

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS VIEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE COM PCM EM
TUBOS ELÍPTICOS DE TROCADORES DE CALOR**

São Leopoldo

2021

MATHEUS VIEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE COM PCM EM
TUBOS ELÍPTICOS DE TROCADORES DE CALOR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, pelo Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Prof.^a Dra. Rejane de César Oliveski

São Leopoldo

2021

RESUMO

Materiais de mudança de fase (PCM – Phase Change Materials), por possuírem alta capacidade de armazenamento de energia em relação ao seu volume, possuem alto potencial para uso em mecanismos de melhoria de eficiência energética. Seu armazenamento de energia térmica ocorre através do calor latente durante o processo de mudança de fase. Portanto, podem ser amplamente utilizados em trocadores de calor, visto que a troca térmica que ocorre nesses sistemas permite o processo de solidificação e/ou fusão de materiais a depender de sua temperatura. Neste trabalho é realizado um estudo numérico do processo de fusão do PCM RT – 82 contido em um trocador de calor de múltiplos tubos elípticos. Esta condição é analisada variando-se as condições geométricas dos tubos, a excentricidade vertical dos tubos em relação aos anéis de PCM e sua orientação. A análise é conduzida através de CFD (fluidodinâmica computacional) através do *software* FLUENT. O problema apresentado é bidimensional, verticalmente simétrico e transiente. O modelo matemático compõe-se das equações de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento. O modelo numérico é validado com resultados experimentais e numéricos da literatura. São apresentados resultados de tempo total de fusão, fração de líquido bem como os campos de fração de líquido e de velocidade. Os resultados mostram que dentre as variações geométricas realizadas no estudo, o fator que mais influencia na redução do tempo total de fusão do PCM é a excentricidade dos tubos.

Palavras-chave: Materiais de mudança de fase (PCM). Armazenamento de energia. Fusão. Fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

As Phase Change Materials (PCM) have a high energy storage capacity in relation to their volume, they have a high potential for use in mechanisms to improve energy efficiency. Their thermal energy storage occurs through latent heat during the phase change process. Therefore, they can be widely used in heat exchangers, since the thermal exchange that occurs in this process allows the solidification and/or fusion process of materials depending on their temperature. In this essay, a numerical study of the fusion process of the PCM RT - 82 contained in an elliptical multiple tube heat exchanger is performed. This condition is analyzed by varying the geometric conditions of the tubes, the vertical eccentricity of the tubes in relation to the PCM rings and their orientation. The analysis is conducted by using CFD (Computational Fluid Dynamics) on the FLUENT software. The problem presented is two-dimensional, vertically symmetric and transient. The mathematical model is composed of the equations for the conservation of mass, energy and momentum. The numerical model is validated with experimental and numerical results from the literature. The results for total melting time, liquid fraction as well as liquid fraction and velocity fields are presented. The results show that among the geometric variations carried out in the study, the factor that most influences the reduction of the total melting time of the PCM is the tube eccentricity.

Keywords: Phase Change Materials (PCM). Energy storage. Fusion. Computational Fluid Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos sistemas de armazenamento de energia térmica e comparação do calor latente de um PCM com outros materiais.....	16
Figura 2 - Classificação dos PCM e suas subdivisões.....	18
Figura 3 - PCM comercializados pela Rubitherm.....	21
Figura 4 - Convecção de Rayleigh-Bénard.....	26
Figura 5 - Organização dos átomos nas diferentes fases: (a) sólida, (b) líquida e (c) gasosa.....	27
Figura 6 - Energia térmica armazenada de um material.....	28
Figura 7 - Modelo físico da seção transversal do tubo de trocador de calor.....	29
Figura 8 - Relação do raio maior e menor do tubo elíptico interno.....	30
Figura 9 - Tubos elípticos com diferentes posicionamentos e orientações.....	30
Figura 10 - Excentricidade vertical dos tubos em relação aos anéis de PCM.....	32
Figura 11 - Malha computacional: (a) completa e (b) detalhe da região refinada.....	37
Figura 12 - Teste de independência da malha.....	39
Figura 13 - Diferenças relativas de fração líquida vs tempo.....	40
Figura 14 - Trocador de calor aletado de triplo tubo.....	42
Figura 15 - Campos de temperatura de RT - 82 para $t = 30\text{min}$: (a) presente trabalho e (b) numérico (Al - Abidi et al. (2013)).....	43
Figura 16 – Fração de líquido vs. tempo.....	44
Figura 17 - Perfil de temperatura vs Tempo.....	45
Figura 18 - Tempo total de fusão.....	46
Figura 19 - Fração de líquido vs Tempo.....	47
Figura 20 - Campos de fração líquida para $t = 10, 25$ e 45 min , para os casos: (a) horizontal com $e = 0\text{ mm}$, (b) horizontal com $e = 10\text{ mm}$, (c) horizontal com $e = 20\text{ mm}$, (d) vertical com $e = 0\text{ mm}$, (e) vertical com $e = 10\text{ mm}$ e (f) vertical com $e = 20\text{ mm}$	49
Figura 21 - Fração líquida e vetores de velocidade: a) integral, b) detalhe e c) detalhe.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compostos inorgânicos de PCM	19
Tabela 2 – PCM comercializados.....	19
Tabela 3 – Configuração dos tubos.....	31
Tabela 4 – Propriedades termofísicas do PCM RT 82	32

LISTA DE SIGLAS

ASME	Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>computer aided design</i>)
CFD	Fluidodinâmica computacional (<i>computational fluid dynamics</i>)
GCI	Índice de convergência de malha (<i>Grid convergence index</i>)
HTF	Fluido de transferência de calor (<i>heat transfer fluid</i>)
LHS	Armazenamento de calor latente (<i>latent heat storage</i>)
LHTES	Sistema térmico de energia por calor latente (<i>latent heat thermal energy storage</i>)
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
PCM	Material de mudança de fase (<i>phase change material</i>)
SHS	Armazenamento de calor sensível (<i>sensible heat storage</i>)
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área	[m ²]
c	constante Mushy Zone	[-]
c _p	calor específico a pressão constante	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
d	diâmetro	[m]
e	excentricidade	[mm]
g	aceleração da gravidade	[m s ⁻²]
h	coeficiente de transferência de calor	[W m ⁻² K ⁻¹]
h _e	entalpia específica	[J kg ⁻¹]
h _{ref}	entalpia de referência	[J kg ⁻¹]
h _s	entalpia sensível	[J kg ⁻¹]
k	condutividade térmica	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
L	calor latente	[J kg ⁻¹]
m	massa	[kg]
Nu	número de Nusselt	[-]
p	pressão	[Pa]
q"	fluxo de calor	[W m ⁻¹]
q	taxa de transferência de calor	[W]
r	raio	[m]
\vec{S}	termo fonte da quantidade de movimento	[-]
T	temperatura	[K]
t	tempo	[s]
T _∞	temperatura do fluido longe da superfície	[K]
V	volume	[m ³]
\vec{V}	vetor velocidade	[m/s]

Símbolos Gregos

α _n	fração volumétrica na enésima célula computacional	[-]
β	coeficiente de expansão volumétrica	[K ⁻¹]
Δ	variação	[-]
ε	constante (valor 0,001)	[-]

ρ	massa específica	$[\text{kg m}^{-3}]$
μ	viscosidade dinâmica	$[\text{Pa s}]$
ν	viscosidade cinemática	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
γ	fração líquida	$[-]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA	13
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 Objetivo Geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 JUSTIFICATIVA	14
2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)	15
2.1 APLICAÇÕES DOS PCM.....	16
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PCM.....	17
2.2.1 PCM orgânicos	18
2.2.2 PCM inorgânicos	19
2.2.3 Misturas eutéticas	20
2.3 PCM DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE	20
2.4 PESQUISAS COM PCM	21
3 REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO	24
3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	24
3.3 CONVECÇÃO DE RAYLEIGH-BÉNARD	26
3.4 PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE.....	26
4 ABORDAGEM NUMÉRICA	29
4.1 MODELO FÍSICO	29
4.2 MODELO NUMÉRICO	32
4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONTROLE DAS SIMULAÇÕES.....	34
5 METODOLOGIA	35
5.1 <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS.....	35
5.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA MALHA	37
5.3 ANÁLISE DO INTERVALO DE TEMPO.....	40
5.4 PROCESSAMENTO	41
5.5 PÓS – PROCESSAMENTO	41
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	42

6.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	42
6.1 .1 Validação Qualitativa	43
6.1.2 Validação Quantitativa	44
6.2 ESTUDO DE CASO	45
6.2.1 Tempo total de fusão	45
6.2.2 Fração líquida	46
6.2.1 Influência da excentricidade no tempo total de fusão	47
6.2.3 Campos de fração líquida e vetores de velocidade	50
7 CONCLUSÕES	52
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento brusco na demanda de energia e a dificuldade das empresas geradoras de energia de suprirem essa necessidade global tem sido um dos principais desafios das últimas décadas (Elsanusi, 2020). A escassez dos recursos naturais para geração de energia como carvão, petróleo e gás natural, somada às emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera leva a um assunto bastante recorrente e preocupante nos dias atuais por parte das grandes indústrias: gerenciamento energético.

A situação energética e ambiental em que o planeta se encontra atualmente revela uma urgência nas medidas a serem tomadas quanto ao uso inteligente de energia. Cientistas têm feito diferentes pesquisas na busca de novas alternativas como fontes renováveis de energia. (SHARMA, 2009). Dentre as opções estudadas, destacam-se as energias solar e eólica. Entretanto, fontes de energia renováveis costumam ter um comportamento intermitente, isto é, podem sofrer oscilações ao longo do dia, como é o caso da incidência solar, que sofre diversas variações ao longo do dia, das estações do ano e até mesmo conforme a nebulosidade; bem como acontece com a energia eólica, com a velocidade e direção do vento variando ao longo do dia. Levando em conta esses fatores, torna-se imprescindível a utilização de sistemas de armazenamento de energia, considerando a excelente vantagem que eles oferecem, como melhor aproveitamento da energia, possibilitando o usuário fazer uso da energia armazenada em momentos em que a geração dessa energia seria impossibilitada por indisponibilidade da fonte, por exemplo.

O armazenamento de energia surge como uma solução para a diferença entre demanda e oferta existente de energia para os dias atuais, pois ele consiste em acumular alguma forma de energia para que ela seja utilizada em outro período conforme a necessidade do usuário. Sharma et al. (2009) citam diferentes métodos de armazenamento de energia, seja ela de origem mecânica, elétrica ou química. Quanto à energia térmica, esta pode ser armazenada como uma mudança na energia interna de um material como calor sensível, latente ou termoquímico.

De acordo com Pielichowska e Pielichowski, (2014), um sistema de armazenamento de energia por calor sensível (SHS) envolve o acúmulo de energia através do aumento de temperatura de um determinado material, e a quantidade desta energia armazenada depende de fatores como o calor específico do material, da

mudança de temperatura e da massa do dispositivo de armazenamento. Já o armazenamento por calor latente (LHS) possui a grande vantagem por possibilitar uma densidade de armazenamento de energia muito superior, pois ele baseia-se na absorção e liberação de calor do material utilizado para armazenar energia, enquanto ocorre a mudança de fase do mesmo. Entretanto, conforme Farid et al. 2004, mudanças de fase como evaporação não são práticas devido à alta mudança de volume associada a esse processo.

Os materiais utilizados para o armazenamento de calor latente são conhecidos como materiais de mudança de fase (PCM – *phase change material*). Com ampla aplicação em diferentes segmentos da indústria, como automobilística, aeronáutica, alimentícia, entre outros, têm-se como exemplo comum o gelo, o qual mantém a temperatura baixa de bebidas ao ser utilizado, aproveitando o grande calor latente de fusão da água e mudando de fase (Çengel e Boles, 2013).

Grande parte dos estudos realizados com PCM são relacionados à determinação de propriedades físicas desses materiais, bem como o seu comportamento diante de determinadas condições térmicas e geométricas. O grupo de pesquisa da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, coordenado pela professora Rejane de César Oliveski, têm estudado o comportamento do processo de mudança de fase com PCM sob diferentes aspectos geométricos e condições térmicas. Pode-se citar como exemplo o trabalho de Raymundo Júnior (2017), cujo trabalho estuda o processo de mudança de fase de PCM em esferas com fluxo de calor variável. Pode-se mencionar ainda o estudo de Tacques Filho (2019), cuja análise em seu trabalho busca relacionar o aspecto e posicionamento de aleta numa cavidade retangular contendo PCM em processo de fusão. Também pode-se citar o estudo de Joulin A. et al. (2010), cujo trabalho lida com uma comparação experimental e numérica do comportamento do processo de fusão de um PCM utilizado em painéis solares.

Ainda que tenham sido publicados nos últimos anos estudos extensos e variados sobre o uso de PCM para o armazenamento de energia, não foram encontrados na literatura estudos numéricos que consideram o comportamento dos PCM sob diferentes condições de posicionamento e orientação em trocadores de calor com múltiplos tubos elípticos e anéis de PCM. Portanto, neste documento é desenvolvido um estudo sobre o comportamento do processo de fusão de um PCM

na variação dimensional de uma configuração de trocador de calor com múltiplos tubos contendo duas camadas de PCM.

