 2.14 - Tamanho de poro de espuma metálica.....	38
Figura 3.1 - Representação esquemática da bancada experimental de análise térmica com sistema de armazenamento de energia.....	43
Figura 3.2 - Instalação da bancada experimental de análise térmica.....	44
Figura 3.3 – Reservatório de testes experimentais de chapas de acrílico.	45
Figura 3.4 – Resistência do tipo <i>PTC</i> fixada no reservatório de testes experimentais.	46
Figura 3.5 - Volume de controle em torno do bioPCM com espuma metálica.....	46
Figura 3.6 – Posicionamento dos sensores de temperatura no reservatório de análise térmica.	48
Figura 3.7 - Estrutura da espuma metálica de níquel utilizada no experimento.	49
Figura 3.8 - Configurações geométricas de espumas metálicas de níquel: a) inteira e b) perfilada.	50
Figura 3.9 – Aspecto do bioPCM (cera de palma): (a) estado sólido e (b) estado líquido.....	52
Figura 3.10 – Perfil de decomposição térmica do bioPCM em atmosfera inerte.	53
Figura 3.11 - Perfil de decomposição térmica do bioPCM em atmosfera oxidante. ..	54
Figura 3.12 – Termograma de fusão do bioPCM.	55

Figura 3.13 - Termograma de solidificação do bioPCM.....	55
Figura 3.14 – Teste de viscosidade x velocidade para caracterização do bioPCM... ..	58
Figura 3.15 – Teste torque x velocidade para caracterização do bioPCM.	58
Figura 3.16 – Viscosidade em função da temperatura do bioPCM.	59
Figura 3.17 – Método de preenchimento dos reservatórios com bioPCM: a) pesagem do bioPCM; b) transferência do bioPCM; c) fusão gradativa do bioPCM e d) fusão completa do bioPCM.	61
Figura 3.18 - Casos analisados no processo de fusão e solidificação do bioPCM: a) caso A - somente bioPCM; b) caso B - bioPCM com espuma retangular e c) caso C - bioPCM com espuma perfilada.	62
Figura 3.19 - Casos analisados no processo de fusão do bioPCM: a) caso D - bioPCM com espuma retangular inclinado em 30° e b) caso E - bioPCM com espuma perfilada inclinado em 30°.....	63
Figura 3.20 - Processamento de imagens da fusão do bioPCM: a) imagem original, b) imagem em 8-bit, c) ajuste de contorno e d) imagem binária.....	65
Figura 4.1 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo através do maior fluxo de calor para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.	69
Figura 4.2 – Campos de fração de líquido para o caso C, com espuma perfilada, nos instantes de tempo: a) 2.400 s, b) 2.700 s e c) 3.000 s.....	71
Figura 4.3 - Zona mole em $t = 4.800$ s e $t = 9.600$ s para: a e d) caso A, b e e) caso B e c e f) caso C.	72
Figura 4.4 – Perfis de temperatura em função do tempo ($\Delta t = 300$ s) para maior fluxo de calor para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.	74
Figura 4.5 – Perfis de temperatura no instante de tempo de 15.000 s até 40.000 s dos sensores de temperatura S ₈ , S ₉ e S ₁₀ para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.....	77
Figura 4.6 – Perfis de fração de líquido em função do tempo no maior fluxo de calor para os casos A, B e C.	79
Figura 4.7 - Energia acumulada para o caso A, caso B e caso C.	81
Figura 4.8 – Influência do maior fluxo de calor na fração de líquido para o caso C ..	82
Figura 4.9 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo para o caso C obtidos para: a) maior fluxo de calor e b) menor fluxo de calor.....	82
Figura 4.10 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo para: a) caso D e b) caso E.....	84
Figura 4.11 - Perfis de fração de líquido em função do tempo para os casos D e E.	85

Figura 4.12 – Campos de fração de líquido no instante de tempo $t = 14.400$ s, para os casos D e E.....	85
Figura B.1 – Opções de fixação dos sensores de temperatura.....	107
Figura B.2 - Perfis de aquecimento dos sensores de temperatura para as diferentes formas de fixação.....	108
Figura C.1 - Posicionamento dos sensores de temperatura o para teste de uniformidade térmica.....	109
Figura C.2 - Perfis de aquecimento da análise de uniformidade térmica.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades da espuma metálica de níquel.	49
Tabela 3.2 - Calor específico obtido para o bioPCM na faixa de temperatura de mudança de fase.....	57
Tabela 3.3 - Massa específica do bioPCM.	60
Tabela 3.4 - Precisão dos instrumentos aplicados ao sistema.....	66
Tabela 3.5 - Incertezas padrão dos parâmetros do sistema.	67
Tabela 4.1 – Leituras de temperatura para o maior fluxo de calor no instante de tempo $t = 13.000$ s.	75

LISTA DE SIGLAS

<i>bioPCM</i>	Material de mudança de fase de base biológica
<i>COP</i>	Coeficiente de performance
<i>DSC</i>	Calorímetro de varredura diferencial
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>LHTES</i>	Armazenamento de calor latente
<i>MEV</i>	Microscópio eletrônico de varredura
<i>PCM</i>	Material de mudança de fase
<i>PPI</i>	Poros por polegada
<i>PTC</i>	Coeficiente de temperatura positivo
<i>RTD</i>	Detector de temperatura por resistência
<i>SHS</i>	Armazenamento de calor sensível
<i>TCHS</i>	Armazenamento termoquímico
<i>TES</i>	Armazenamento de energia térmica
<i>TGA</i>	Análise termogravimétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

a_m	fração fundida	[-]
a_r	fração de material que reagiu	[-]
c	comprimento do nó cúbico	[-]
cp	calor específico	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
d_p	diâmetro do poro	[m]
d	deslocamento vertical	[mW]
E	energia	[W]
G	irradiância	[W m ⁻²]
H	altura	[m]
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	[W m ⁻² K ⁻¹]
h_m	entalpia de fusão	[kJ kg ⁻¹]
h_r	calor endotérmico da reação	[kJ kg ⁻¹]
k	condutividade térmica	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
L	comprimento	[m]
m	massa	[kg]
n	número de leituras realizadas	[-]
Q	quantidade de calor armazenado	[J]
q''	fluxo de calor	[W m ⁻²]
R	raio	[m]
r	raio de ligamento da espuma metálica	[-]
S	sensor de temperatura	[-]
s	desvio padrão experimental	[-]
T	temperatura	[°C]
T_h	espessura	[m]
t	tempo	[s]
u	incerteza padrão	[-]
V	volume	[m ³]
v	velocidade	[m s ⁻¹]
W	largura	[m]

Símbolos gregos

α	velocidade angular	[rpm]
----------	--------------------	---------

β	fração de líquido	[-]
ε	porosidade	[%]
ρ	massa específica	[kg m ⁻³]
μ	viscosidade	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ω	densidade de poro	[PPI]

Sub-índices

a	amostra
$acum$	acumulada
amb	ambiente
$cell$	célula fotovoltaica
$cond$	condução
$conv$	convecção
eff	efetiva
ent	entra
F	espuma metálica
f	fluido
g	gerada
h	alto
l	baixo
m	material
p	padrão
S	superfície
s	sólido
sai	sai
v	vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Armazenamento de energia	20
2.1.1	Armazenamento de energia através do calor termoquímico	20
2.1.2	Armazenamento de energia através do calor sensível	21
2.1.3	Armazenamento de energia através do calor latente.....	21
2.2	Material de mudança de fase.....	23
2.2.1	Classificação.....	23
2.2.2	Transferência de calor no PCM	28
2.2.3	Processo de fusão	28
2.2.4	Processo de solidificação.....	30
2.2.5	Aprimoramento da transferência de calor	31
2.2.6	Aplicações.....	33
2.3	Espuma metálica	35
2.3.1	Classificação.....	35
2.3.2	Porosidade	36
2.3.3	Densidade de poro.....	37
2.3.4	Tamanho de poro.....	37
2.3.5	Condutividade térmica efetiva	38
2.3.6	Aplicações.....	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	Bancada Experimental	43
3.1.1	Reservatório.....	44
3.2	Sistema de aquecimento.....	45
3.3	Medição da temperatura	47
3.4	Espuma Metálica.....	48
3.5	Material de Mudança de Fase - PCM.....	50
3.5.1	Análise qualitativa	52

3.5.2	Decomposição térmica.....	52
3.5.3	Temperatura de mudança de fase e calor latente.....	54
3.5.4	Calor específico	56
3.5.5	Viscosidade.....	57
3.5.6	Massa específica	59
3.5.7	Condutividade térmica	60
3.6	Procedimento de preenchimento dos reservatórios	61
3.7	Casos analisados	62
3.8	Determinação do fluxo de calor	63
3.9	Tratamento de imagens	64
3.10	Incerteza experimental	65
4	RESULTADOS.....	68
4.1	Análise da influência geométrica.....	68
4.1.1	Campos de fração de líquido	68
4.1.2	Perfis de temperatura.....	72
4.1.3	Perfis de fração de líquido	78
4.1.4	Energia armazenada.....	80
4.2	Análise da influência do fluxo de calor	81
4.3	Análise da inclinação do reservatório	83
5	CONCLUSÕES	87
6	TRABALHOS FUTUROS.....	90
REFERÊNCIAS.....		91
APÊNDICE A - PROJETO DO RESERVATÓRIO		99
APÊNDICE B – ANÁLISE DA FIXAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA CHAPA DE COBRE.....		107
APÊNDICE C - ANÁLISE DE UNIFORMIDADE TÉRMICA DA PLACA DE COBRE		109
APÊNDICE D - TEMPERATURAS AMBIENTE COM BASE NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA A801 DO INMET		111

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais as mudanças climáticas são discutidas em nossa sociedade, principalmente devido aos danos que estas provocam e que estão ameaçando a garantia da sustentabilidade dos sistemas humanos e naturais (Howard, 2022). Desta forma, torna-se importante que nossa sociedade implemente ações que viabilizem a atenuação das consequências já vivenciadas. Entre os esforços que atualmente são despendidos, o programa “Net Zero” mostra-se como uma das ações em prática, que tem como objetivo equilibrar as emissões dos gases de efeito estufa, além da ambição de retornar aos níveis de CO₂ existentes antes do início da Revolução Industrial (Groves; Santosh; Zhang, 2023). Com isso, para que se possa efetivamente cumprir os objetivos e/ou metas estabelecidas, torna-se necessária a realização de uma transição energética para fontes de energia que sejam mais limpas e consideradas eficazes ambientalmente.

Diversas são as possibilidades de tecnologias nas quais essa transição se torna possível. Entre as opções, pode ser citado o uso da energia solar, da energia eólica, assim como da energia advinda de usinas hidrelétricas, de biomassa e geotérmicas, bem como da utilização de hidrogênio. No entanto, a maioria destas fontes é sazonal, o que ocasiona intermitência na geração da energia. Desta forma, em alguns momentos poderá não existir sua geração, pela ausência da fonte geradora, e em outros momentos haverá geração em excesso, o que poderá sobrecarregar os sistemas de transmissão. Deste modo, para que seja possível equilibrar a demanda de energia e sua geração, torna-se importante a utilização de sistemas de armazenamento de energia (Mitali; Dhinakaran; Mohamad, 2022) onde o armazenamento de energia térmica apresenta-se como alternativa (Mehari; Xu; Wang, 2020), podendo existir através de calor sensível, latente ou termoquímico.

Entre as diferentes alternativas de armazenamento térmico, o armazenamento através do calor latente mostra-se mais atrativo, pelo fato de possuir elevada densidade de armazenamento em temperatura praticamente constante, realizado durante a mudança de fase (Ismail et al., 2022). Os Materiais de Mudança de Fase, do inglês *Phase Change Material* (PCM), são materiais baseados nesta forma de armazenamento, classificados quanto à composição química em orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Li et al., 2022a), enquanto à temperatura de mudança de fase, classificados em baixa, média e elevada temperatura (Lawag; Ali, 2022). Entre as

características, os PCM apresentam elevado calor latente de fusão, baixa condutividade térmica, baixo ponto de ignição (Rostami et al., 2020) e pouca alteração volumétrica (Irfan Lone; Jilte, 2021).

Os Materiais de Mudança de Fase podem ser utilizados em inúmeras aplicações, como em sistemas de armazenamento de energia, edificações, controle térmico de baterias e microeletrônicos (Irfan Lone; Jilte, 2021), além da indústria têxtil, alimentícia e automobilística (Ismail et al., 2022). Deste modo, pela vasta possibilidade de aplicações, torna-se importante a utilização de PCM ecologicamente correto, com o intuito de resguardar possíveis impactos ambientais. Neste contexto, os PCM de base biológica passam a ser uma alternativa promissora (Nazari; Jebrane; Terziev, 2020). No entanto, como os PCMs em geral apresentam baixa condutividade térmica, o que restringe o desempenho dos sistemas, algumas técnicas estão sendo estudadas para melhorar as características de transferência térmica. Entre as mais utilizadas, podem-se citar a inclusão de aletas, microencapsulação (Lawag; Ali, 2022), utilização de múltiplos PCM, aplicação de nanopartículas e incorporação de espuma metálica (Ismail et al., 2022).

Estas técnicas embora resultem no incremento da condutividade térmica, também apresentam limitações que podem impactar negativamente os processos de fusão e solidificação. Como exemplo, o uso de nanopartículas em elevadas concentrações pode provocar aglomeração e sedimentação, o que ocasiona sua heterogeneidade (Dhaidan et al., 2022). No uso de aletas, a configuração da sua implementação afeta de forma predominante a uniformidade da temperatura e consequentemente o efeito da transferência de calor (Zhu; Li; Zhu, 2022). Portanto, a inserção de espuma metálica apresenta-se como uma das alternativas mais eficientes, por apresentar, além de elevada condutividade térmica, grande área de superfície, o que aumenta a área de contato entre o fluido e sua superfície (Aramesh; Shabani, 2022; Shi et al., 2023).

Ao longo do tempo, pesquisas foram desenvolvidas para melhor entendimento dos mecanismos de transferência de calor nos PCM, através da utilização de espumas metálicas, para os processos de fusão e solidificação. Algumas destas foram direcionadas para o entendimento de variações morfológicas específicas das espumas, como tamanho de poro (Sheikh; Orhan; Azmeer, 2022), porosidade (Duan, 2021; Mahdi et al., 2021; Shakibi et al., 2022) e densidade dos poros (Li et al., 2021; Marri; Balaji, 2021). Já outras, na incorporação das espumas metálicas para melhorar

a uniformidade do campo de temperatura (Guo et al., 2021; Liu et al., 2022; Yang et al., 2020).

Embora as espumas metálicas e as aletas sejam extensivamente estudadas na literatura, existem poucos estudos que combinam os benefícios de ambas. Em geral, a maioria destes estudos se concentram em como diferentes parâmetros afetam o processo de fusão e solidificação. Em comparação com as técnicas anteriormente mencionadas, a espuma metálica com perfil que remete à geometria de aletas pode, teoricamente, ocupar menor volume e mesmo assim aumentar a transferência de calor local, possibilitando melhora no armazenamento de energia e na eficiência do sistema.

Dentro desse contexto, esta pesquisa concentra-se em investigar a influência da geometria da espuma no desempenho da cera de palma como um material de mudança de fase de base biológica, com foco em duas geometrias de espuma distintas, sendo uma retangular e outra perfilada, semelhante a aletas. Destas geometrias, a uniforme apresenta-se como geometria comumente estudada por inúmeras outras pesquisas, enquanto a perfilada mostra-se como uma opção de geometria híbrida, entre o uso de aletas e espuma metálica. Portanto, através da geometria híbrida espera-se que seja possível aumentar a transferência de calor por condução, sem que ocorra redução significativa da transferência de calor por convecção natural. Com este intuito, diferentes ensaios experimentais foram planejados, contemplando, além da modificação geométrica, a variação do fluxo de calor assim como a alteração da inclinação do reservatório, sendo esta similar a inclinação de um módulo fotovoltaico. Desta forma, esta pesquisa possui o objetivo de analisar o aprimoramento térmico das diferentes geometrias da espuma metálica, conjuntamente com o uso de bioPCM, possibilitando a obtenção de valiosas percepções sobre a aplicabilidade da espuma perfilada, enquanto alternativa para o aprimoramento dos processos de fusão e solidificação de bioPCM.

1.1 Objetivos

Os objetivos, geral e específicos desta pesquisa são apresentados na sequência.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar experimentalmente a influência da utilização de espuma metálica nos processos de fusão e solidificação de bioPCM contido em um reservatório de geometria retangular.

1.1.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente trabalho:

- a) analisar os diferentes mecanismos de transferência de calor no bioPCM sob influência de espuma metálica de geometrias distintas;
- b) verificar a ocorrência de intensificação dos processos térmicos do bioPCM (fusão e solidificação) com a presença de espuma metálica;
- c) analisar como a geometria da espuma metálica influencia os processos térmicos de fusão e solidificação;
- d) investigar o comportamento dos campos de fração de líquido e a resposta térmica do bioPCM ao longo do tempo, considerando a influência das diferentes configurações geométricas de espuma metálica, fluxo de calor e inclinação do reservatório.

1.2 Estrutura do trabalho

A apresentação desta pesquisa foi dividida em 5 capítulos, no qual, no capítulo 1, realiza-se uma breve introdução sobre o tema de pesquisa e seus objetivos. O capítulo 2 trata da fundamentação teórica com enfoque em Materiais de Mudança de Fase e Espumas Metálicas. Na sequência, apresenta-se a metodologia desenvolvida para a execução do experimento no capítulo 3, com detalhamento da sua estruturação e execução. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 4, os quais resultaram nas conclusões expostas no capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica apresenta os principais conceitos sobre armazenamento de energia, materiais de mudança de fase e espumas metálicas, utilizados para auxílio no desenvolvimento e entendimento da metodologia empregada neste experimento. Para tal, diversas publicações desenvolvidas nas últimas décadas foram analisadas, contribuindo para a estruturação deste trabalho.

2.1 Armazenamento de energia

O armazenamento de energia térmica pode ser realizado através da mudança da energia interna de um material. Esta mudança pode ocorrer através do calor sensível, calor latente e termoquímico. Deste modo, o armazenamento de energia térmica, *TES* (*Thermal Energy Storage*), pode ser classificado em armazenamento de calor sensível, *SHS* (*Sensible Heat Storage*), armazenamento de calor latente, *LHTES* (*Latente Heat Thermal Energy Storage*) e armazenamento termoquímico, *TCHS* (*Thermochemical Heat Storage*).

2.1.1 Armazenamento de energia através do calor termoquímico

O armazenamento de energia proveniente do calor termoquímico ocorre por meio da absorção ou liberação de energia durante a ocorrência de reação química reversível. Este depende do calor endotérmico da reação, da quantidade de material armazenado e extensão da conversão (Sharma et al., 2009). Deste modo, pode ser obtida conforme Eq. 2.1.

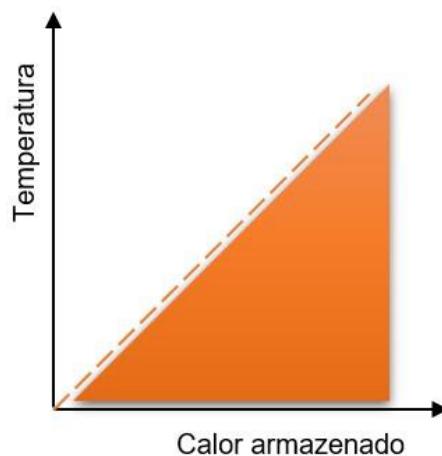
$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (2.1)$$

onde Q equivale a quantidade de calor armazenado, a_r a fração de material que reagiu, m a massa do meio de armazenamento e h_r ao calor endotérmico da reação. Este tipo de armazenamento possui maior densidade de absorção comparado ao armazenamento oriundo do calor sensível e latente. No entanto, apresenta restrição quanto ao uso em ciclos repetitivos (Abdellatif et al., 2025).

2.1.2 Armazenamento de energia através do calor sensível

O armazenamento de energia através do calor sensível ocorre com o aumento contínuo da temperatura de um sólido ou de um líquido, sem que ocorra mudança de fase, conforme representado na Figura 2.1. Nesta, a linha tracejada representa o aumento da temperatura e a área abaixo desta linha representa a quantidade de calor armazenado.

Figura 2.1 - Armazenamento de energia através de calor sensível.



Fonte: adaptado de Gracia e Cabeza (2015).

A quantidade de calor armazenado depende do calor específico, da variação de temperatura e da quantidade de material armazenado e pode ser obtida conforme Eq. 2.2 (Sharma et al., 2009).

$$Q = \int_{T_l}^{T_f} mc_p dT \quad (2.2)$$

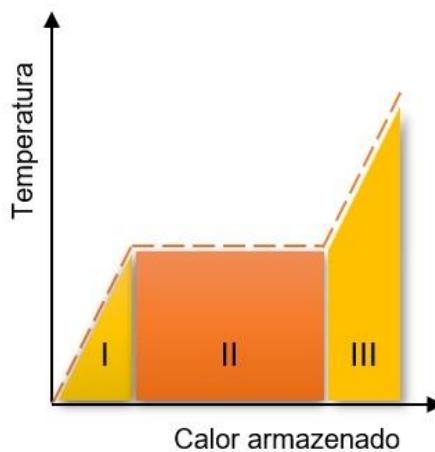
sendo c_p o calor específico e T a temperatura. Os sistemas de armazenamento de energia baseados em calor sensível apresentam ciclos de carga e descarga reversíveis. No entanto, necessitam de maior espaço de armazenamento comparado ao calor latente (Mitali; Dhinakaran; Mohamad, 2022).

2.1.3 Armazenamento de energia através do calor latente

O armazenamento de energia através do calor latente ocorre essencialmente por meio da absorção de calor durante a passagem do material do estado sólido para o líquido. No processo reverso, ocorre liberação de calor durante a passagem do

material do estado líquido para o sólido. Este processo de armazenamento está representado na Figura 2.2, onde a região I representa o estado sólido do material, região II a zona de mudança de fase e região III o estado líquido do material. O armazenamento mediante calor latente possibilita maior capacidade de armazenamento comparado ao calor sensível, sendo esse em temperatura aproximadamente constante, ou seja, na temperatura em que ocorre a mudança de fase do material (Sharma et al., 2009; Zhou; Zhao; Tian, 2012). Durante a transição de fase o material apresenta fisicamente uma região semissólida, designada como zona mole (*Mushy Zone*) (Ezzat; Sakr; Abdel-Rehim, 2023).

Figura 2.2 - Armazenamento de energia através do calor latente.



Fonte: adaptado de De Gracia e Cabeza (2015).

A quantidade de calor armazenado pode ser obtida conforme Eq. 2.3.

$$Q = \int_{T_l}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT \quad (2.3)$$

onde a_m representa a fração fundida do material e Δh_m a entalpia de fusão do mesmo. Nesta equação há três termos, retratados pelas regiões I, II e III da Figura 2.2. O primeiro e o terceiro termos da equação são referentes ao calor sensível, nos estados sólido e líquido, respectivamente, equivalentes às regiões I e III da figura, enquanto o segundo termo refere-se ao calor latente, região II da figura. Esta sequência deve-se ao fato de que no início do processo o material absorve calor, através de calor sensível até a temperatura de início da mudança de fase. Durante a transição de fase a absorção ocorre por meio do calor latente. Após o processo volta a absorver calor através do calor sensível.

2.2 Material de mudança de fase

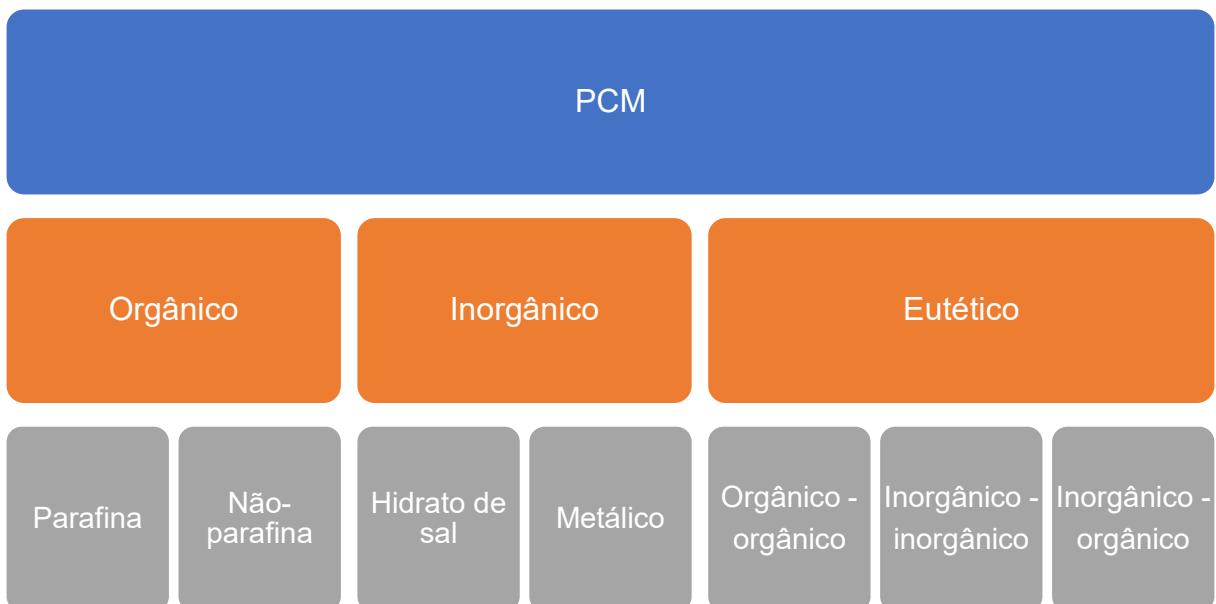
Os materiais de mudança de fase, do inglês *Phase Change Material*, PCM, possuem como característica o armazenamento de energia essencialmente através do calor latente, em temperatura praticamente constante (Lawag; Ali, 2022), conforme apresentado anteriormente na Figura 2.2. Durante o aquecimento, assim que o PCM alcança a temperatura de início da transição de fase, inicia a fusão gradativa do mesmo e, consequentemente, ocorre aumento da absorção de energia térmica. Quando ocorre redução da temperatura, o PCM inicia sua solidificação e consequentemente libera energia térmica.

No desenvolvimento para diferentes aplicações, deseja-se que o PCM apresente elevada estabilidade cíclica ao longo do tempo, o que consiste em baixas alterações de suas propriedades térmicas após elevado número de ciclos térmicos (Zhou; Zhao; Tian, 2012). Além disso, espera-se que possua elevada condutividade térmica, maior calor latente, seja atóxico, não seja corrosivo e também apresente pouca mudança de volume durante a mudança de fase (Tyagi et al., 2022).

2.2.1 Classificação

Os PCM são classificados em três grupos, denominados como orgânico, inorgânico e eutético, conforme sua composição química, contendo subdivisões. A Figura 2.3 apresenta, de forma esquematizada, esta classificação com suas respectivas subdivisões. Conforme apresentado, o PCM orgânico se subdivide em parafina e não-parafina. O inorgânico em hidrato de sal e hidrato metálico. Já o eutético apresenta três subdivisões, denominadas como orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico e inorgânico-orgânico (Irfan Lone; Jilte, 2021).

Figura 2.3 - Classificação dos PCMs quanto à composição química.



Fonte: adaptado de Irfan Lone e Jilte, (2021).

O grupo de PCM orgânico apresenta como vantagem estabilidade química, elevado calor latente de fusão e compatibilidade com diversos materiais. Seu armazenamento de energia ocorre com pouca diferença entre a temperatura de fusão e a temperatura de solidificação (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018). A possível inflamabilidade e a baixa condutividade térmica são apresentadas como algumas das suas desvantagens (Irfan Lone; Jilte, 2021). Na subdivisão dos PCM orgânicos, as parafinas são compostas pela mistura de hidrogênio e moléculas de carbono (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018). Possuem ampla variedade de temperaturas de fusão e apresentam estabilidade química em temperaturas abaixo de 500 °C (Lawag; Ali, 2022), são estáveis fisicamente e não são corrosivos (Irfan Lone; Jilte, 2021). Apresentam também baixa condutividade térmica e baixa inflamabilidade (Rostami et al., 2020). As não-parafinas possuem propriedades termofísicas semelhantes às parafinas, sendo também conhecidas como ácidos graxos, álcoois, ésteres e glicóis (Lawag; Ali, 2022). Apresentam estabilidade química, elevado calor latente de fusão, baixa condutividade térmica, baixo ponto de ignição e inflamabilidade (Rostami et al., 2020). Não são tóxicas, além de possuírem estabilidade cíclica, ou seja, não ocorre degradação de suas propriedades entre os ciclos de carga e descarga (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018).

O grupo de PCM inorgânico, em comparação com os PCM orgânicos, possuem maior condutividade térmica e pouca alteração volumétrica, além de elevado calor

latente de fusão, menor inflamabilidade e sub-resfriamento. No entanto, apresentam instabilidade térmica e são corrosivos (Akeiber et al., 2016). Na sub-divisão dos PCM inorgânicos, os hidratos de sal apresentam maior condutividade térmica, elevado calor latente de fusão, menor alteração volumétrica durante a mudança de fase e possuem capacidade de não perder calor durante o armazenamento, no entanto, são tóxicos (Lawag; Ali, 2022). Possuem comportamentos distintos durante sua fusão, conhecidos como congruência, semi-congruência e incongruência. Na fusão congruente, o sal anidro está completamente solúvel na água na temperatura de fusão. Com a fusão semicongruente ocorre equilíbrio entre as fases sólida e líquida na temperatura de fusão. Já na fusão incongruente o sal não está completamente solúvel na água na temperatura de fusão (Sharma et al., 2009). Os PCM metálicos, ou hidratos metálicos, se caracterizam por metais de baixo ponto de fusão (Rostami et al., 2020), maior condutividade térmica, baixa pressão de vaporização, elevado calor latente de fusão por unidade de volume e baixo calor específico (Sharma et al., 2009).

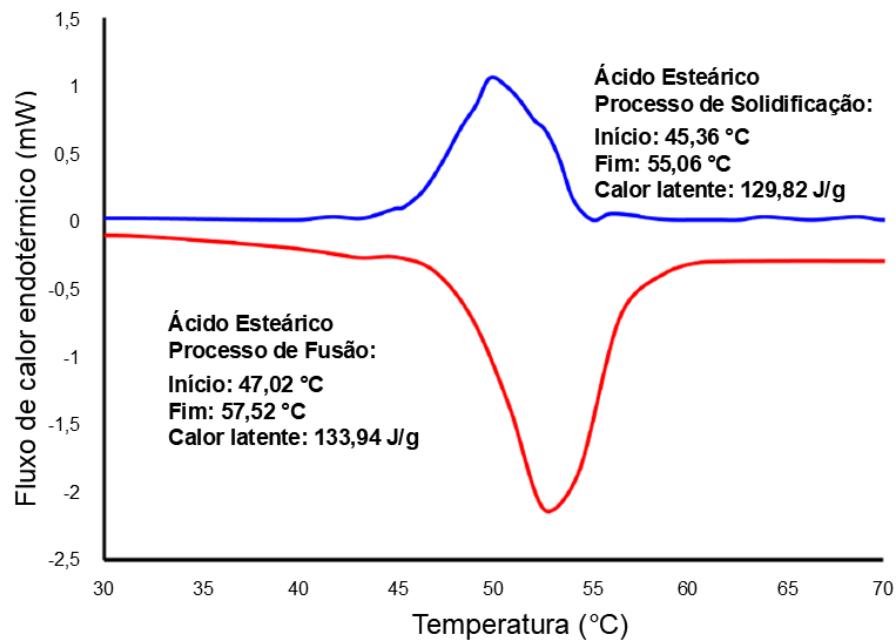
No grupo de PCM eutético, ocorre a combinação de pelo menos dois componentes, caracterizados como orgânico e/ou inorgânico (Lawag; Ali, 2022). Cada componente funde e solidifica de forma congruente, sem que ocorra a formação de um novo composto (Reddy; Mudgal; Mallick, 2018). Estes possuem elevado calor latente e elevado ponto de fusão (Jaguemont et al., 2018).