1.1 TEMA

Neste trabalho é abordado o processo de fusão de um PCM presente em um trocador de calor de múltiplos tubos com geometria elíptica submetido a diferentes condições geométricas e de posicionamento, analisado através de simulação numérica.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Serão realizadas simulações numéricas da fusão de um PCM contido em um trocador de calor de múltiplos tubos através de um modelo geométrico bidimensional e simétrico, considerando-se as condições de contorno específicas apresentadas.

Efeitos como a compatibilidade química do PCM com o material, influência da espessura da parede do tubo, da transferência de calor por radiação, bem como aspectos econômicos e ambientais não serão estudados.

1.3 PROBLEMA

Dentro da gama de estudos sobre os PCM disponíveis na literatura, poucos analisam com certa profundidade o comportamento do processo de fusão dos PCM em tubos de trocadores de calor com geometria elíptica. Este estudo aborda e analisa o processo de fusão e o comportamento térmico de um PCM contido em diferentes configurações de tubos elípticos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar e discutir o processo de fusão de um PCM no interior de um tubo elíptico de trocador de calor em diferentes condições geométricas, considerando que este está submetido a um escoamento externo.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) realizar a simulação numérica do processo de fusão de um PCM em um tubo elíptico com geometria bidimensional e simétrica;
- b) analisar a influência dos diferentes parâmetros geométricos de anéis de PCM e do seu posicionamento no tubo com relação ao tempo de fusão total do PCM;
- c) investigar a variação da fração líquida do PCM no tubo ao longo do tempo para diferentes configurações.

1.5 JUSTIFICATIVA

Os materiais de mudança de fase são objeto de estudo no campo da engenharia mecânica, especialmente por proporcionarem um potencial ganho no aproveitamento eficiente de energia em sistemas já existentes. Trabalhos experimentais e numéricos sobre o comportamento de materiais de mudança de fase durante o processo de fusão em tubos de trocadores de calor são facilmente encontrados na literatura, como o estudo de Seddegh S. et al. (2015), que faz um estudo comparativo do comportamento térmico de um sistema de armazenamento de energia de casco e tubo utilizando PCM.

Tendo isto em vista, apesar da existência de estudos que comparam o comportamento térmico de PCM contido em tubos de diferentes geometrias como o estudo realizado por Tran et al. (2018), ou que avaliam somente a inclusão de aletas nos tubos, conforme os estudos de Xu et al. (2020), não foram encontrados estudos que exploram o processo de fusão de um PCM a partir de um posicionamento e orientação otimizados dos anéis de PCM contidos em um tubo elíptico de trocador de calor de múltiplos tubos. Considerando as diferentes configurações possíveis de múltiplos tubos com PCM, propõe-se um estudo para não somente analisar o comportamento dos fenômenos físicos durante o processo de fusão de um PCM, como também quantificar os resultados obtidos.

2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

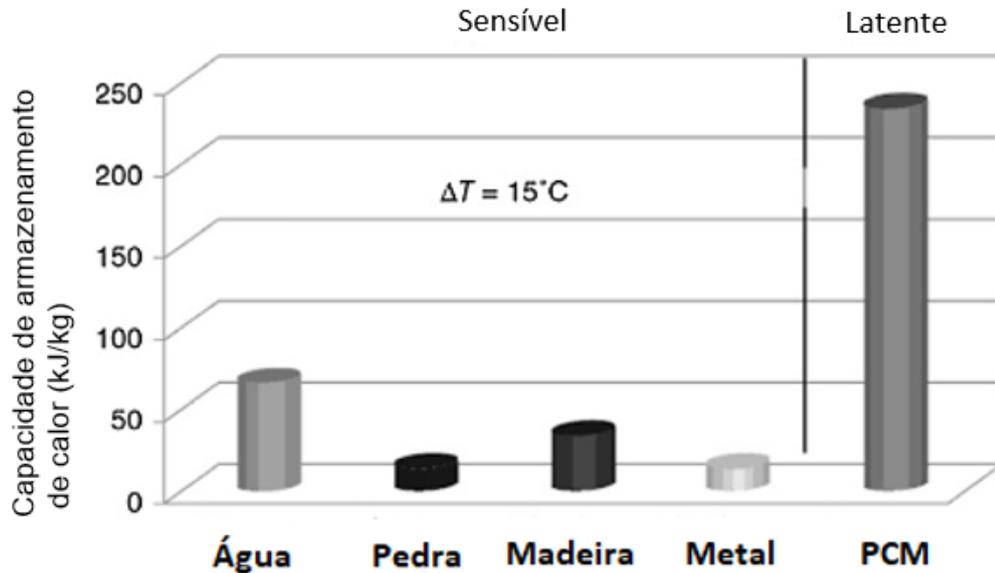
A demanda por energia continua a aumentar a medida que a população humana cresce, e junto com ela surgem avanços tecnológicos que geram uma melhora na qualidade de vida das pessoas. A constante necessidade de geração de energia aliada aos problemas enfrentados para gerar energia de origem fóssil e possíveis danos ao meio ambiente são os maiores fatores que levam os pesquisadores a buscarem alternativas sustentáveis.

Fontes de energia sustentáveis como hidroelétrica, eólica e solar são consideradas as soluções mais promissoras para a alta demanda que existe por geração de energia. Entretanto, vale ressaltar que essas fontes de energia flutuam com o tempo, impossibilitando um sistema de geração contínua de energia. Por isso a necessidade de um sistema de armazenamento de energia.

Há diferentes sistemas de armazenamento de energia, e eles são classificados de acordo com o tipo de calor que está sendo armazenado. Armazenamento de calor sensível, calor latente e termoquímico são três diferentes métodos de armazenar energia térmica. (Hosseini et al. 2015). O primeiro caso, calor sensível, diz respeito à energia térmica que é reservada quando há um aumento na temperatura de um líquido ou sólido através do aquecimento deste. Já o calor latente é baseado no calor armazenado ou liberado no processo de mudança de fase de um material, seja num caso de solidificação ou fusão.

Conforme apontado por Nie et al. (2020), a atenção dos pesquisadores tem sido centrada nos PCM, os quais possuem alta densidade de armazenamento de energia térmica. Os PCM são materiais cujas propriedades os tornam capazes de armazenar energia térmica na forma de calor latente. Além disso, outra grande vantagem dos PCM é o armazenamento ou descarga de grande quantidade de energia em um volume relativamente baixo, (Pielichowska e Pielichowski, 2014), o que torna sua aplicação viável para diferentes finalidades. Esses materiais possuem características únicas quanto ao quesito capacidade de armazenar energia em forma de calor e liberá-la posteriormente sem alterar sua temperatura, ao contrário de outros materiais (SHARMA et al. 2009). A Figura 1 mostra, de forma comparativa, a capacidade de armazenamento de calor latente do PCM.

Figura 1 – Classificação dos sistemas de armazenamento de energia térmica e comparação do calor latente de um PCM com outros materiais



Fonte: Adaptado de Jaguemont (2018)

A maior parte dos estudos recentes relacionados aos PCM estão focados na qualificação de materiais cujas propriedades físicas e comportamento possam levá-los à aplicações como materiais de mudança de fase, bem como na eficiência do processo de transferência de calor dos LHTES (SHARMA et al. 2009). Dito isso, a tecnologia com calor latente pode oferecer uma solução compacta para a diferença de demanda e oferta de energia existente hoje.

2.1 APLICAÇÕES DOS PCM

Conforme exposto por Agyenim et al. (2010), as principais aplicações dos PCM no ramo da engenharia são armazenamento de energia e proteção térmica. Para o caso de proteção térmica, o PCM é utilizado para estabilizar a temperatura de algum componente. Essa aplicação vem sendo amplamente estudada para componentes eletrônicos, pois com os avanços na capacidade de processamento dos aparelhos eletrônicos, o gerenciamento térmico de dispositivos como celulares, notebooks e *tablets* se torna ainda mais importante. Sistemas de resfriamento com o uso de PCM podem manter a temperatura de dispositivos eletrônicos abaixo do valor crítico, permitindo então um maior tempo de uso contínuo (Pielichowska e Pielichowski, 2014).

Quanto ao armazenamento de energia, este ocorre quando se utiliza um PCM para armazenar calor para que ele seja liberado posteriormente. Pielichowska e Pielichowski, (2014) citam algumas aplicações do PCM para essa finalidade: resfriamento ou aquecimento passivo em edifícios, armazenamento de energia solar e até mesmo aplicações no espaço.

No caso de um sistema de resfriamento ou aquecimento passivo de um edifício, o PCM consegue armazenar energia vindo de fonte externa e liberá-la na forma de calor para o ambiente interno quando necessário, geralmente à noite quando a temperatura cai.

Quanto às aplicações espaciais, Cui et al. (2003), ao realizar um estudo sobre o sistema de energia solar espacial de 2 kW da NASA, propôs um modelo de receptor de calor com triplo PCM cujos resultados dos estudos mostraram que um receptor de calor com triplo PCM reduz significativamente a flutuação da temperatura do fluido de trabalho.

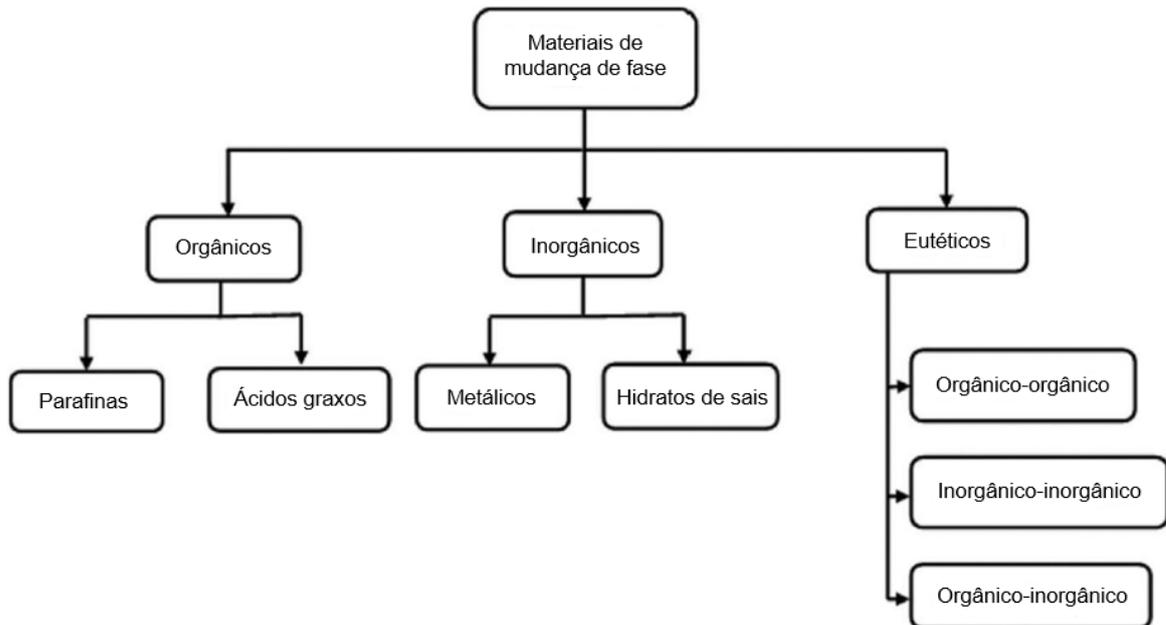
Uma aplicação interessante também refere-se à aplicação de PCM como proteção térmica de alimentos refrigerados, cujas temperaturas são fatores cruciais para a duração dos alimentos. Leducq et al., (2015) estudaram de forma experimental o uso de PCM para melhor estabilidade da temperatura de sorvetes armazenados. O PCM utilizado na aplicação foi uma solução eutética de água e cloreto de sódio com uma temperatura de fusão de -21°C . Os autores concluíram, ao término do experimento, que o uso de PCM impactou de forma significativa na qualidade final do sorvete, mantendo a temperatura de refrigeração dos alimentos estável.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PCM

Diferentes autores citam métodos que classificam os materiais com potencial de serem utilizados como PCM, entre eles Cui et al. (2003), Nie et al. (2020) e Pielichowska e Pielichowski, (2014). Dentre os grupos de materiais citados pelos autores, destacam-se os materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos.

Dentro do grupo dos materiais orgânicos existe o subgrupo das parafinas e dos ácidos graxos. Já no grupo dos inorgânicos, encontram-se os subgrupos de hidratos, sais fundidos e metálicos. As misturas eutéticas podem ser constituídas por dois ou mais elementos, que se fundem e cristalizam de forma concordante.