Os PCM também podem ser classificados com base na temperatura de mudança de fase, sendo divididos em baixa, média e elevada temperatura (Lawag; Ali, 2022). Quando a mudança de fase acontece abaixo de 15 °C, o PCM se classifica como de baixa temperatura. Na mudança de fase entre 15 °C e 90 °C, este se classifica em média temperatura. Quando a temperatura de mudança de fase ultrapassa 90 °C, o PCM passa a ser considerado de elevada temperatura (Pielichowska; Pielichowski, 2014).

Com a finalidade de utilizar-se adequadamente um PCM, torna-se necessária a realização de sua caracterização. Desta forma, pode-se obter propriedades físicas e térmicas, como calor latente, calor específico, condutividade térmica, viscosidade e massa específica. O calor latente e o calor específico possuem relação com a capacidade de armazenamento, e a condutividade térmica influencia a carga e a descarga, ou seja, a fusão e a solidificação. Já a viscosidade e a massa específica são importantes para se determinar o fluxo de fusão e o volume de armazenamento, respectivamente (Tyagi et al., 2022).

Diferentes metodologias são utilizadas para a caracterização de um PCM. Estas são denominadas *Differential Scanning Calorimeter* (Calorimetria de Varredura Diferencial), *DSC*, e *T-History method* (Curva de Temperatura pelo Tempo). Através do *DSC*, pode-se obter o calor específico, a faixa de temperatura de mudança de fase, o calor latente e o grau de subresfriamento. Com o *T-History method* pode-se obter a difusividade térmica, calor específico, faixa de mudança de fase, grau de subresfriamento e calor latente (Tyagi et al., 2022). No ensaio *DSC* ocorre a medição da diferença entre o calor adicionado na amostra de PCM com o calor adicionado no material de referência, ou seja, material cujas propriedades térmicas são conhecidas (Zhou; Zhao; Tian, 2012). Os equipamentos de ensaio *DSC* apresentam os resultados obtidos por meio de termogramas, conforme exemplo exposto na Figura 2.4. Neste exemplo, são visualizadas curvas para o processo de fusão (cor vermelha) e solidificação (cor azul) para o PCM ácido esteárico, com o respectivo valor de calor latente e faixa de temperatura de mudança de fase de cada processo.

Figura 2.4 - Termograma *DSC* para amostra de PCM - ácido esteárico.

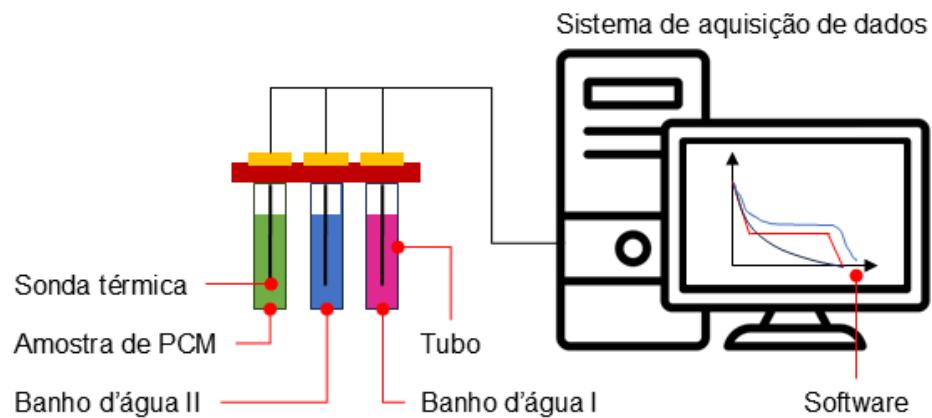


Fonte: adaptado de Masoumi; Haghghi Khoshkhoo e Mirfendereski (2022).

Para realizar o ensaio através do *T-History method*, a amostra de PCM deve ser pré-aquecida juntamente com o material de referência, cujas propriedades são conhecidas, sendo o aquecimento em temperatura acima da temperatura de fusão do PCM. Na Figura 2.5 pode ser verificada a montagem do ensaio, que consiste em dois

banhos d'água, tubos, sondas térmicas e um sistema para registro de dados (Yinping; Yi; Yi, 1999).

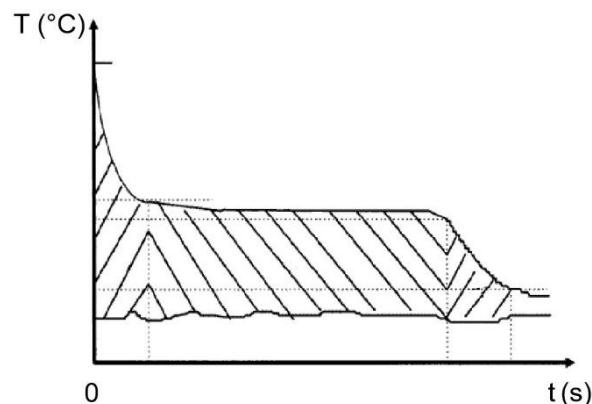
Figura 2.5 - Sistema de ensaio do método da curva de temperatura ou *T-history*.



Fonte: adaptado de Yinping; Yi e Yi (1999).

Após o aquecimento, deve ser aplicada uma mudança de temperatura simultânea nos materiais, expondo-os à temperatura ambiente. Curvas de temperatura pelo tempo, conforme exemplo apresentado na Figura 2.6, são traçadas durante o resfriamento dos materiais e comparadas com curvas de referência (Tyagi et al., 2022). Este método de ensaio permite a análise de amostras maiores comparadas com o método de ensaio *DSC*, porém possui a desvantagem de não ser comercializado, sendo normalmente montado em laboratórios (Solé et al., 2013).

Figura 2.6 - Curva temperatura versus tempo do método *T-history* aplicado à amostra de PCM.



Fonte: adaptado de Yinping; Yi e Yi (1999).

2.2.2 Transferência de calor no PCM

A transferência de energia térmica devido à diferença de temperatura pode ocorrer em PCM pelos mecanismos de condução de calor e convecção natural. O fluxo de calor por condução pode ser obtido através da Lei de Fourier, calculada conforme Eq. 2.4:

$$\ddot{q}_{cond} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.4)$$

onde \ddot{q}_{cond} representa o fluxo de calor por condução, k a condutividade térmica do material, ΔT a diferença de temperatura entre as paredes e L o comprimento do corpo.

Através da Lei de Resfriamento de Newton se pode obter o fluxo de calor por convecção, que pode ser calculado conforme Eq. 2.5:

$$\ddot{q}_{conv} = h(T_s - T_f) \quad (2.5)$$

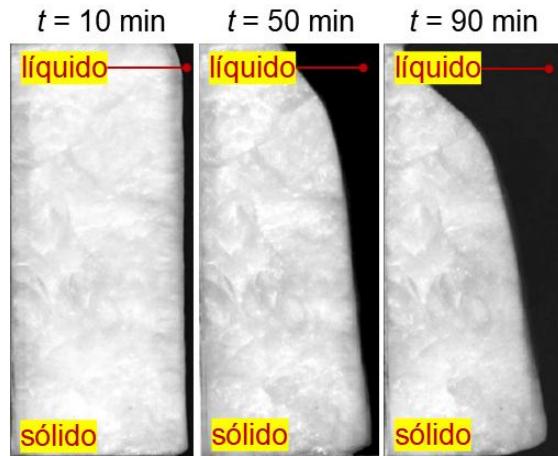
sendo \ddot{q}_{conv} o fluxo de calor por convecção, h o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s temperatura da superfície e T_f temperatura do fluido.

2.2.3 Processo de fusão

Durante o processo de fusão de um PCM em reservatórios de diferentes geometrias, a transferência de calor apresenta comportamento similar, em que pequenas diferenças podem ser verificadas devido às diferentes regiões que possam estar em aquecimento. De forma geral, a transferência de calor ocorre pela condução de calor e pela convecção natural (Hekmat et al., 2022), sendo nos instantes iniciais a mesma predominantemente condutiva, pelo fato da força viscosa ser maior do que a força de empuxo. Com o decorrer do tempo, a força de empuxo torna-se maior do que a força viscosa, iniciando-se a convecção natural na região fundida (Shokouhmand; Kamkari, 2013). A Figura 2.7 apresenta o processo de fusão para um reservatório retangular em diferentes instantes de tempo, cujas paredes inferior, superior e lateral esquerda são isoladas termicamente e a parede lateral direita está sob aquecimento. Percebe-se que no instante $t = 10$ min existe uma fina camada de PCM fundido junto à parede aquecida, o que caracteriza o processo predominantemente condutivo. Nos instantes $t = 50$ min e 90 min, percebe-se aumento

da camada fundida e erosão da parte superior da interface sólido-líquido, bem como inclinação gradativa da frente de fusão. Este comportamento caracteriza a predominância da convecção natural, visto que ocorre a formação de correntes circulantes ascendentes junto à parede aquecida e descendentes junto à interface sólido-líquido.

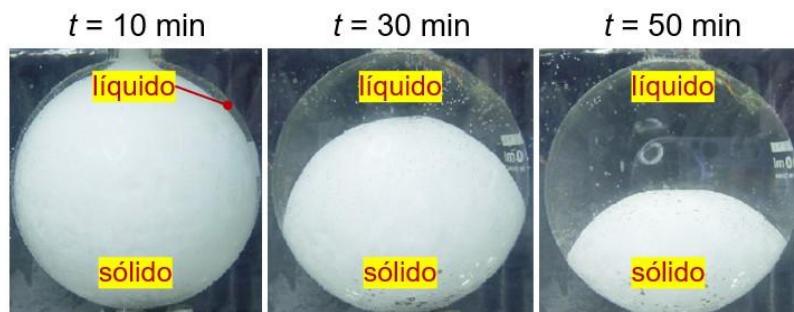
Figura 2.7 - Processo de fusão de PCM em cavidade retangular.



Fonte: adaptado de Shokouhmand e Kamkari (2013).

A Figura 2.8 apresenta o processo de fusão para um reservatório esférico, exposto a aquecimento uniforme na parede externa. Percebe-se que o comportamento dos mecanismos de transferência de calor apresenta semelhança ao reservatório retangular, ou seja, com condução de calor, instante $t = 10$ min, e convecção natural, instantes $t = 30$ min e 50 min.

Figura 2.8 - Processo de fusão de PCM em esfera.

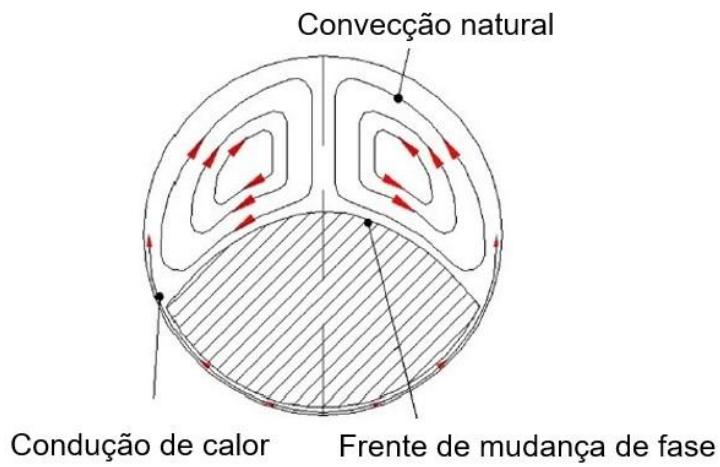


Fonte: adaptado de Tan (2008).

Conforme pode ser verificado na Figura 2.9, a primeira diferença entre os reservatórios citados está na forma da interface sólido-líquido, com corrente ascendente de PCM fundido junto à superfície com maior temperatura e corrente

descendente na interface sólido-líquido, sendo simétrica para a geometria esférica. A segunda diferença está na parte inferior do reservatório, onde se percebe a formação de uma fina película de PCM fundido, também conhecida como fusão de contato, do inglês *close contact melting*. Esta fusão ocorre devido ao mecanismo de condução de calor, entre o PCM sólido descendente e a superfície do reservatório que está sob aquecimento (Hu et al., 2022; Moallemi; Webb; Viskanta, 1986).

Figura 2.9 - Fusão de contato em PCM fundido em esfera.



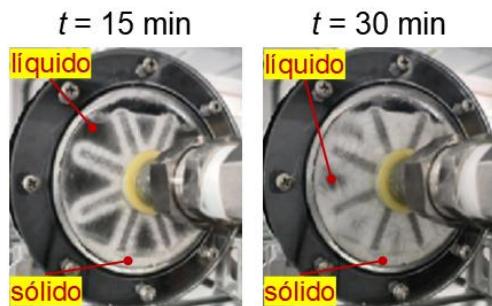
Fonte: adaptado de Tan (2008).

2.2.4 Processo de solidificação

No processo de solidificação de um PCM, este encontra-se inicialmente no estado líquido e passa a solidificar à medida que libera calor. Comparado ao processo de fusão, a transferência de calor apresenta diferença relevante. Neste caso, a mesma ocorre predominantemente por condução de calor, pelo fato deste processo apresentar menor gradiente de temperatura entre o PCM fundido e o PCM já solidificado, eliminando consequentemente as correntes convectivas (Masoumi; Haghghi khoshkhoo; Mirfendereski, 2022). Além disso, este comportamento também está relacionado ao aumento da viscosidade do mesmo com a redução contínua da sua temperatura, além do fato de a massa específica ser maior no estado sólido, o que também inibe a ocorrência das correntes convectivas. Deste modo, com o aumento da quantidade de PCM solidificado, a resistência térmica aumenta, o que reduz o gradiente térmico, ocasionando velocidades de convecção baixas e, consequentemente, transferência de calor por convecção desprezível (Mallya; Haussener, 2021). Como exemplo, na Figura 2.10 são expostas imagens do processo

de solidificação de um PCM em um trocador de calor com aletas utilizado como unidade de armazenamento de energia térmica, nos instantes $t = 15$ min e $t = 30$ min. Através das imagens nota-se que a frente de solidificação, diferentemente do processo de fusão, ocorre homogeneousmente, o que contribui para evidenciar a ausência de correntes convectivas, justificando a transferência de calor por condução.

Figura 2.10 - Processo de solidificação de PCM em um trocador de calor.



Fonte: adaptado de Zhang et al. (2025).

2.2.5 Aprimoramento da transferência de calor

Conforme apresentado anteriormente, os PCM apresentam baixa condutividade térmica, o que provoca aumento do período de carga e descarga (Zhou; Zhao; Tian, 2012) e limita seu uso efetivo em sistemas térmicos (Ismail et al., 2022). Desta forma, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de se desenvolverem técnicas de aprimoramento da transferência de calor, como a inserção de aletas e adição de nanopartículas (Hekmat et al., 2022).

Na inserção de aletas, pode-se citar o estudo numérico e experimental desenvolvido por Zhang; Sun e Chen (2020). Neste, os autores estudaram o comportamento do processo de solidificação de PCM em uma unidade de armazenamento cilíndrica, com aletas dispostas radialmente. Como resultado, os autores concluíram que o número de aletas e suas larguras possuem menor influência no processo de descarga em relação aos seus comprimentos. Em outro estudo, Oliveski et al. (2021) analisaram numericamente o processo de fusão de um PCM em um reservatório, sob influência de uma aleta horizontal. Os autores investigaram a influência que alterações da razão de aspecto da aleta causam no processo térmico. Os resultados mostraram que o tempo total do processo de fusão reduziu através de sucessivas reduções da razão de aspecto. Spengler et al. (2022) estudaram numericamente aletas posicionadas horizontalmente e verticalmente em uma

cavidade anular, submetidas a diferentes razões de aspecto e razões de área, para o processo de fusão de PCM. Os autores verificaram que o tempo total do processo de fusão foi menor para as aletas posicionadas verticalmente em todas as razões de área. Outro estudo importante foi desenvolvido por Qasim et al. (2020), que analisaram experimentalmente o efeito da inserção de diferentes quantidades de aletas em um módulo fotovoltaico contendo PCM. Entre os resultados obtidos, se pode destacar o aumento da potência dos painéis, além da melhora da eficiência da conversão elétrica, se comparado ao painel contendo somente PCM, sendo os melhores resultados obtidos com a configuração contendo maior quantidade de aletas.

Nanopartículas também podem ser utilizadas como técnica de aprimoramento da transferência de calor. Benbrika et al. (2021) estudaram numericamente o processo de carga e descarga de PCM contendo nanopartículas de grafeno em um cilindro de armazenamento de energia. Neste estudo, os autores concluíram que a inclusão das mesmas melhora a transferência de calor e reduz o tempo de solidificação significativamente. No entanto, com o aumento do percentual de dispersão das nanopartículas, o processo de fusão não apresentou melhora significativa. Mayilvelnathan e Valan Arasu (2020) também estudaram o processo de carga e descarga de PCM contendo nanopartículas, porém em um casco e tubo posicionados horizontalmente. Os autores concluíram que ambos os processos apresentaram melhora, sendo essa mais significativa na carga do sistema.

Os empregos simultâneos de múltiplas técnicas de aprimoramento da transferência de calor também são pesquisados. Como exemplo, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Colarossi e Princi (2021), que analisaram experimentalmente um sistema de resfriamento híbrido em um módulo fotovoltaico, utilizando PCM com nanopartículas e aletas. Os autores obtiveram resultados promissores, como a redução da temperatura do painel, além do aumento do rendimento elétrico durante o processo de carga. No entanto, o processo de descarga não foi muito efetivo, apresentando superaquecimento e menor eficiência. Arici et al. (2020) estudaram numericamente PCM contendo CuO como nanopartículas em uma cavidade aletada. Através de alterações geométricas das aletas, os autores analisaram o comportamento do processo de fusão e concluíram que esse melhora com a inclusão das técnicas, porém de forma distinta conforme a dimensão da aleta.

A utilização de espumas metálicas cada vez mais está ganhando destaque como técnica de aprimoramento da transferência de calor. Além do aumento da condutividade térmica dos PCM, esta técnica permite maior uniformidade do campo de temperatura. Como exemplo, Hu; Zhu e Gong (2019) desenvolveram um estudo experimental e numérico com *PCM* inserido em espuma metálica de baixa porosidade, com objetivo de analisar o comportamento do campo de temperatura e o processo de fusão. Entre os resultados obtidos pelos autores, ocorreu redução do tempo do processo de fusão, além de maior uniformidade do campo de temperatura do *PCM* com espuma metálica, ao se comparar com o resultado do *PCM* sem espuma metálica. Os autores também concluíram que o aumento da porosidade da espuma provoca aumento do tempo de fusão se comparado à espuma de menor porosidade. Zhang et al. (2022) estudaram experimentalmente diferentes configurações de espumas metálicas em um reservatório contendo *PCM*. Os autores constataram que ocorre maior homogeneização do campo de temperatura através do aumento da razão de enchimento de espuma no reservatório. Estes também concluíram que os menores tempos de processo foram obtidos com a espuma de maior porosidade posicionada próxima da superfície que está sob aquecimento, ou então posicionada na parte superior do reservatório.

2.2.6 Aplicações

Os PCMs podem ser utilizados em inúmeras aplicações. A título de exemplos, podem ser citados sistemas de armazenamento de energia, edificações, controle térmico de baterias, controle da temperatura de microeletrônicos, assim como no corpo humano, logística, entre outros (Irfan Lone; Jilte, 2021; Mehling; Brüttling; Haussmann, 2022).

Como exemplo de utilização em sistemas de armazenamento de energia, tem-se a implementação de *PCM* em sistemas solares. Samuel Hansen et al. (2022) estudaram experimentalmente a aplicação de *PCM* em um sistema de destilação solar, contendo um destilador de bacia inclinado. Neste experimento, o *PCM* foi integrado para que fosse possível ocorrer o processo de destilação no período noturno, através do calor absorvido pelo mesmo durante o período diurno. Em outro experimento, Carmona; Palacio Bastos e García (2021) propuseram uma nova configuração de módulo fotovoltaico, para que fosse possível melhorar a eficiência

deste, através da inserção de PCM. Desta forma, os autores modificaram este módulo, através da inserção de um container contendo PCM e realizaram uma avaliação comparativa do desempenho energético.

Na aplicação voltada para dispositivos eletrônicos, Mozafari; Lee e Mohammadpour (2021) estudaram a utilização de diferentes PCMs como método de gerenciamento térmico passivo. Mais precisamente, os autores compararam o desempenho térmico, através da implementação de um ou mais PCMs simultaneamente em um dissipador de calor aletado, através da aplicação de diferentes fluxos de calor. Entre os resultados obtidos, destaca-se que a utilização se torna viável para sistemas que operam sob elevada temperatura, pois proporciona maior tempo de operação e apresenta menor temperatura de transição.

A aplicação de PCM em baterias se mostra outra aplicação importante, principalmente no controle térmico, devido ao atual desenvolvimento de carros elétricos e híbridos. Conforme apresentado por Jaguemont et al. (2018), através da utilização de PCM se pode melhorar a administração térmica de baterias automotivas e sua durabilidade. No entanto, a maior eficiência está limitada para operações entre 45 °C e 50 °C. Mei et al. (2022) igualmente constataram os benefícios citados anteriormente com a utilização de PCM, porém, também verificaram restrições quanto ao uso em temperaturas maiores do que 60 °C, o que mostra o cenário de possíveis desenvolvimentos nos métodos de gerenciamento térmico.

Em vestuários, a utilização de PCM se torna promissora pelo fato de apresentar a possibilidade de redução do desconforto térmico oriundo de temperaturas elevadas. Li et al. (2022b) propuseram o desenvolvimento de uma roupa de resfriamento contendo PCM, sendo esta analisada sob diferentes aspectos, como peso, que resultará no tempo de resfriamento, além das partes do corpo, devido às diferentes sensações térmicas existentes.

No ramo alimentício, a utilização de PCM na proteção térmica se mostra atrativa. Jafarpour; Fathi e Soltanizadeh (2023) desenvolveram o polietilenoglicol encapsulado como PCM para transporte e armazenamento de pescado perecível. Os autores compararam o tempo de manutenção da baixa temperatura com uma embalagem de controle, cujos resultados apresentaram melhor eficiência para armazenamento, além de não comprometer as propriedades orgânicas do produto.

Em sistemas de refrigeração, Harun-Or-Rashid et al. (2024) analisaram o aumento do desempenho de um refrigerador em que o evaporador e o condensador

estavam envoltos em um PCM. Os autores constataram que houve diminuição da temperatura do condensador, o que provocou redução no consumo de energia, além de maior transferência de calor do refrigerador para o evaporador. Com isso, houve aumento acima de 12% no COP, além do aumento no tempo de inatividade do compressor.

Os PCM também podem ser utilizados como sistema de resfriamento de usinas nucleares, onde Shin et al. (2022) avaliaram a aplicação de um PCM em um edifício de contenção de uma usina. Os autores verificaram que, apesar do PCM possuir limitação quanto à capacidade de absorção de energia térmica, este apresentou melhor desempenho no início da simulação de um acidente, comparado ao sistema de pulverização, possibilitando a integridade do edifício de contenção.

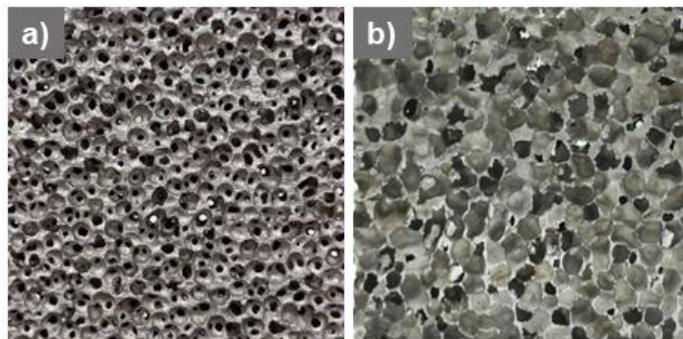
2.3 Espuma metálica

Espuma metálica, do inglês *Metal Foam*, consiste em um material de matriz sólida contendo cavidades, denominadas poros, aleatoriamente interconectadas. Apresentam elevada condutividade térmica assim como razão entre área superficial e volume, além de boa resistência mecânica e baixa massa específica. As espumas possuem estrutura conectiva contínua, desta forma, obtém-se aumento da área de contato entre fluido e metal, possibilitando melhora da transferência de calor (Shi et al., 2023).

2.3.1 Classificação

As espumas metálicas são classificadas quanto ao tipo de célula que possuem, sendo estas denominadas como célula aberta, do inglês *open cell*, ou célula fechada, do inglês *closed cell* (Changdar; Chakraborty, 2021). Na Figura 2.11(a e b) são apresentados exemplos de espumas metálicas de alumínio, sendo a Figura 2.11(a) a representação de uma espuma de célula aberta e a Figura 2.11(b) a representação com célula fechada. No entanto, as espumas que possuem células abertas também são classificadas com base na porosidade, denominadas como de alta e baixa porosidade. Quando esta for superior a 85%, será classificada como alta porosidade, porém, quando esta for inferior a 85% e superior a 50%, será classificada como baixa porosidade (Zhu et al., 2020).

Figura 2.11 - Espuma metálica: a) célula aberta e b) célula fechada.



Fonte: adaptado de Beihai Composite (2022).

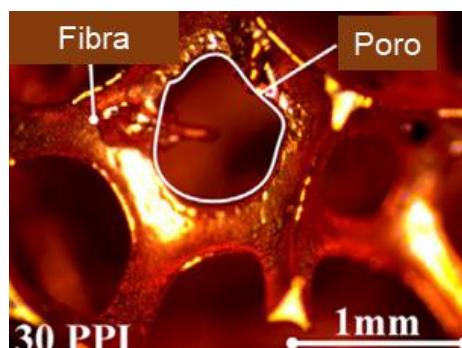
2.3.2 Porosidade

A porosidade, ε , pode ser caracterizada por meio a massa específica aparente da espuma metálica ($m_F V_F^{-1}$) e a massa específica do material (ρ_m), relacionando, desta forma, o volume de poros e o volume total da espuma metálica. Portanto, a porosidade pode ser determinada conforme a Eq. 2.6, extraída do trabalho de Wang et al., 2016.

$$\varepsilon(\%) = \left(1 - \frac{m_F}{\rho_m V_F}\right) \times 100 \quad (2.6)$$

sendo m_F a massa da espuma metálica e V_F seu volume. Quando a porosidade apresenta valores elevados, seus poros são maiores e os ligamentos finos, o que melhora a permeabilidade. Porém, quando apresenta valores baixos, as propriedades mecânicas são melhores (Zhu et al., 2020). Na Figura 2.12 tem-se destacada a representação de um poro e da fibra de uma espuma metálica, sendo essa a ligação entre os diferentes poros.

Figura 2.12 – Representação do poro e da fibra de uma espuma metálica.

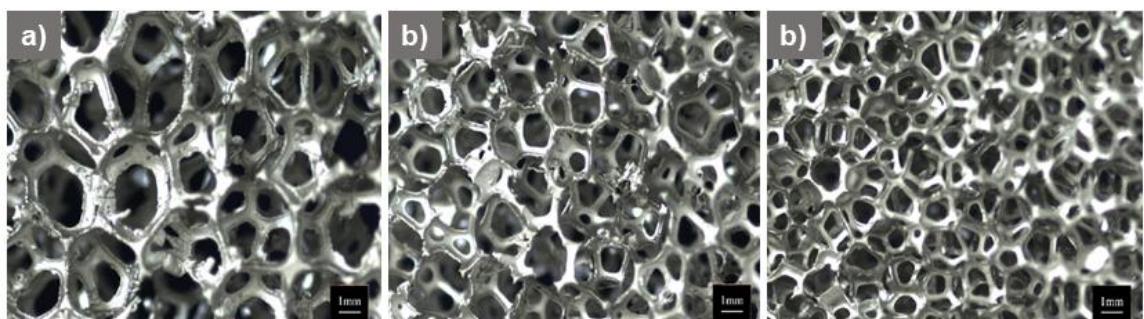


Fonte: adaptado de Shang et al. (2018).

2.3.3 Densidade de poro

A caracterização da densidade de poro ocorre pelo número médio de poros por comprimento, sendo representada por ω , com especificação feita através de PPI, poros por polegada. Na Figura 2.13(a-c) tem-se a representação de espumas metálicas de níquel com porosidade similar e diferentes densidades de poros. A Figura 2.13(a) apresenta uma densidade de poro de 5 PPI, Figura 2.13(b) uma densidade de 10 PPI e Figura 2.13(c) 25 PPI. Através destas, pode ser verificado que quanto maior a densidade de poro, menor passa a ser o tamanho do mesmo, além de resultar em ligamentos mais finos (Aramesh; Shabani, 2022).

Figura 2.13 – Diferentes densidades de poro: a) 5 PPI, b) 10 PPI e c) 25 PPI.



Fonte: adaptado de Xiao; Zhang e Li (2013).

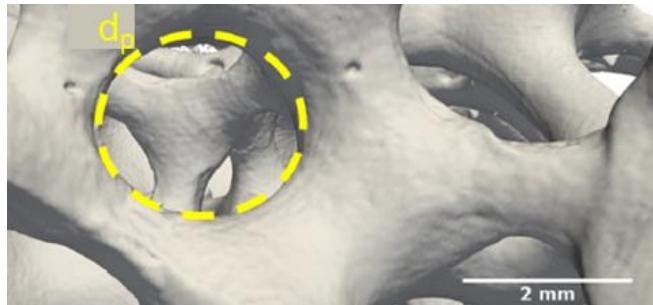
2.3.4 Tamanho de poro

O tamanho de poro também conhecido como seu diâmetro, possui relação inversa à densidade de poro (Zhao et al., 2020), obtido através da Eq. 2.7:

$$d_p = \frac{0,0254}{\omega} \quad (2.7)$$

sendo d_p o diâmetro do poro. Na Figura 2.14 está representado o dimensionamento do diâmetro médio de um poro, de uma espuma de níquel, obtida através de um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 2.14 - Tamanho de poro de espuma metálica.



Fonte: adaptado de Mirdrikvand et al. (2020).

2.3.5 Condutividade térmica efetiva

Espumas metálicas são constituídas de diferentes porosidades e densidades de poro, características morfológicas que influenciam no seu comportamento térmico. Estas também apresentam elevada condutividade térmica, o que proporciona maior transferência de calor através de seus ligamentos, por intermédio de condução de calor, sendo este mecanismo influenciado pelas propriedades térmicas do material na qual a espuma se constitui. Conforme a aplicação da espuma metálica, ocorre interação entre a mesma e o fluido, em que se tem uma condutividade térmica efetiva, que pode ser estimada através da Lei de Fourier, conforme Eq. 2.8:

$$k_{eff} = \frac{q''_{cond} L}{\Delta T} \quad (2.8)$$

sendo k_{eff} a condutividade térmica efetiva. Esta pode ser obtida através da porosidade e da condutividade térmica de cada substância, conforme modelo proposto por Calmidi e Mahajan (1999) apresentado na Eq. 2.9:

$$k_{eff} = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_f \quad (2.9)$$

sendo k_s a condutividade térmica do sólido, neste caso espuma metálica, e k_f a condutividade térmica do fluido. No entanto, este modelo não considera a estrutura porosa, o que limita sua aplicação (Xu et al., 2019). Devido à restrição exposta, outros modelos para cálculo da k_{eff} foram propostos. Como exemplo, se tem o modelo proposto por Boomsma e Poulikakos (2001), desenvolvido com base em uma célula de espuma com geometria tridimensional. Neste, a k_{eff} pode ser determinada conforme Eq. 2.10.

$$k_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2(R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad (2.10)$$

onde R_A , R_B , R_C e R_D são obtidos através das Eq. 2.11-2.14.

$$R_A = \frac{4r}{[2c^2 + \pi r(1 - c)]k_s + [4 - 2c^2 - \pi r(1 - c)]k_f} \quad (2.11)$$

$$R_B = \frac{(c - 2r)^2}{(c - 2r)c^2 k_s + [2c - 4r - (c - 2r)c^2]k_f} \quad (2.12)$$

$$R_C = \frac{\sqrt{2} - 2c}{\sqrt{2}\pi r^2 k_s + (2 - \sqrt{2}\pi r^2)k_f} \quad (2.13)$$

$$R_D = \frac{2c}{c^2 k_s + (4 - c^2)k_f} \quad (2.14)$$

sendo c o comprimento adimensional do nó cúbico. Conforme Boomsma e Poulikakos (2011), se tem como valor otimizado $c = 0,16$. Por fim, o raio de ligamento da espuma metálica, r , pode ser obtido conforme Eq. 2.15.

$$r = \sqrt{\frac{\sqrt{2} \left(2 - \frac{3\sqrt{2}}{4} c^3 - 2\varepsilon \right)}{\pi(3 - 2\sqrt{2}c - c)}} \quad (2.15)$$

A Eq. 2.13 e Eq. 2.15 foram obtidas através da atualização do modelo apresentado, conforme Boomsma e Poulikakos (2011), assim como o valor de c .