Figura 2 - Classificação dos PCM e suas subdivisões



Fonte: Adaptado de Nie et al. (2020)

2.2.1 PCM orgânicos

Os materiais de mudança de fase orgânicos são categorizados em parafinas e ácidos graxos, sendo que as parafinas são as mais utilizadas devido ao seu baixo custo e estabilidade química. Entretanto, as parafinas podem ser inflamáveis e possuem baixa condutividade térmica (SHARMA et al., 2009). De forma geral, os PCM orgânicos têm uma temperatura de fusão próxima às temperaturas procuradas para melhoramento de conforto térmico, as quais vão de 19 a 32° C. Além disso, os PCM orgânicos possuem alta capacidade de armazenamento de calor, tornando-os os favoritos para aplicações em moradias ou edifícios (OLIVEIRA, 2012).

Sendo um material facilmente comercializado e obtido até mesmo sinteticamente, a parafina possui uma temperatura de fusão que varia de acordo com o número de átomos de carbono que existe em sua estrutura química, o que possibilita que ela seja utilizada para diferentes aplicações desde que atenda a temperatura para qual será destinada.

De acordo com Sharma et al. (2009), os ácidos graxos são PCM orgânicos com propriedades muito similares às das parafinas, exceto por possuírem maiores valores de calor latente de fusão que as parafinas e por terem um custo muito superior ao das parafinas, chegando a custar até 2,5 vezes mais que as parafinas.

2.2.2 PCM inorgânicos

Conforme Tyagi et al. (2005), os PCM inorgânicos são divididos em hidratos de sais e metálicos, sendo o primeiro um dos tipos de PCM mais estudados. Em comparação aos PCM orgânicos, os inorgânicos são não inflamáveis, mais baratos e facilmente obtidos. Entretanto, podem sofrer decomposição e arrefecimento, o que pode afetar suas propriedades de mudança de fase.

Os hidratos de sais são amplamente estudados pelo seu uso em sistemas de armazenamento de energia térmica com calor latente. Suas propriedades mais atrativas são: alto calor de fusão por unidade de volume, relativamente alta condutividade térmica (quase o dobro das parafinas) e baixa mudança no volume no processão de fusão. Além disso, não são muito corrosivos, compatíveis com plásticos e apenas levemente tóxicos (SHARMA et al. 2009).

A categoria de metais puros e ligas metálicas possui alto potencial como PCM pois esses materiais possuem excelente condutividade térmica e alta massa específica, garantindo ao material uma maior capacidade volumétrica para armazenamento térmico. Entretanto, essa categoria ainda não é muito considerada para a tecnologia de PCM devido ao seu peso. (SHARMA et al. 2009)

Tabela 1 - Compostos inorgânicos de PCM

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg) —
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18,5	231
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25,8	125,9
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	190,8
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	296
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32	251

Fonte: Adaptado de Tyagi et al. (2005)

Conforme visto na Tabela 1, a variação das temperaturas de fusão dos compostos inorgânicos é alta, além de possuírem elevada entalpia de fusão. Essas duas atribuições permitem a esse tipo de PCM atender diferentes aplicações, respeitando a temperatura de operação a qual será destinado.

2.2.3 Misturas eutéticas

As misturas eutéticas são o resultado que se obtém ao combinar dois ou mais compostos orgânicos que se fundem de forma congruente formando uma mistura durante a cristalização. (Tyagi et al. 2005). Essas misturas podem ser do tipo orgânica-orgânica, orgânica-inorgânica e inorgânica-inorgânica.

2.3 PCM DISPONÍVEIS COMERCIALMENTE

Dentre as pesquisas já realizadas sobre PCM, diferentes autores já compilaram informações em tabelas sobre os materiais de mudanças de fase disponíveis no mercado. Oliveira et al. (2012) classificou diferentes PCM comercializados conforme suas devidas temperaturas de fusão e fornecedores, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – PCM comercializados

Fabricante	Faixa de Temperaturas (°C)	Número de PCM listados
Rubitherm	-52,0 a 100,0	29
Cristopia	-33,0 a 27,0	12
TEAP	-50,0 a 78,0	22
Doerken	-22,0 a 28,0	2
Mitsubishi Chemical	-9,5 a 118	6
Climator	-18,0 a 70,0	9
EPS,Lda	-114,0 a 164,0	61

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2012)

Entre os diversos fabricantes de PCM listados na Tabela 2, pode-se destacar a empresa RUBITHERM, a qual não só possui uma excelente gama de temperaturas em seus produtos, como também comercializa os materiais em suas principais formas: granulado, pó e composto. O primeiro PCM mencionado é comercializado dentro de uma película que lhe protege de perda de conteúdo quando o material se encontra na fase líquida. (KONSTANTINIDIS et al. 2010).

O PCM em pó possui alta capacidade de armazenamento de calor, pois ele é resultado de uma combinação de um material com capacidade de armazenar calor latente e sílica ecológica. Já o material composto é comercializado com alto conteúdo

de PCM e, portanto, alta capacidade de armazenamento de calor latente. (KONSTANTINIDIS et al. 2010).

A Figura 3 mostra as diferentes formas que a empresa Rubitherm comercializa os PCM (pó, granulado e composto, respectivamente).

Figura 3 – PCM comercializados pela Rubitherm



Fonte: KONSTANTINIDIS et al. (2010)

2.4 PESQUISAS COM PCM

Diversos estudos numéricos, analíticos e experimentais sobre PCM foram realizados nos últimos anos, com um número de artigos científicos publicados sobre as diversas linhas de estudos com PCM cada vez maior, sendo os estudos dos centros de pesquisa e desenvolvimento concentrados em problemas contendo materiais de mudança de fase e também nas características de novos materiais. (AGYENIM et al. 2010).

Seddegh et al. (2015) realizou um estudo comparativo sobre o comportamento térmico de trocadores de calor casco e tubo orientados verticalmente e horizontalmente para o armazenamento de energia utilizando PCM. Os resultados das simulações mostraram que durante o processo de carga para a orientação horizontal, a transferência de calor por convecção tem um grande efeito no processo de fusão na parte superior do PCM sólido e é menos significativa durante a fusão da parte inferior do mesmo. Os resultados também mostraram que ao aumentar a temperatura do fluido quente, o tempo para armazenar energia reduz substancialmente, independente da orientação do trocador de calor.

Cui et al. (2003) analisou numericamente o comportamento térmico de um trocador de calor para um sistema dinâmico de energia solar da NASA. Em seu

estudo, ele considerou o uso de três diferentes materiais de mudança de fase juntos e seus respectivos modelos físicos. Após comparar com o uso de um único PCM, os resultados concluem que é possível melhorar a performance do trocador de calor ao utilizar os três PCM mencionados em seu trabalho, reduzindo com isso tanto a flutuação da temperatura do fluido de trabalho quanto o peso do próprio trocador de calor.

Ismail et al. (2000) apresentam um estudo paramétrico da solidificação de um PCM envolvendo um cilindro para aplicações de bancos de gelo. Neste estudo, o PCM escolhido foi água, visto que as aplicações de bancos de gelo e de armazenamento de energia em baixa temperatura eram de maior interesse. O fluido de transferência de calor era uma mistura de 70% de água e 30% de etilenoglicol, bastante utilizado como um refrigerante secundário em bancos de gelo. Os resultados obtidos deste estudo mostraram que uma temperatura inicial menor da fase líquida parecia acelerar a solidificação e a condutividade térmica do material da parede do tubo poderia ter uma influência bastante considerável na velocidade desse processo. Além disso, a resistência térmica da fase sólida fez com que a velocidade da solidificação caísse rapidamente após os primeiros instantes e boa parte da energia foi armazenada em calor latente.

Esapour et al. (2016) estudaram numericamente especificações geométricas e parâmetros operacionais de sistemas de armazenamento de calor multitubos. A investigação numérica considerou que a parte interna do casco é preenchida com RT35 como PCM, o qual é aquecido pelo fluido de transferência de calor (HTF) que escoar pelos tubos internos. Os resultados mostraram que a condução é a forma mais dominante de transferência de calor no início do processo de fusão, a qual é precedida pela dominância da convecção. O estudo também concluiu que conforme o número de tubos aumentava, a superfície de contato entre o PCM e o fluido também aumentava, fazendo com que a transferência de calor por convecção aumentasse o processo de fusão, reduzindo então o tempo total de fusão.

Por fim, o estudo de Raymundo Júnior (2017) analisa numericamente o processo de fusão de um PCM em esferas com fluxo de calor variável, as quais são submetidas ao processo de transferência de calor por convecção externa. O estudo analisa esse caso sob diferentes condições térmicas, variando-se a temperatura do escoamento externo. Com os resultados obtidos com as simulações, conclui-se que a posição da esfera tem pouca influência nos valores de fração líquida e fluxo de calor.

Por outro lado, ambos são muito mais afetados pela temperatura do escoamento externo e do valor do número de Reynolds. Além disso, os resultados mostraram que em 30% do tempo total de fusão, o eritritol presente dentro das esferas como PCM já havia armazenado 50% da energia total.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A transferência de calor é a troca de energia que ocorre entre diferentes meios, a qual ocorre quando há uma diferença de temperatura entre esses meios. Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. O problema de mudança de fase proposto no trabalho engloba diferenças muito pequenas de temperaturas. Portanto, os efeitos da transferência de calor por radiação são desprezíveis para o caso em estudo.

A seguir, são detalhados os processos físicos que envolvem a troca térmica ocorrida no trabalho proposto.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

A transferência de calor por condução ocorre quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário sólido ou líquido. Conforme Incropera et al. (1996), ela pode ser vista como a transferência de energia de moléculas mais energéticas para moléculas de menor energia, em um meio que exista interação entre essas moléculas.

Para quantificar os processos de transferência de calor por condução, a equação utilizada é conhecida como lei de *Fourier*, que considera que para uma parede plana unidimensional com uma distribuição de temperatura $T(x)$, a equação para determinar a taxa de transferência de calor é dada pela Equação 3.1:

$$qx'' = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

na qual a constante k é a condutividade térmica do material utilizado, T é a temperatura e x é a distância na direção do eixo.

3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção ocorre a partir do contato de um fluido em movimento com uma superfície, quando ambos se encontram em diferentes temperaturas. Esse modo de transferência de calor contempla dois mecanismos:

movimento molecular e global. O movimento aleatório das moléculas presentes no fluido contribui para a transferência de calor desde que exista um gradiente de temperatura. Esse movimento molecular somado ao movimento global do fluido ocasiona o que chamamos de convecção.

Ao considerarmos um fluido com velocidade V e temperatura T_f escoando sobre uma superfície de área superficial A_{sup} a uma temperatura T_{sup} , e considerando que T_{sup} é diferente de T_f , pode-se calcular o fluxo térmico local causado pelo processo de transferência de calor por convecção, o qual é definido pela Equação 3.2:

$$q_{conv}'' = h \cdot (T_{sup} - T_f) \quad (3.2)$$

onde h representa o coeficiente local de transferência de calor por convecção. A taxa total de transferência de calor por convecção pode ser obtida ao multiplicar o fluxo de calor local pela área total da superfície analisada.

O processo de transferência de calor por convecção pode ser classificado conforme a natureza do escoamento do fluido. Chamamos de convecção forçada quando o escoamento do fluido ocorre através de meios externos, como o uso de ventiladores para refrigeração de componentes eletrônicos através da convecção forçada do ar. Já a convecção livre ou natural ocorre por forças de empuxo, as quais são ocasionadas pelas diferenças de massa específica causadas por variações de temperatura no fluido.

Tratando-se de um processo complexo, a análise da transferência de calor por convecção depende de diversos fatores que estão presentes no escoamento, tornando difícil a determinação do coeficiente convectivo para determinados casos, pois esta sofre influência da movimentação do líquido ou gás. Portanto, torna-se necessário o uso de números adimensionais que possam facilitar os cálculos de transferência de calor por convecção, como o número de Nusselt (Nu), o qual é definido pela Equação 3.3:

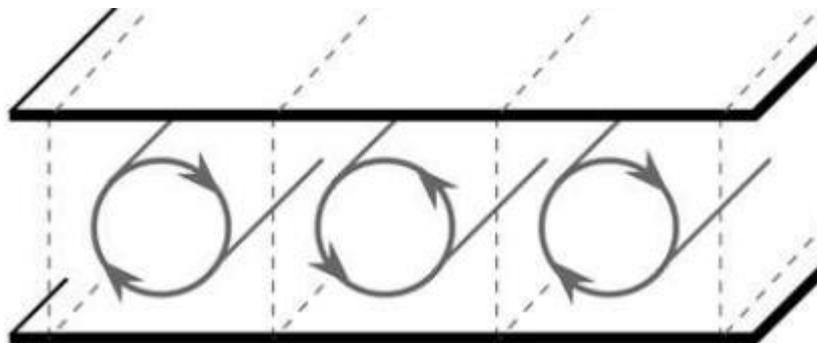
$$Nu = (h \cdot L_c)/k \quad (3.3)$$

onde L_c é o comprimento característico da geometria pela qual o escoamento ocorre. Dito isso, o cálculo do número de Nusselt representa o coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção.