2.3.6 Aplicações

As espumas metálicas podem ser aplicadas em inúmeros casos que necessitem de melhora da transferência de calor. Entre estas, pode-se citar coletores solar, gerador termoelétrico, sistema de armazenamento de energia térmica além de sistemas de refrigeração e células de combustível (Hu; Zhao; Li, 2023).

Como exemplo de aplicação de espuma metálica, se tem a utilização em ebulação em vaso, ou *pool boiling*. Sharifzadeh et al. (2022) pesquisaram o efeito da eletrodeposição em espuma metálica, de célula aberta, com três configurações de densidade de poro e porosidade constantes, sob cinco espessuras distintas em água

deionizada. Entre os resultados obtidos pelos autores, ressalta-se que, comparativamente com a superfície lisa, ocorreu melhora significativa da transferência de calor pela utilização de espuma metálica, em que cada densidade de poro apresentou seus melhores resultados com diferentes espessuras e números de eletrodeposições. Em outro exemplo de aplicação de espuma metálica em *pool boiling*, Manetti et al. (2020) estudaram a utilização destas na superfície aquecida em contato com o fluido sob condições de saturação, para entendimento da dinâmica das bolhas. Com os resultados, os autores concluíram que as espumas podem absorver e distribuir mais efetivamente o fluido, em comparação com a superfície plana, resultando em um maior coeficiente de transferência de calor, além de que o início da ebulação nucleada ocorreu em baixo superaquecimento da superfície.

Quanto à aplicação no controle térmico de sistemas elétricos, Yu et al. (2022) analisaram experimentalmente a inclusão de espuma metálica em um reservatório contendo PCM. No entanto, os autores aplicaram uma compressão direcional na espuma para alterar a estrutura dos poros e, com isso, melhorar a condutividade térmica na direção do fluxo de calor. Os resultados mostraram que a espuma metálica melhora a transferência de calor, reduz a temperatura da superfície em aquecimento e melhora o controle térmico, principalmente após a compressão direcional.

Na aplicação de sistemas de armazenamento térmico, Li et al. (2022c) compararam a utilização de espumas metálicas em relação a aletas, em um casco e tubo contendo PCM. Para tal, os autores utilizaram espumas com diferentes densidades de poros, além de diferentes quantidades de aletas, no entanto, ambas as técnicas contendo o mesmo volume. A inserção de espumas metálicas melhorou o desempenho do sistema e ocorreu aumento da condução de calor e redução da convecção. Desta forma, no início do processo ocorre uma alta densidade de potência e posteriormente esta reduz-se gradualmente. Em outro exemplo desta aplicação, Guo et al. (2021) analisaram experimentalmente a inserção de espuma metálica e aletas em um duplo tubo contendo PCM. Os autores estudaram o sistema contendo espuma, aleta e espuma mais aleta, ou seja, um sistema híbrido. Entre os resultados obtidos pelos autores, se pode destacar que a espuma metálica melhorou a uniformidade do campo de temperatura no sistema de armazenamento.

A utilização de espumas metálicas em sistemas solares apresenta-se como uma aplicação interessante, visto a oportunidade de melhora da condição de operação, através da diminuição da temperatura de trabalho e, consequentemente,

do aumento da eficiência da geração de energia. Como exemplo, Ejaz; Jamil e Ali (2022) analisaram experimentalmente a inserção de espuma metálica em um módulo fotovoltaico contendo PCM. Os autores realizaram o experimento em condição de ambiente externo, onde utilizaram duas espessuras de espumas, para observar a performance em comparação ao painel de referência. Os resultados obtidos mostraram que ocorreu aumento da potência elétrica gerada com a colocação das espumas, além de aumento da eficiência de conversão com a espuma de maior espessura.

Pela fundamentação teórica apresentada, tem-se que, dentre as diferentes formas de armazenamento de energia térmica, o armazenamento através do calor latente é o mais atrativo. Os PCM de base biológica, bioPCM, são materiais derivados de recursos renováveis e ecológicos, da produção do setor agroalimentar e seus subprodutos, incluindo óleo de palma, óleo de coco, dentre outros. No entanto, a baixa condutividade térmica do material de mudança de fase (PCM) resulta em baixa eficiência de armazenamento de calor, limitando sua aplicação em larga escala. Para superar essa limitação, um grande esforço tem sido feito para melhorar a condutividade térmica de PCM, por meio do uso de diferentes técnicas, como o uso de espumas metálicas. As espumas metálicas possuem características distintas, como alta condutividade térmica, grande área de superfície e interconexão estrutural, sendo uma boa escolha para melhorar o desempenho de PCM.

Desta forma, se observou que há possibilidade da realização de uma pesquisa na qual se possa utilizar bioPCM juntamente com espuma metálica, sendo essa com diferentes perfis geométricos. Com isso, espera-se obter diferença nos mecanismos de transferência de calor e, consequentemente, mudança no comportamento do processo térmico de fusão e solidificação.

Portanto, a presente tese tem por objetivo contribuir com o entendimento da influência da inserção da espuma metálica de níquel, sob diferentes configurações geométricas (retangular e perfilada), nos processos térmicos da cera de palma como bioPCM. Para tal, a comparação de campos de fração de líquido associados às diferentes configurações geométricas permite analisar o comportamento dos diferentes mecanismos de transferência de calor no bioPCM (condução de calor e convecção natural).

Ademais, a análise dos perfis de temperatura ao longo do tempo possibilita a avaliação da resposta térmica do bioPCM ao longo dos processos térmicos. Adicionalmente, a avaliação do efeito da inclinação do reservatório permite verificar mudanças na evolução e/ou influência dos processos térmicos. Deste modo, os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento e/ou aprimoramento de sistemas térmicos similares ao analisado.

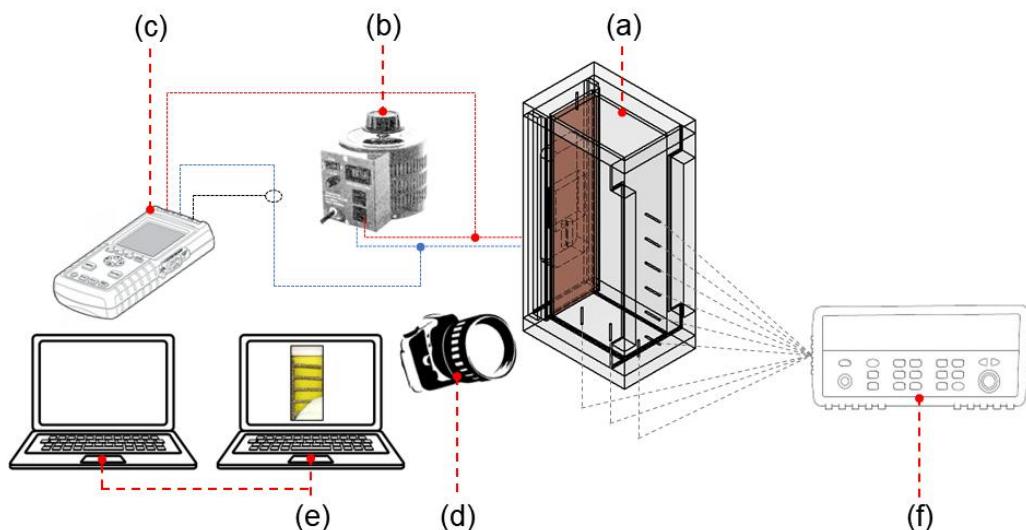
3 METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada na estruturação e execução do experimento, para análise da influência da utilização de espuma metálica de diferentes geometrias em um bioPCM contido em reservatório retangular. Desta forma, são apresentadas as caracterizações do material de mudança de fase, assim como da espuma metálica. Além disso, a instrumentação utilizada e o procedimento de execução dos ensaios são especificados, além do tratamento dos dados.

3.1 Bancada Experimental

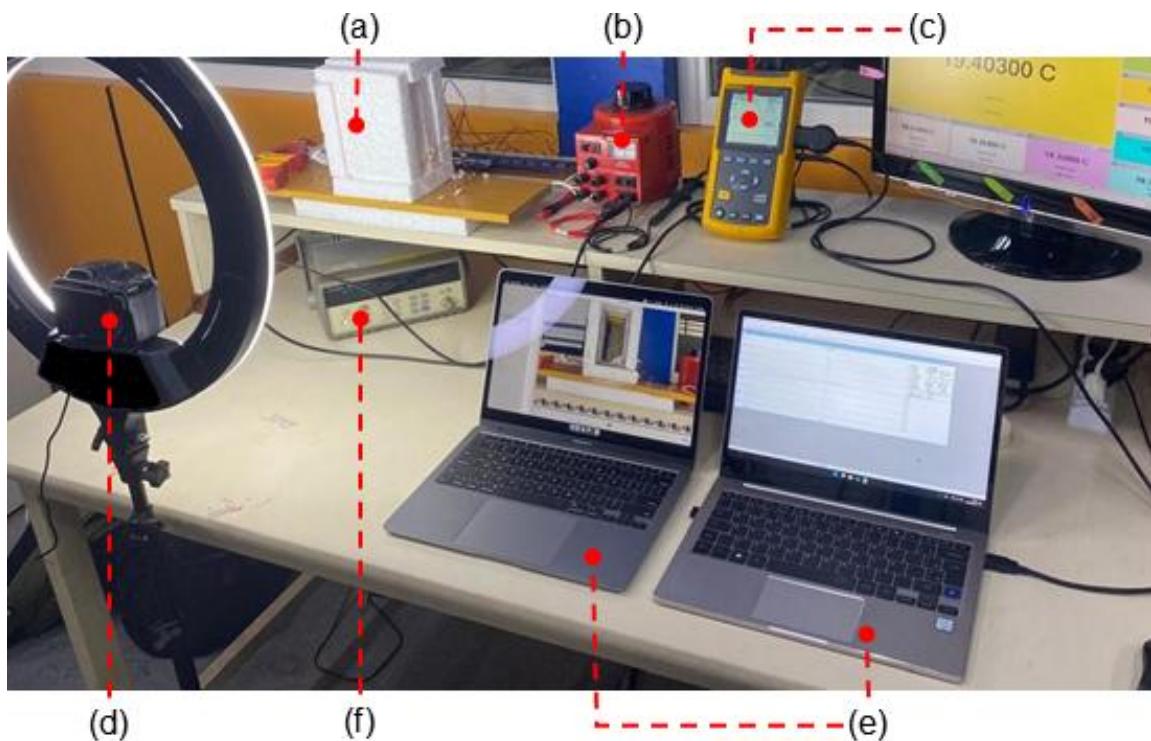
O desenvolvimento do experimento ocorreu através da montagem de uma bancada experimental de análise térmica, conforme esquema apresentado na Figura 3.1. A mesma compreende uma seção de testes (a), para colocação do bioPCM e espuma metálica, uma fonte de alimentação (b), um analisador de qualidade de energia (c), além de um sistema registrador de dados (f). Complementam a bancada, computadores portáteis (e) e uma câmera fotográfica (d). Na Figura 3.2 se tem a apresentação de uma fotografia da instalação da bancada experimental.

Figura 3.1 - Representação esquemática da bancada experimental de análise térmica com sistema de armazenamento de energia.



Fonte: o autor (2025).

Figura 3.2 - Instalação da bancada experimental de análise térmica.



Fonte: o autor (2025).

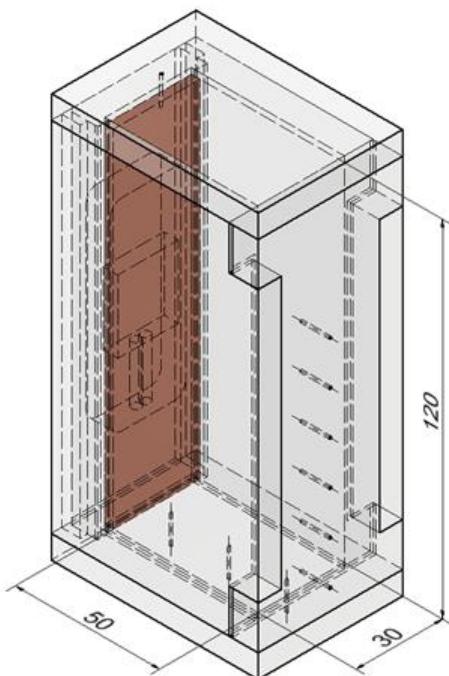
A seção de testes consiste em um reservatório de acrílico que contém uma placa de cobre, denominada “ contato”, uma resistência e sensores de temperatura, isolados termicamente. O princípio de funcionamento consiste na aplicação de potência na resistência por intermédio da fonte de energia. O calor gerado é transferido para o bioPCM e espuma metálica através da placa de cobre. Todos os ensaios foram realizados com temperatura do laboratório entre 20 °C e 21 °C.

3.1.1 Reservatório

O reservatório projetado para o experimento está reproduzido na Figura 3.3 e detalhado no Apêndice A. Chapas de acrílico de 10 mm de espessura e cola de silicone para altas temperaturas foram utilizadas para sua fabricação. Suas dimensões internas correspondem a 120 mm de altura (H), 50 mm de comprimento (L) e 30 mm de largura (W), o que resultou na capacidade volumétrica de 0,18 L. Na superfície interna da lateral esquerda foi adicionado um rebaixo para inserção de uma placa de cobre de dimensões iguais a 120 mm de comprimento, 30 mm de largura e 3 mm de espessura. Um furo de Ø0,9 mm foi adicionado na tampa, para alívio da pressão interna durante a realização dos ensaios, posicionado no centro da largura interna e

distanciado em 1,5 mm da face interna da chapa de cobre. As superfícies externas foram isoladas termicamente com poliestireno expandido de 27 mm de espessura, sendo que no isolamento da lateral esquerda foi adicionado um rebaixo de 10 mm de espessura, preenchido com lã de vidro. Devido à baixa condutividade térmica do isopor e à sua alta espessura, além da espessura do acrílico, assumiu-se perdas térmicas desprezíveis durante os testes.

Figura 3.3 – Reservatório de testes experimentais de chapas de acrílico.

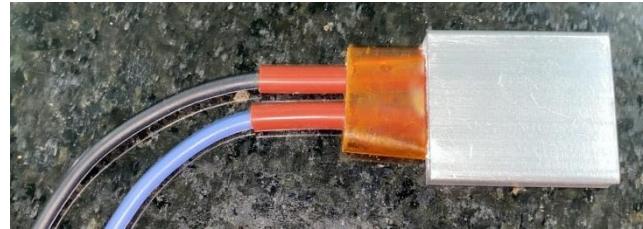


Fonte: o autor (2025).

3.2 Sistema de aquecimento

A Figura 3.4 apresenta o modelo de resistência utilizada neste experimento, do tipo PTC, Coeficiente de Temperatura Positiva, do inglês *Positive Temperature Coefficient*, com resistência de 4 k Ω dimensionada sem a introdução de energia elétrica. Este modelo de resistência aumenta seu valor com o gradativo aumento da temperatura (Iyere; Ozigi; Yeboah, 2020), o que provoca redução no valor da sua corrente elétrica. A resistência foi fixada no centro da placa de cobre, junto da superfície posicionada para o lado externo do reservatório através de adesivo termocondutor, atenuando-se possíveis perdas térmicas ocasionadas pelo efeito de resistência de contato.

Figura 3.4 – Resistência do tipo PTC fixada no reservatório de testes experimentais.



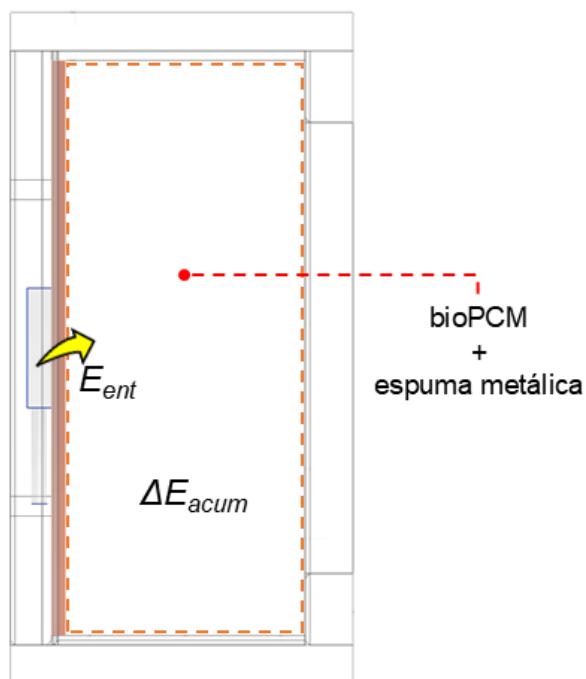
Fonte: o autor (2025).

O aquecimento do sistema ocorreu através do conjunto placa de cobre e resistência, sendo a transferência de calor para o interior do reservatório realizada pelo mecanismo de condução de calor através da placa. Ao realizar um balanço de energia entre o volume de controle, contendo bioPCM com espuma metálica, e a placa de cobre, conforme Eq. 3.1, pode-se obter a quantidade de energia acumulada no mesmo, o que caracteriza a quantidade de energia absorvida pelo bioPCM e a espuma.

$$E_{ent} - E_{sai} + E_g = \Delta E_{acum} \quad (3.1)$$

onde E_{ent} representa a energia que entra no sistema, E_{sai} a energia que sai, E_g a energia gerada e ΔE_{acum} a energia acumulada. A Figura 3.5 destaca o volume de controle referente ao balanço de energia deste experimento.

Figura 3.5 - Volume de controle em torno do bioPCM com espuma metálica.



Fonte: o autor (2025).

No sistema apresentado, a ΔE_{acum} será igual a E_{ent} , sendo a E_g e E_{sai} iguais a zero, por não existir geração de energia no interior do sistema e pelo fato das perdas térmicas serem desprezíveis. Desta forma, conforme expresso na Eq. 3.2, a E_{ent} resulta da condução de calor (q_{cond}), sendo esta correspondente a potência fornecida pela resistência (P_{res}). Consequentemente, ao conduzir o calor gerado pela resistência através da superfície da chapa de cobre, ou seja, por meio da sua seção transversal, obtém-se fluxo de calor (q'') como condição de contorno.

$$E_{ent} = q_{cond} = P_{res} = q'' \quad (3.2)$$

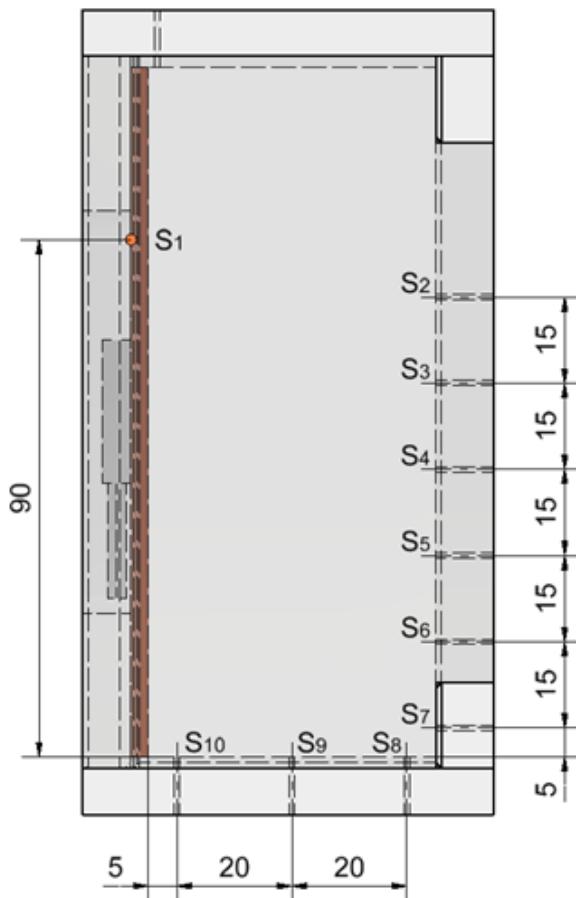
Complementando o sistema de aquecimento, no Apêndice B se tem a exposição de uma análise da fixação dos sensores de temperatura na placa de cobre. Considerando a maior facilidade de fixação e às pequenas diferenças observadas, através das leituras de temperatura, optou-se pela fixação dos termopares com adesivo termocondutor. No Apêndice C se tem a apresentação de uma análise de uniformidade térmica da chapa de cobre. Através desta, foi evidenciado que as dimensões da placa de cobre possibilitam a obtenção de uniformidade térmica na mesma.

3.3 Medição da temperatura

A medição da temperatura ao longo dos ensaios ocorreu através da instalação de 10 sensores de temperatura, termopares do tipo E, constituídos de dois fios de Ø0,25 mm, conectores e cabos de extensão fabricados pela Omega®. Os sensores foram dispostos conforme apresentado na Figura 3.6, centralizados em relação a largura do reservatório. Na lateral direita foram instaladas 6 unidades, sendo o termopar inferior posicionado a 5 mm da base interna e os demais distanciados verticalmente em 15 mm. Na base foram instaladas 3 unidades, sendo o termopar da esquerda posicionado a 5 mm da chapa de cobre e os demais distanciados horizontalmente em 20 mm. Todos os sensores instalados no acrílico foram inseridos em furos de Ø0,9 mm e fixados com cola de silicone para altas temperaturas, enquanto na chapa de cobre a fixação ocorreu com adesivo termocondutor a 90 mm da base. Para não intervir e alterar o comportamento dos mecanismos de transferência de calor durante a fusão e solidificação, optou-se por não inserir termopares na região interna dos reservatórios.

Estes sensores foram conectados a um sistema registrador de dados, da Agilent®, modelo 34.970 A. Durante os ensaios, suas leituras foram gravadas a cada 10 s, o que totalizou 6 registros a cada minuto.

Figura 3.6 – Posicionamento dos sensores de temperatura no reservatório de análise térmica.



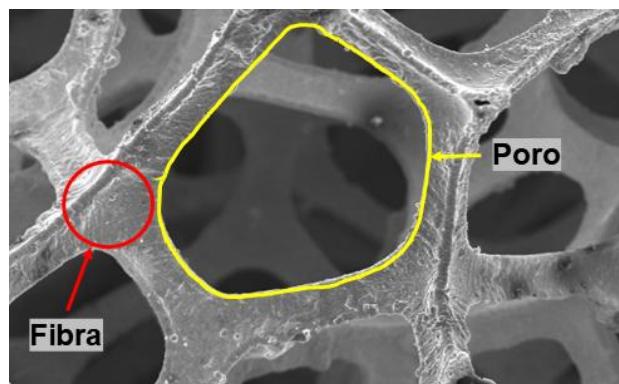
Fonte: o autor (2025).

3.4 Espuma Metálica

Nesta pesquisa foi utilizada espuma metálica de níquel. A mesma foi escolhida por não ser uma alternativa comumente utilizada em conjunto com PCM, mas que pode intensificar a transferência de calor através de um investimento de capital menor, comparado ao cobre e/ou alumínio. Desta forma, torna-se importante a obtenção de informações que possam auxiliar no entendimento do seu comportamento neste tipo de sistema térmico, contribuindo, desta forma, para futuras implementações. A sua estrutura está apresentada na Figura 3.7, obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da ZEISS®, modelo EVO LS15. O referido

equipamento está instalado no Departamento de Física e Química da Universidade Estadual Paulista, UNESP. Por meio da amostra analisada, verifica-se que a espuma possui célula aberta, ressaltada através do contorno de um poro e destacada por uma fibra, responsável pela interligação deste a outros poros.

Figura 3.7 - Estrutura da espuma metálica de níquel utilizada no experimento.



Fonte: o autor (2025).

As propriedades da espuma estão expostas na Tabela 3.1. A densidade de poros (ω) foi determinada por meio de uma imagem da espuma metálica, capturada e calibrada sob dimensões de 25,4 mm por 25,4 mm, ou seja, 1 in por 1 in. Através do software ImageJ® foram traçadas 7 linhas horizontais e 7 linhas verticais na imagem capturada, sendo as quantidades de poros contabilizadas sob cada linha. Posteriormente, foi calculada a média destas quantidades, na qual foi obtida a densidade de $\omega = 20$ PPI. O percentual de porosidade (ε) foi determinado conforme a Eq. 2.7, apresentada anteriormente, onde foi obtida $\varepsilon = 98\%$, enquanto o diâmetro dos poros (d_p) foi determinado conforme Eq. 2.8, através do valor da densidade de poros. A escolha da espuma de alta porosidade ocorreu com o objetivo de aumentar a transferência de calor por condução no bioPCM sem diminuir significativamente a transferência de calor por convecção natural.

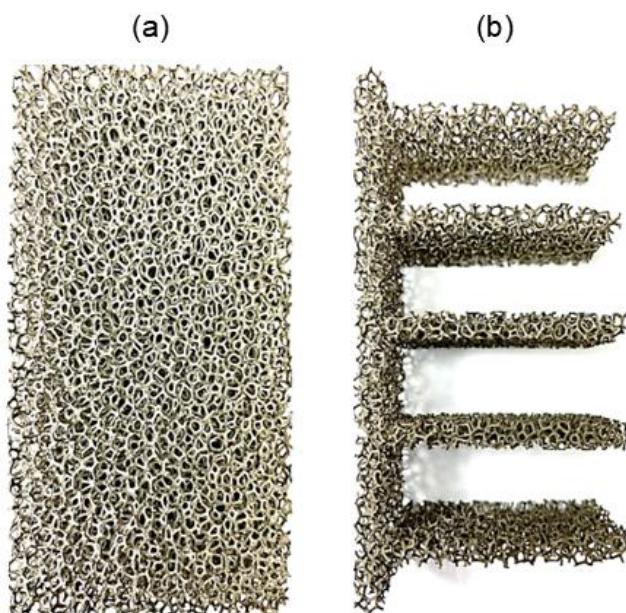
Tabela 3.1 - Propriedades da espuma metálica de níquel.

Propriedade	Valor
Condutividade térmica (27°C) – k_s [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	90,7
Densidade de poros – ω [PPI]	20
Porosidade – ε [%]	98
Diâmetro do poro – d_p [mm]	1,27

Fonte: o autor (2025).

Duas geometrias distintas foram analisadas, em que uma possui geometria retangular, conforme Figura 3.8(a), e a outra, geometria perfilada, conforme Figura 3.8(b). Estas foram obtidas por meio de eletroerosão a fio, processo no qual o corte foi efetuado através de descargas elétricas oriundas do contato do fio com a amostra. Desta forma, não houve deformação na estrutura da espuma metálica. A espuma de geometria retangular possui 100 mm de altura (H), 50 mm de comprimento (L) e 30 mm de largura (W), enquanto a espuma perfilada possui a mesma altura e largura da retangular, porém com 5 perfis de 5 mm de espessura (T_h) distanciados mutuamente em 15 mm a partir do centro da altura. As espumas foram soldadas na chapa de cobre através de estanho, previamente laminado na espessura de 1 mm.

Figura 3.8 - Configurações geométricas de espumas metálicas de níquel: a) inteira e b) perfilada.



Fonte: o autor (2025).

3.5 Material de Mudança de Fase - PCM

O PCM utilizado neste experimento possui a premissa de ser de base biológica, conhecido como bioPCM. No entanto, pelo fato de a seleção deste advir da temperatura na qual ocorre a mudança de fase, optou-se por realizar sua seleção com base em uma aplicação real, neste caso, módulos fotovoltaicos. A escolha desta aplicação real ocorreu pelo fato de o reservatório planejado apresentar aquecimento em uma superfície, de forma similar aos módulos citados. Por este motivo, inicialmente

foi realizado o levantamento das temperaturas ambiente registradas através da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, de Porto Alegre, nomeada como A801 (INMET, 2022). Foram coletados registros para dez anos completos e consecutivos, no intuito de mitigar possíveis erros de medição ou sazonalidade. Posteriormente, estes dados foram organizados por ano e categorizados por mês, em que somente foram analisadas as maiores e menores temperaturas da série histórica, para se utilizar as condições mais críticas. As temperaturas obtidas estão apresentadas no Apêndice D, sendo que a maior temperatura verificada foi de 40,6 °C e a menor de 1,1 °C, encontradas em fevereiro de 2014 e junho de 2012, respectivamente.

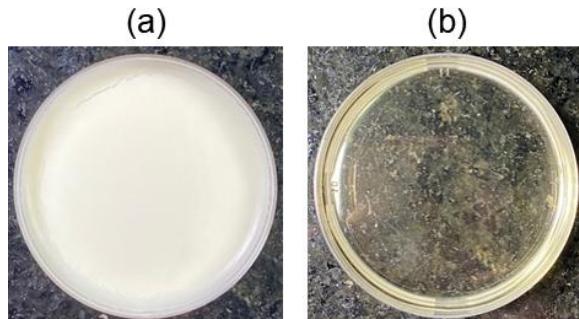
Através das temperaturas compiladas da estação meteorológica, foram estimadas as temperaturas das células fotovoltaicas por meio de um modelo semiempírico proposto por (Skoplaki; Boudouvis; Palyvos, 2008), exposto na Eq. 3.3. O mesmo foi selecionado por relacionar conjuntamente três variáveis ambientais, temperatura ambiente, velocidade do vento e irradiação, de forma simples e direta.

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{0,32}{8,91 + 2v_v} \right) G \quad (3.3)$$

sendo T_{cell} a temperatura calculada para a célula fotovoltaica, T_{amb} a temperatura ambiente, v_v a velocidade do vento e G a irradiação. Ao considerar a pior condição de temperatura, velocidade do vento e irradiação da série histórica, a maior temperatura estimada foi de 62,66 °C, enquanto a menor foi de 43,65 °C.

Mediante a faixa de temperaturas obtida por meio da estimativa de temperaturas das células fotovoltaicas, possíveis materiais de natureza biológica com mudança de fase próxima do intervalo apontado foram pesquisados. Deste modo, entre as opções encontradas como potenciais bioPCM, a cera de palma foi selecionada para a condução desta pesquisa. Esta foi obtida através do fornecedor Catarina Velas e Artesanato®, sendo derivada da fruta *Elaeis Guineensis*, que comprehende ácidos graxos saturados de cadeia longa, o que contribui para que tenha comportamento hidrofóbico (Hafila et al., 2022). No estado sólido, a cera de palma possui cor branca, conforme evidenciado na Figura 3.9(a), enquanto no estado líquido é incolor, conforme Figura 3.9(b).

Figura 3.9 – Aspecto do bioPCM (cera de palma): (a) estado sólido e
(b) estado líquido.



Fonte: o autor (2025).

3.5.1 Análise qualitativa

No intuito de confirmar que a cera de palma provém de material orgânico, amostras foram ensaiadas qualitativamente por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X, modelo 720, fabricado pela empresa Shimadzu®. Através deste ensaio, caracterizaram-se os elementos químicos existentes no material, mediante a leitura dos comprimentos de onda específicos dos mesmos, após a irradiação das amostras (Laboratório LCVMat - Unisinos). Os resultados obtidos não identificaram elementos químicos inorgânicos, evidenciando sua natureza orgânica. Deste modo, após este resultado, diferentes ensaios de caracterização foram conduzidos para obtenção das propriedades termofísicas do bioPCM.