3.3 CONVECÇÃO DE RAYLEIGH-BÉNARD

A convecção de Rayleigh-Bénard é o fenômeno que corresponde ao movimento coordenado de um fluido confinado que escoar entre duas superfícies horizontais planas. De acordo com Sondak et al. (2020), o fluido é aquecido pela superfície inferior, a qual possui uma temperatura maior que a superfície superior, causando um gradiente de temperatura. A convecção de Rayleigh-Bénard é caracterizada pela formação de círculos de convecção e por permitir uma transferência de calor mais eficiente entre as placas. De forma exemplificada, uma partícula de fluido que se encontra numa temperatura maior que o seu ambiente tende a ascender. No decorrer do movimento, a partícula encontra outras partículas do fluido em uma temperatura menor, causando uma instabilidade. No desenvolver dessa instabilidade, um padrão de escoamento é formado. Em algumas geometrias, o padrão pode ser visto com formas diferentes.

Figura 4 – Convecção de Rayleigh-Bénard



Fonte: Adaptado de Manneville et al. (2006)

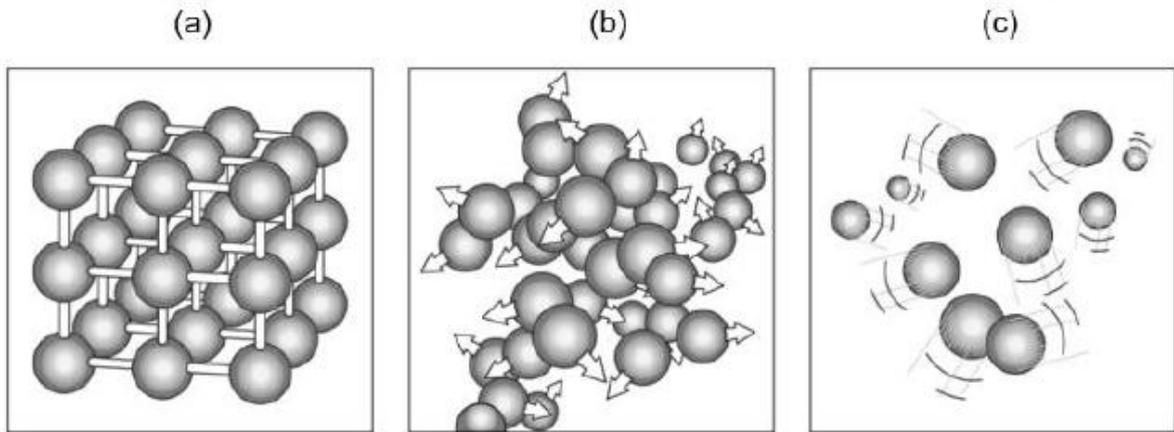
3.4 PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE

Sabemos por experiência própria que todas substâncias possuem diferentes fases e que cada substância se encontra em uma determinada fase às condições específicas. Embora existam três fases principais: sólida, líquida e gasosa, isso não impede a coexistência de mais de uma fase em uma substância pura, como é o caso de um copo de água com cubos de gelo.

Ao estudarmos os processos de mudança de fase na termodinâmica, não é necessário conhecer profundamente a estrutura molecular e o comportamento exato

das diferentes fases, mas entender os fenômenos moleculares e como eles ocorrem na troca de fase é de grande utilidade (ÇENGEL; BOLES, 2012).

Figura 5 - Organização dos átomos nas diferentes fases: (a) sólida, (b) líquida e (c) gasosa



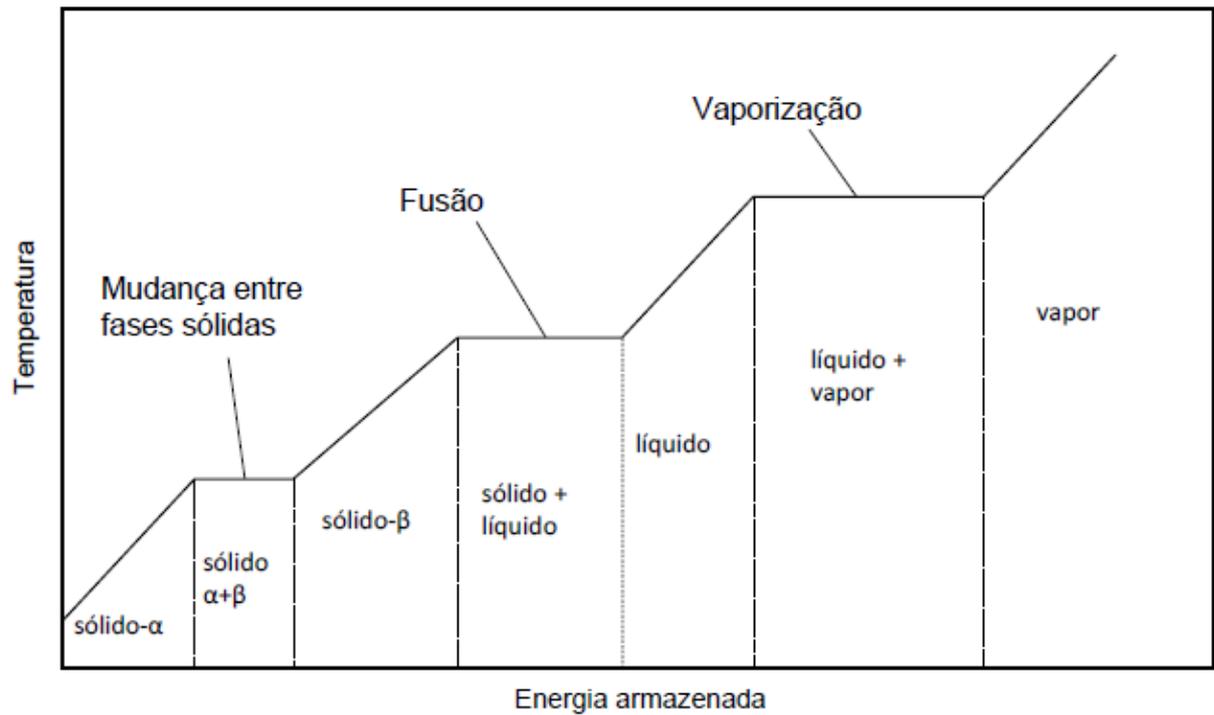
Fonte: Adaptado de ÇENGEL et al. (2012)

No estado sólido (a), as ligações intermoleculares são fortes, por se encontrarem compactadas e bem distribuídas em um padrão de rede. As pequenas distâncias que existem entre as moléculas são responsáveis pelas grandes forças de atração que mantêm as moléculas em posições fixas. Apesar das moléculas de uma substância no estado sólido não movimentarem entre si, elas ainda oscilam em torno de suas posições de equilíbrio, e a velocidade em que elas se movimentam varia de acordo com a temperatura. A uma temperatura alta o suficiente, a quantidade de movimento existente entre as moléculas pode superar a força de atração até que essas moléculas se desprendem, iniciando então o processo de fusão.

A distância intermolecular na fase líquida (b) não é tão diferente da fase sólida. Entretanto, conforme pode-se observar na segunda etapa da Figura 5, existe uma movimentação mais livre entre os grupos de moléculas, indicando também que as forças intermoleculares são mais fracas que as presentes no estado sólido.

Quanto a uma substância na fase gasosa (c), a distância entre as moléculas é muito maior, além de seus movimentos ocorrerem de forma aleatória. A energia existente nas moléculas presentes em substâncias no estado gasoso é geralmente alta. Sendo assim, o gás liberará uma enorme quantidade de energia em um caso de mudança de fase. (ÇENGEL et al. 2012)

Figura 6 – Energia térmica armazenada de um material



Fonte: Adaptado de Nomura, Okinaka e Akiyama et al. (2010)

Conforme visto na Figura 6, para qualquer processo de mudança de fase exige-se uma transferência de energia e essa energia tende a modificar os arranjos moleculares sem alterar a temperatura da substância. A quantidade de energia armazenada ou liberada para realizar a mudança de fase de um material é chamada de calor latente, cuja quantidade envolvida no processo depende da temperatura ou da pressão em que a mudança de fase ocorre.

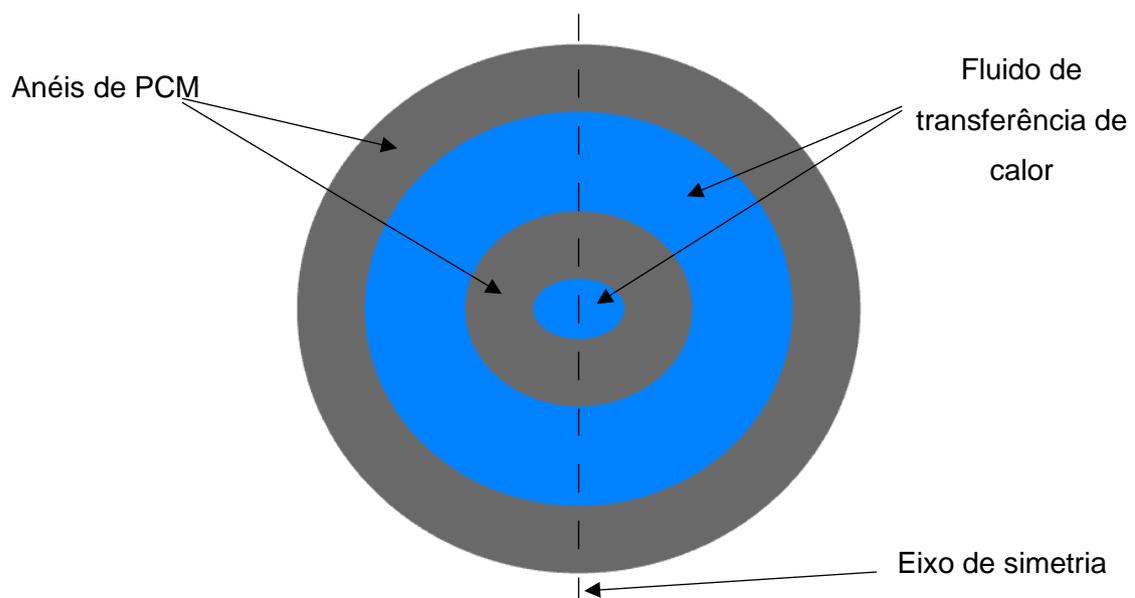
4 ABORDAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentados o modelo físico analisado, o modelo numérico e as devidas condições iniciais e de contorno consideradas.

4.1 MODELO FÍSICO

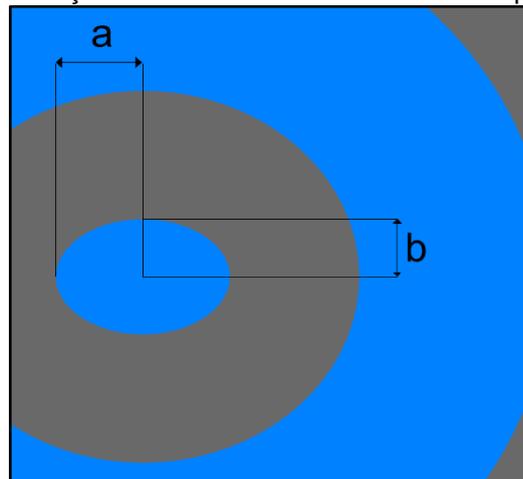
A geometria analisada neste presente trabalho é de um trocador de calor de múltiplos tubos elípticos conforme mostrado na Figura 7. O tubo em estudo pode ser representado geometricamente como uma elipse bidimensional, considerando que as temperaturas nas paredes em contato com o PCM são homogêneas. Além disso, o modelo geométrico é verticalmente simétrico. Sendo assim, foi modelado somente a metade do tubo para que a necessidade de processamento e o tempo de execução das simulações fossem reduzidos. Conforme pode-se ver na Figura 7, a região cinza representa os anéis de PCM, enquanto a região azul representa o fluido de transferência de calor contido nos tubos. Ainda, na Figura 8, é possível observar a relação a/b , que diz respeito ao raio maior e menor do tubo interno.