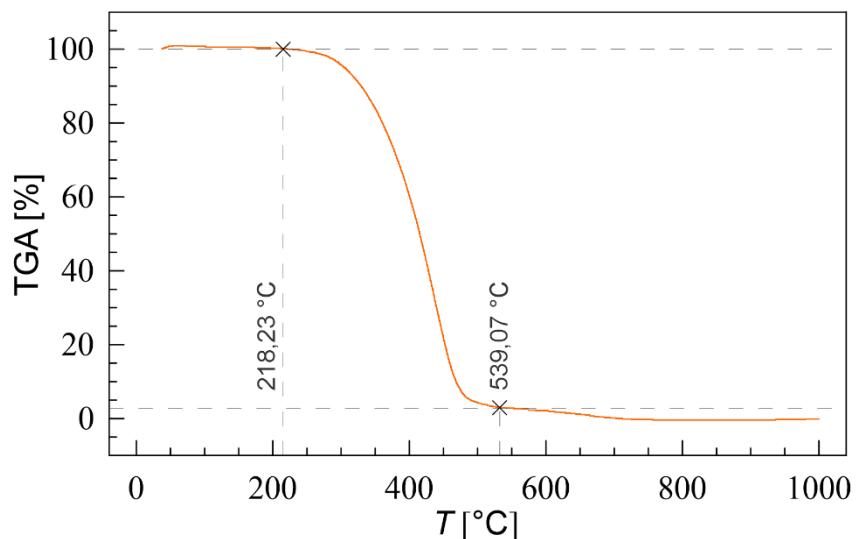
3.5.2 Decomposição térmica

No intuito de avaliar a viabilidade de utilização do bioPCM selecionado em processos térmicos, amostras foram analisadas por meio da “*Thermogravimetric Analysis*” (Análise Termogravimétrica), conhecida como *TGA*. Esta análise consiste em aquecer continuamente a amostra e analisar a razão da sua massa pela massa inicial, em diferentes instantes de tempo. Deste modo, através desta análise, foi gerado o perfil de decomposição térmica do bioPCM, que possibilitou a obtenção da faixa de temperaturas na qual ocorre a sua degradação, ou seja, faixa de temperaturas em que ocorre decréscimo da sua massa. Para tal, foi utilizado um analisador termogravimétrico da Shimadzu®, modelo TGA-51 (Laboratório LabMat – Feevale). Foram analisadas duas amostras de, aproximadamente, 7 mg de bioPCM que foram

submetidas a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, da temperatura ambiente até 1000 °C, sob vazão de gás de 50 mL/min. Uma amostra foi submetida à atmosfera inerte (nitrogênio) e a outra à atmosfera oxidante (ar sintético), com pureza superior a 99,999% com 20,9% de oxigênio.

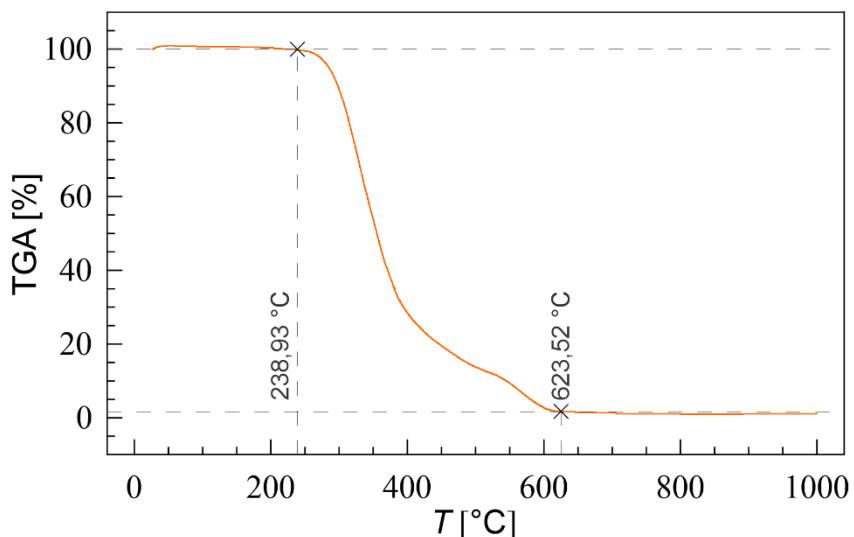
A Figura 3.10 apresenta o perfil de decomposição térmica obtido para a amostra submetida a atmosfera inerte, enquanto a Figura 3.11 apresenta o perfil da amostra submetida à atmosfera oxidante. Através destes, nota-se que o início da decomposição ocorreu em 218,23 °C e 238,93 °C, para atmosferas inerte e oxidante, respectivamente, enquanto o fim ocorreu em 539,07 °C e 623,52 °C, respectivamente. Portanto, estes resultados evidenciaram a viabilidade de utilização do bioPCM selecionado em processos térmicos, porém, com temperatura de operação inferior à temperatura de início da decomposição térmica.

Figura 3.10 – Perfil de decomposição térmica do bioPCM em atmosfera inerte.



Fonte: o autor (2025).

Figura 3.11 - Perfil de decomposição térmica do bioPCM em atmosfera oxidante.



Fonte: o autor (2025).

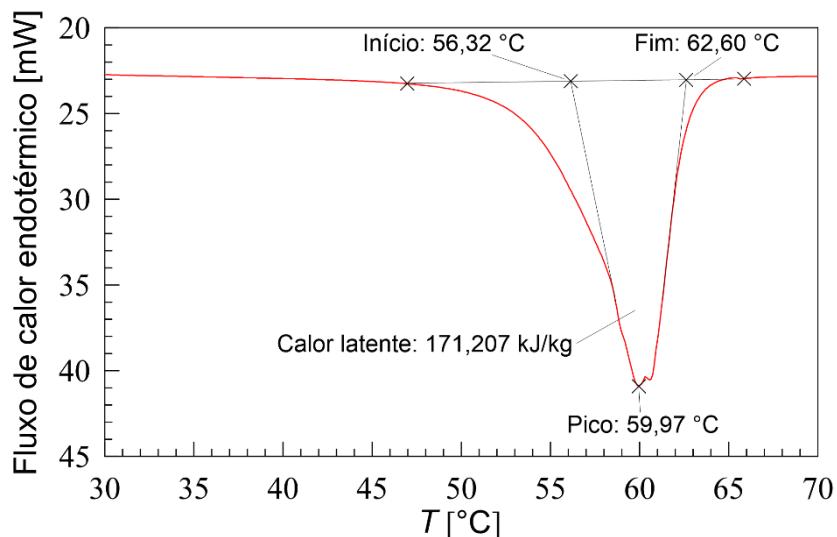
3.5.3 Temperatura de mudança de fase e calor latente

Por intermédio da análise térmica realizada com *Differential Scanning Calorimeter* (Calorímetro de Varredura Diferencial), *DSC*, foram obtidas as faixas de temperatura nas quais ocorrem as mudanças de fase do bioPCM, assim como seu calor latente, para os processos térmicos de fusão e solidificação, respectivamente. Para tal, foi utilizado o analisador térmico da Perkin Elmer®, modelo *DSC 6000* (Laboratório LabMat – Feevale). Este equipamento apresenta precisão de $\pm 2\%$ e $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para desempenho calorimétrico e de temperatura, respectivamente. Para a realização dos ensaios, utilizou-se nitrogênio como gás inerte e cadinho de alumínio. O método de ensaio consistiu no aquecimento e resfriamento da amostra, sob taxa de $5\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, no qual o aquecimento ocorreu de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o resfriamento de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para ambos os processos foi programado um tempo de permanência, sob máxima e mínima temperaturas, de 20 min, com o objetivo de garantir que a temperatura real das amostras igualasse às temperaturas programadas. Como resultado, foram obtidos termogramas para o processo de fusão, detalhados na Figura 3.12, assim como para o processo de solidificação, Figura 3.13. Ambos termogramas foram gerados com sinal de fluxo de calor endotérmico direcionado para baixo.

Através do termograma da Figura 3.12 nota-se que foram obtidas as temperaturas de $56,32\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $62,60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, como balizadoras da faixa na qual ocorreu a mudança de fase, com pico de $59,97\text{ }^{\circ}\text{C}$ e calor latente de

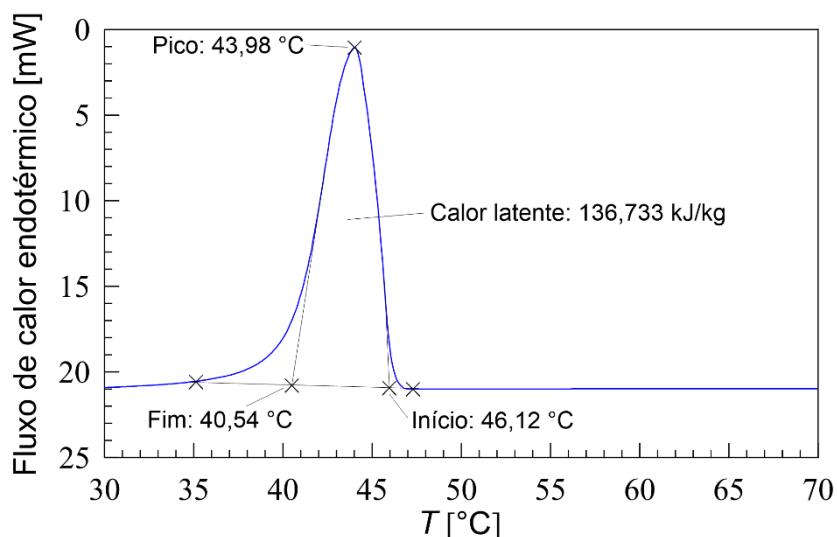
171,207 kJ/kg. Por meio da Figura 3.13 foram obtidas as temperaturas de 46,12 °C e 40,54 °C, respectivamente, para faixa de mudança de fase com pico de 43,98 °C e calor latente de 136,733 kJ/kg. Desta forma, ao analisar as temperaturas apresentadas, este *bioPCM* enquadra-se na classificação de média temperatura.

Figura 3.12 – Termograma de fusão do bioPCM.



Fonte: o autor (2025).

Figura 3.13 - Termograma de solidificação do bioPCM.



Fonte: o autor (2025).

Ao comparar este *bioPCM* com diferentes PCM orgânicos que atualmente são comercializados, evidenciou-se que o mesmo possui potencial de comercialização, pois possui calor latente de fusão superior para faixa de temperatura de mudança de fase similar. Como exemplo, o PCM RT60 apresenta calor latente de 160 kJ/kg, para faixa de temperatura de fusão entre 55 °C e 61 °C (Rubitherm Technologies GmbH,

2020a), enquanto o PCM RT55 apresenta calor latente de 170 kJ/kg, para faixa de fusão um pouco inferior, entre 51°C e 57 °C (Rubitherm Technologies GmbH, 2020b).

3.5.4 Calor específico

Os valores de calor específico (c_p) do bioPCM foram obtidos por intermédio de análise térmica, realizada através de *DSC*. Para tanto, foi utilizado o mesmo equipamento da caracterização da temperatura de mudança de fase e calor latente, aliado ao procedimento estabelecido na norma ASTM E1269 (2011). A norma reportada estabelece como metodologia para obtenção desta propriedade a comparação da curva térmica da mesma com a curva de um material de referência, neste caso, safira sintética (óxido de alumínio ou alumina). Deste modo, os seguintes passos foram empregados sequencialmente:

- Registro da curva térmica do cadiño vazio na faixa de temperaturas de interesse, por meio do emprego da taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹;
- Obtenção da curva térmica do material de referência utilizando o mesmo cadiño da etapa anterior, aplicando a mesma taxa de aquecimento;
- Registro da curva térmica do material de interesse utilizando novamente o mesmo cadiño e a mesma taxa de aquecimento.

Após a obtenção das curvas térmicas, estas foram comparadas e foi realizado o cálculo do cp para a amostra de bioPCM conforme Eq. 3.4.

$$cp_a = cp_p \frac{d_a m_p}{d_p m_a} \quad (3.4)$$

onde cp_a refere-se ao calor específico da amostra, cp_p ao calor específico do material ou padrão de referência, d_a representa o deslocamento vertical entre a curva térmica da amostra e a curva do cadiño vazio, d_p o deslocamento vertical entre a curva do material ou padrão de referência e a curva térmica do cadiño vazio, m_a refere-se a massa da amostra e m_p a massa do material ou padrão de referência. O equipamento utilizado possui em seu pacote de softwares o módulo para efetivação deste cálculo. Deste modo, ao considerar a faixa de temperaturas na qual ocorreu a mudança de fase do bioPCM, foram obtidos os valores de calor específico nos estados sólido e líquido, expostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Calor específico obtido para o bioPCM na faixa de temperatura de mudança de fase.

Propriedade	Sólido	Líquido
Calor específico, cp [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]	2,492	2,689

Fonte: o autor (2025).

3.5.5 Viscosidade

A obtenção da viscosidade (μ) foi realizada com o bioPCM no estado líquido em diferentes temperaturas, através de um viscosímetro da Brookfield®, modelo DV-II+ Pro, provido com fuso SC4-18 para volume de amostra de até 8 mL (Laboratório Polímeros – Unisinos). O mesmo apresenta repetibilidade de $\pm 0,2\%$ da faixa de escala total, além de precisão de $\pm 1\%$ da faixa de fundo de escala. O controle da temperatura ocorreu através da utilização de um banho térmico.

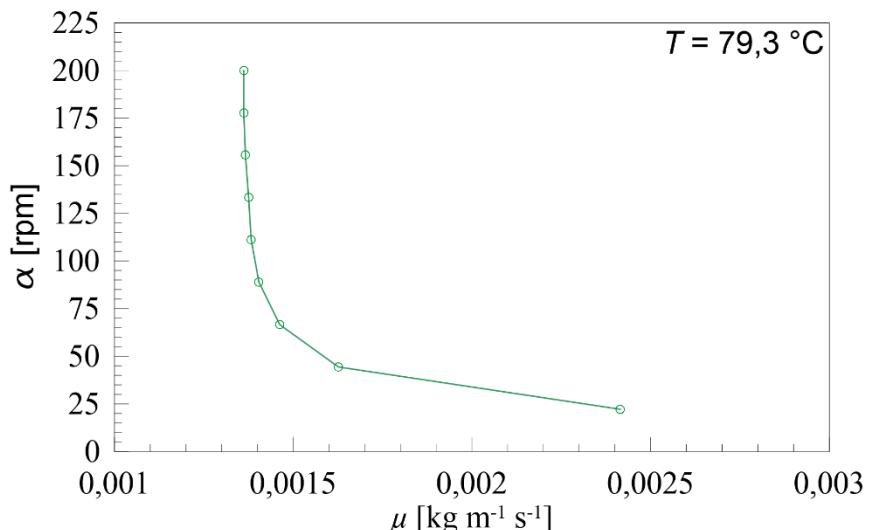
Previamente à realização dos ensaios, foram realizados testes para definição de parâmetros importantes, a fim de obter-se a viscosidade em função da variação da temperatura. Tais parâmetros consistiram em:

- Comportamento da viscosidade em relação à variação da rotação do eixo árvore do viscosímetro, sob temperatura constante;
- Alteração do torque empregado pelo viscosímetro em relação à variação da rotação do eixo árvore do mesmo, também sob temperatura constante.

Deste modo, foi verificado que não ocorreu mudança significativa no valor da viscosidade com o aumento da velocidade do eixo árvore do viscosímetro, conforme exposto na Figura 3.14. Como exemplo, para velocidade angular (α) de 200 rpm foi obtida a viscosidade de 0,001362 kg m⁻¹ s⁻¹, enquanto para 44 rpm foi obtida a viscosidade de 0,001626 kg m⁻¹ s⁻¹, o que representa uma diferença de 0,000264 kg m⁻¹ s⁻¹. A temperatura média do teste foi de 79,3 °C, com uma amplitude de 0,52 °C.

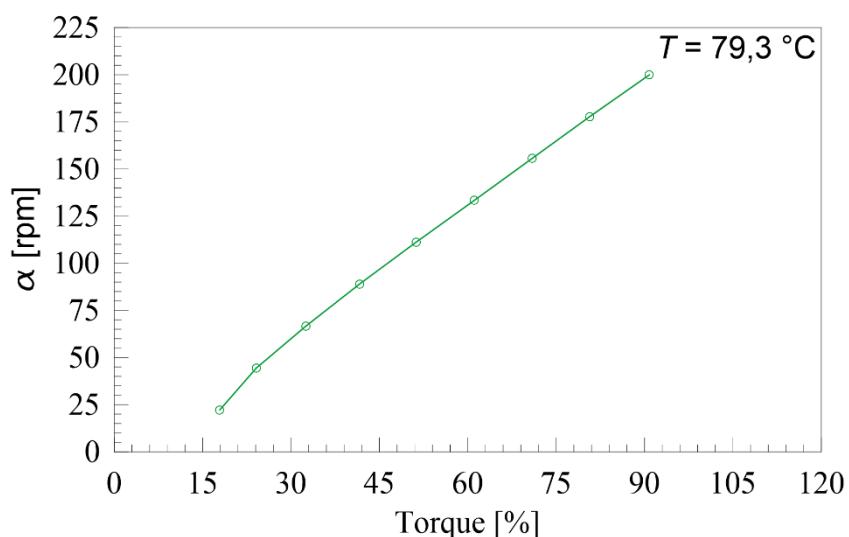
Por intermédio da Figura 3.15 pode-se verificar o comportamento do torque em função do aumento da velocidade. A temperatura média do teste também foi de 79,3 °C, para a mesma amplitude térmica descrita anteriormente. Como exemplo, para velocidade angular de 200 rpm foi obtido um torque próximo de 91 %, enquanto para 44 rpm foi obtido um torque próximo de 24 %.

Figura 3.14 – Teste de viscosidade x velocidade para caracterização do bioPCM.



Fonte: o autor (2025).

Figura 3.15 – Teste torque x velocidade para caracterização do bioPCM.

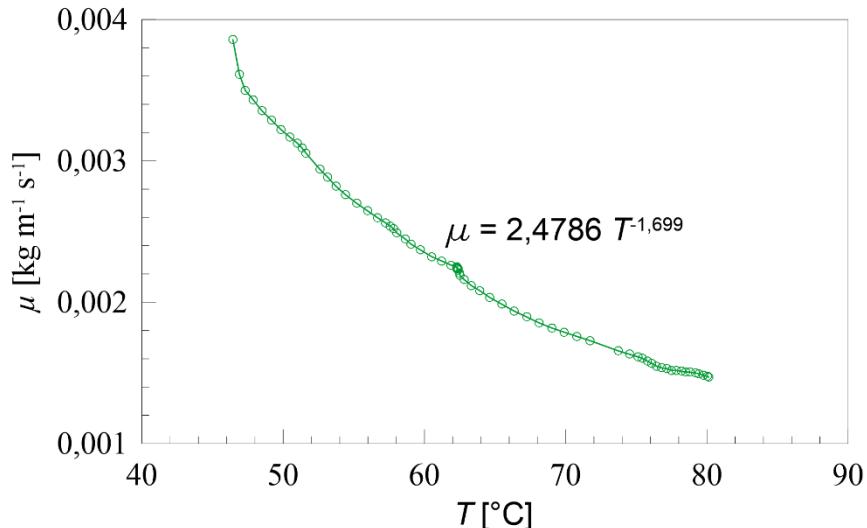


Fonte: o autor (2025).

Ao longo dos testes, foi observado que valores de torque menores a 10% e superiores a 100% apresentaram, em alguns momentos, inconsistências nas leituras de viscosidade. Desta forma, com base nos dados obtidos e apresentados na Figura 3.14 e Figura 3.15, foi definida a velocidade de 50 rpm para realização dos ensaios, o que resultou em torque inicial próximo de 26%. Também foi verificado que, através da redução da temperatura, ocorreu aumento da viscosidade e, consequentemente, aumento do torque. Deste modo, através da velocidade definida, foi reduzida a tendência de erros de leitura observados nos valores de torque previamente citados.

Posteriormente a definição da metodologia, foi realizado o ensaio para o bioPCM deste estudo. A Figura 3.16 apresenta o perfil de viscosidade obtido em relação à variação da temperatura. Através da mesma, nota-se que o bioPCM possui valores de viscosidade acima de $0,001 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e abaixo de $0,004 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, sendo essa ajustada através da equação $\mu = 2,4786 T^{-1,699}$.

Figura 3.16 – Viscosidade em função da temperatura do bioPCM.



Fonte: o autor (2025).

3.5.6 Massa específica

A obtenção da massa específica (ρ), tanto para o estado líquido quanto para o estado sólido, ocorreu de formas distintas. Para o estado líquido, foi utilizada a relação entre massa (m) e volume (V) do bioPCM, conforme Eq. 3.5:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

Desta forma, primeiramente foi realizada a fusão do bioPCM, contido previamente em um recipiente de vidro que estava inserido em outro recipiente contendo água. Esta foi aquecida através de um aquecedor/agitador magnético. A temperatura foi ajustada por meio de um potenciômetro e monitorada através de um termômetro, utilizado com a finalidade de monitorar a temperatura da água e garantir que a temperatura fosse superior à temperatura de mudança de fase do bioPCM. Após a completa fusão do mesmo, este foi inserido em uma proveta de capacidade volumétrica de 10 ml. Por intermédio da proveta preenchida com uma quantidade não

definida de *bioPCM*, foi realizada a leitura do volume ocupado através da visualização do “menisco”. Ao finalizar esta etapa, o *bioPCM* solidificou sob temperatura ambiente. Após a completa solidificação, o mesmo foi pesado juntamente com a proveta, em uma balança analítica. A massa da proveta, obtida preliminarmente à caracterização, foi subtraída da massa total, o que resultou no valor da massa do *bioPCM*. Desta forma, no estado líquido foi obtido o valor de massa específica de 945 kg m^{-3} .

No estado sólido, a propriedade requerida foi obtida por meio de um picnômetro da Micromeritics®, modelo AccuPyc II 1340 (Laboratório LCVMat – Unisinos). Este equipamento utiliza hélio como gás inerte, sob pressão aproximada de 19,7 psi e temperatura de trabalho entre 15 °C e 35 °C. O mesmo apresenta reprodutibilidade de $\pm 0,02\%$ em amostras limpas e secas, além de precisão de $\pm 0,06\%$. Deste modo, no estado sólido foi obtido o valor de massa específica de 993 kg m^{-3} . Para facilitar a visualização dos resultados obtidos em ambos os estados físicos, estes também foram expressos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Massa específica do *bioPCM*.

Propriedade	Sólido	Líquido
Massa específica, $\rho [\text{kg m}^{-3}]$	993	945

Fonte: o autor (2025).

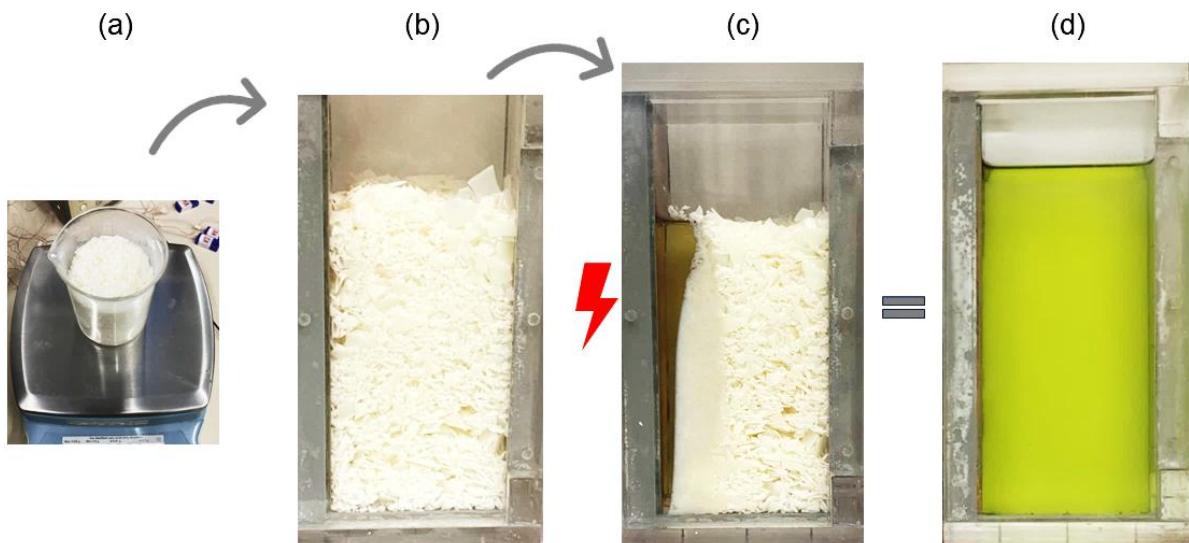
3.5.7 Condutividade térmica

A caracterização da condutividade térmica (k) foi realizada por meio de um medidor de fluxo de calor, modelo F200HT da Laser Comp®. O equipamento encontra-se instalado no Laboratório Multiusuário de Análise Térmica (Laboratório LAMAT – UFRGS). Este possui precisão de $\pm 1\%$ e reprodutibilidade de $\pm 0,5\%$. O funcionamento consiste em submeter a amostra, com dimensões aproximadas de 200 mm de largura, 200 mm de comprimento e 25,4 mm de espessura, a um diferencial de temperatura, o que resulta em um fluxo de calor. Posteriormente, por meio da Lei de Fourier, o equipamento calcula e apresenta o valor da condutividade térmica da amostra. Neste caso, foi obtido o resultado de $k = 0,1396 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para a amostra do *bioPCM* analisada. Considerando a iteração entre o *bioPCM* e a espuma metálica, por meio do valor de k e modelo apresentado anteriormente nas Eqs. 2.11 até 2.16, foi obtida $k_{eff} = 1,443 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

3.6 Procedimento de preenchimento dos reservatórios

O procedimento para preenchimento do reservatório aconteceu em diferentes etapas, conforme apresentado nas Figura 3.17(a-d). Devido a premissa da utilização da mesma quantidade de bioPCM em cada caso, para garantir a mesma capacidade de energia por meio de calor latente, o que possibilita a realização de análise energética ideal, a massa utilizada foi definida através do caso B. Este foi utilizado como referência, pois previamente foi estabelecida a condição de que a espuma metálica necessitava estar totalmente inserida no bioPCM, e este caso apresenta o maior volume da mesma. Desta forma, inicialmente ocorreu a pesagem de certa quantidade do bioPCM, em uma balança analítica com resolução de 0,01 g, conforme exposto na Figura 3.17(a). Na sequência, este foi inserido no interior do reservatório, conforme Figura 3.17(b).

Figura 3.17 – Método de preenchimento dos reservatórios com bioPCM: a) pesagem do bioPCM; b) transferência do bioPCM; c) fusão gradativa do bioPCM e d) fusão completa do bioPCM.



Fonte: o autor (2025).

Posteriormente, foi inserida uma tampa no reservatório e acionada a fonte de alimentação, promovendo o aquecimento da chapa de cobre e consequentemente a fusão gradativa do bioPCM, conforme apresentado na Figura 3.17(c). Após a fusão completa da quantidade inserida, Figura 3.17(d), foi realizado o desligamento da fonte de alimentação e aguardada a solidificação do bioPCM, para conferência da altura alcançada. Estas etapas foram repetidas até o completo preenchimento, considerado

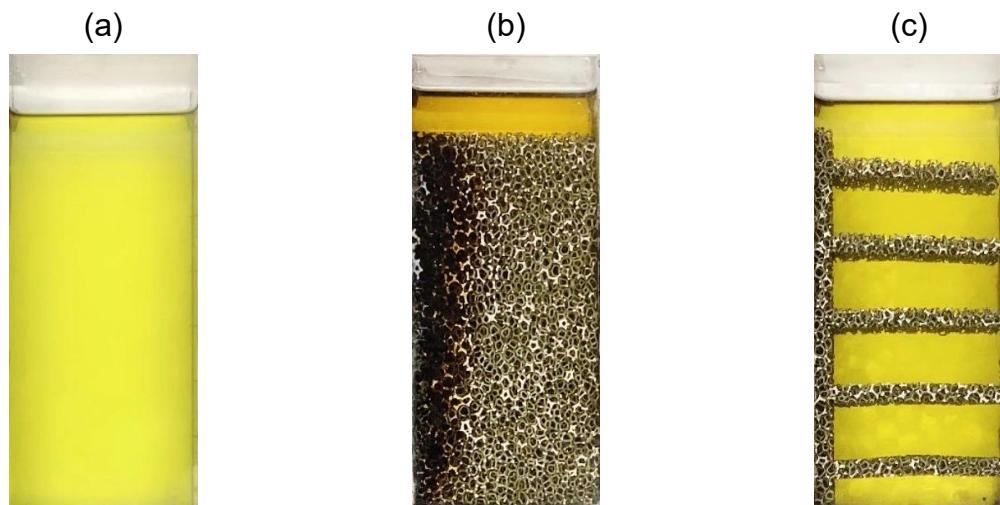
concluído quando a altura do bioPCM solidificado ultrapassou a altura total da espuma metálica. Em decorrência desta metodologia, foi alcançada a massa de 140 g de bioPCM.

3.7 Casos analisados

Diferentes casos foram definidos para realização do experimento, tanto para o processo de fusão, quanto para o processo de solidificação, conforme apresentado nas Figura 3.18(a-c). No caso A, Figura 3.18(a), o reservatório possui em seu interior somente bioPCM, enquanto o caso B, Figura 3.18(b), possui bioPCM com espuma metálica de geometria retangular, ao passo que o caso C possui no interior bioPCM com espuma de geometria perfilada, conforme Figura 3.18(c). Estes casos foram orientados verticalmente, formando um ângulo de 90° a partir do plano horizontal.

Figura 3.18 - Casos analisados no processo de fusão e solidificação do bioPCM:

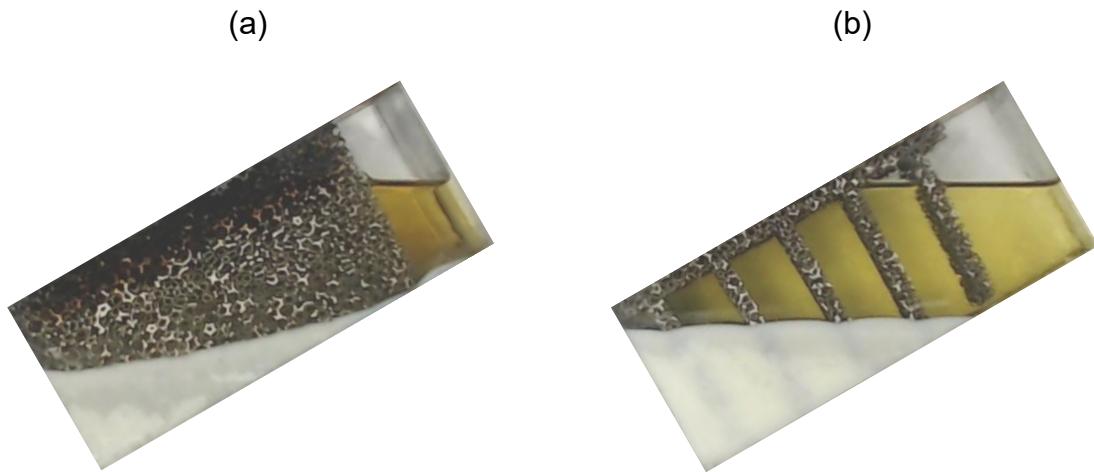
- a) caso A - somente bioPCM;
- b) caso B - bioPCM com espuma retangular e
- c) caso C - bioPCM com espuma perfilada.



Fonte: o autor (2025).

Além destes, outros dois casos também foram definidos, conforme exposto na Figura 3.19(a-b). O caso D possui as mesmas características do caso B, no entanto, com inclinação de 30° no sentido horário a partir do plano horizontal, assim como o caso E, que possui as mesmas características do caso C contendo a inclinação citada.

Figura 3.19 - Casos analisados no processo de fusão do bioPCM:
 a) caso D - bioPCM com espuma retangular inclinado em 30° e b) caso E - bioPCM com espuma perfilada inclinado em 30°.



Fonte: o autor (2025).

Em todos os casos foi adicionada a mesma quantidade de bioPCM (140 g). Desta forma, foi possível garantir que todos os casos tivessem a mesma capacidade energética por meio de calor latente, possibilitando a realização de uma comparação energética ideal.

3.8 Determinação do fluxo de calor

A alimentação de energia elétrica à resistência ocorreu por meio de uma fonte de energia AC. Na mesma foi conectado o analisador de qualidade de energia da Fluke®, modelo 43B, para medição dos valores de tensão e corrente elétrica. Estes valores foram monitorados e registrados a cada segundo com o auxílio do software FlukeView®. Os diferentes casos desta pesquisa foram submetidos a duas tensões iniciais distintas, nas quais, devido ao tipo de resistência utilizada e por meio dos valores medidos, foram estimadas as potências (P) e, posteriormente, os fluxos de calor (q'') em função do tempo (t).

Mediante os valores de q'' estimados, para o conjunto de ensaios compostos de cada caso em cada tensão inicial, foram calculados os q'' médios também em função do t . Através dos mesmos foram expressas as Eqs. 3.6 e 3.7, para as condições nomeadas como baixo fluxo de calor (q_l'') e alto fluxo de calor (q_h''):

$$q_l'' = 24.081t^{-0,032} \quad (3.6)$$

$$q_h'' = 49.777t^{-0,074} \quad (3.7)$$

Por meio das equações apresentadas foram calculados os q_l'' e q_h'' em função do t , que foram comparados com os q'' médios, para verificação da diferença percentual entre os q'' das equações e os q'' das leituras dos ensaios. A maior diferença percentual obtida foi de, aproximadamente, 3,2%. Através das equações nota-se que os valores de q'' apresentam redução ao longo do tempo. Este comportamento está associado a característica da resistência, que apresenta redução no valor da corrente elétrica com o gradativo aumento no valor de temperatura.

3.9 Tratamento de imagens

Ao longo dos ensaios, o isolamento da vista frontal foi removido por aproximadamente 15 s a cada 5 min. Nestes instantes, foram capturadas imagens do campo de fração de líquido e visualizada a frente de fusão, através da câmera fotográfica da Nikon®, modelo DSLR D5300. As imagens foram analisadas e pós-processadas mediante o software de processamento de imagens ImageJ®, o que tornou possível a quantificação da fração de líquido (β) através da aplicação da Eq. 3.8:

$$\beta = \frac{\text{número de pixels da região fundida}}{\text{número total de pixels}} \quad (3.8)$$

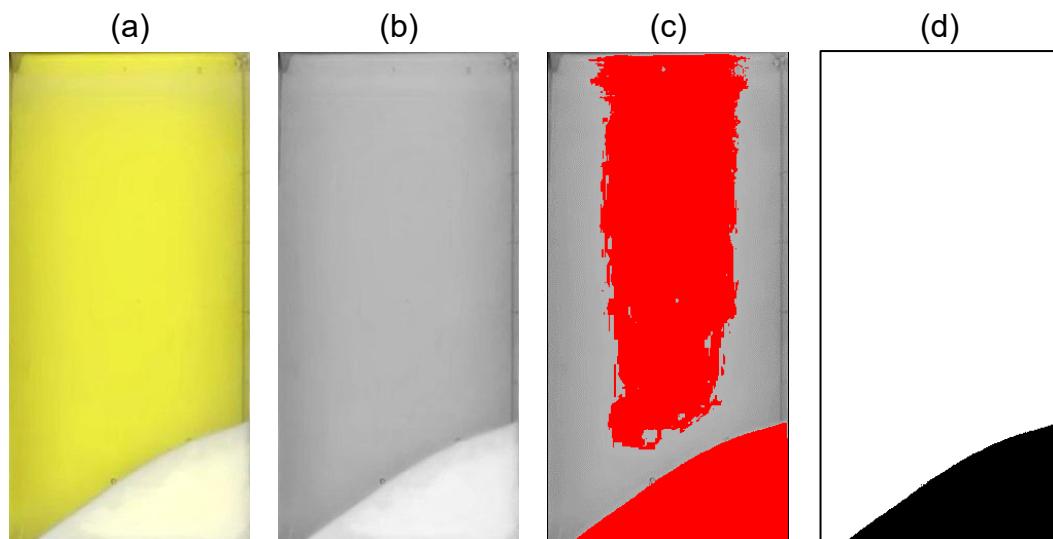
onde o número total de pixels corresponde à área do bioPCM totalmente sólido, enquanto o número de pixels da região fundida corresponde à área de bioPCM fundido, no respectivo instante de tempo (t). Por meio dos valores calculados em cada instante de tempo (t) tornou-se possível a construção do perfil de fração de líquido (β), correspondente ao processo de fusão do bioPCM.

A quantificação da fração de líquido através dos processamentos das imagens ocorreu por meio de algumas manipulações nas mesmas de maneira individual. Em cada ensaio, as imagens foram obtidas sem interferência da câmera, sendo a mesma mantida na mesma posição e distância em relação ao reservatório.

Nas Figura 3.20(a-d) são apresentadas algumas imagens para exemplificar a sequência utilizada, onde a Figura 3.20(a) mostra uma imagem nomeada como

original, ou seja, sem manipulação prévia, obtida em um ensaio do caso A. O tratamento da imagem iniciou através da conversão da mesma para imagem em 8-bit, transformando a imagem colorida para tons de cinza, conforme Figura 3.20(b). Posteriormente, foi utilizada uma ferramenta para ajuste de contorno, destacando a massa de bioPCM não fundida, conforme Figura 3.20(c). Por fim, a imagem 8-bit com ajuste de contorno foi convertida para uma imagem binária, conforme Figura 3.20(d). Nota-se através da Figura 3.20(c) uma região na cor vermelha acima do bioPCM ainda sólido. Para que esta região não interfira no cálculo da fração de líquido, a mesma foi removida da imagem binária. Após estas manipulações, foi realizado o cálculo da fração fundida por meio das ferramentas de análise que compõem o software. Esta metodologia foi utilizada para cada imagem de cada caso ensaiado.

Figura 3.20 - Processamento de imagens da fusão do bioPCM: a) imagem original, b) imagem em 8-bit, c) ajuste de contorno e d) imagem binária.



Fonte: o autor (2025).

3.10 Incerteza experimental

As análises das incertezas relacionadas aos parâmetros associados à execução dos ensaios foram efetuadas distintamente. Para os equipamentos utilizados no monitoramento dos mesmos, foram analisadas suas respectivas precisões, enquanto os parâmetros do sistema foram analisados quanto às incertezas de medição.

Deste modo, na Tabela 3.4 são apresentadas as precisões do sistema registrador de dados, assim como do analisador de qualidade de energia, referentes ao monitoramento de temperatura, tensão e corrente elétrica, respectivamente. Conforme descrito na ficha técnica do registrador de dados, a especificação de precisão contempla possíveis erros de medição, erro de comutação, além de eventual erro de conversão do transdutor, acrescida da precisão do sensor (Keysight Technologies, 2020). As precisões referentes à tensão e à corrente elétrica foram obtidas através do manual do usuário do analisador de qualidade de energia. Este considera um percentual fixo de erro mais uma contagem de erro proveniente da resolução do instrumento.

Tabela 3.4 - Precisão dos instrumentos aplicados ao sistema.

Parâmetros	Precisão
Temperatura [°C]	± 2,7
Tensão [V]	± 1,32
Corrente [A]	± 0,11

Fonte: o autor (2025).

Na Tabela 3.5 são expressas as incertezas padrão obtidas para os parâmetros medidos. Estes contemplam medição de temperatura por meio dos sensores de temperatura, porosidade da espuma metálica, massa de bioPCM inserida nos reservatórios e fotografias do processo de fusão. Estas foram calculadas conforme determinado pelo BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (2008), por meio do cálculo da incerteza-padrão, conforme Eq. 3.9:

$$u^2 = \frac{s^2}{n} \quad (3.9)$$

onde u caracteriza a incerteza padrão, s o desvio padrão experimental e n o número de leituras realizadas.

A avaliação desta incerteza baseia-se em uma análise estatística de uma quantidade de medições repetidas da mesma grandeza, efetuadas sob as mesmas condições. Para os sensores de temperatura, a incerteza padrão foi obtida através da calibração dos mesmos em um banho térmico, na faixa de temperaturas de 20 °C até 80 °C, em intervalos de 10 °C. Deste modo, após a estabilização do banho em cada temperatura, foram realizadas 150 medições consecutivas a cada 5 s. Para cada

sensor foi obtida uma curva de calibração, resultante da comparação das leituras de cada sensor contra um sensor RTD de referência, presente no mesmo banho e calibrado previamente entre as temperaturas de 0 °C e 100 °C. A incerteza relacionada à porosidade da espuma metálica foi obtida através de 5 medições consecutivas da massa de uma amostra, cuja porosidade foi calculada conforme Eq. 2.7. Na avaliação da incerteza da pesagem da massa do bioPCM, foram realizadas 25 pesagens consecutivas para cada caso proposto. Tanto para a pesagem da espuma quanto para a do bioPCM foi utilizada uma balança previamente calibrada. Por fim, a incerteza oriunda das fotografias dos campos de fração de líquido foi determinada através de 10 medições repetidas, para 3 instantes de tempo distintos (50 min, 150 min e 250 min) nos 3 casos ensaiados. Pelo fato de existirem valores distintos de incerteza padrão para cada leitura de temperatura, massa de bioPCM e fotografias, optou-se por expressar somente os maiores valores.

Tabela 3.5 - Incertezas padrão dos parâmetros do sistema.

Parâmetros	Incerteza padrão
Temperatura dos sensores de temperatura [°C]	± 0,01
Porosidade da espuma metálica [%]	± 0,01
Massa de bioPCM [kg]	± 0,001
Fotografias dos campos de fração de líquido [%]	± 0,03

Fonte: o autor (2025).

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos estudos experimentais realizados na fusão e solidificação do bioPCM em reservatório retangular vertical e o efeito das diferentes configurações da espuma metálica, assim como da alteração do fluxo de calor e da inclinação do reservatório.

4.1 Análise da influência geométrica

Nesta pesquisa, a análise da influência geométrica da espuma metálica nos processos de carga e descarga do bioPCM foi realizada por meio da comparação dos campos de fração de líquido, perfis de temperatura, perfis de fração de líquido e energia acumulada ao longo do tempo.

4.1.1 Campos de fração de líquido

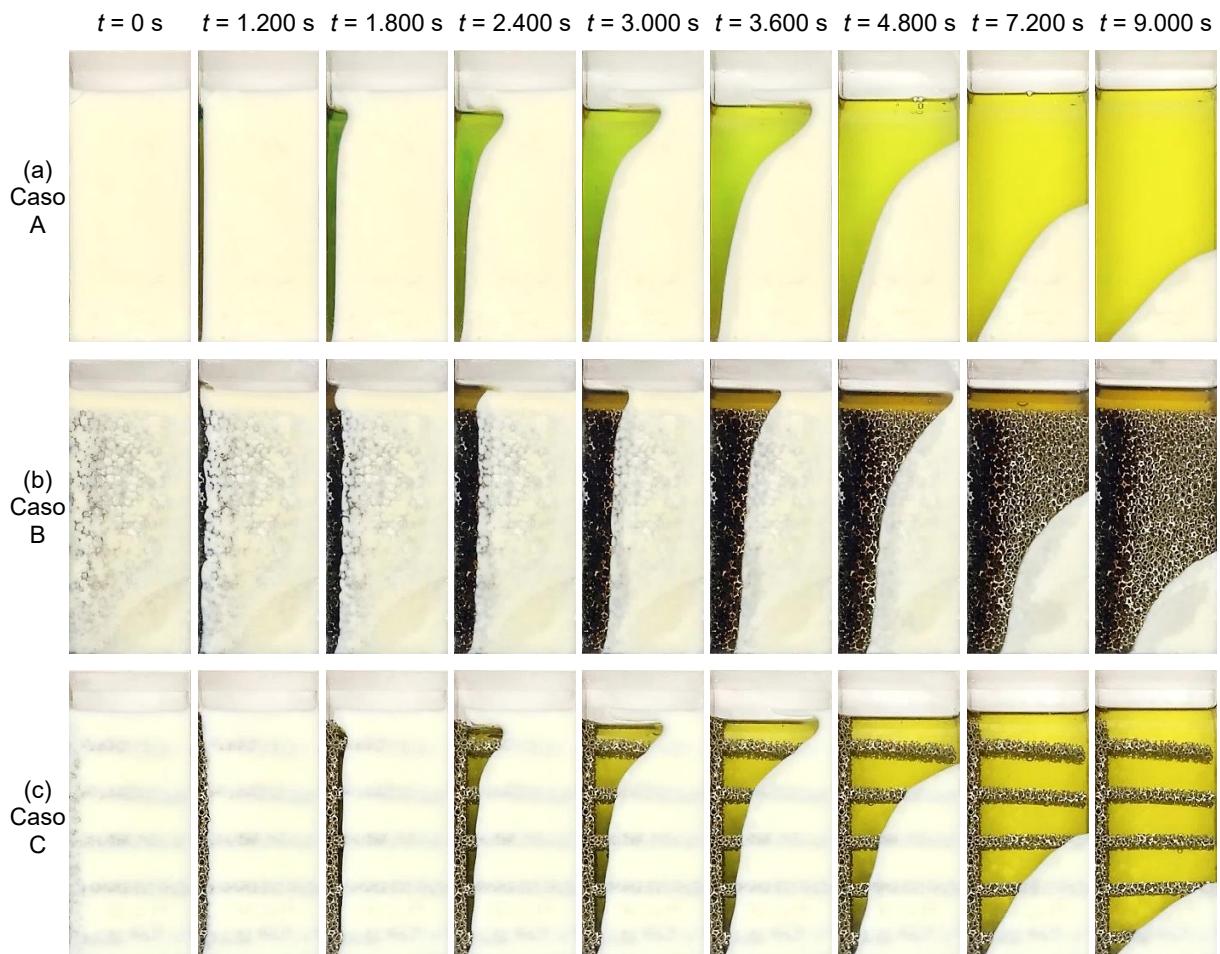
Na Figura 4.1(a-c) são apresentados campos de fração de líquido (β) obtidos por meio do fluxo de calor de maior potência (q_h^*) em diferentes instantes de tempo (t), para o caso A (bioPCM puro), Figura 4.1(a); caso B (bioPCM com espuma metálica de geometria retangular), Figura 4.1(b); e caso C (bioPCM com espuma metálica perfilada), Figura 4.1(c).

No início dos ensaios, $t = 0$ s, o bioPCM estava totalmente solidificado e, passados 1.200 s, nota-se que a fusão iniciou paralelamente à chapa de cobre. Este comportamento indica que nos instantes iniciais a transferência de calor por condução influenciou significativamente o processo de fusão do bioPCM, pelo fato de a força viscosa ser maior em comparação à força de empuxo. No entanto, com o decorrer do tempo, percebe-se que a camada fundida aumentou, o que gerou crescimento da frente de fusão e, consequentemente, alteração no comportamento do processo de fusão.

Ao analisar especificamente o caso A, Figura 4.1(a), em $t = 1.800$ s, observa-se formação de uma curvatura da frente de fusão na região superior da interface sólido-líquido, com inclinação à direita. Este comportamento indica que a convecção natural passou a ser o mecanismo de transferência de calor predominante, pelo fato de a força de empuxo ter superado a força viscosa. Com a evolução do processo, a

força de empuxo aumentou e correntes de convecção foram formadas, ocasionando aumento constante na curvatura da frente de fusão. Este comportamento pode ser evidenciado a partir de $t = 2.400\text{ s}$. Também pode ser observado que a região inferior da interface sólido-líquido permaneceu próxima da chapa de cobre até o instante $t = 7.200\text{ s}$, comportamento relacionado à baixa condutividade térmica do bioPCM. A partir de $t = 9.000\text{ s}$, a interface sólido-líquido avançou com a constante redução da quantidade de bioPCM a fundir.

Figura 4.1 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo através do maior fluxo de calor para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.



Fonte: o autor (2025).

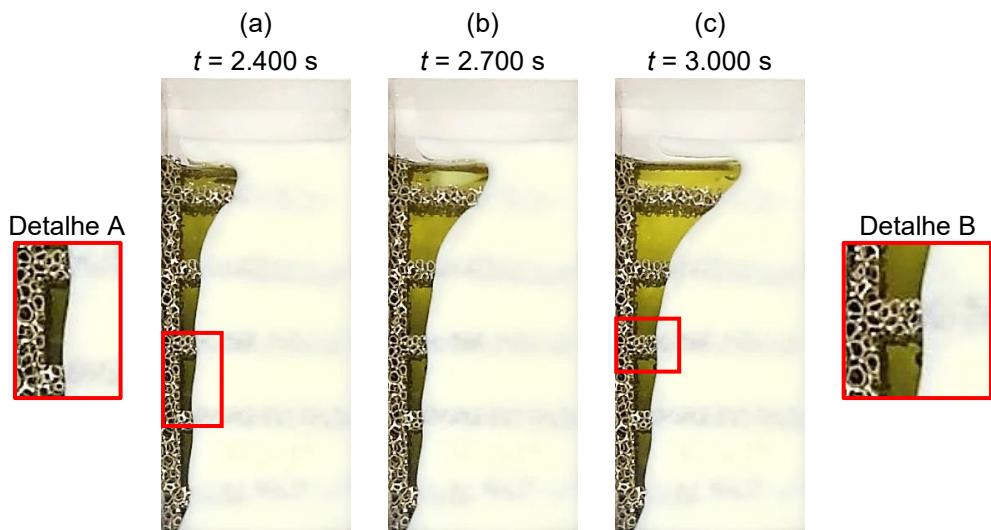
No caso B, Figura 4.1(b), através dos instantes $t = 1.800\text{ s}$ e $t = 2.400\text{ s}$ pode-se observar que a frente de fusão continuou avançando paralelamente a chapa de cobre, diferentemente ao observado no caso A. Este comportamento sugere que a condução de calor permaneceu sendo o mecanismo de transferência de calor predominante, devido a influência da espuma metálica.

A partir do instante $t = 3.000$ s, a convecção natural aumentou e começou a alterar o formato da interface sólido-líquido na região superior, no entanto, em menor magnitude comparado ao caso A. Na região inferior da interface, observa-se que a frente de fusão se distanciou continuamente da chapa de cobre em todos os instantes de tempo. Portanto, os comportamentos descritos indicam a predominância do mecanismo de condução de calor em comparação à convecção natural.

Ao analisar o caso C, Figura 4.1(c), nota-se que a evolução da frente de fusão, apresentou um misto entre os comportamentos destacados nos casos A e B, respectivamente. Este pode ser evidenciado a partir do instante $t = 1.800$ s, onde percebe-se maior influência da convecção natural comparado ao caso B e maior influência da condução de calor comparado ao caso A. Em $t = 3.000$ s da Figura 4.1(c), observou-se na região superior aumento da inclinação da frente de fusão, comparado a Figura 4.1(b), assim como maior afastamento da frente de fusão em relação à chapa de cobre, comparado a Figura 4.1(a). Ao comparar os campos de fração de líquido entre os casos C e A, no mesmo instante de tempo, visualmente aparenta não existir diferença significativa da massa fundida entre ambos. No entanto, conforme mencionado anteriormente, esses casos possuem a mesma massa de bioPCM. Desta forma, o acréscimo da espuma resultou em diferença na altura do bioPCM entre os casos, o que gerou essa falsa percepção, porém, com diferença quantitativa na quantidade de bioPCM fundido.

Para melhor entendimento do comportamento da frente de fusão deste caso, nas Figura 4.2(a-c) são apresentados campos de fração de líquido, β , para o caso C em diferentes instantes t . No detalhe A da Figura 4.2(a) evidencia-se inclinação da interface sólido-líquido na região inferior do perfil, com pequena inclinação da frente de fusão à direita, semelhante ao comportamento apresentado na Figura 4.1(a), indicando transferência de calor por convecção natural. De forma análoga, através do detalhe B da Figura 4.2(c) observa-se sob os perfis da espuma, avanço paralelo da frente de fusão, semelhante ao que foi sinalizado na Figura 4.1(b), indicando transferência de calor por condução. Desta forma, ao considerar as observações apresentadas, validou-se a ocorrência de transferência de calor mista para o caso C, ou seja, caso contendo espuma metálica de geometria perfilada.

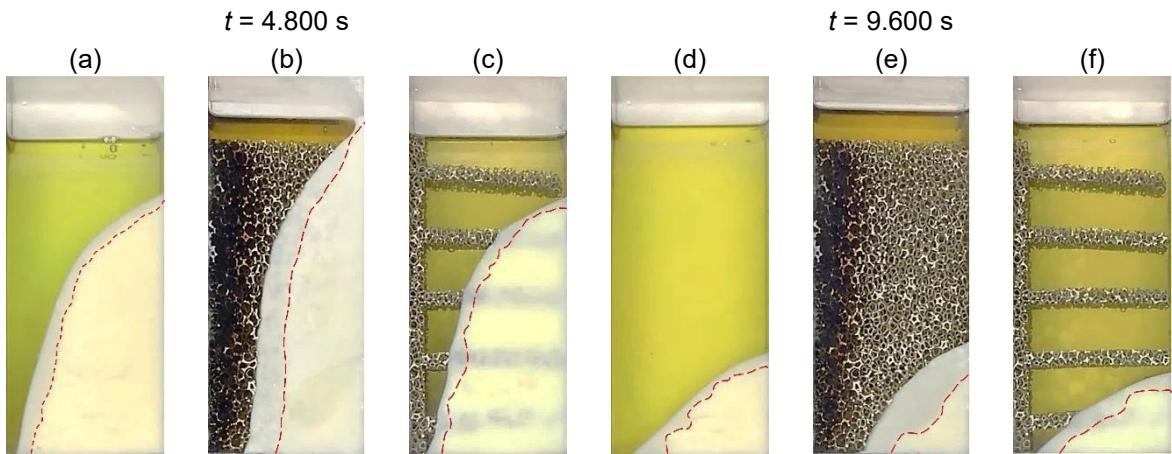
Figura 4.2 – Campos de fração de líquido para o caso C, com espuma perfilada, nos instantes de tempo: a) 2.400 s, b) 2.700 s e c) 3.000 s.



Fonte: o autor (2025).

Durante os processos de mudança de fase dos casos apresentados, verificou-se que existe uma região de transição entre o estado sólido e líquido do bioPCM, sendo a mesma uma região semissólida conhecida como *mushy zone* (zona mole) (Ezzat; Sakr; Abdel-Rehim, 2023). Como exemplo, na Figura 4.3(a-f) são apresentadas as frações de líquido β nos instantes $t = 4.800\text{ s}$ e $t = 9.600\text{ s}$, para os casos A, B e C, respectivamente, com destaque para as zonas moles. As Figura 4.3(b e e) mostram que o caso B apresentou a maior zona mole, enquanto as Figura 4.3(c e f) mostram que o caso C apresentou maior zona mole nas regiões em que havia espuma, comparado ao caso A, Figura 4.3(a e d). Desta forma, torna-se evidente que nas regiões em que há espuma metálica ocorreu aumento da zona mole, ocasionado pela intensificação da transferência de calor.

Figura 4.3 - Zona mole em $t = 4.800$ s e $t = 9.600$ s para: a e d) caso A, b e e) caso B e c e f) caso C.



Fonte: o autor (2025).

4.1.2 Perfis de temperatura

Nas Figura 4.4(a-c) são expressos perfis de temperatura (T) em função do tempo (t) no maior fluxo de calor, q_h , para o caso A, Figura 4.4(a), caso B, Figura 4.4(b) e caso C, Figura 4.4(c). Nestas figuras são apresentados perfis para cada sensor de temperatura, dispostos conforme layout exibido na Figura 3.6, cujos valores foram divididos entre os processos de carga (fusão) e descarga (solidificação).

Os resultados apresentados são correspondentes a intervalos de leitura de 300 s, no entanto, as coletas dos dados foram realizadas em intervalos de 10 s. No processo de carga, as leituras de temperatura mostram que, para o caso A, foram necessários 14.460 s para fusão completa do bioPCM, enquanto, para o caso B, foram necessários 13.380 s e, para o caso C, 13.440 s. A diferença destes resultados corresponde a, aproximadamente, 7,5% entre os casos A e B e a, aproximadamente, 7,1% entre os casos A e C. Desta forma, evidencia-se que os casos contendo espuma metálica possibilitaram intensificação da transferência de calor para o processo de fusão, com diferença entre os casos B e C inferior a 1%.

Os perfis de temperatura apresentados pelo sensor S_1 apresentaram leituras de temperatura maiores ao longo do processo de carga em comparação com os demais sensores. Este comportamento ocorreu pelo fato destes estarem posicionados na superfície na qual ocorre a absorção de calor pelo bioPCM. Ao analisar o momento da fusão completa do bioPCM foram obtidas as leituras de 106,3 °C, 110,1 °C e 109,9 °C para os casos A, B e C, respectivamente. Os perfis também mostram que os

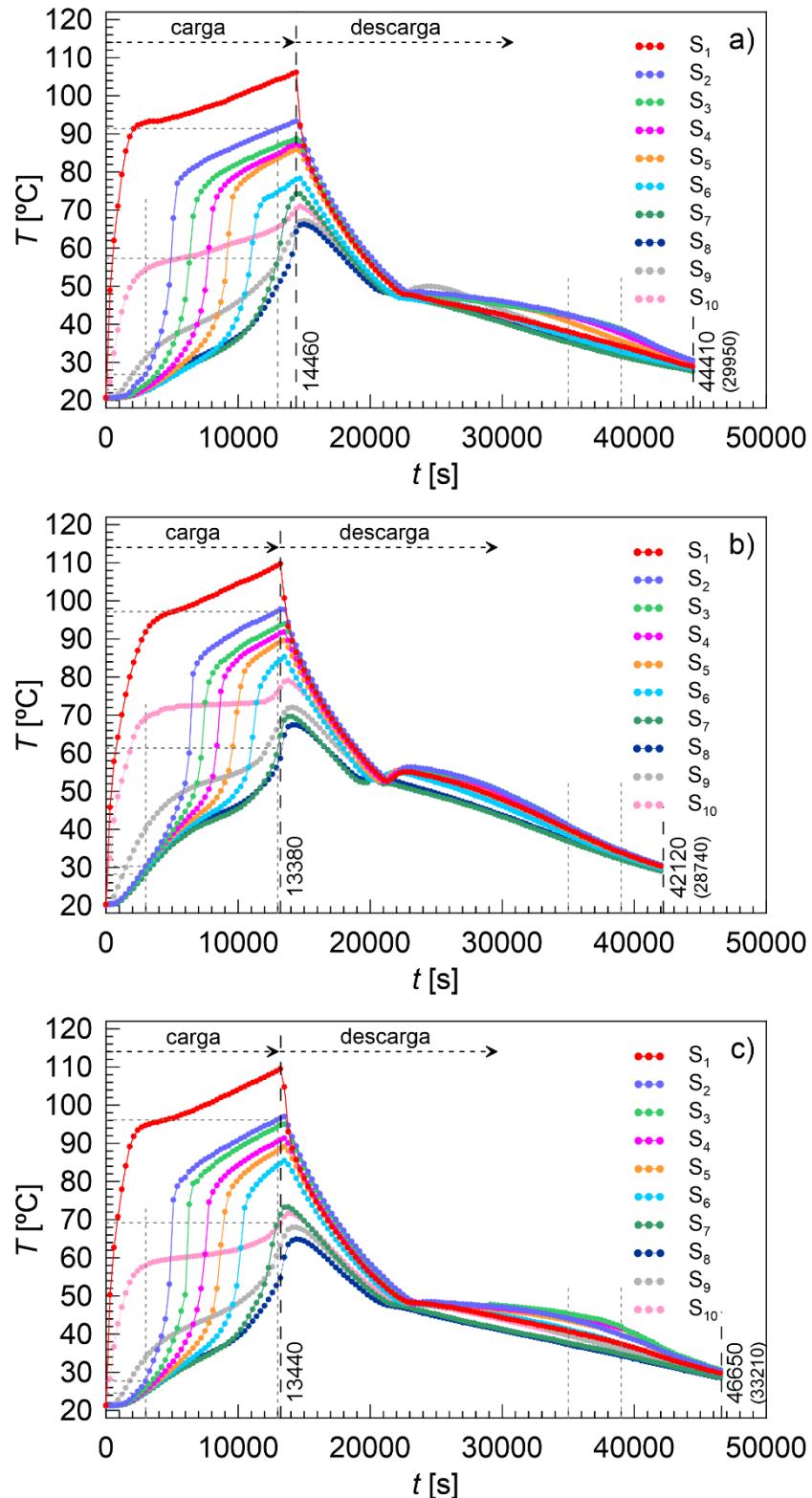
casos com espuma metálica apresentaram diferentes aumentos instantâneos de temperatura em comparação ao caso A. Como exemplo, para alcançar a temperatura de início da mudança de fase ($56,32^{\circ}\text{C}$) foram necessários 440 s no caso A, enquanto nos casos B e C foram necessários 560 s e 410 s, respectivamente. Estes valores correspondem a diferença de, aproximadamente, 21% entre os casos A e B e 7% entre os casos A e C.

As Figura 4.4(a-c) também evidenciaram maior absorção de calor para os casos B e C em relação ao caso A, comportamento observado por meio de comparações das leituras de temperatura dos sensores S_2 a S_7 . Como exemplo, no instante $t = 3.000$ s, a mediana das temperaturas obtidas foi de, aproximadamente, $T = 29,7^{\circ}\text{C}$ para o caso B, enquanto no caso C foi de $T = 25,1^{\circ}\text{C}$ e no caso A, $T = 23,0^{\circ}\text{C}$. Da mesma forma, estes sensores evidenciaram no mesmo instante de tempo maior homogeneidade na elevação da temperatura, em que a diferença entre as maiores e as menores leituras foi de aproximadamente $4,4^{\circ}\text{C}$, $2,0^{\circ}\text{C}$ e $3,2^{\circ}\text{C}$ para os casos A, B e C, respectivamente.

Além disso, os perfis de temperatura dos mesmos sensores indicaram, próximo dos instantes finais do processo de fusão, a existência de significativa estratificação térmica do bioPCM. A mesma ocorre pelo fato de as forças de empuxo, geradas em virtude da variação da massa específica próxima da chapa de cobre, desenvolverem correntes convectivas ascendentes, estratificando termicamente o bioPCM fundido na região superior do reservatório. Este comportamento pode ser melhor evidenciado no instante $t = 13.000$ s das Figura 4.4(a-c), onde para todos os casos, a temperatura do S_2 apresentou valor superior ao S_3 , que por sua vez, também apresentou valor superior ao S_4 e assim sucessivamente. As leituras de temperatura no respectivo instante de tempo estão detalhadas na Tabela 4.1, evidenciando o comportamento descrito.

Ao comparar o comportamento dos perfis de temperatura dos sensores S_8 ao S_{10} com os campos de β , apresentados nas Figura 4.1(a-c), percebe-se que a evolução destes está associada ao avanço da frente de fusão.

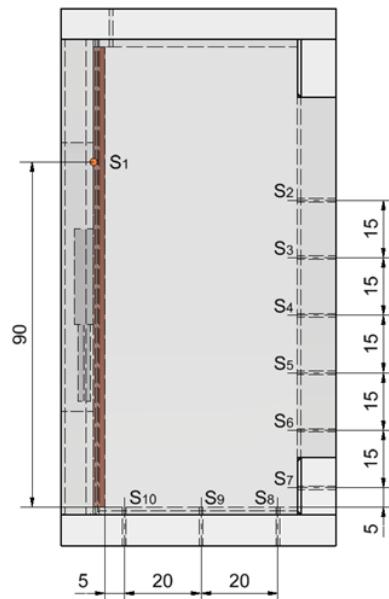
Figura 4.4 – Perfis de temperatura em função do tempo ($\Delta t = 300$ s) para maior fluxo de calor para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.



Fonte: o autor (2025).

Tabela 4.1 – Leituras de temperatura para o maior fluxo de calor no instante de tempo $t = 13.000$ s.