Figura 7 – Modelo físico da seção transversal do tubo de trocador de calor



Fonte: Elaborado pelo autor

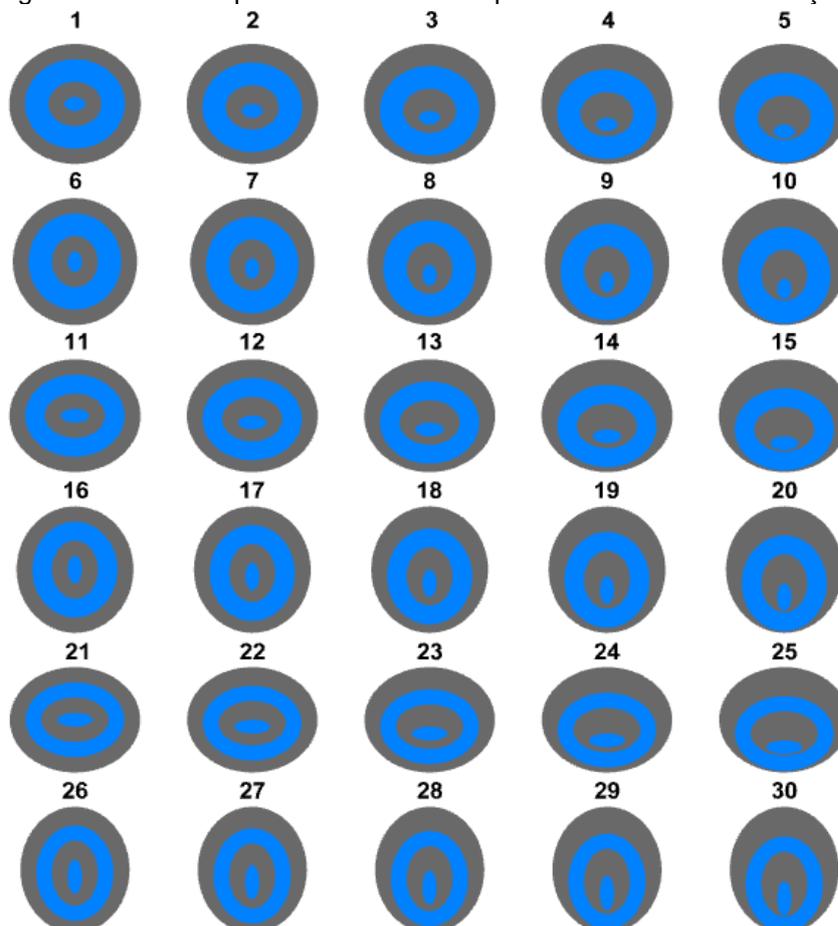
Figura 8 – Relação do raio maior e menor do tubo elíptico interno



Fonte: Elaborado pelo autor

As dimensões dos tubos variam para cada um dos 30 casos estudados. Entretanto, a massa total de PCM contido nos tubos e a área de troca térmica são iguais em todos os casos simulados.

Figura 9 – Tubos elípticos com diferentes posicionamentos e orientações



Fonte: elaborada pelo autor

Conforme visto na Figura 9, os casos analisados variam a relação dos raios menores e maiores dos tubos internos, a orientação dos tubos para cada caso como também acontece a excentricidade vertical descendente dos tubos (em azul). A Tabela 3 apresenta as características geométricas específicas de cada caso simulado.

Tabela 3 – Configuração dos tubos

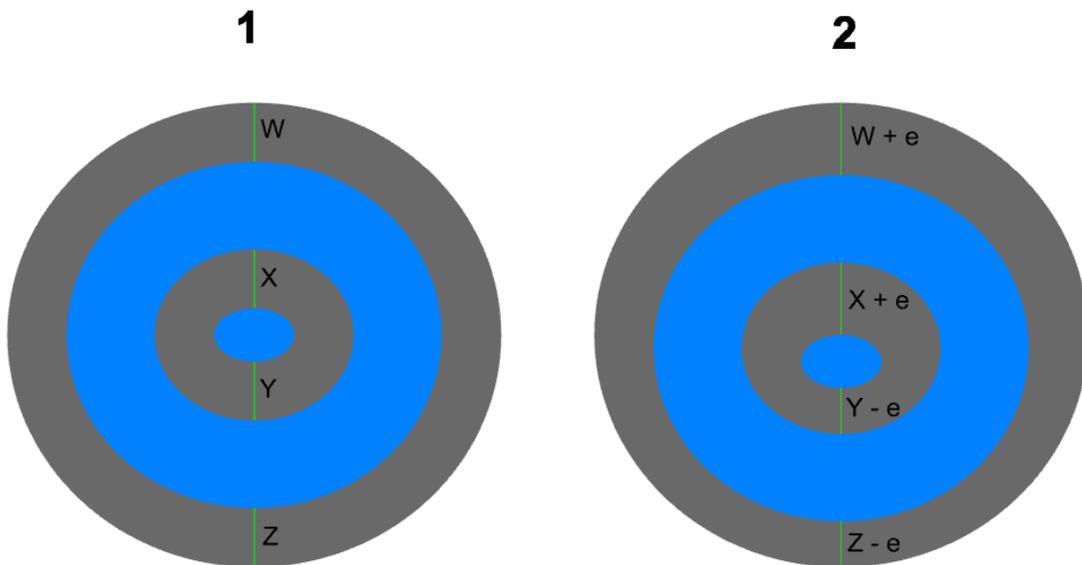
Caso	Orientação dos tubos	Relação a/b	Excentricidade (mm)
1 (base)	Horizontal	1,5	0
2	Horizontal	1,5	5
3	Horizontal	1,5	10
4	Horizontal	1,5	15
5	Horizontal	1,5	20
6	Vertical	1,5	0
7	Vertical	1,5	5
8	Vertical	1,5	10
9	Vertical	1,5	15
10	Vertical	1,5	20
11	Horizontal	2	0
12	Horizontal	2	5
13	Horizontal	2	10
14	Horizontal	2	15
15	Horizontal	2	20
16	Vertical	2	0
17	Vertical	2	5
18	Vertical	2	10
19	Vertical	2	15
20	Vertical	2	20
21	Horizontal	1,75	0
22	Horizontal	1,75	5
23	Horizontal	1,75	10
24	Horizontal	1,75	15
25	Horizontal	1,75	20
26	Vertical	1,75	0
27	Vertical	1,75	5
28	Vertical	1,75	10
29	Vertical	1,75	15
30	Vertical	1,75	20

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a Tabela 3, além das variações das relações a/b, pode-se observar que os casos variam suas orientações entre horizontal e vertical. A excentricidade vertical dos tubos em relação aos anéis de PCM também é levada em conta, a qual

aumenta gradativamente, reduzindo assim a espessura da região inferior de cada anel, conforme exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Excentricidade vertical dos tubos em relação aos anéis de PCM



Fonte: elaborado pelo autor

Assim como o modelo estudado por Al-Abidi et al. (2013), o PCM utilizado para o estudo foi o RT-82. Suas propriedades termofísicas estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades termofísicas do PCM RT82

Propriedade	RT 82
Densidade do PCM sólido (kg/m^3)	950
Densidade do PCM líquido (kg/m^3)	770
Calor específico do PCM líquido (J/kg.K)	2000
Calor latente de fusão (J/kg)	176000
Temperatura de fusão (K)	350,15-358,15
Condutividade térmica (W/ m.K)	0,2
Coefficiente de expansão térmica ($1/\text{K}$)	0,001
Viscosidade dinâmica (kg/m.s)	0,03499

Fonte: Adaptado de Al-Abidi et al. (2013)

4.2 MODELO NUMÉRICO

Para o modelo matemático do processo de fusão do PCM contido no tubo de trocador de calor, assume-se que o escoamento é laminar e incompressível e a dissipação viscosa é desprezível. Também considera-se que as propriedades do PCM

são independentes da temperatura. As equações que compõem o modelo matemático são as equações de balanço de massa (4.1), da quantidade de movimento (4.2) e da conservação de energia (4.3) (ANSYS, 2013), apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \cdot \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho h_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_e) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.3)$$

onde ρ é a massa específica, \vec{V} é o vetor de velocidade, t é o tempo, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica, \vec{g} é a aceleração da gravidade, \vec{S} é o termo fonte da quantidade de movimento, k é a condutividade térmica e h_e é a entalpia total. A entalpia total é definida na Eq. (4.5) como sendo a soma da entalpia sensível h_s , descrita através da Eq (4.4), com a entalpia devida à mudança de fase (γL).

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (4.4)$$

$$h_e = h_s + \gamma L \quad (4.5)$$

onde h_{ref} é a entalpia de referência na temperatura de referência (T_{ref}), c_p é o calor específico, L é o calor latente de fusão, e γ é a fração líquida que ocorre durante a mudança de fase entre os estados sólido e líquido, quando a temperatura é $T_1 > T > T_s$ e que pode ser escrito como:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s, \\ 1 & \text{se } T > T_l, \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (4.6)$$

onde T_s é a temperatura do PCM sólido e T_l é a temperatura do PCM líquido.

O termo fonte \vec{S} da equação da quantidade de movimento é definido por:

$$\vec{S} = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 - \varepsilon)} C_{mushy\ zone} \vec{V} \quad (4.7)$$

onde $\varepsilon = 0,001$ é uma pequena constante para evitar a divisão por zero e C é a constante que reflete o processo cinético e morfologia da região de mudança de fase, estudada, entre outros, por pesquisadores como Brent e Voller (1988) e Shmueli et al. (2010). Estes pesquisadores demonstraram que a constante C controla, efetivamente, o grau de fusão (ou solidificação), sendo mais rápido ou mais lento, dependendo do valor adotado para esta constante. A constante C interfere, assim, na intensidade de convecção do PCM líquido durante todo o processo de fusão ou solidificação. Os valores normalmente adotados para a constante C vão de 10^4 a 10^{10} .

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONTROLE DAS SIMULAÇÕES

A temperatura inicial do PCM foi considerada igual a 27 °C ($300,15\text{ K}$). Nessa temperatura, todo PCM se encontra no estado sólido, passando a se fundir conforme recebe calor dos tubos. As superfícies dos tubos elípticos, as quais têm contato direto com o PCM, são mantidas em uma temperatura constante de 90 °C ($363,15\text{ K}$). As superfícies dos tubos elípticos são consideradas isotérmicas e as paredes têm uma condição de não deslizamento.

5 METODOLOGIA

A fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics*) é a área que estuda, através da simulação numérica, o comportamento dos fluidos, seja o escoamento, a transferência de calor, processos de mudança de fase ou outros fenômenos físicos do interesse da mecânica dos fluidos. Com um conjunto de ferramentas e condições de contorno, um *software* CFD é capaz de solucionar dos mais simples aos mais complexos problemas. Entretanto, para que isso seja possível, o domínio computacional é dividido em pequenos volumes, conhecidos como malha computacional.

A fluidodinâmica computacional já é bastante utilizada tanto no ramo acadêmico quanto industrial, como setor automobilístico, naval, de energia, entre outros. Essa ferramenta tende a se difundir cada vez mais por possuir uma excelente vantagem de reduzir a quantidade de protótipos fabricados, reduzindo custos de fabricação e o tempo total de entrega do produto final.

O estudo de CFD pode ser dividido em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-processamento a geometria é definida, bem como a malha computacional. Também são definidas as condições de contorno, as propriedades dos materiais presentes no modelo e quais são os modelos matemáticos a serem utilizados para a resolução e descrição dos fenômenos de interesse na simulação.

No processamento, o modelo matemático é resolvido de acordo com as condições estabelecidas no pré-processamento. Por fim, o pós-processamento é responsável por representar graficamente, de diferentes formas, os resultados obtidos através da simulação.

5.1 SOFTWARES UTILIZADOS

Neste trabalho são utilizados os seguintes *softwares* da empresa Ansys, Inc.: Design Modeler, Meshing, Fluent e CFD-Post, os quais possuem versões disponíveis gratuitamente para estudantes.

O *software* CAD Rhinoceros é utilizado para a criação da geometria a ser simulada posteriormente. Ele permite a criação de geometrias 2D e/ou 3D, com uma

variedade de ferramentas que permitem o usuário desenvolver seu trabalho com certa liberdade mesmo para modelagens complexas.

O Ansys Meshing é utilizado para a criação da malha computacional, a qual constitui-se de um grupo de elementos infinitesimais, onde todos os cálculos sobre os fenômenos estudados são aplicados. O *software* permite o usuário trabalhar com diferentes tipos de elementos conforme o número de dimensões espaciais do modelo (bidimensional ou tridimensional).

O *software* Fluent, por sua vez, é utilizado para a finalização do pré-processamento e processamento numérico. O programa disponibiliza uma interface para o usuário configurar os parâmetros de entrada dos equacionamentos. Nele se define diversas opções sobre o modelo físico, como regime transiente, escoamento laminar ou turbulento, transferência de calor e processos de fusão e solidificação, conforme necessidade e interesse do usuário. O *software* disponibiliza uma biblioteca de propriedades de diferentes materiais, sejam eles sólidos ou líquidos, assim como ele permite adicionar novos materiais e editar as propriedades dos materiais já existentes.

Quanto ao CFD-Post, este *software* possibilita a geração de diversos formatos dos resultados obtidos, como gráficos, imagens e animações, além de possibilitar a exportação dos resultados em planilhas eletrônicas.