Sensor	$T [^{\circ}\text{C}]$		
	Caso A	Caso B	Caso C
S ₂	91,36	97,39	96,26
S ₃	86,74	93,23	94,35
S ₄	84,72	91,17	90,51
S ₅	83,54	88,91	88,17
S ₆	75,07	83,92	84,34
S ₇	57,19	61,19	69,53



Fonte: o autor (2025).

Através do perfil do sensor S₁₀ verifica-se, nos instantes iniciais, aquecimento mais acelerado do caso B, seguido do caso C e posteriormente do caso A. Como exemplo, no instante $t = 3.000$ s obteve-se, aproximadamente, $T = 69,14$ °C no caso B, $T = 58,03$ °C no caso C e $T = 54,37$ °C no caso A. Este comportamento está associado ao distanciamento da frente de fusão em relação a chapa de cobre. Além disso, entre os instantes $t = 4.000$ s e $t = 12.000$ s o perfil do caso A apresentou permanente aumento de temperatura, enquanto o caso B apresentou certa estabilidade térmica, ao passo que o caso C apresentou comportamento misto, ou seja, aumento de temperatura mais acelerado em relação ao caso A sem a estabilização térmica do caso B.

As leituras dos sensores S₉ mostraram aumentos de temperatura permanentes, onde o caso B apresentou aquecimento superior em comparação aos demais casos enquanto o caso C aqueceu mais em comparação ao caso A. Como exemplo, o caso A necessitou $t = 6910$ s para alcançar 40 °C, enquanto o caso B necessitou $t = 2980$ s e o caso C $t = 5120$ s. Comportamento equivalente ao S₉ foi observado com o sensor S₈.

Assim que o processo de carga do bioPCM cessou, ocorreu o início do processo de descarga. Desta forma, os perfis apresentados mostram que o ciclo

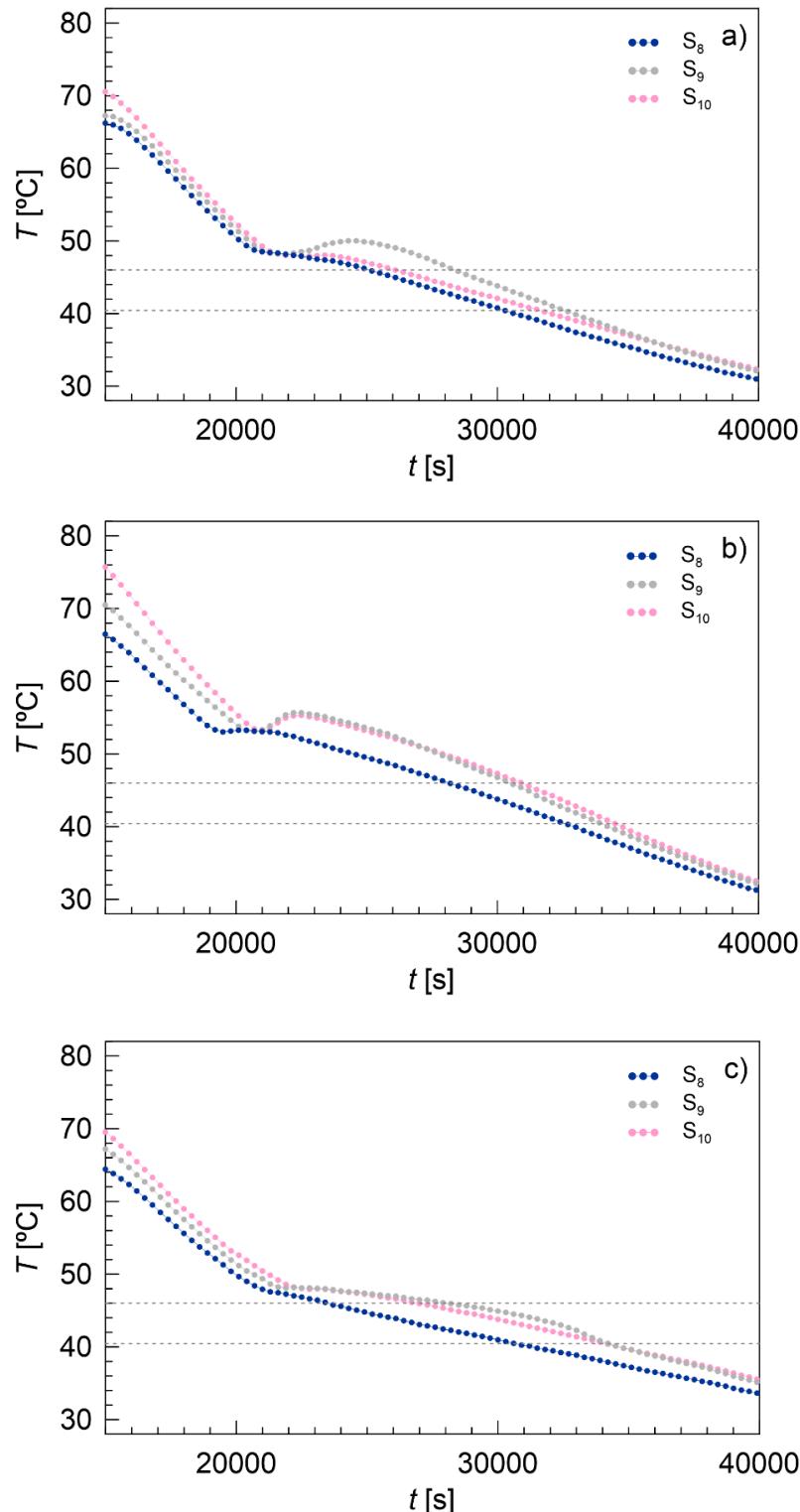
completo transcorreu em 44.410 s, 42.120 s e 46.650 s, para os casos A, B e C, respectivamente. No entanto, ao considerar somente os tempos de descarga, estes ocorreram em 29.950 s, 28.740 s e 33.210 s, respectivamente. Estes valores correspondem a diferença aproximada de 4% entre os casos A e B, em contraste com a diferença aproximada de 10% entre os casos A e C. O menor tempo de processo obtido no caso B está associado a inserção da espuma metálica, que possibilitou aumento da transferência de calor e, portanto, viabilizou a aceleração da dissipação do calor absorvido pelo bioPCM.

Em contraponto, o maior tempo de processo apresentado no caso C também está relacionado à espuma metálica. Conforme descrito anteriormente, devido à inserção da espuma, os casos B e C aumentaram a temperatura do bioPCM durante o processo de carga. Este fato, combinado com a geometria da espuma no caso C, prolongou a duração do processo devido ao menor volume de espuma inserido no bioPCM e à ausência de fluxo de calor, o que acarretou em menor intensificação da transferência de calor e, consequentemente, menor dissipação do calor absorvido.

Este comportamento pode ser evidenciado pela comparação das leituras dos sensores S₂ ao S₁₀, através do instante em que ocorreu a carga completa com outro instante do processo de descarga. Desta forma, no instante da fusão completa, as medianas das leituras obtidas correspondem a 78,22 °C, 85,13 °C e 85,43 °C, para os casos A, B e C, respectivamente, enquanto que no instante $t = 39.000$ s, por exemplo, as medianas obtidas correspondem a 33,18 °C, 33,69 °C e 37,38 °C, respectivamente, evidenciando o comportamento retratado.

Os perfis de temperatura apresentados também expressam a dinâmica na qual ocorreu o processo de descarga do bioPCM. Como não houve fluxo de calor direcionado durante este processo, o mesmo não apresentou frente de solidificação. Desta forma, os perfis de temperatura indicam que a mesma apresentou comportamentos distintos. Como exemplo, ao comparar as leituras de temperatura dos sensores S₃, S₅ e S₇ nos instantes $t = 35.000$ s e $t = 39.000$ s das Figura 4.4(a-c), verifica-se que as leituras do S₇ possuem valores menores ao S₅, que por sua vez também apresenta valores menores ao S₃.

Figura 4.5 – Perfis de temperatura no instante de tempo de 15.000 s até 40.000 s dos sensores de temperatura S₈, S₉ e S₁₀ para: a) caso A, b) caso B e c) caso C.



Fonte: o autor (2025).

Desta forma, estes valores indicam que verticalmente a solidificação ocorreu de baixo para cima. No entanto, transversalmente, a solidificação ocorreu a partir da

interface das paredes do reservatório com o bioPCM em direção à região interna do mesmo. Este comportamento pode ser evidenciado através das Figura 4.5(a-c), onde são apresentados especificamente perfis de descarga dos sensores S_8 ao S_{10} , entre os instantes $t = 15.000$ s até $t = 40.000$ s, para os casos A, B e C, respectivamente.

Nestas figuras foram traçadas linhas horizontais que representam a faixa de temperaturas na qual ocorre a solidificação, conforme o termograma da caracterização apresentado na Figura 3.13. Nota-se na Figura 4.5(a) que as maiores leituras de temperatura foram obtidas através do sensor S_9 , enquanto que as menores foram obtidas pelo S_8 , ao passo que as leituras do S_{10} oscilaram com valores intermediários. De forma geral, estas leituras indicam que para o caso A, o processo de solidificação ocorreu em direção ao centro do reservatório. Na Figura 4.5(b) nota-se que as maiores temperaturas foram obtidas pelo S_{10} e as menores pelo S_8 , porém com leituras do S_9 próximas ao S_{10} . Neste caso, estas indicam que a solidificação ocorreu deslocada para a esquerda, comparado ao caso A. Agora, na Figura 4.5(c), ocorreu comportamento similar ao da Figura 4.5(b), porém, com o S_9 apresentando as maiores leituras.

4.1.3 Perfis de fração de líquido

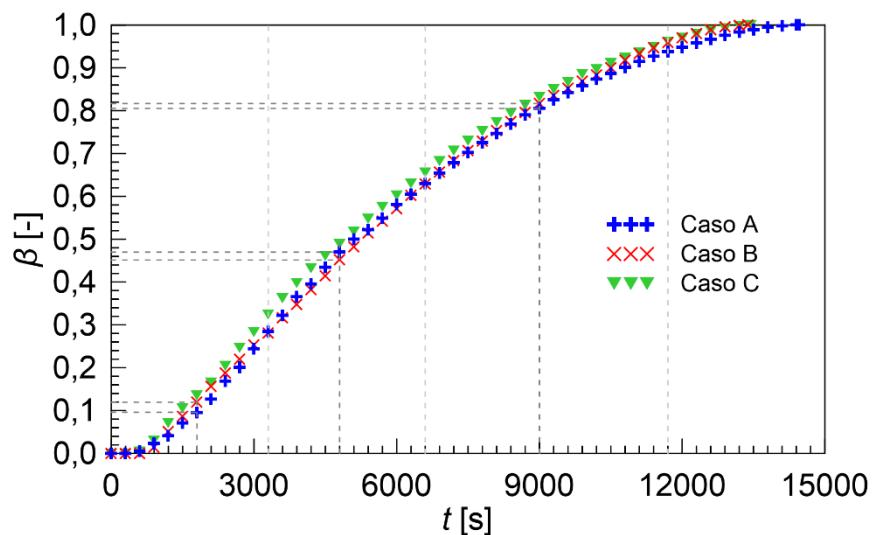
Na Figura 4.6 são apresentados perfis de fração de líquido (β) em função do tempo (t) para os casos A, B e C, respectivamente, submetidos aos fluxos de calor de alta potência (q''_h). Os valores de β oscilam de 0 até 1, onde 0 corresponde ao bioPCM completamente sólido e 1 ao mesmo totalmente fundido. Ao comparar os perfis obtidos nos casos A e B ao longo do processo, percebe-se que até o instante $t = 3.000$ s o caso B apresentou fusão do bioPCM mais acelerada comparada ao caso A, desacelerando entre os instantes $t = 3.300$ s e $t = 6.600$ s, voltando a acelerar até o final do processo.

Como exemplo deste comportamento, no instante $t = 1.800$ s, os valores obtidos para β foram 0,095 e 0,120 para os casos A e B, respectivamente, enquanto no instante $t = 4.800$ s, os valores foram 0,470 e 0,452, ao passo que em $t = 9.000$ s foram 0,805 e 0,817, respectivamente. Ao associar estes resultados, nos mesmos instantes t , com os campos de β exibidos na Figura 4.1(a e b), nota-se que, em

$t = 1.800$ s, a frente de fusão do caso B apresentou maior distanciamento em relação à chapa de cobre comparada ao caso A.

Este comportamento indica que houve aumento da transferência de calor por condução em consequência da inserção da espuma metálica, o que justifica a aceleração do processo. Em $t = 4.800$ s percebe-se na região superior do bioPCM maior inclinação à direita da frente de fusão no caso A comparado ao caso B. Isto indica maior influência da convecção natural no caso A, respaldada pelo retardo do início deste mecanismo no caso B, evidenciado entre os instantes $t = 2.400$ e 3.600 s da Figura 4.1(a e b). Desta forma, ocorreu desaceleração do processo de fusão no caso B. Por fim, em $t = 9.000$ s a inclinação da frente de fusão mostra-se similar entre os casos, porém com maior distanciamento desta em relação a chapa de cobre no caso B. Este comportamento indica equilíbrio da convecção natural entre os casos, no entanto, devido a presença da espuma metálica no caso B, o mesmo voltou a acelerar.

Figura 4.6 – Perfis de fração de líquido em função do tempo no maior fluxo de calor para os casos A, B e C.



Fonte: o autor (2025).

Ao comparar o perfil apresentado para o caso C com o perfil do caso A, nota-se que o mesmo está mais acelerado durante todo o processo de fusão, e ao comparar com o perfil do caso B, o caso C mostra-se mais acelerado até o instante $t = 11.700$ s, desacelerando posteriormente até o final do processo. Este comportamento pode ser justificado devido a transferência de calor mista, evidenciada anteriormente através

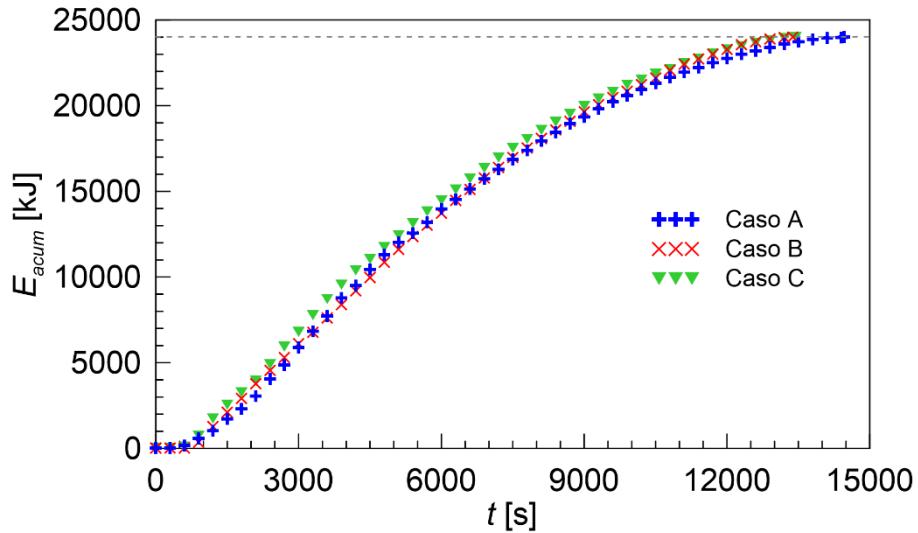
dos campos de β exibidos na Figura 4.1(c) e detalhados nas Figura 4.2(a-c). Desta forma, a espuma de geometria perfilada possibilitou a intensificação da transferência de calor por condução sem inibir e/ou retardar a transferência por convecção natural.

4.1.4 Energia armazenada

A evolução da energia acumulada (E_{acum}) ao longo do processo de carga pode ser analisada através da Figura 4.7. Esta evolução considera a soma do calor sensível e do calor latente do bioPCM com as leituras médias de temperatura dos termopares, onde o calor latente foi analisado durante a mudança de fase. A E_{acum} total obtida resultou em, aproximadamente, 24.000 kJ para todos os casos, com diferença entre os mesmos inferior a 1%, ocasionada pelas pequenas diferenças de temperatura na parcela de energia proveniente do calor sensível. No entanto, nota-se que o caso A necessitou de maior tempo de processo para alcançar a capacidade máxima, pelo fato de o processo de carga proveniente do calor latente ser mais lento em relação aos casos B e C. Contudo, ao considerar a taxa de armazenamento de energia, a diferença entre os casos A e B foi de, aproximadamente, 8,1%, enquanto entre os casos A e C foi de, aproximadamente, 7,6%.

O armazenamento ao longo do processo apresentou oscilações, onde o caso C exibiu armazenamento superior em praticamente todo o processo, sendo que em alguns instantes o caso A mostrou armazenamento superior e em outros inferior ao caso B. Como exemplo, no instante $t = 6.000$ s o caso A armazenou 13.965 kJ, enquanto o caso B armazenou 13.723 kJ e o caso C 14.477 kJ, o que representa 58%, 57% e 60% da E_{acum} . Em contrapartida, no instante $t = 9.000$ s foram armazenados 19.330 kJ, 19.627 kJ e 19.978 kJ para os casos A, B e C, respectivamente, o que corresponde a 81%, 82% e 83% da E_{acum} . Estes valores evidenciam que a inclusão da espuma metálica possibilitou a aceleração da capacidade de armazenamento de energia pelo bioPCM, onde suas diferenças geométricas resultaram em alterações da evolução do armazenamento.

Figura 4.7 - Energia acumulada para o caso A, caso B e caso C.



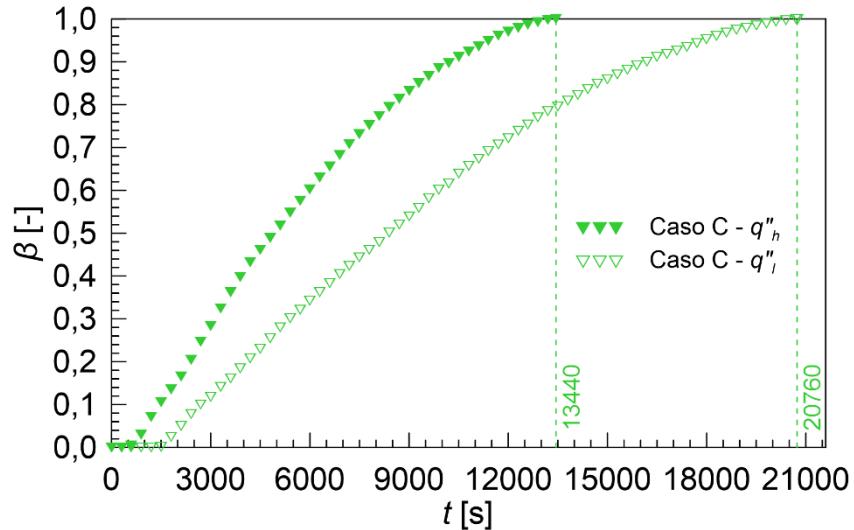
Fonte: o autor (2025).

4.2 Análise da influência do fluxo de calor

A análise da influência da modificação do fluxo de calor, q'' , foi realizada por meio da comparação dos campos de fração de líquido do caso C e dos perfis de fração de líquido ao longo do tempo. Desta forma, a variação da β pode ser analisada através da Figura 4.8. A mesma mostra que a redução do q'' acarretou aumento do processo de fusão, onde para o maior fluxo de calor, q''_h , o processo ocorreu em 13.440 s, enquanto que para o menor fluxo, q''_l , ocorreu em 20.760 s. Estes valores representam uma diferença quantitativa de 7.320 s, o que equivale a uma diferença percentual de, aproximadamente, 35%. Desta forma, como esperado, quanto maior o q'' mais acelerado foi o processo, devido à intensificação da transferência de calor.

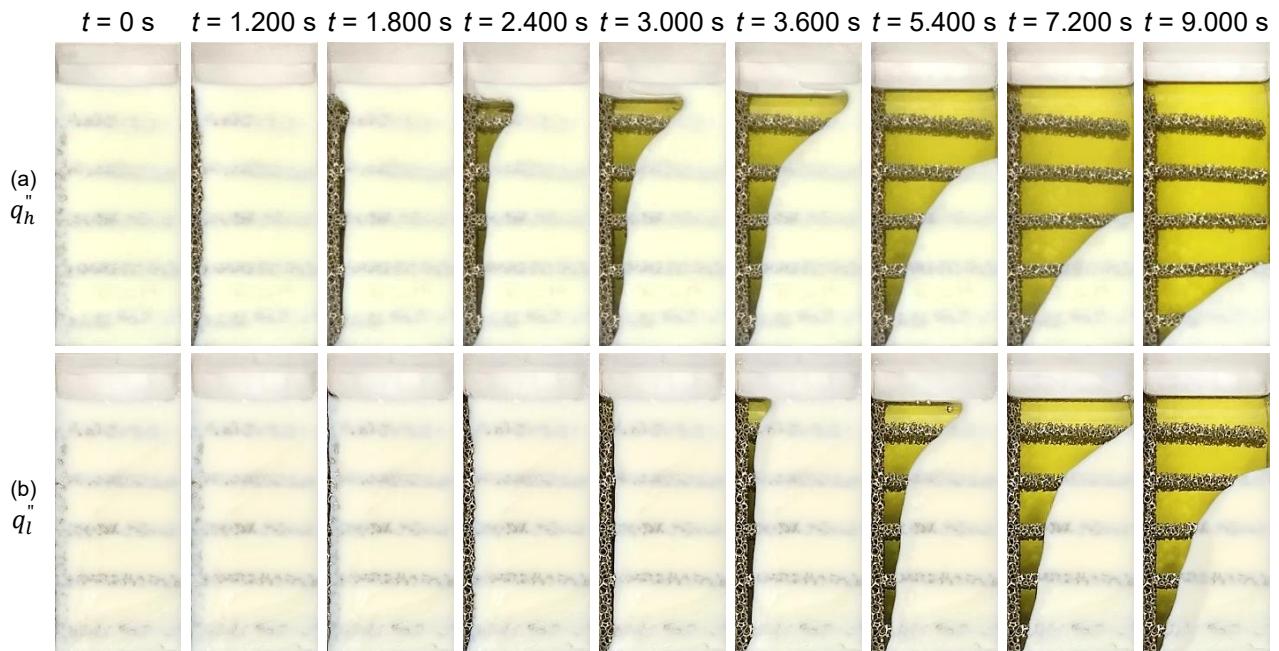
A diferença do avanço da frente de fusão com a redução do q'' pode ser analisada através da Figura 4.9(a e b), para q''_h e q''_l , respectivamente. Ao comparar as mesmas, torna-se evidente que a desaceleração do processo provocou retardos na formação da curvatura da frente de fusão. Como exemplo, o comportamento relatado pode ser evidenciado no instante $t = 3.000$ s, onde na Figura 4.9(a) evidencia-se inclinação da frente de fusão devido às correntes convectivas, enquanto na Figura 4.9(b) a mesma ainda está ocorrendo paralelamente à chapa de cobre, indicando transferência de calor predominantemente condutiva. Desta forma, apesar de alterações de fluxo de calor influenciarem de forma significativa no tempo de processo, estas não alteraram a dinâmica dos mecanismos de transferência de calor.

Figura 4.8 – Influência do maior fluxo de calor na fração de líquido para o caso C.



Fonte: o autor (2025).

Figura 4.9 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo para o caso C obtidos para: a) maior fluxo de calor e b) menor fluxo de calor.



Fonte: o autor (2025).

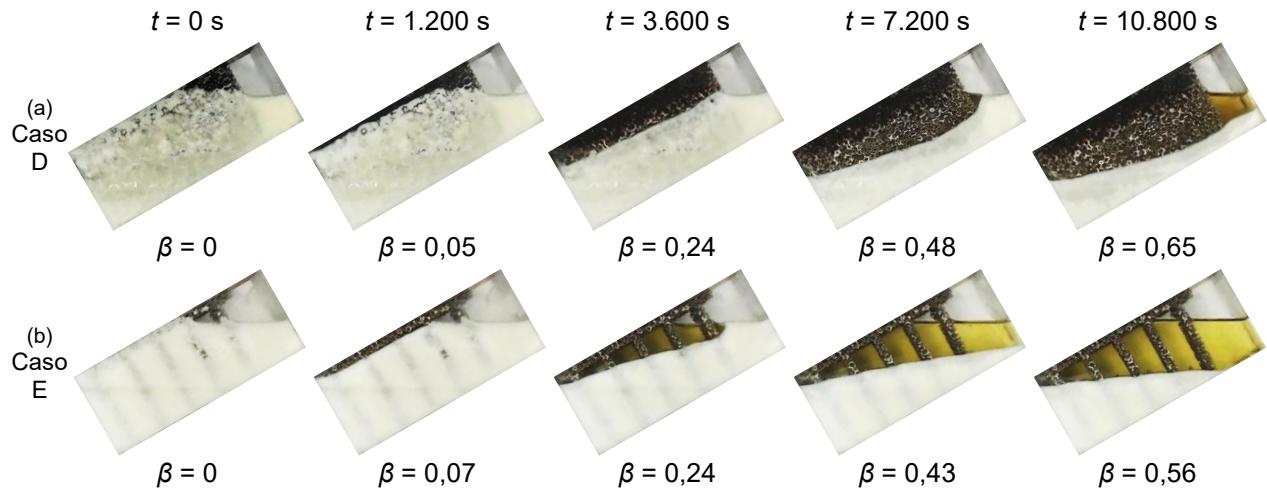
4.3 Análise da inclinação do reservatório

As Figura 4.10(a e b) apresentam imagens de campos de fração de líquido (β) para o processo de fusão dos casos do reservatório inclinado em 30° , caso D (espuma retangular) e caso E (espuma perfilada), respectivamente, para q_h , em diferentes instantes de tempo (t). Como pode ser observado, no início do processo, $t = 0$ s, o bioPCM encontra-se completamente solidificado. Ao decorrer $t = 1.200$ s, para ambos os casos, nota-se avanço da frente de fusão paralelamente à placa de cobre, comportamento idêntico ao verificado anteriormente na Figura 4.1, mesmo com a inclinação dos reservatórios. Neste instante de tempo, a fusão encontra-se um pouco mais acelerada no caso E em relação ao caso D, com valores de $\beta = 0,07$ e $\beta = 0,05$, respectivamente.

A partir do instante $t = 3.600$ s, nota-se que, no caso D, a frente de fusão do bioPCM permanece praticamente paralela à placa de cobre, enquanto, no caso E, pequenas inclinações da mesma são verificadas entre os perfis da espuma metálica. Este comportamento indica, assim como observado anteriormente, que o processo passou de predominantemente condutivo para um processo misto, ou seja, influenciado tanto pela condução de calor quanto pela convecção natural. Neste instante de tempo foi obtido $\beta = 0,24$ para ambos os casos.

No instante $t = 7.200$ s, observa-se avanço constante da frente de fusão, no entanto, na região superior do reservatório, a mesma mostra-se mais distante da placa de cobre em comparação à região inferior. Neste instante, a fusão do bioPCM no caso D passou a ser mais acelerada em relação ao caso E, com valores de β iguais a 0,48 e 0,43, respectivamente, o que representa uma diferença de 10,4%. Esta mudança no comportamento da fusão pode ser comprovada no instante $t = 10.800$ s, onde β apresenta valores de 0,65 para o caso D e 0,56 para o caso E, cuja diferença aumentou para 13,8%. Também pode ser observado, neste instante, a redução da inclinação da frente de fusão no caso D e o nivelamento desta no caso E, o que indica diminuição ou inexistência de correntes convectivas.

Figura 4.10 – Campos de fração de líquido em diferentes instantes de tempo para:
a) caso D e b) caso E.

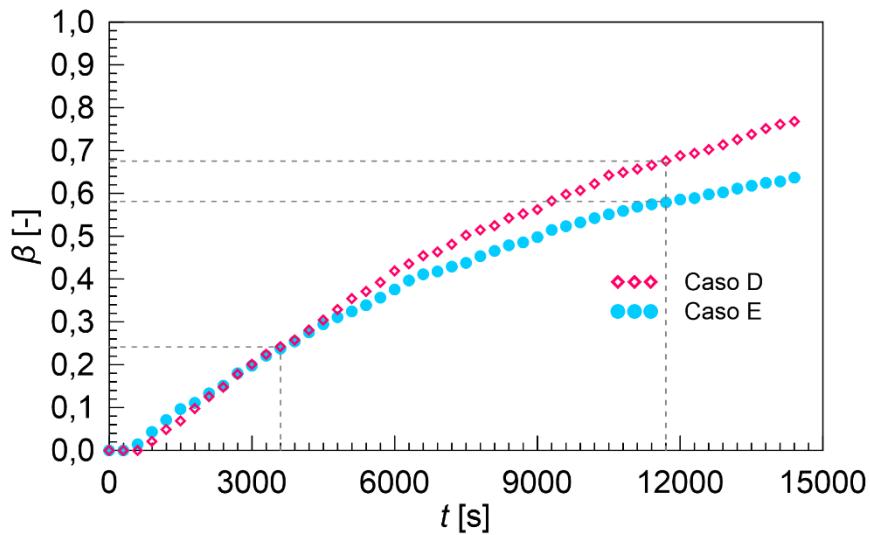


Fonte: o autor (2025).

A mudança no comportamento do processo de fusão também pode ser observada por meio da Figura 4.11, onde são apresentados perfis de β em função de t para os casos D e E, respectivamente. Através desta, nota-se que o processo de fusão iniciou mais acelerado para o caso E e passou a apresentar constante desaceleração. A partir de $t = 3.900$ s, o mesmo tornou-se mais lento comparado ao caso D. Este comportamento está relacionado à inibição da convecção natural, devido à inclinação dos reservatórios, o que impede a formação de correntes convectivas ascendentes, ocasionadas pela variação da massa específica do bioPCM fundido junto a superfície de aquecimento, onde a condução de calor por meio da espuma metálica passou a ser o mecanismo predominante. Desta forma, o caso inclinado, que contém a espuma de geometria perfilada, apresentou menor intensificação da transferência de calor, comparado ao caso inclinado com a espuma retangular.

Ao comparar este comportamento com os tempos obtidos para a fusão completa do bioPCM nos casos B e C, Figura 4.4(b e c), percebe-se que a inibição da convecção natural retardou significativamente o processo de fusão. Como exemplo deste comportamento, ao comparar os perfis de β da Figura 4.11 com os perfis da Figura 4.6, em $t = 11.700$ s, percebe-se que nos casos B e C foram obtidos valores de $\beta = 0,96$, enquanto que para o caso D obteve-se $\beta = 0,68$ e para o caso E obteve-se $\beta = 0,58$, o que corresponde à diferença aproximada de 29% para o caso D e 40% para o caso E.

Figura 4.11 - Perfis de fração de líquido em função do tempo para os casos D e E.



Fonte: o autor (2025).

Por fim, as Figura 4.12(a e b) mostram campos de β para os casos D e E, respectivamente, no instante $t = 14.400$ s. Neste instante, os campos de β estão praticamente estabilizados, onde, para o caso D, o valor de β corresponde a 0,77, enquanto que, para o caso E, este corresponde a 0,64. Portanto, para o fluxo de calor aplicado nestes casos, foi constatada a atenuação da duração da convecção natural e insuficiência do mesmo para viabilizar a fusão completa do bioPCM.

Figura 4.12 – Campos de fração de líquido no instante de tempo $t = 14.400$ s, para os casos D e E.



Fonte: o autor (2025).