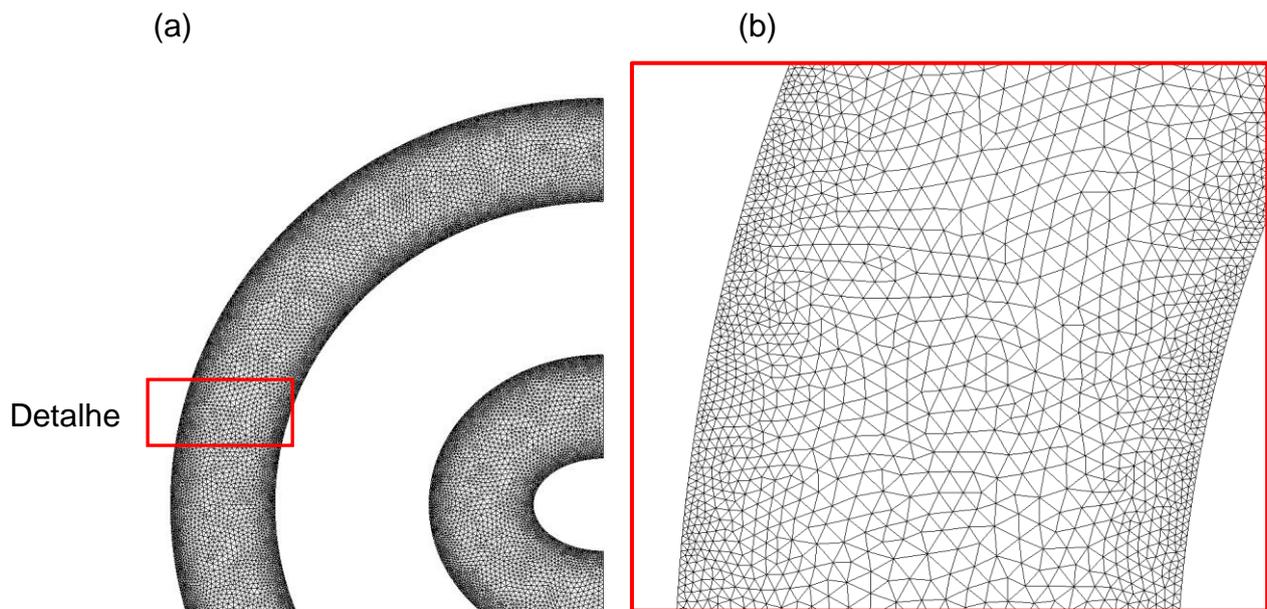
O valor da constante C usado para as simulações foi de 1×10^5 , tendo já sido validado anteriormente por Al-Abidi et al. (2013). Foram utilizados os seguintes métodos de solução e controle para as simulações: SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade por ser vastamente utilizado para esse tipo de problema. Para a discretização espacial do gradiente, foi definido o método *least squares cell based*, PRESTO para a pressão e *Second order upwind* para a solução das equações de quantidade de movimento e da conservação de energia.

Para monitoramento residual dos resultados, utiliza-se o valor 0,00005 para as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento, e 0,00008 para a equação de energia. Os coeficientes de relaxamento utilizados para pressão, energia, fração de líquido e forças de corpo e quantidade de movimento são de 0,3, 1, 0,9 e 0,2, respectivamente. O intervalo de tempo utilizado é de 0,5 segundos, tendo um número máximo de 1000 iterações para cada intervalo de tempo.

5.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DA MALHA

Para verificar a influência da malha utilizada, foram criadas três malhas computacionais, chamadas de M1, M2 e M3, as quais possuem 36500, 20780 e 12244 elementos, respectivamente. Estas possuem estrutura e distribuição dos elementos de forma similar, com elementos triangulares e com refino nas regiões mais críticas para estudo (Figura 11), como é o caso das regiões próximas ao limite do PCM com as paredes dos tubos. Isso ocorre, pois, essas superfícies são fontes de calor para o sistema, apresentando assim gradientes térmicos e fluidodinâmicos mais notáveis ao longo do tempo.

Figura 11 – Malha computacional: (a) completa e (b) detalhe da região refinada.



Fonte: elaborado pelo autor

O método utilizado para analisar a influência da malha nos resultados foi o GCI (*Grid Convergence Index*), o qual consiste em comparar os resultados obtidos com três malhas. Este método é aceito e recomendado pela ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) para pesquisas e estudos nesta área. Para aplicar o método, deve-se definir o tamanho representativo da malha (D_n) através da equação 5.1:

$$D_n = \left[\frac{1}{N} A_m \right]^{1/2}, \quad (5.1)$$

onde N é o número total de elementos contido na malha e A_m é a área superficial da malha. Define-se também o fator de refinamento da malha (Fr), através das equações 5.2 e 5.3 abaixo:

$$Fr_{21} = \frac{D_2}{D_1} \quad (5.2)$$

$$Fr_{32} = \frac{D_3}{D_2} \quad (5.3)$$

onde D_1 , D_2 e D_3 indicam as malhas mais refinadas, malha base e menos refinada, respectivamente. Os índices Fr indicam quais malhas estão sendo comparadas. Calcula-se, então, a ordem aparente (p) do método através das Eq. 5.4, 5.5 e 5.6:

$$p = \frac{1}{\ln(Fr_{21})} \left| \ln \left| \frac{\eta_{32}}{\eta_{21}} \right| + \ln \left(\frac{Fr_{21}^p - 1 \cdot \text{sign}\left(\frac{\eta_{32}}{\eta_{21}}\right)}{Fr_{32}^p - 1 \cdot \text{sign}\left(\frac{\eta_{32}}{\eta_{21}}\right)} \right) \right| \quad (5.4)$$

onde $\eta_{32} = \phi_3 - \phi_2$ e $\eta_{21} = \phi_2 - \phi_1$, sendo ϕ definido como a diferença entre soluções numéricas ϕ_n entre duas malhas distintas. Determina-se, então, valores extrapolados das soluções ϕ_e através das equações 5.5 e 5.6:

$$\phi_e^{21} = \frac{Fr_{21}^p \phi_1 - \phi_2}{Fr_{21}^p - 1} \quad (5.5)$$

$$\phi_e^{32} = \frac{Fr_{32}^p \phi_1 - \phi_2}{Fr_{32}^p - 1} \quad (5.6)$$

O erro relativo aproximado Er_{aprox} é definido através das equações 5.7 e 5.8, enquanto o erro relativo extrapolado Er_{ext} é calculado através das equações 5.9 e 5.10:

$$Er_{aprox}^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (5.7)$$

$$Er_{aprox}^{32} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_3}{\phi_2} \right| \quad (5.8)$$

$$Er_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \quad (5.9)$$

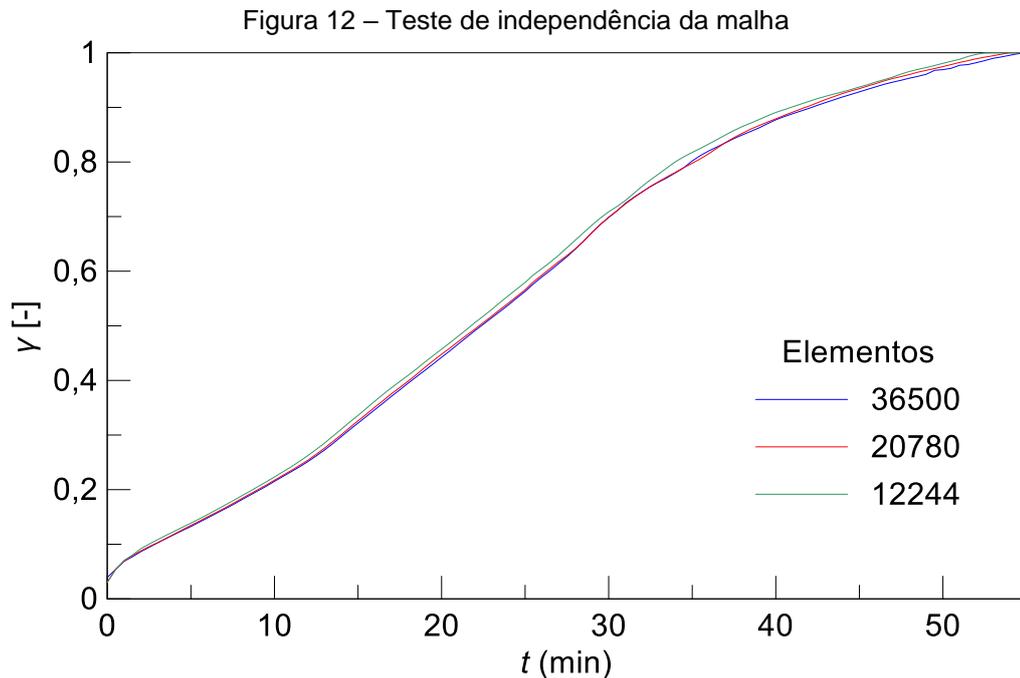
$$Er_{ext}^{32} = \left| \frac{\phi_{ext}^{32} - \phi_2}{\phi_{ext}^{32}} \right| \quad (5.10)$$

Por fim, calcula-se o *GCI* através das equações 5.11 e 5.12.

$$GCI^{21} = \frac{F_s Er_{aprox}^{21}}{Fr_{21}^p - 1} \quad (5.11)$$

$$GCI^{32} = \frac{F_s Er_{aprox}^{32}}{Fr_{32}^p - 1} \quad (5.12)$$

sendo o termo F_s um fator de segurança, cujo valor é 1,25, conforme sugerido por Roache (1998) e recomendado pela ASME para garantir um intervalo de confiança de 95% para a incerteza. A fração de líquido foi utilizada como critério de avaliação. A Figura 12 mostra os valores de fração de líquido para cada uma das três malhas avaliadas através do método *GCI*.



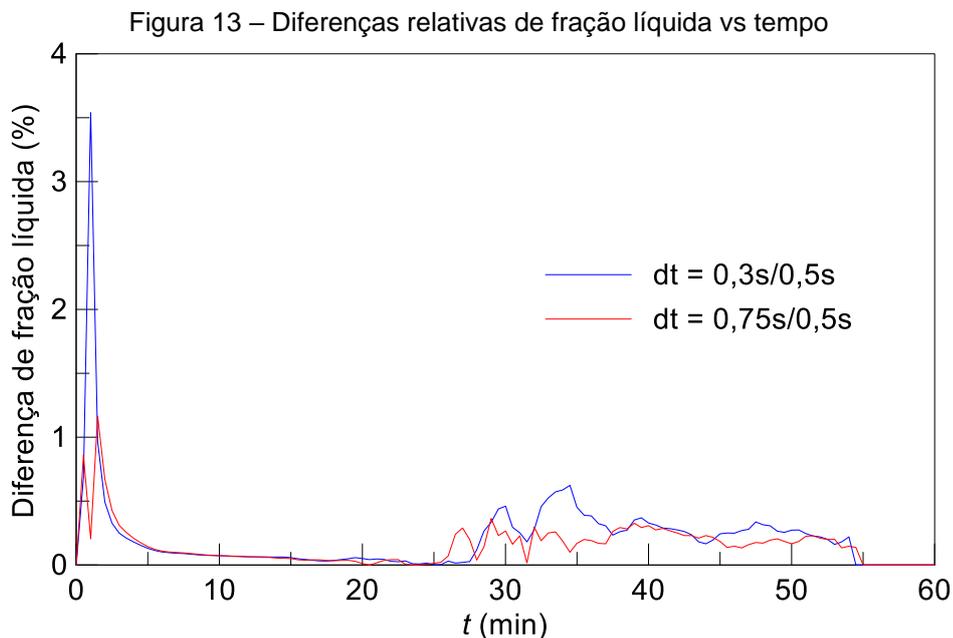
Fonte: elaborado pelo autor

Os valores de *GCI* calculados a partir dos resultados obtidos, ao longo de todo o processo de fusão, apresentaram o valor médio de, aproximadamente, 1,40%. Percebe-se, ao analisar a Figura 12, que os resultados de fração de líquido ao longo do tempo, independente da malha utilizada, são bem próximos. Logo, qualquer uma das malhas poderia ser utilizada como base para todas as simulações. Entretanto, por

haver casos em que a geometria exige melhor refinamento da malha em zonas críticas e de pouca espessura de PCM, além de o tempo de processamento não ser substancialmente exagerado, a malha utilizada nesse estudo foi a mais refinada, com 36500 elementos.

5.3 ANÁLISE DO INTERVALO DE TEMPO

Assim como foi realizada a análise da independência de malha, a análise do intervalo de tempo também foi realizada com a malha base. Nessa análise foram adotados valores de intervalo de tempo de 0,3, 0,5, 0,7 e 1s. Diversos problemas de convergência ocorreram ao longo da simulação para o intervalo de 1 s. Sendo assim, ele foi descartado. A Figura 13 mostra as diferenças de fração de líquido ao longo do tempo, entre os intervalos de tempo 0,3 e 0,75s em relação ao intervalo de tempo de 0,5s.



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme visto na Figura 13, as diferenças de fração de líquido para os intervalos de tempos de 0,3 e 0,75 s em relação ao intervalo de tempo de 0,5 s são realmente baixas ao longo de toda a simulação, com uma diferença média de fração de líquido abaixo de 0,25%. O aumento nas diferenças de fração de líquido, evidentes apenas no início das simulações, não é relevante, pois nesse instante a fração de

líquido ainda está abaixo de 0,1 e as diferenças diminuem drasticamente ao longo da simulação. Desta forma, o valor de intervalo de tempo adotado para o restante das simulações é de 0,5s, considerando uma boa confiabilidade dos resultados sem o acréscimo desnecessário de processamento caso o intervalo de tempo escolhido fosse de 0,3s.

5.4 PROCESSAMENTO

Boa parte das simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core i5 4670K e sistema operacional de 64 bits. Para acelerar as simulações, foi utilizado também um computador disponibilizado pela universidade com processador Intel Core i7 2600 e sistema operacional de 64 bits. O tempo médio necessário para a simulação de cada caso, utilizando a malha e o intervalo de tempo selecionados, variou de 5 a 7 horas.