Os resultados apresentados evidenciaram a potencial utilização da cera de palma como bioPCM, com valor de calor latente superior a PCM atualmente comercializado. Este também apresentou temperatura inicial de degradação superior a 200 °C, além de baixo valor de condutividade térmica, intensificada com a inserção

da espuma metálica. Como planejado, a proposta de implementação de espuma com geometria perfilada, apresentou transferência de calor mista, ou seja, combinando transferência de calor por condução com a preservação da convecção natural. Deste modo, através dos campos de fração de líquido foi possível analisar o comportamento dos mecanismos de transferência de calor, enquanto que por meio dos perfis de temperatura foi possível analisar a resposta térmica do bioPCM ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foi analisado experimentalmente o comportamento dos processos de carga (fusão) e descarga (solidificação) de um bioPCM, por meio de ensaios experimentais sob diferentes geometrias de espuma metálica e fluxos de calor. Os resultados evidenciam que a incorporação de espuma metálica melhora efetivamente a transferência de calor em sistemas de armazenamento de energia térmica contendo bioPCM. Adicionalmente, a alteração geométrica da espuma permite balancear a transferência de calor por condução e convecção, conforme requisitos de aplicação. Deste modo, as conclusões relevantes desta pesquisa são as seguintes:

Influência da geometria da espuma metálica:

- A adição da espuma metálica melhorou a transferência de calor, a qual intensificou os processos térmicos de fusão e solidificação em comparação com o reservatório contendo somente bioPCM. Devido à estrutura porosa, a espuma metálica aumentou a área de superfície para troca de calor, o que facilitou a transferência de calor por condução. Ao comparar com o reservatório contendo somente bioPCM, o reservatório com espuma retangular (caso B) obteve uma redução de 7,5% no tempo de carga, enquanto o reservatório com espuma perfilada (caso C) obteve uma redução de 7,1%. No tempo de descarga, o reservatório com espuma retangular apresentou redução de 4%, enquanto o reservatório com espuma perfilada obteve aumento de 10%.
- A espuma metálica retangular (caso B) promoveu transferência de calor predominantemente condutiva, o que resultou em uma frente de fusão paralela à placa de cobre com menor influência da convecção natural.
- A espuma perfilada (caso C) apresentou um comportamento de transferência de calor misto, combinando condução de calor aprimorada com preservação da convecção natural. Essa configuração levou a uma taxa de fusão mais rápida nos estágios iniciais do processo.
- A presença de espuma metálica aumentou a “*mushy zone*” – região intermediária entre as fases sólida e líquida – indicando melhor transferência de calor e distribuição com maior uniformidade da energia térmica.

Comportamento térmico:

- Durante o processo de carga, os casos com espuma metálica (B e C) apresentaram temperaturas mais elevadas e uniformes em comparação ao caso contendo somente com bioPCM, no qual o caso B apresentou as maiores temperaturas e a maior estratificação térmica.
- Os dados dos sensores de temperatura revelaram que a fusão evoluiu de forma mais eficiente nos casos com espuma metálica, particularmente evidente pela resposta mais rápida do sensor posicionado na base (S_{10}), que evidencia o avanço da frente de fusão.
- A descarga (solidificação) ocorreu mais rapidamente no caso B, seguida pelo caso A, sendo mais lenta no caso C. O maior tempo de descarga no caso C foi ocasionado pelo menor volume de espuma e pela maior temperatura do bioPCM advinda do processo de carga.

Desempenho do armazenamento de energia:

- Embora a energia total acumulada tenha sido semelhante em todos os casos (~24.000 kJ), o tempo necessário para atingir o armazenamento total foi significativamente menor para as configurações aprimoradas com espuma.
- A inclusão da espuma metálica melhorou a taxa de armazenamento de energia em aproximadamente 8,1% (caso B) e 7,6% (caso C) em comparação ao caso contendo somente bioPCM.

Efeito do fluxo de calor:

- Maior fluxo de calor acelerou significativamente o processo de fusão. A diferença de tempo entre os casos de alto e baixo fluxo de calor foi de aproximadamente 7.320 s, o que representou duração 35% maior sob menor aporte de calor.
- Embora o tempo total de fusão tenha variado com o fluxo de calor, os mecanismos dominantes de transferência de calor (condução e convecção natural) permaneceram consistentes durante todo o processo.

Apesar do caso com espuma perfilada não ter apresentado o menor tempo de fusão, comparado ao caso com espuma retangular, o mesmo apresentou comportamento interessante, com melhores resultados em relação ao processo de fusão total e ao armazenamento de energia térmica ao caso contendo somente o

bioPCM. Dessa forma, a espuma com geometria perfilada mostra-se promissora, especialmente em aplicações que necessitem de menor tempo de processo sem aumento significativo do peso do sistema.

Efeito da inclinação:

- Por meio da inclinação dos reservatórios em 30°, houve alteração na dinâmica do processo de fusão, com mudança no avanço da frente de fusão. O caso contendo a espuma com geometria retangular apresentou maior fusão do bioPCM comparado ao caso com espuma perfilada. A estrutura da espuma retangular permitiu que mais calor fosse transferido ao bioPCM, através do mecanismo de condução de calor, acarretando em fusão mais acelerada.
- No Caso D, a transferência de calor permaneceu predominantemente condutiva, onde a frente de fusão avançou quase paralelamente à placa de cobre e os sensores a jusante registraram temperaturas mais altas. Em contraste, o Caso E exibiu um regime misto de condução-convecção. Entre os perfis da espuma, as forças de empuxo superaram a resistência viscosa, gerando ciclos naturais de convecção (movimento ascendente do bioPCM fundido e movimento descendente na interface sólido-líquido), enquanto, sob os perfis, a condução ainda predominava.

Comportamento do bioPCM:

- O uso da cera de palma apresentou comportamento promissor como bioPCM, com valor de calor latente superior a PCM comercializado, para a faixa de temperatura de mudança de fase similar.
- O bioPCM apresentou temperatura de degradação superior a 500 °C, tanto para atmosfera inerte quanto para atmosfera oxidante.
- Como esperado o bioPCM apresentou baixo valor de condutividade térmica, onde a inserção da espuma metálica resultou em condutividade térmica efetiva superior.

6 TRABALHOS FUTUROS

Por meio do desenvolvimento desta pesquisa foi possível agregar conhecimento sobre a dinâmica dos processos térmicos do bioPCM com a inserção da espuma metálica de geometria perfilada. Deste modo, ao analisar os resultados obtidos, sugere-se:

- Análise dos processos térmicos do mesmo bioPCM (cera de palma), com alteração do material da espuma metálica para cobre, porém com a manutenção da geometria perfilada.
- Análise de novas configurações geométricas, no intuito de aumentar a convecção natural em casos inclinados e a condução de calor em casos verticais.
- Utilização de resistência que permita a obtenção de fluxo de calor constante ou implementação de um banho térmico, o que poderá flexibilizar alterações da temperatura inicial dos ensaios.

REFERÊNCIAS

ABDELLATIF, Houssam Eddine *et al.* Modeling and performance analysis of phase change materials in advanced thermal energy storage systems: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, v. 121, p. 116517, jun. 2025.

AKEIBER, Hussein *et al.* A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 1470–1497, jul. 2016.

ARAMESH, Mohamad; SHABANI, Bahman. Metal foam-phase change material composites for thermal energy storage: A review of performance parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, p. 111919, mar. 2022.

ARICI, Müslüm *et al.* Enhancement of PCM melting rate via internal fin and nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 156, p. 119845, ago. 2020.

ASTM E1269. Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken, PA: ASTM International, , 1 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E1269-11>>

BEIHAI COMPOSITE. Aluminum Foam. Disponível em: <<https://www.beihacomposite.com/aluminum-foam/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BENBRIKA, Mebrouk *et al.* Effect of graphene nanoparticles on charging and discharging processes of latent thermal energy storage using horizontal cylinders. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 45, p. 101242, jun. 2021.

BOOMSMA, Kevin; POULIKAKOS, Dimos. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 44, n. 4, p. 827–836, fev. 2001.

BOOMSMA, Kevin; POULIKAKOS, Dimos. Corrigendum for the paper: K. Boomsma, D. Poulikakos, “On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam” [International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (2001) 827–836]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 54, n. 1–3, p. 746–748, jan. 2011.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Disponível em: <<https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>>. Acesso em: 24 nov. 2022.

CALMIDI, V. v.; MAHAJAN, R. L. The Effective Thermal Conductivity of High Porosity Fibrous Metal Foams. *Journal of Heat Transfer*, v. 121, p. 466–471, 1999.

CARMONA, Mauricio; PALACIO BASTOS, Alberto; GARCÍA, José Doria. Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector

with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, v. 172, p. 680–696, jul. 2021.

CHANGDAR, Anirban; CHAKRABORTY, Shitanshu Shekhar. Laser processing of metal foam - A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 61, p. 208–225, jan. 2021.

COLAROSSI, Daniele; PRINCIPI, Paolo. Indoor and Outdoor Performance of an Enhanced Photovoltaic Panel through Graphene/Fins/Phase Change Materials. *Applied Sciences*, v. 11, n. 19, p. 8807, 22 set. 2021.

DE GRACIA, Alvaro; CABEZA, Luisa F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, v. 103, p. 414–419, set. 2015.

DHAIDAN, Nabeel S. *et al.* Review of solidification of phase change materials dispersed with nanoparticles in different containers. *Journal of Energy Storage*, v. 51, p. 104271, jul. 2022.

DUAN, Juan. The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel. *Renewable Energy*, v. 180, p. 1315–1332, dez. 2021.

EJAZ, Ali; JAMIL, Furqan; ALI, Hafiz Muhammad. A novel thermal regulation of photovoltaic panels through phase change materials with metallic foam-based system and a concise comparison: An experimental study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 49, p. 101726, fev. 2022.

EZZAT, Yohana; SAKR, R. Y.; ABDEL-REHIM, Ahmed A. Numerical investigation of the effect of thermal expansion coefficient and mushy zone constant on modelling of the phase change process to provide reliable selection criteria of modelling parameters. *Journal of Energy Storage*, v. 72, p. 108771, nov. 2023.

GROVES, David I.; SANTOSH, M.; ZHANG, Liang. Net zero climate remediations and potential terminal depletion of global critical metal resources: A synoptic geological perspective. *Geosystems and Geoenvironment*, v. 2, n. 1, p. 100136, fev. 2023.

GUO, Junfei *et al.* Effect of fin-metal foam structure on thermal energy storage: An experimental study. *Renewable Energy*, v. 172, p. 57–70, jul. 2021.

HAFILA, K. Z. *et al.* Effect of palm wax on the mechanical, thermal, and moisture absorption properties of thermoplastic cassava starch composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 194, p. 851–860, jan. 2022.

HARUN-OR-RASHID, Mohammad *et al.* Energy efficient refrigeration system using latent heat storage, PCM. *International Journal of Thermofluids*, v. 23, p. 100717, ago. 2024.

HEKMAT, Mohamad Hamed *et al.* The influence of energy storage container geometry on the melting and solidification of PCM. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 137, p. 106237, out. 2022.

HOWARD, Lisa. When global problems come home: Engagement with climate change within the intersecting affective spaces of parenting and activism. *Emotion, Space and Society*, v. 44, p. 100894, ago. 2022.

HU, Haitao; ZHAO, Yixin; LI, Yuhan. Research progress on flow and heat transfer characteristics of fluids in metal foams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 171, p. 113010, jan. 2023.

HU, Nan *et al.* Rapid charging for latent heat thermal energy storage: A state-of-the-art review of close-contact melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, p. 111918, mar. 2022.

HU, Xusheng; ZHU, Feng; GONG, Xiaolu. Experimental and numerical study on the thermal behavior of phase change material infiltrated in low porosity metal foam. *Journal of Energy Storage*, v. 26, p. 101005, dez. 2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 29 set. 2022.

IRFAN LONE, Mohammad; JILTE, Ravindra. A review on phase change materials for different applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 10980–10986, 2021.

ISMAIL, Kamal A. R. *et al.* New potential applications of phase change materials: A review. *Journal of Energy Storage*, v. 53, p. 105202, set. 2022.

IYERE, Sunday F.; OZIGI, Bernard O. A.; YEBOAH, Joseph K. Response characteristics of a negative temperature coefficient thermistor. *Journal of Electrical, Control and Technological Research*, v. 1, p. 17–22, 29 jul. 2020.

JAFARPOUR, Milad; FATHI, Milad; SOLTANIZADEH, Nafiseh. Encapsulation of polyethylene glycol as a phase change material using alginate microbeads to prevent temperature fluctuation- Case study: Fish packaging. *Food Hydrocolloids*, v. 134, p. 108029, jan. 2023.

JAGUEMONT, Joris *et al.* Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, v. 132, p. 308–320, mar. 2018.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. 34970A Data Acquisition/Switch Unit Family. [S.I.: S.n.J. Disponível em: <www.keysight.com>.

LAWAG, Radhi Abdullah; ALI, Hafiz Muhammad. Phase change materials for thermal management and energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, v. 55, p. 105602, nov. 2022.

LI, Dehong *et al.* Incorporation technology of bio-based phase change materials for building envelope: A review. *Energy and Buildings*, v. 260, p. 111920, abr. 2022a.

LI, Hongyang *et al.* Visualized-experimental investigation on the energy storage performance of PCM infiltrated in the metal foam with varying pore densities. *Energy*, v. 237, p. 121540, dez. 2021.

LI, Weilin *et al.* Study of ultra-light modular phase change cooling clothing based on dynamic human thermal comfort modeling. *Building and Environment*, v. 222, p. 109390, ago. 2022b.

LI, Zi-Rui *et al.* Enhanced power density during energy charging of a shell-and-tube thermal storage unit: Comparison between the inclusion of metal fins and foams. *Journal of Energy Storage*, v. 55, p. 105576, nov. 2022c.

LIU, Gang *et al.* Design and assessments on a hybrid pin fin-metal foam structure towards enhancing melting heat transfer: An experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 182, p. 107809, dez. 2022.

MAHDI, Jasim M. *et al.* Simultaneous and consecutive charging and discharging of a PCM-based domestic air heater with metal foam. *Applied Thermal Engineering*, v. 197, p. 117408, out. 2021.

MALLYA, Nithin; HAUSSENER, Sophia. Buoyancy-driven melting and solidification heat transfer analysis in encapsulated phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 164, p. 120525, jan. 2021.

MANETTI, Leonardo Lachi *et al.* Pool boiling heat transfer of HFE-7100 on metal foams. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 113, p. 110025, maio 2020.

MARRI, Girish Kumar; BALAJI, C. Experimental and numerical investigations on the effect of porosity and PPI gradients of metal foams on the thermal performance of a composite phase change material heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 164, p. 120454, jan. 2021.

MASOUMI, H.; HAGHIGHI KHOSHKHOO, R.; MIRFENDERESKI, S. M. Experimental and numerical investigation of melting/solidification of nano-enhanced phase change materials in shell & tube thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, v. 47, p. 103561, mar. 2022.

MAYILVELNATHAN, V.; VALAN ARASU, A. Experimental investigation on thermal behavior of graphene dispersed erythritol PCM in a shell and helical tube latent energy storage system. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 155, p. 106446, set. 2020.

MEHARI, Abel; XU, Z. Y.; WANG, R. Z. Thermal energy storage using absorption cycle and system: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, v. 206, p. 112482, fev. 2020.

MEHLING, Harald; BRÜTTING, Michael; HAUSSMANN, Thomas. PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021. *Journal of Energy Storage*, v. 51, p. 104354, jul. 2022.

MEI, Jie *et al.* Investigation on the optimization strategy of phase change material thermal management system for lithium-ion battery. *Journal of Energy Storage*, v. 55, p. 105365, nov. 2022.

MIRDRIKVAND, Mojtaba *et al.* Pore-scale analysis of axial and radial dispersion coefficients of gas flow in macroporous foam monoliths using NMR-based displacement measurements. *Chemical Engineering Journal*, v. 388, p. 124234, maio 2020.

MITALI, J.; DHINAKARAN, S.; MOHAMAD, A. A. Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*, v. 1, n. 3, p. 166–216, set. 2022.

MOALLEMI, M. K.; WEBB, B. W.; VISKANTA, R. An Experimental and Analytical Study of Close-Contact Melting. *Journal of Heat Transfer*, v. 108, p. 894–899, 1986.

MOZAFARI, M.; LEE, Ann; MOHAMMADPOUR, Javad. Thermal management of single and multiple PCMs based heat sinks for electronics cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 23, p. 100919, jun. 2021.

NAZARI, Meysam; JEBRANE, Mohamed; TERZIEV, Nasko. Bio-Based Phase Change Materials Incorporated in Lignocellulose Matrix for Energy Storage in Buildings—A Review. *Energies*, v. 13, n. 12, p. 3065, 13 jun. 2020.

OLIVESKI, Rejane De Césaro *et al.* Design of fin structures for phase change material (PCM) melting process in rectangular cavities. *Journal of Energy Storage*, v. 35, p. 102337, mar. 2021.

PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, v. 65, p. 67–123, ago. 2014.

QASIM, Muhammad Arslan *et al.* The effect of using hybrid phase change materials on thermal management of photovoltaic panels – An experimental study. *Solar Energy*, v. 209, p. 415–423, out. 2020.

REDDY, K. S.; MUDGAL, Vijay; MALLICK, T. K. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. *Journal of Energy Storage*, v. 15, p. 205–227, fev. 2018.

ROSTAMI, Sara *et al.* A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, v. 211, p. 118698, nov. 2020.

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH. Data sheet RT60. Disponível em: <<https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt>>. Acesso em: 27 jul. 2025a.

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH. Data sheet RT55. Disponível em: <<https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt>>. Acesso em: 27 jul. 2025b.

SAMUEL HANSEN, R. *et al.* Utilization of PCM in inclined and single basin solar stills to improve the daily productivity. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 967–972, 2022.

SHAKIBI, Hamid *et al.* Utilization of a phase change material with metal foam for the performance improvement of the photovoltaic cells. *Journal of Energy Storage*, v. 51, p. 104466, jul. 2022.

SHANG, Bofeng *et al.* Modularized thermal storage unit of metal foam/paraffin composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 125, p. 596–603, out. 2018.

SHARIFZADEH, Amir Mohammad *et al.* Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement using electrodeposited open-cell metal foam. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 176, p. 107536, jun. 2022.

SHARMA, Atul *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 2, p. 318–345, fev. 2009.

SHEIKH, Yahya; ORHAN, Mehmet Fatih; AZMEER, Ahmed. Melting performance of a composite bio-based phase change material: An experimental evaluation of copper foam pore size. *International Journal of Thermofluids*, v. 16, p. 100216, nov. 2022.

SHI, Juan *et al.* Review of phase change heat transfer enhancement by metal foam. *Applied Thermal Engineering*, v. 219, p. 119427, jan. 2023.

SHIN, Sung Gil *et al.* Preliminary design of safety system using phase change material for passively cooling of nuclear reactor containment building. *Applied Thermal Engineering*, v. 200, p. 117672, jan. 2022.

SHOKOUEHMAND, Hossein; KAMKARI, Babak. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 50, p. 201–212, out. 2013.

SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, n. 11, p. 1393–1402, nov. 2008.

SOLÉ, Aran *et al.* Review of the T -history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 425–436, out. 2013.

SPENGLER, Fernando Claudio *et al.* Effect of extended surfaces on lauric acid melting process in annular cavities. *Journal of Energy Storage*, v. 46, p. 103867, fev. 2022.

TAN, F. L. Constrained and unconstrained melting inside a sphere. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 35, n. 4, p. 466–475, abr. 2008.

TYAGI, V. V. *et al.* A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications: Development, characterization, thermal and chemical stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 234, p. 111392, jan. 2022.

WANG, Hongfei *et al.* Experimental investigation on the thermal performance of a heat sink filled with porous metal fiber sintered felt/paraffin composite phase change material. *Applied Energy*, v. 176, p. 221–232, ago. 2016.

XIAO, X.; ZHANG, P.; LI, M. Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material. *Applied Energy*, v. 112, p. 1357–1366, dez. 2013.

XU, H. J. *et al.* Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications. *Chemical Engineering Science*, v. 195, p. 462–483, fev. 2019.

YANG, Xiaohu *et al.* Role of pin fin-metal foam composite structure in improving solidification: Performance evaluation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 117, p. 104775, out. 2020.

YINPING, Zhang; YI, Jiang; YI, Jiang. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology*, v. 10, p. 201–205, 1999.

YU, X. K. *et al.* Temperature control performance of high thermal conductivity metal foam/paraffin composite phase change material: An experimental study. *Journal of Energy Storage*, v. 46, p. 103930, fev. 2022.

ZHANG, Chengbin; SUN, Qing; CHEN, Yongping. Solidification behaviors and parametric optimization of finned shell-tube ice storage units. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 146, p. 118836, jan. 2020.

ZHANG, Shengqi *et al.* Role of partial and gradient filling strategies of copper foam on latent thermal energy storage: An experimental study. *Energy*, v. 255, p. 124517, set. 2022.

ZHANG, Shengqi *et al.* Experimental study on charging and discharging performance of latent energy storage with topologically optimized fins: Diffusion and convection design. *Energy*, v. 328, p. 136467, ago. 2025.

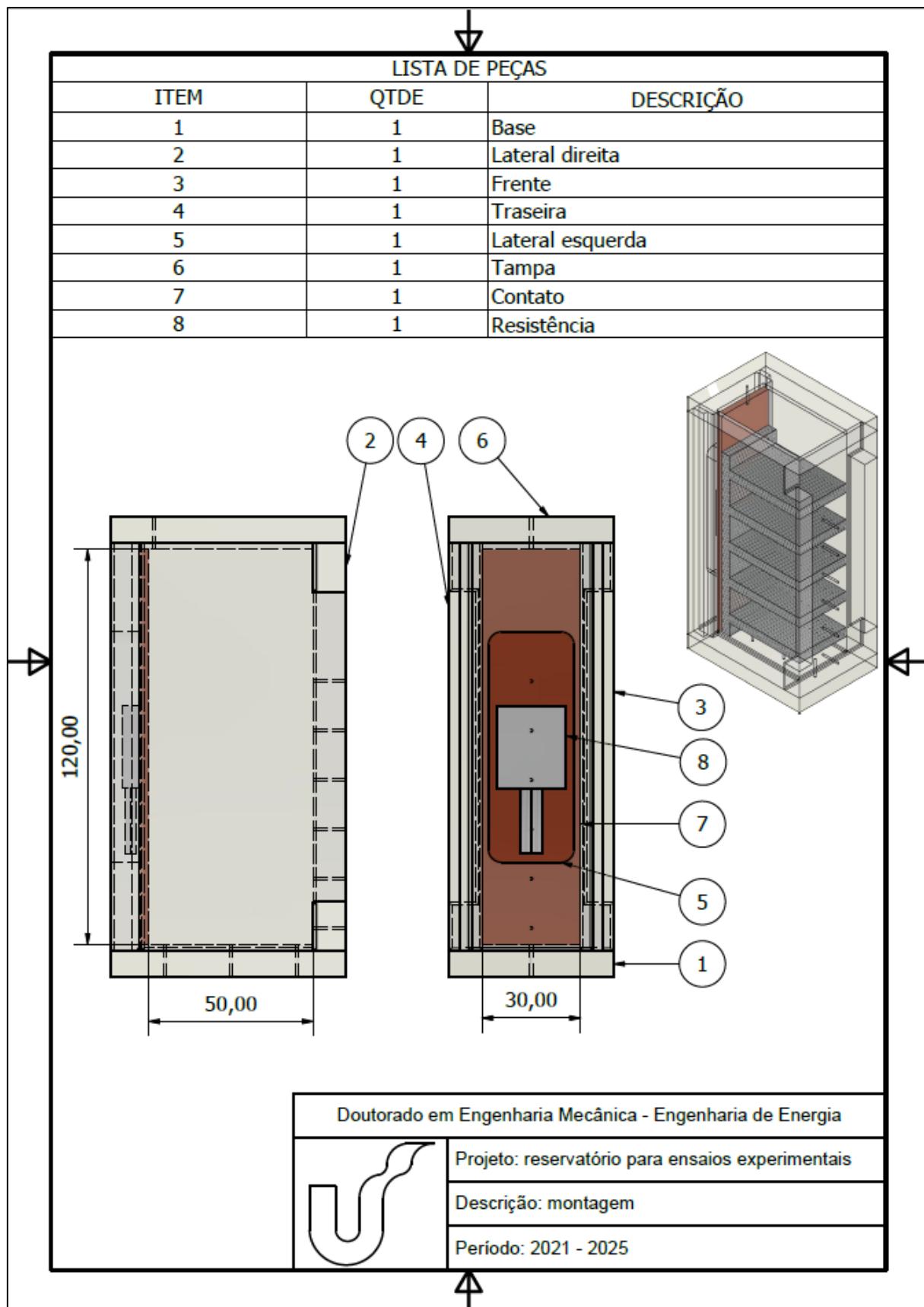
ZHAO, Chunrong *et al.* Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 150, p. 119348, abr. 2020.

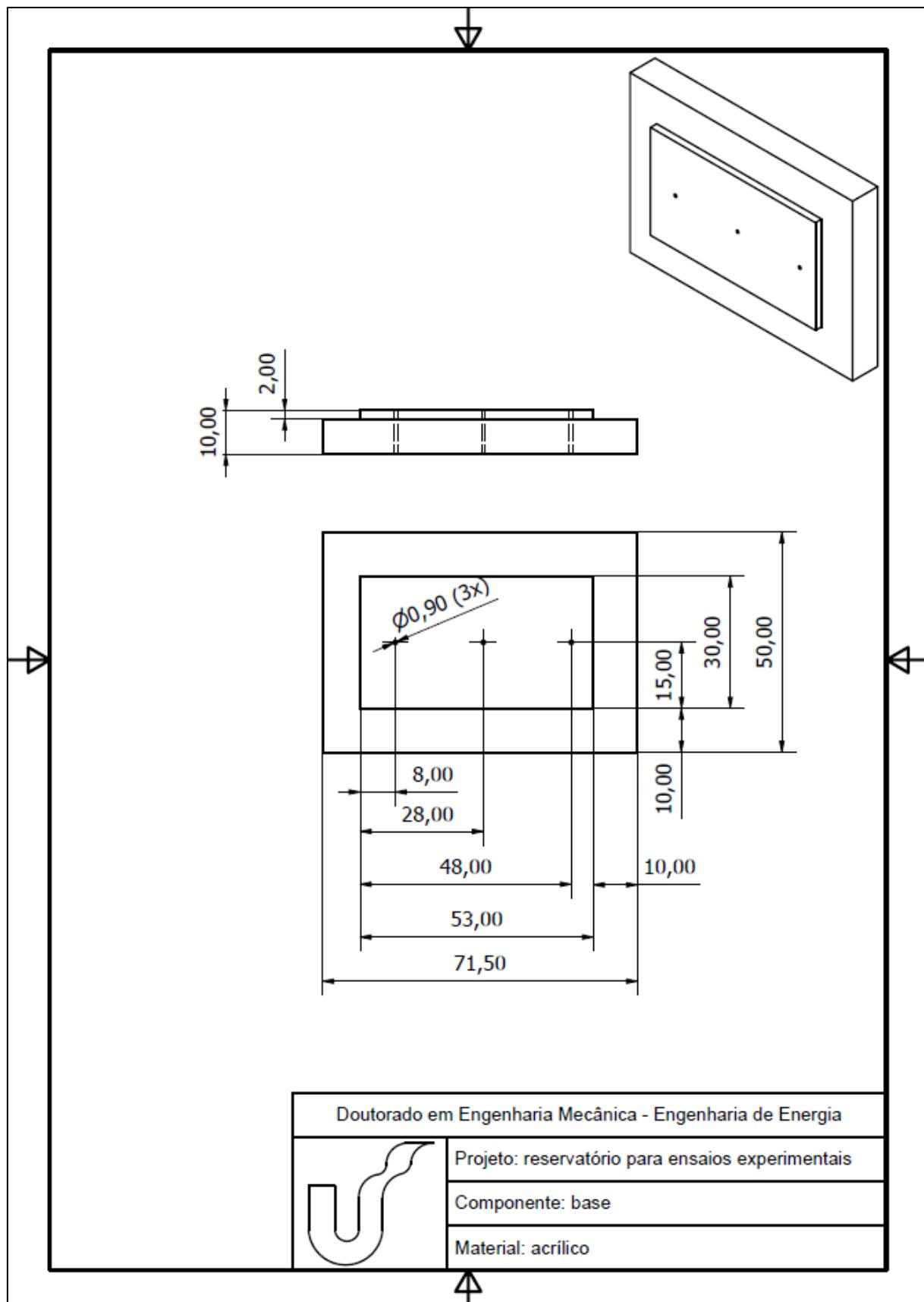
ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, v. 92, p. 593–605, abr. 2012.

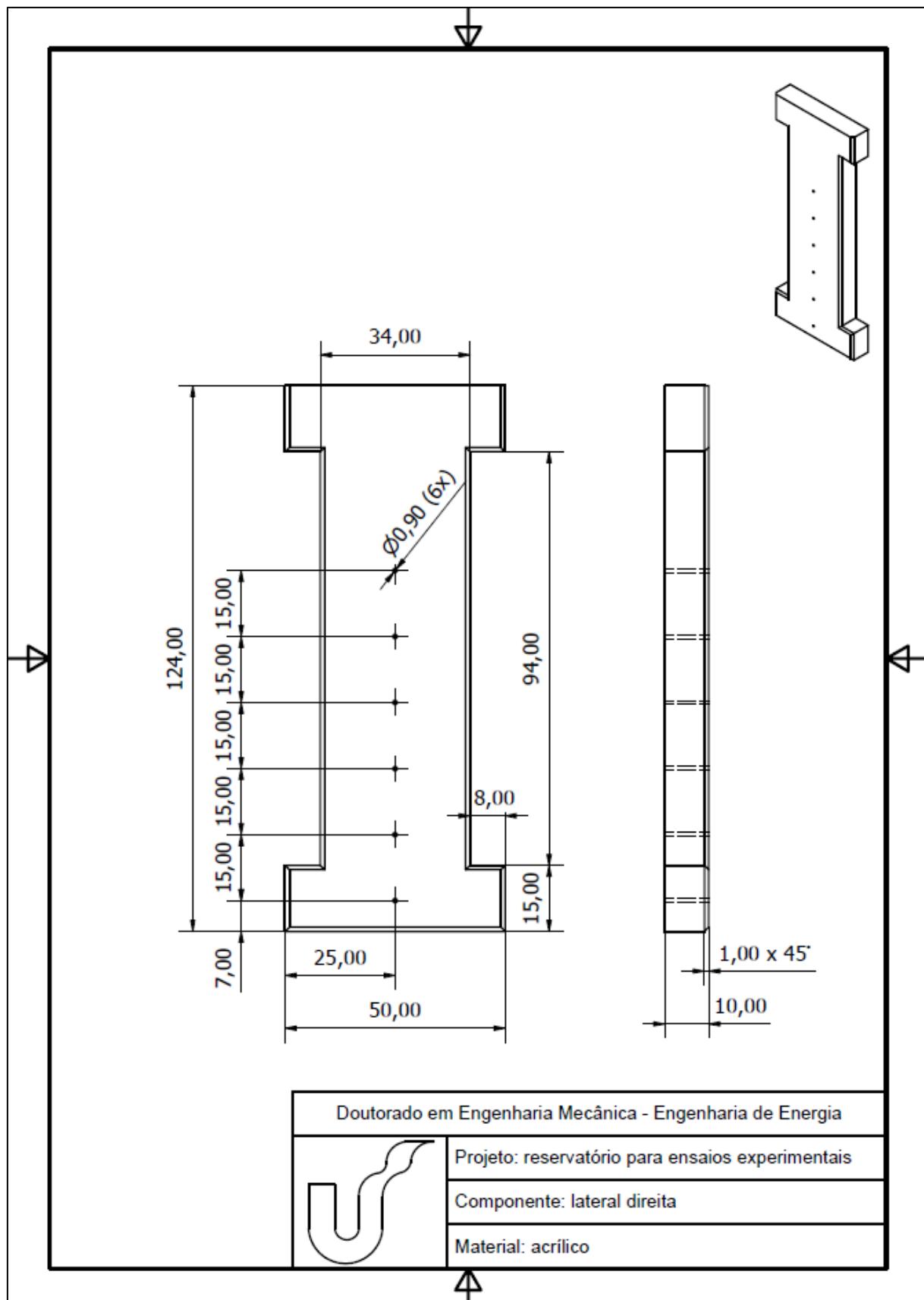
ZHU, Feng *et al.* Experimental and numerical investigation of the melting process of aluminum foam/paraffin composite with low porosity. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, v. 77, n. 12, p. 998–1013, 17 jun. 2020.