5.5 PÓS – PROCESSAMENTO

Através do software Ansys CFD-Post, foi possível obter a fração líquida para cada caso estudado, dividindo a massa de PCM na fase líquida em cada instante de tempo pela massa total de PCM, sendo estes valores extraídos do *software* Ansys Fluent. O tempo total de fusão foi determinado como o tempo necessário para que a fração de líquido atingisse o valor de 1,0. Com o uso do Ansys CFD-Post, foi possível extrair também os contornos de temperatura e velocidade dos casos simulados.

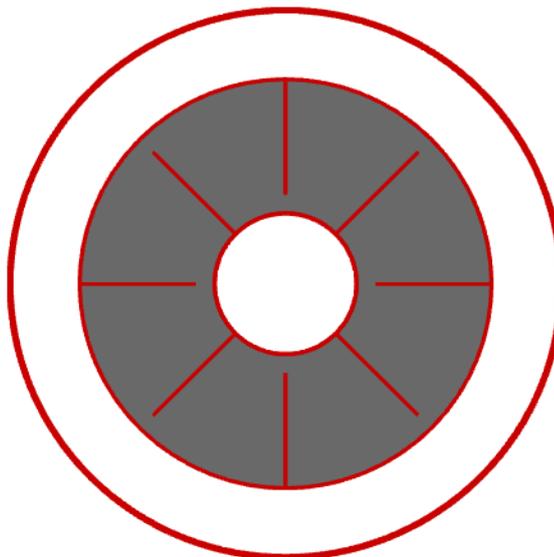
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados da validação numérica e a análise dos resultados obtidos com as simulações realizadas do processo de fusão do PCM sob diferentes condições geométricas. O modelo numérico utilizado no presente trabalho foi validado com resultados disponíveis na literatura.

6.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

O modelo numérico foi verificado e validado através dos resultados de Al-Abidi et al. (2013). Os autores investigaram o processo de fusão do PCM RT- 82. Para a avaliação dos autores, foram estudados 7 casos com diferentes configurações de aletas. Entretanto, neste documento só é validado um dos casos propostos. O tubo de trocador de calor estudado possui um raio interno de 25,4 mm com 1,2 mm de espessura, um raio intermediário de 75 mm e o raio externo do tubo de 100 mm com 2 mm de espessura. O caso proposto para validação é representado pela Figura 6.1, sendo que a região em cinza representa o PCM e a região em branco o HTF.

Figura 14 –Trocador de calor aletado de triplo tubo.



Fonte: elaborado pelo autor

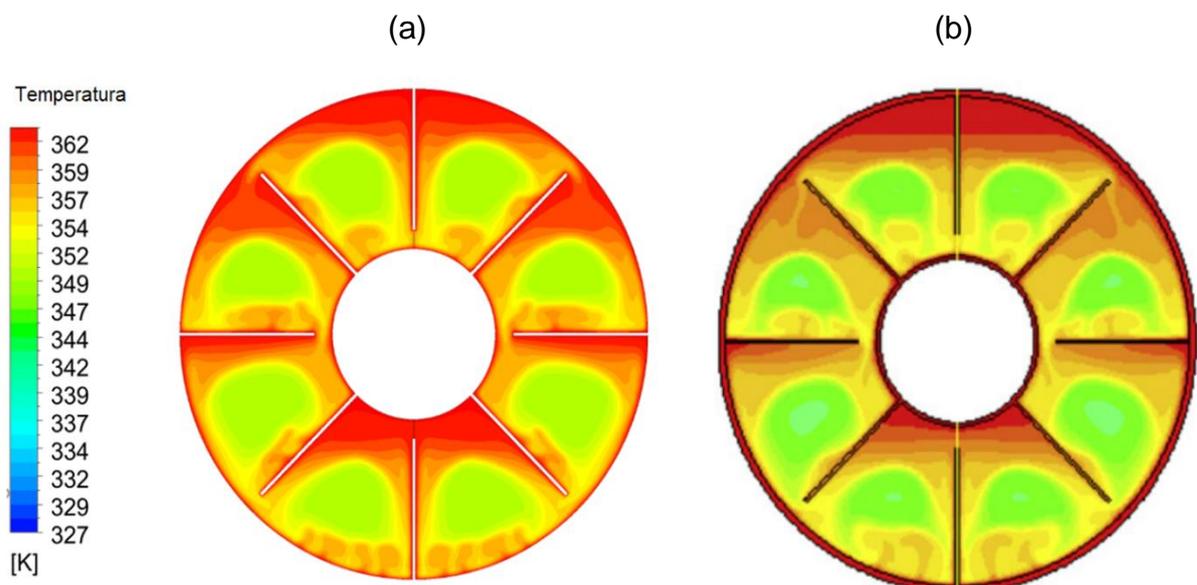
Os autores utilizaram uma temperatura constante de 363,15 K (90 °C) para a superfície dos tubos e o PCM escolhido RT-82 possui, ao início do processo de fusão,

uma temperatura média de 300,15 K (27 °C). A temperatura definida para a superfície dos tubos é mais de 10 graus acima da temperatura de fusão do PCM, a qual variou, ao longo do teste experimental realizado pelos autores, de 70 a 82 °C.

6.1 .1 Validação Qualitativa

Nas Figuras 15 (a,b) são apresentados campos de temperatura, os quais foram obtidos numericamente por este trabalho (Fig. 15 (a)) e numericamente (Fig. 15 (b)) por Al-Abidi et al. (2013), para $t = 30$ min. Comparando-se os resultados, pode-se observar que, aos 30 min, as regiões que contêm PCM ainda sólidas estão divididas entre si devido a presença de aletas, as quais aumentam a área de troca térmica, favorecendo o processo de fusão. Percebe-se também que os resultados obtidos neste trabalho apresentam boa concordância com os resultados obtidos por Al-Abidi et al. (2013). Isso fica notável ao observar que os gradientes de temperatura e as concentrações de regiões ainda sólidas de PCM estão bastante semelhantes.

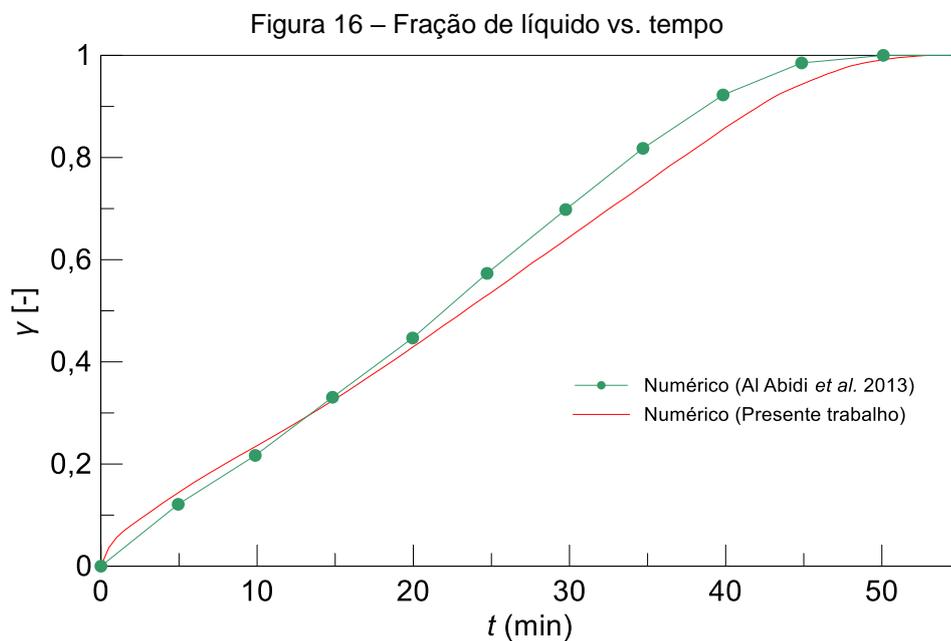
Figura 15 – Campos de temperatura de RT-82 para $t = 30$ min: (a) presente trabalho e (b) numérico (Al-Abidi et al. (2013))



Fonte: elaborado pelo autor

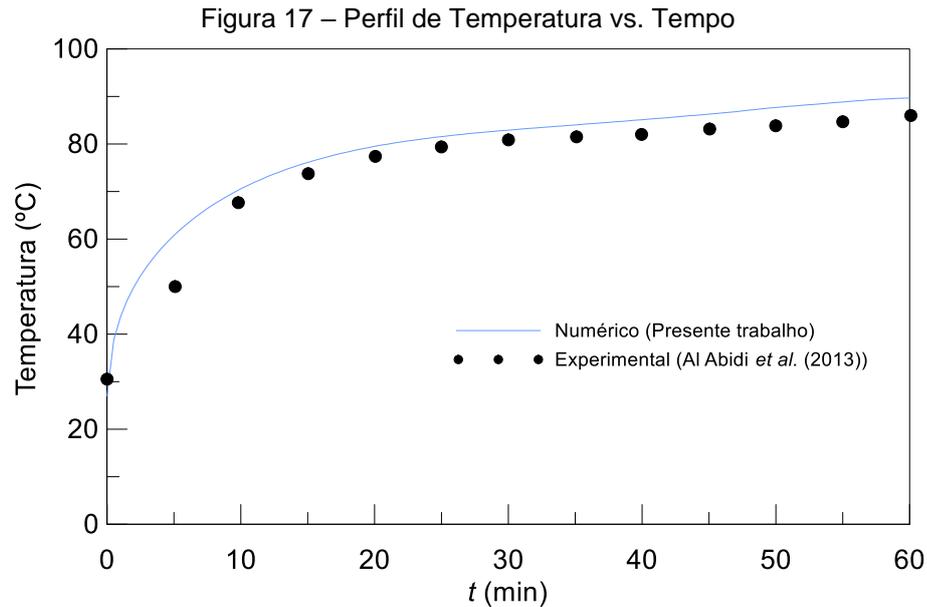
6.1.2 Validação Quantitativa

A validação quantitativa foi realizada através de perfil de fração de líquido (Figura 16) e de temperatura (Figura 17). A primeira mostra a variação de fração líquida ao longo do tempo para o mesmo caso apresentado na Figura 15. Observa-se que os resultados deste trabalho possuem uma boa concordância com os resultados numéricos obtidos por Al-Abidi et al. (2013).



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 17 mostra o perfil de temperatura ao longo do tempo obtido pelo presente trabalho e por Al-Abidi et al. (2013). Observa-se boa concordância entre resultados, com a exceção de um leve afastamento dos resultados no início do processo de fusão.



Fonte: elaborado pelo autor

Considerando os resultados apresentados nas Figuras 15, 16 e 17, o modelo foi considerado validado.

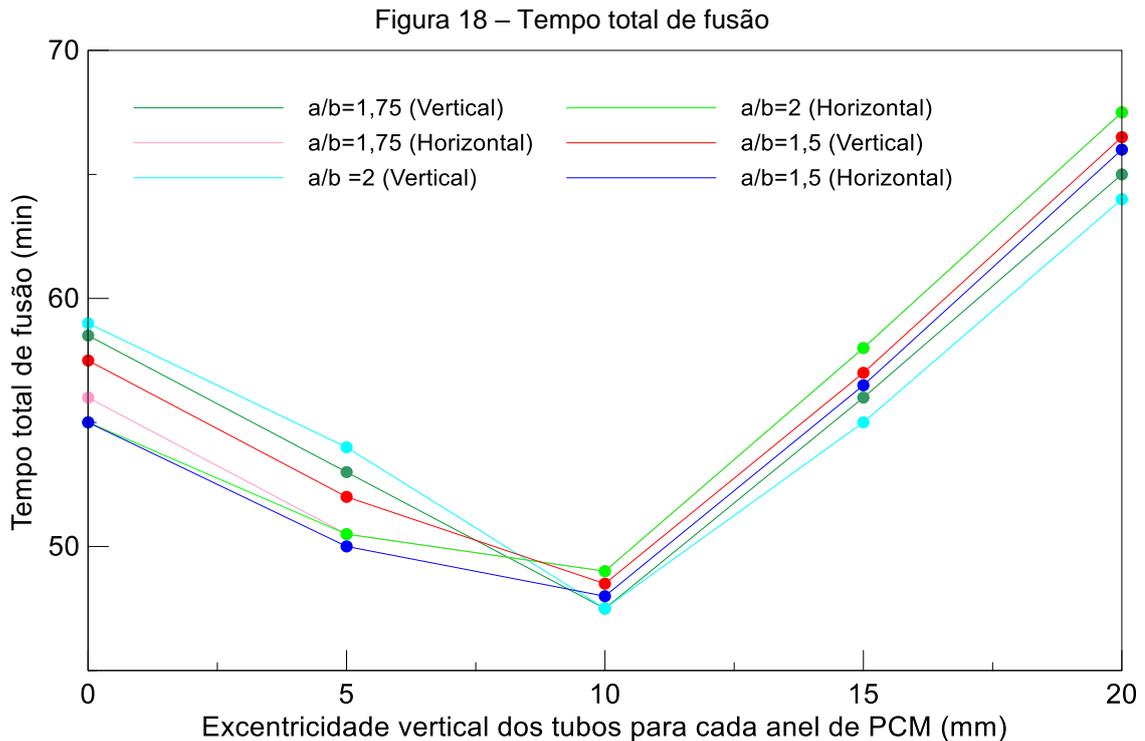
6.2 ESTUDO DE CASO

Os resultados das simulações conduzidas no presente trabalho são apresentados a seguir.