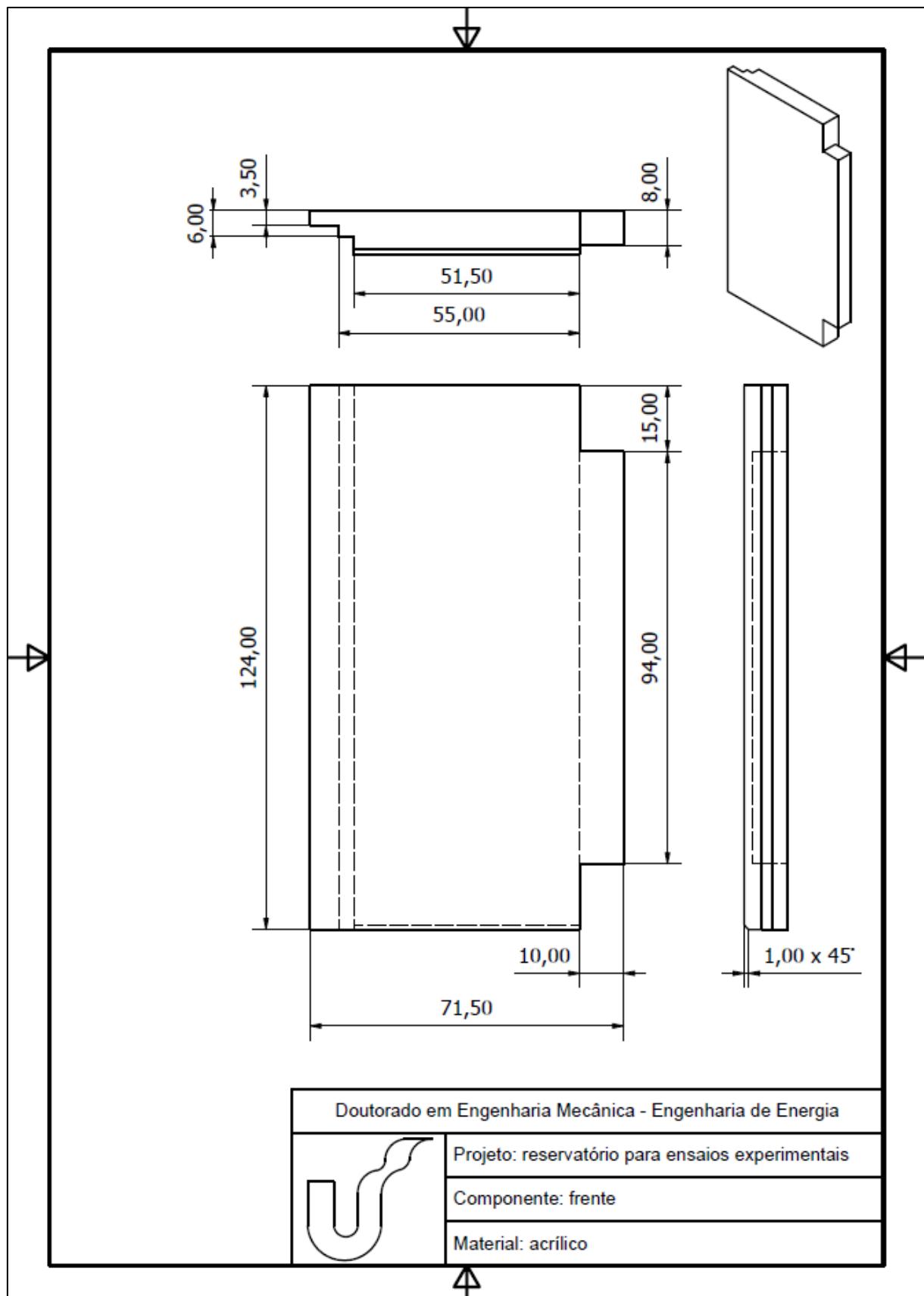
ZHU, Xueliang; LI, Yan; ZHU, Qunzhi. Heat transfer enhancement technology for fins in phase change energy storage. Journal of Energy Storage, v. 55, p. 105833, nov. 2022.

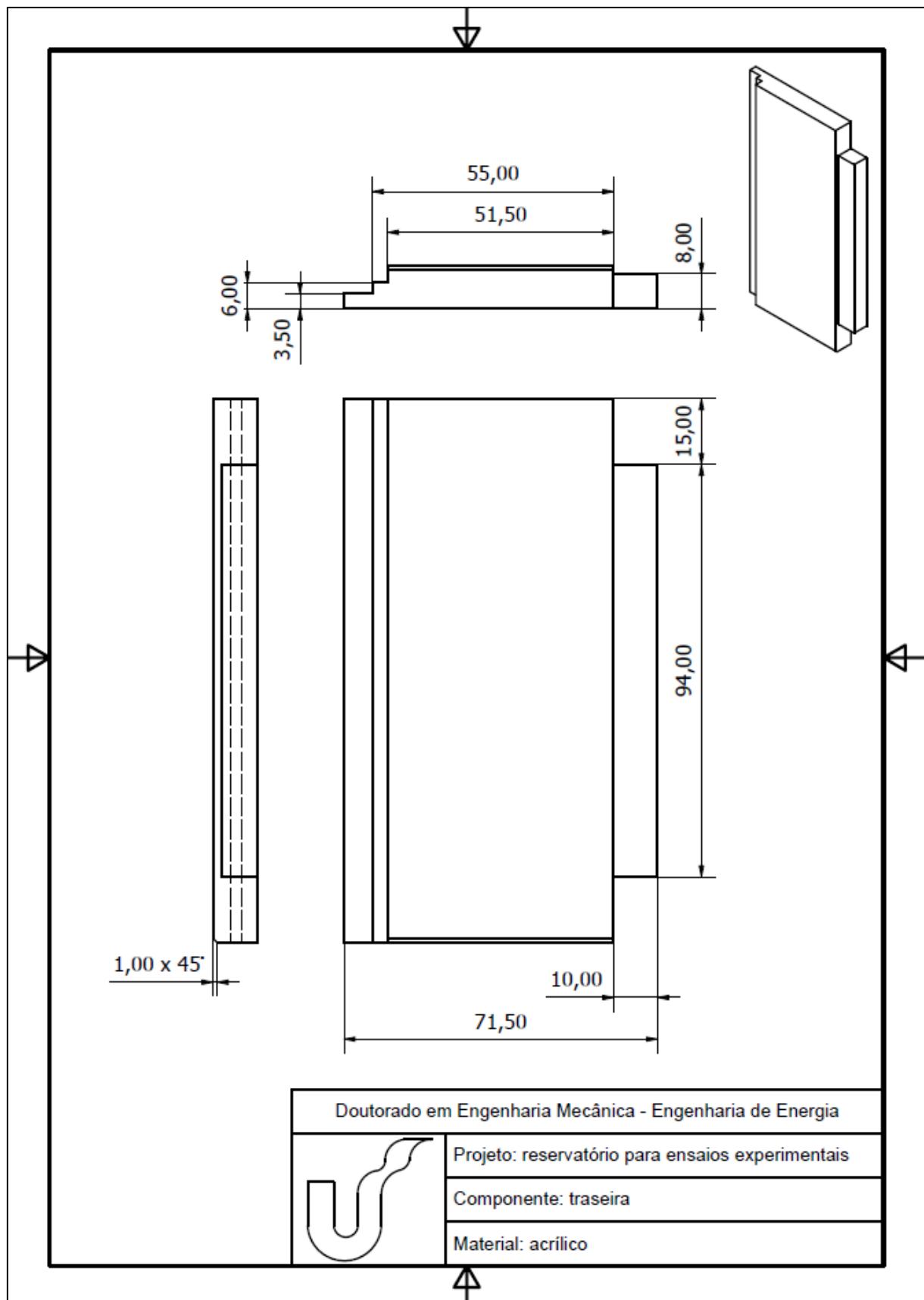
APÊNDICE A - PROJETO DO RESERVATÓRIO

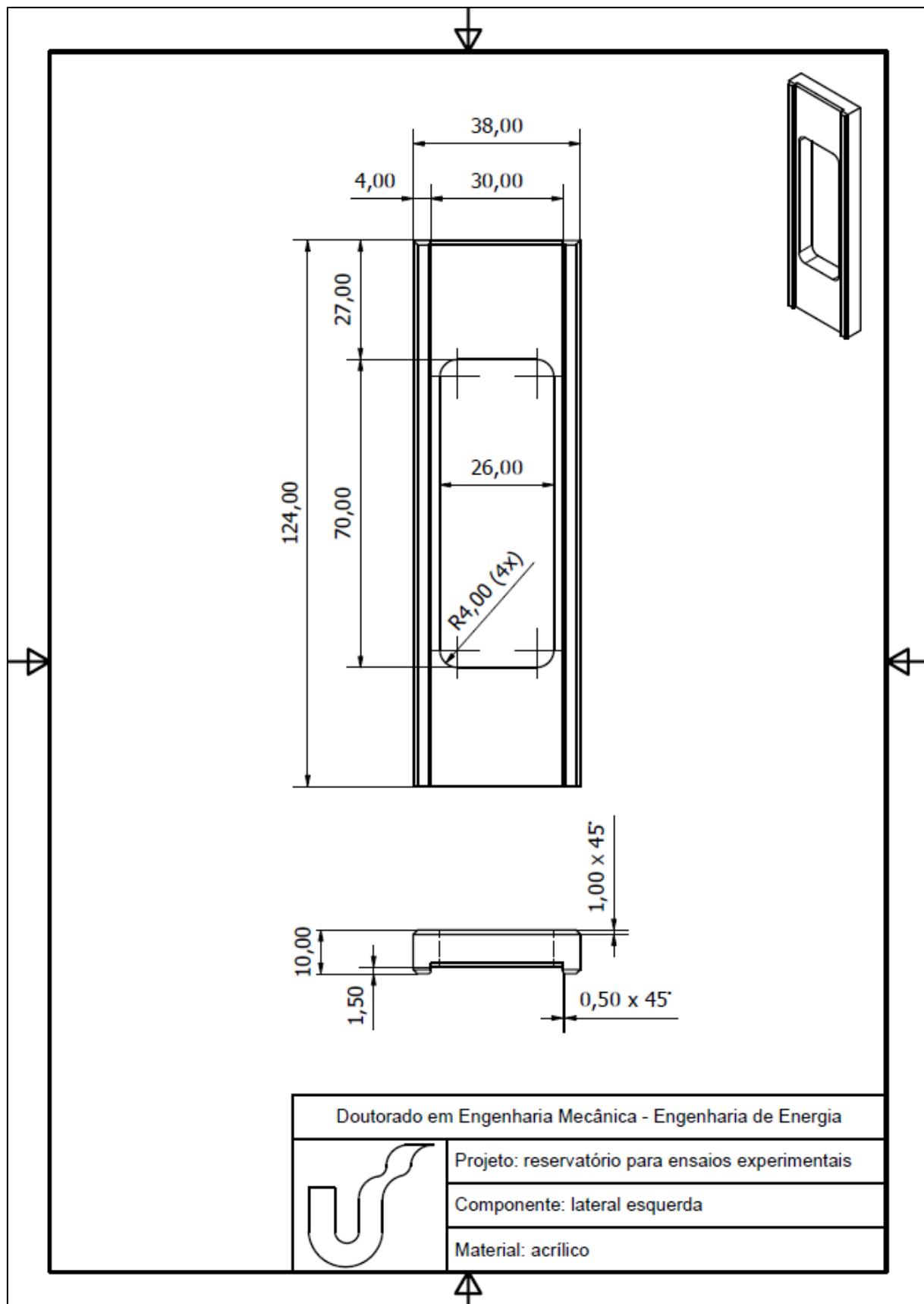


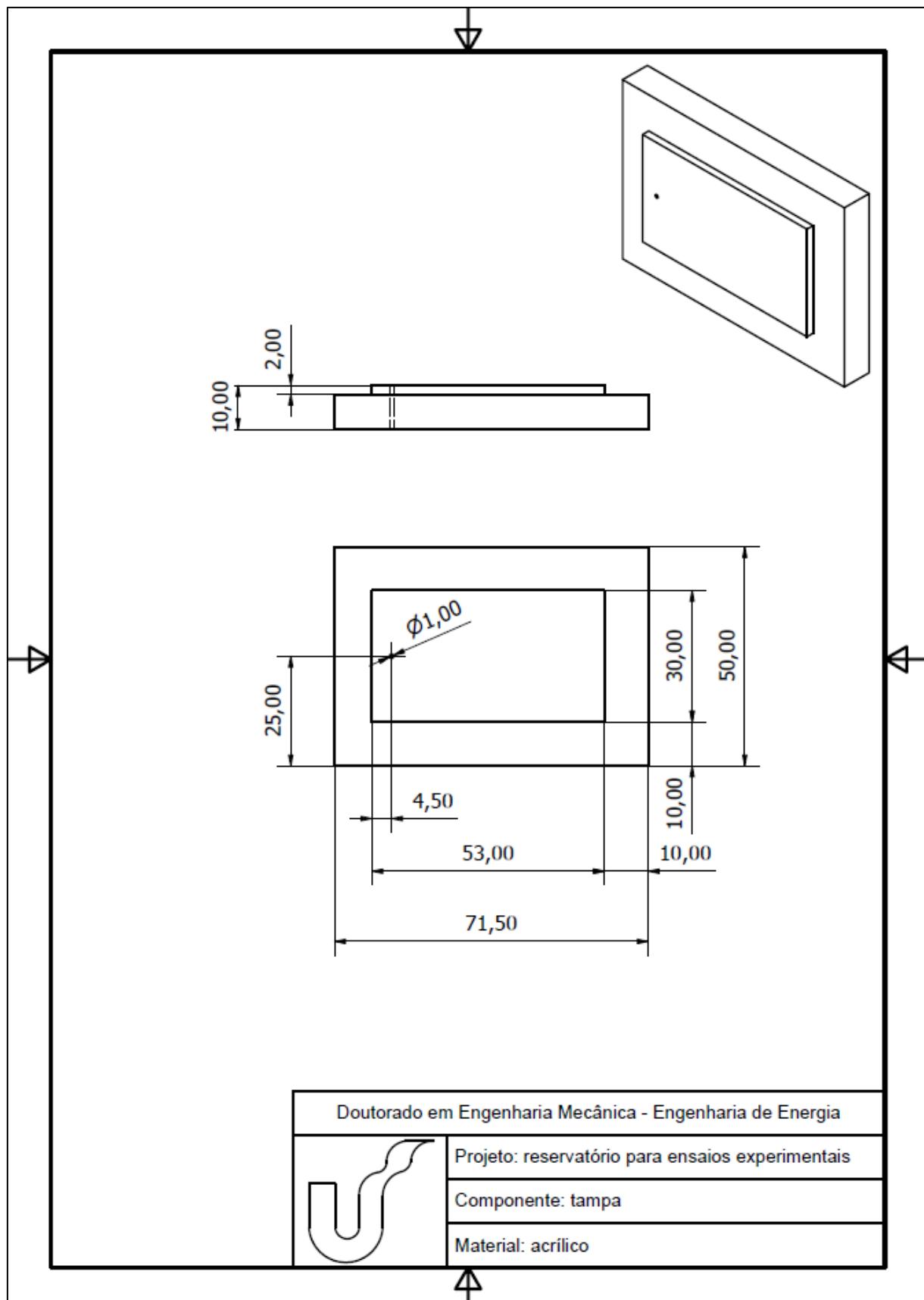


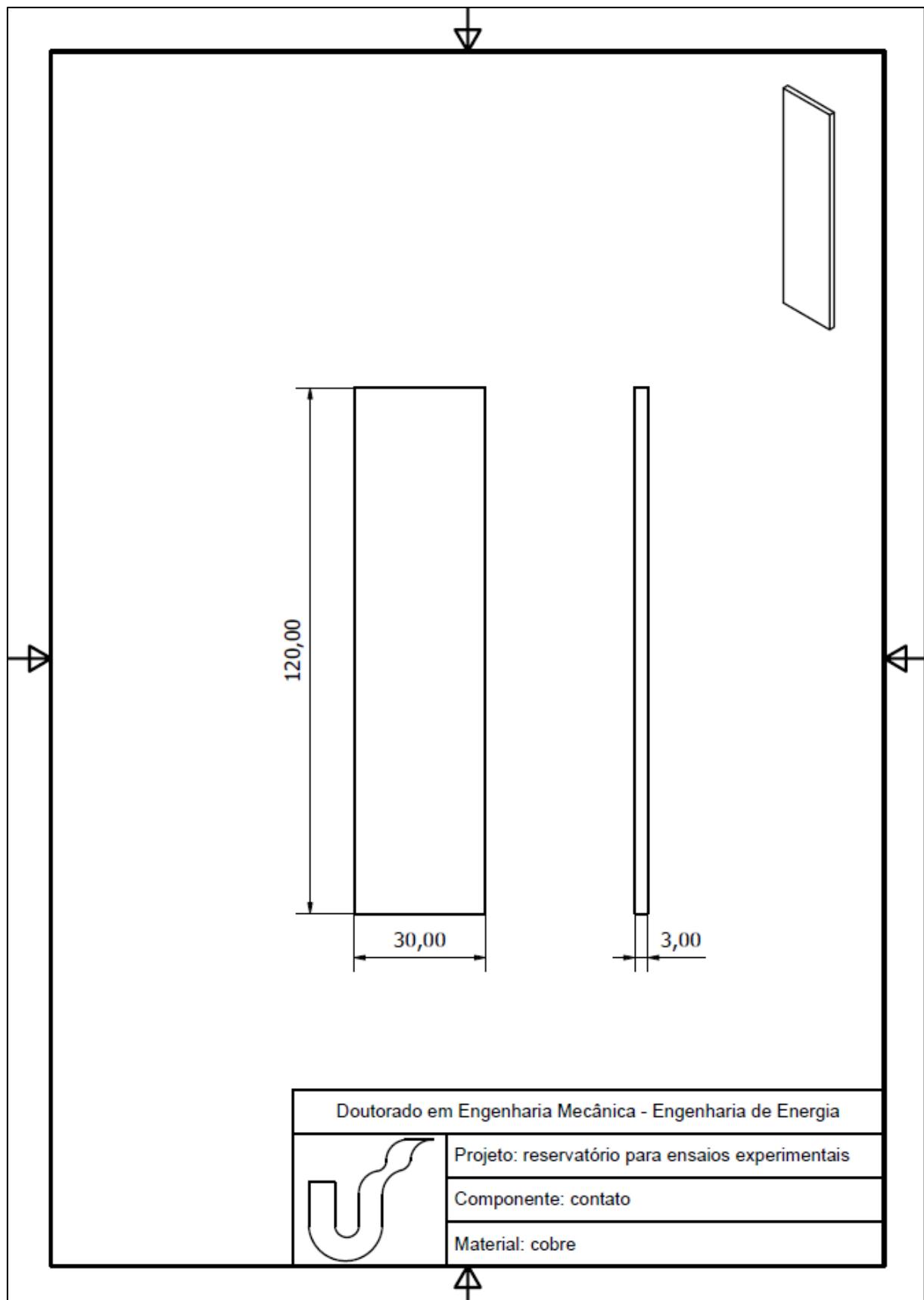








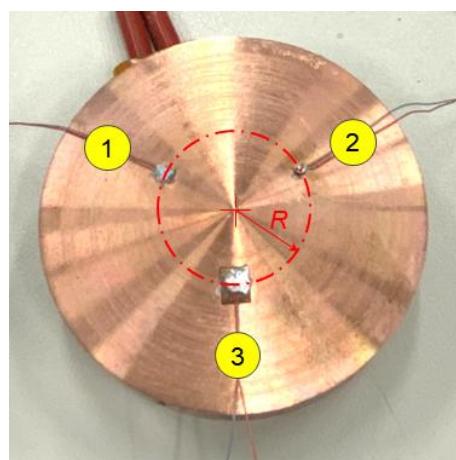




APÊNDICE B – ANÁLISE DA FIXAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA CHAPA DE COBRE

Na intenção de analisar a melhor alternativa para fixação do sensor de temperatura (S) na chapa de cobre, três opções distintas foram avaliadas. Para tal, foi preparada uma amostra de cobre de 50,8 mm de diâmetro por 10 mm de espessura. Nesta, 3 sensores foram posicionados em um raio (R) de 10 mm, em relação ao centro da amostra, distanciados igualmente em 120° , conforme exposto na Figura B.1. De acordo com a imagem, na fixação “1” o sensor de temperatura foi fixo através de adesivo termo condutor, ao passo que na fixação “2” outro sensor foi soldado com estanho, enquanto na fixação “3” o sensor foi soldado em uma chapa de cobre com dimensões de 4,5 x 3,5 x 0,5 mm, sendo posteriormente posicionado na amostra sobre pasta térmica, amenizando possível efeito de resistência de contato. Na base da amostra foi posicionada uma resistência do tipo PTC, idêntica a apresentada na Figura 3.4, contendo pasta térmica entre a mesma e o cobre, possibilitando seu aquecimento. O isolamento térmico foi realizado através de lã de vidro.

Figura B.1 – Opções de fixação dos sensores de temperatura.

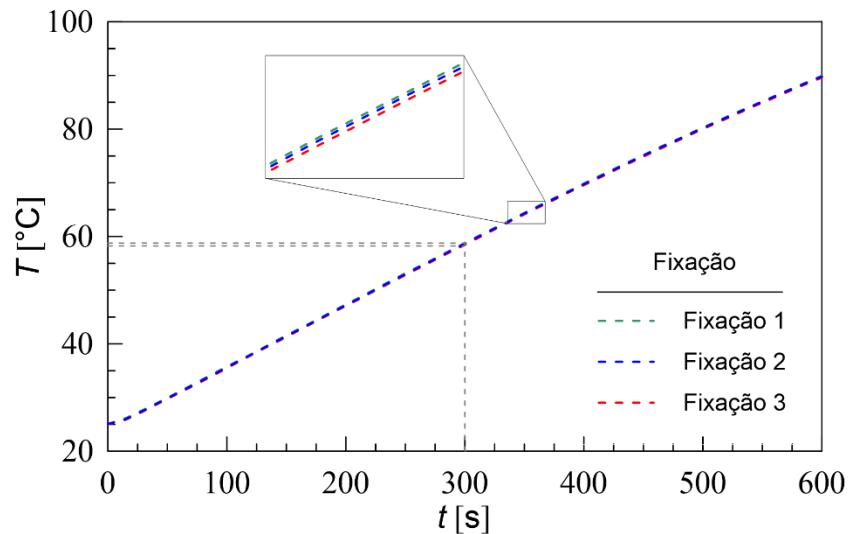


Fonte: o autor (2025).

A Figura B.2 apresenta perfis de aquecimento referentes aos sensores de temperatura analisados sob as diferentes fixações. Conforme apresentado na figura, estes foram aquecidos durante 600 s. Ao longo do tempo, foram observadas diferenças insignificantes, conforme destacado na ampliação dos perfis. Como exemplo, no instante de tempo $t = 300$ s, a leitura obtida na fixação “1” foi de 58,78 °C, enquanto na fixação “2” foi de 58,67 °C e na fixação “3” de 58,48 °C. Estes valores correspondem à diferença aproximada de 0,5% entre as fixações “1” e “3” e 0,2% entre

as fixações “1” e “2”. Desta forma, devido às pequenas diferenças observadas e ao considerar a maior facilidade de fixação, optou-se por utilizar a fixação “1” (com adesivo termocondutor).

Figura B.2 - Perfis de aquecimento dos sensores de temperatura para as diferentes formas de fixação.

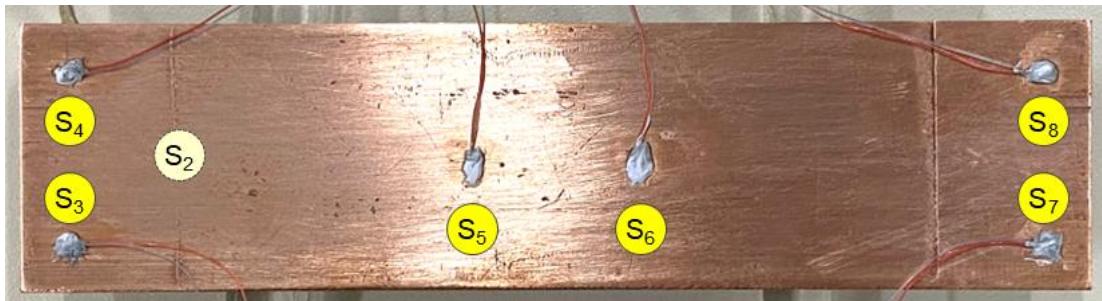


Fonte: o autor (2025).

APÊNDICE C - ANÁLISE DE UNIFORMIDADE TÉRMICA DA PLACA DE COBRE

No intuito de analisar a uniformidade térmica da placa de cobre durante seu aquecimento, 7 sensores de temperatura foram posicionados sobre uma amostra, contendo dimensões similares às da chapa inserida no reservatório. A mesma está exposta na Figura C.1. Nesta, uma resistência do tipo PTC, idêntica a apresentada na Figura 3.4, foi posicionada no centro da superfície inferior, assim como o sensor S_2 , sendo este distanciado a 10 mm da aresta esquerda. Os demais sensores foram posicionados na superfície superior, sendo os S_5 e S_6 distanciados a 50 mm e 70 mm, respectivamente, da aresta esquerda. Os demais sensores, S_3 , S_4 , S_7 e S_8 , foram posicionados a 5 mm das arestas que compõem o contorno. Todos os sensores foram fixos com adesivo termocondutor, conforme definido anteriormente. Assim como na análise anterior, o isolamento térmico foi realizado com lã de vidro.

Figura C.1 - Posicionamento dos sensores de temperatura para teste de uniformidade térmica.

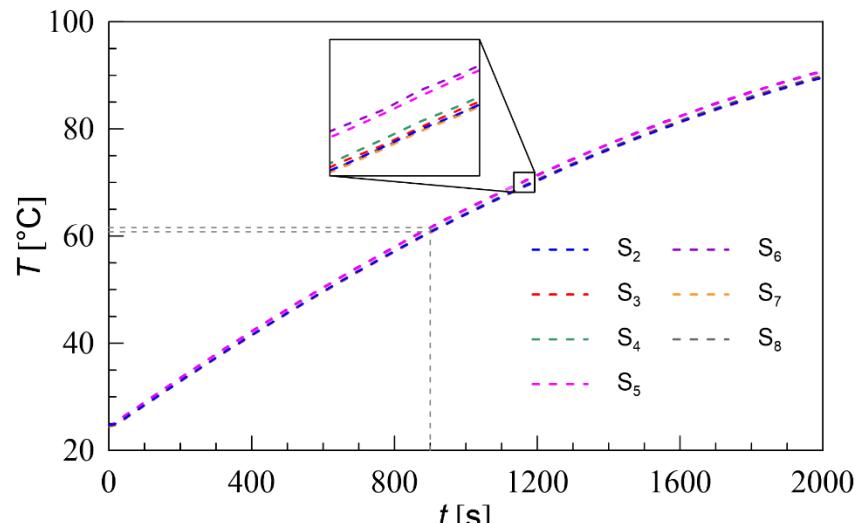


Fonte: o autor (2025).

A Figura C.2 apresenta os perfis de aquecimento obtidos para esta análise, onde o mesmo foi realizado até o instante $t = 2000$ s. Os perfis mostram leituras maiores ao longo de todo o aquecimento para os sensores S_5 e S_6 , com leituras similares para os demais sensores. Este comportamento ocorreu pelo fato da resistência ter sido fixada na mesma região dos respectivos sensores, porém na superfície oposta. No entanto, estas diferenças correspondem a menos de 2% entre as leituras. Como exemplo, no instante $t = 900$ s foram obtidas as leituras de 60,7 °C, 60,8 °C, 60,8 °C, 61,5 °C, 61,6 °C, 60,6 °C e 60,6 °C, para os sensores S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , S_6 , S_7 e S_8 , respectivamente. A diferença aproximada entre as maiores e as menores leituras foi de 1,0 °C, equivalente a 1,7%. Desta forma, evidenciou-se que as

dimensões da placa de cobre possibilitam a obtenção, entre suas superfícies e ao longo das mesmas, de uniformidade térmica para o experimento proposto.

Figura C.2 - Perfis de aquecimento da análise de uniformidade térmica.



Fonte: o autor (2025).

**APÊNDICE D - TEMPERATURAS AMBIENTE COM BASE NA ESTAÇÃO
METEOROLÓGICA A801 DO INMET**

Ano	Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2012	$T_{máx}$ (°C)	36,3	38,4	36,2	33,1	29,7	30,0	30,6	33,0	32,4	33,6	34,8	39,0
	$T_{mín}$ (°C)	17,2	17,9	10,1	8,6	7,3	1,1	2,9	7,1	7,4	12,7	13,7	15,9
2013	$T_{máx}$ (°C)	36,5	37,8	33,2	31,6	30,8	24,1	28,3	30,1	35,1	32,3	33,7	38,9
	$T_{mín}$ (°C)	14,4	14,8	14,7	10,1	5,6	7,0	1,4	5,2	6,2	11,1	12,2	15,6
2014	$T_{máx}$ (°C)	38,2	40,6	33,4	32,4	26,9	29,4	28,0	34,3	33,9	37,2	34,9	37,4
	$T_{mín}$ (°C)	17,4	17,6	11,6	11,0	7,0	4,6	5,3	3,6	10,6	13,3	13,6	14,4
2015	$T_{máx}$ (°C)	36,5	34,6	34,9	32,5	29,7	28,9	29,2	34,8	29,5	31,0	31,8	35,4
	$T_{mín}$ (°C)	17,9	18,1	15,7	13,3	8,9	5,7	6,8	9,8	6,3	7,4	13,8	13,2
2016	$T_{máx}$ (°C)	38,9	36,0	34,8	35,9	24,6	22,2	29,5	32,9	31,7	32,8	34,8	38,3
	$T_{mín}$ (°C)	18,4	17,4	16,9	7,0	7,0	4,1	5,1	6,5	8,7	9,3	9,6	14,4
2017	$T_{máx}$ (°C)	34,6	36,3	35,8	32,3	28,4	28,5	30,6	34,0	34,8	31,7	35,5	35,9
	$T_{mín}$ (°C)	17,5	17,9	13,6	8,5	10,0	5,5	5,6	7,0	14,0	11,4	11,6	15,2
2018	$T_{máx}$ (°C)	35,7	36,2	36,8	33,7	29,4	28,8	30,4	29,5	32,9	32,8	34,4	37,9
	$T_{mín}$ (°C)	16,2	13,9	14,3	16,1	5,2	2,6	5,3	3,5	9,8	9,1	12,7	11,9
2019	$T_{máx}$ (°C)	38,5	37,0	35,7	33,5	30,4	30,3	27,9	32,8	36,1	38,2	33,8	40,3
	$T_{mín}$ (°C)	19,2	16,9	13,0	13,7	10,2	3,7	2,2	5,0	6,9	12,4	12,5	12,8
2020	$T_{máx}$ (°C)	38,1	37,9	38,4	32,7	31,4	30,9	30,7	31,3	29,5	33,8	37,8	37,5
	$T_{mín}$ (°C)	14,6	14,7	17,4	11,9	7,8	4,8	2,7	4,0	5,6	10,2	11,5	15,7
2021	$T_{máx}$ (°C)	38,3	34,9	34,5	34,5	32,3	31,5	28,2	34,5	30,1	34,3	36,3	35,3
	$T_{mín}$ (°C)	16,7	17,6	16,6	11,5	4,6	6,9	2,3	4,0	9,7	9,6	12,5	15,5
	$T_{máx/mês-10\ anos}$ (°C)	38,9	40,6	38,4	35,9	32,3	31,5	30,7	34,8	36,1	38,2	37,8	40,3
	$T_{mín/mês-10\ anos}$ (°C)	14,4	13,9	10,1	7,0	4,6	1,1	1,4	3,5	5,6	7,4	9,6	11,9
	$T_{máx-10\ anos}$ (°C)							40,6					
	$T_{mín-10\ anos}$ (°C)							1,1					

Fonte: adaptado de INMET, 2022.