6.2.1 Tempo total de fusão

O tempo total de fusão é apresentado na Figura 18. Inicialmente, percebe-se que, entre os casos concêntricos, independentemente de sua orientação, o tempo total de fusão permaneceu entre 55 e 58,5 minutos. Também é possível verificar que o tempo total de fusão do PCM atinge o valor máximo com a excentricidade dos anéis de PCM em 20 mm, tendo os casos 15 e 25 os maiores tempos totais de fusão, em 67,5 minutos. Ao analisar o comportamento do tempo total de fusão com o aumento da excentricidade vertical do anel de PCM, é evidente que existe uma excentricidade ótima de 10 mm, visto que, para todas as diferentes configurações simuladas, mantendo-se a excentricidade em 10 mm, o tempo de fusão torna-se drasticamente menor, tendo os casos 8 e 18 os menores tempos totais de fusão, em 48,5 minutos.

Ao comparar os casos 8 e 18 isoladamente, nota-se que ambos os casos estão orientados verticalmente, possuem excentricidade dos seus anéis de PCM em 10mm e relações a/b acima de 1,5. É interessante observar que essa configuração otimizada reduz o tempo total de fusão, em comparação com o caso base (1) e o pior cenário simulado (casos 15 e 25), em aproximadamente 13,64% e 29,63%, respectivamente.



Fonte: elaborado pelo autor

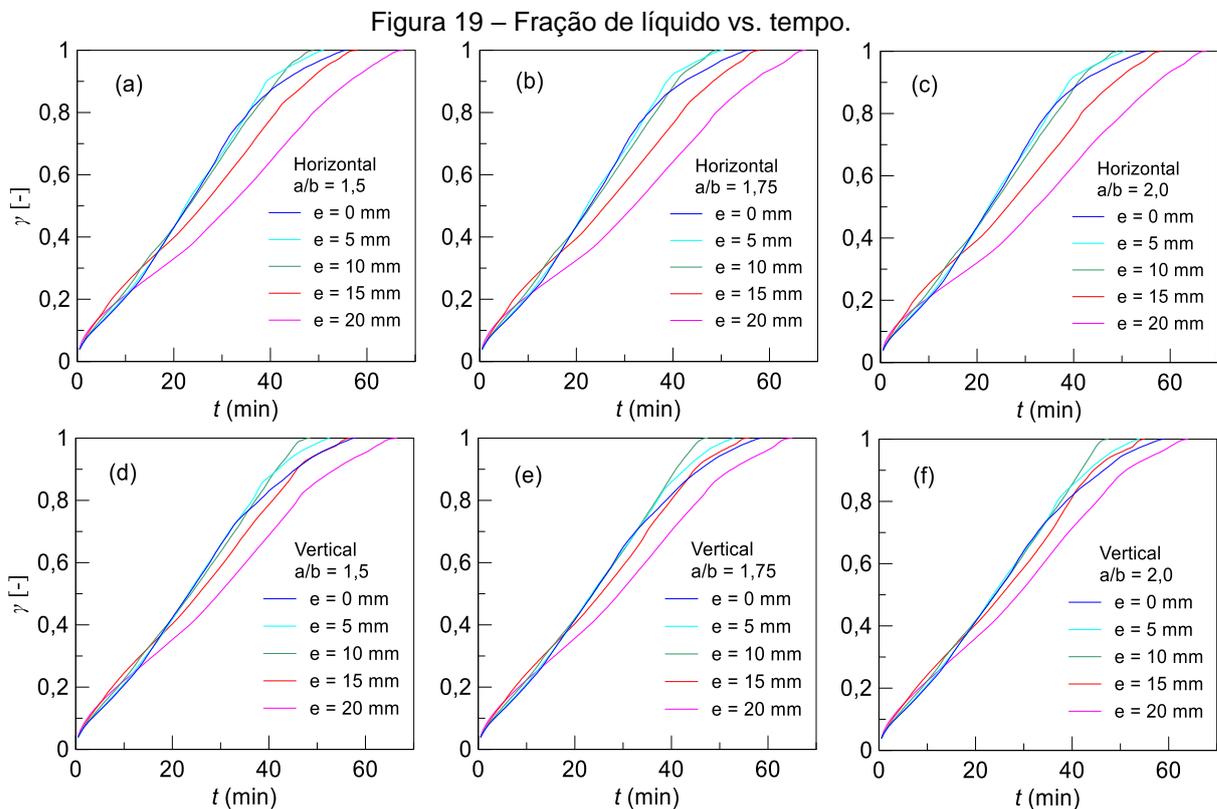
6.2.2 Fração líquida

A fração líquida é caracterizada pela proporção de PCM encontrada na fase líquida em determinado instante. Desta forma, ela representa a quantidade de PCM que já absorveu calor latente. Os perfis de fração de líquido para diferentes instantes de tempo podem ser vistos na Figura 19, onde os casos são representados conforme sua orientação e relação a/b nas colunas. Como pode ser observado, até, aproximadamente, os 10 minutos, todos os casos possuem taxas de fusão do PCM similares.

A partir deste instante, cada caso começa a ter um comportamento diferente. Isso ocorre, pois, ao aumentar a excentricidade e dos tubos em relação aos anéis de PCM, a espessura da região inferior do PCM diminui. Isso facilita o processo de fusão nessas regiões devido à menor quantidade de massa de PCM a ser fundida. Além

disso, devido às forças de empuxo, a região inferior tende a acumular a fração de líquido fria de PCM enquanto a fração líquida quente ascende. Logo, como a força motriz para a transferência de calor é a diferença de temperatura, na região inferior do anel esse diferencial seria menor comparado às demais regiões da cavidade. Desta forma, justifica-se a excentricidade vertical descendente dos tubos.

Ao comparar os resultados por orientação, nota-se que as curvas dos casos orientados verticalmente se dispersam relativamente menos que os casos orientados horizontalmente. Pode-se verificar também que, para uma mesma orientação, ao variar as relações a/b , pouca diferença se nota no tempo que os casos levam para completar o processo de fusão.



Fonte: elaborado pelo autor

6.2.1 Influência da excentricidade no tempo total de fusão

Para melhor avaliar a influência do fator excentricidade no processo de fusão, foram considerados os casos com relação $a/b = 2$ e os valores de excentricidades 0, 10 e 20 mm. De forma evidente, a excentricidade de 10 mm, independente da orientação dos tubos, diminui substancialmente o tempo necessário para completar o

processo de fusão do PCM. A Figura 20 mostra o comportamento dos campos de fração de líquido dos casos considerados nessa avaliação.

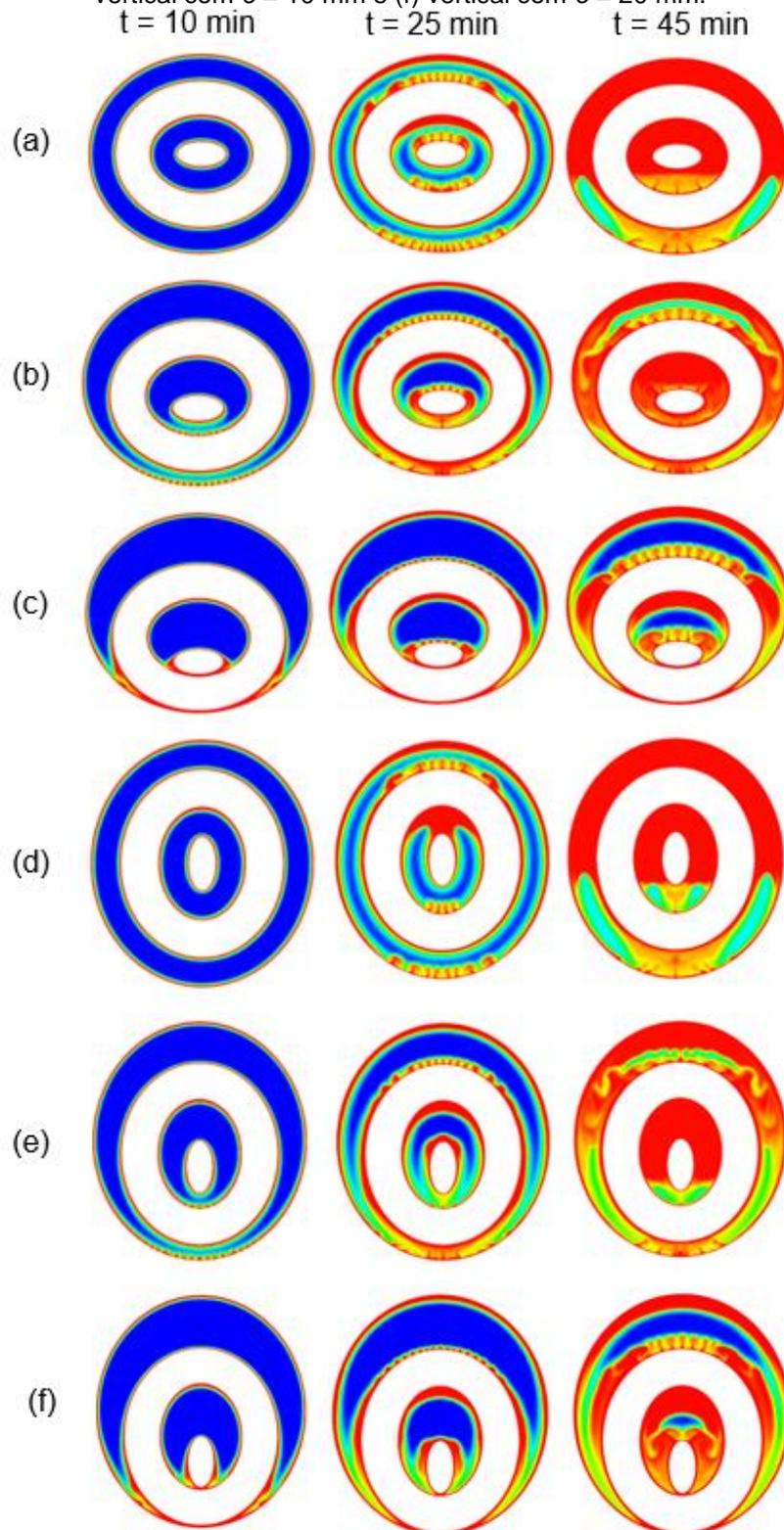
Conforme indica os campos de fração de líquido presentes na Figura 20, inicialmente, com exceção dos casos com excentricidade de 20 mm, todos os outros possuem ainda uma pequena fração de líquido concentrada apenas nas regiões próximas das paredes aquecidas, indicando que, inicialmente, o mecanismo dominante de transferência de calor é a condução.

Entretanto, as diferenças se tornam bastante perceptíveis com $t = 25$ min, com os efeitos da convecção natural em cada caso. Além das correntes de convecção presentes, nota-se, principalmente nos casos concêntricos (a) e (d), a convecção de Rayleigh-Bénard, presente na região inferior de cada anel de PCM, acelerando o processo de fusão nessas regiões. É interessante observar que, para um mesmo valor de excentricidade, os casos horizontais e verticais possuem comportamento muito próximos.

Ainda em $t = 25$ min, o efeito da excentricidade já se torna notável, sendo que os casos (c) e (f), os quais possuem o valor máximo de excentricidade de 20 mm, possuem boa parte das regiões superiores do PCM ainda em estado sólido. Os mesmos casos, em $t = 45$ min, apresentam a convecção de Rayleigh-Bénard, ainda com a camada superior dos anéis de PCM parcialmente sólida. Esses casos possuem camadas de PCM nas regiões inferiores muito elevadas, aumentando o tempo para que ocorra uma convecção mais intensa, conforme explicado na seção 6.2.2.

Em $t = 45$ min, os casos concêntricos (a) e (d), já com as regiões superiores completamente fundidas, ainda possuem PCM sólido concentrado nas regiões inferiores. Em comparação, no mesmo intervalo, os casos (b) e (e), com excentricidade de 10 mm, estão mais próximos de completar o processo de fusão, e as pequenas regiões que ainda não completaram o processo de fusão não estão concentradas em um único ponto. Ainda, é nítido também que a excentricidade de 10 mm aumenta a área dominante de convecção, reduzindo o tempo total de fusão.

Figura 20 – Campos de fração líquida para $t = 10, 25$ e 45 min, para os casos: (a) horizontal com $e = 0$ mm, (b) horizontal com $e = 10$ mm, (c) horizontal com $e = 20$ mm, (d) vertical com $e = 0$ mm, (e) vertical com $e = 10$ mm e (f) vertical com $e = 20$ mm.



Fonte: elaborado pelo autor

6.2.3 Campos de fração líquida e vetores de velocidade

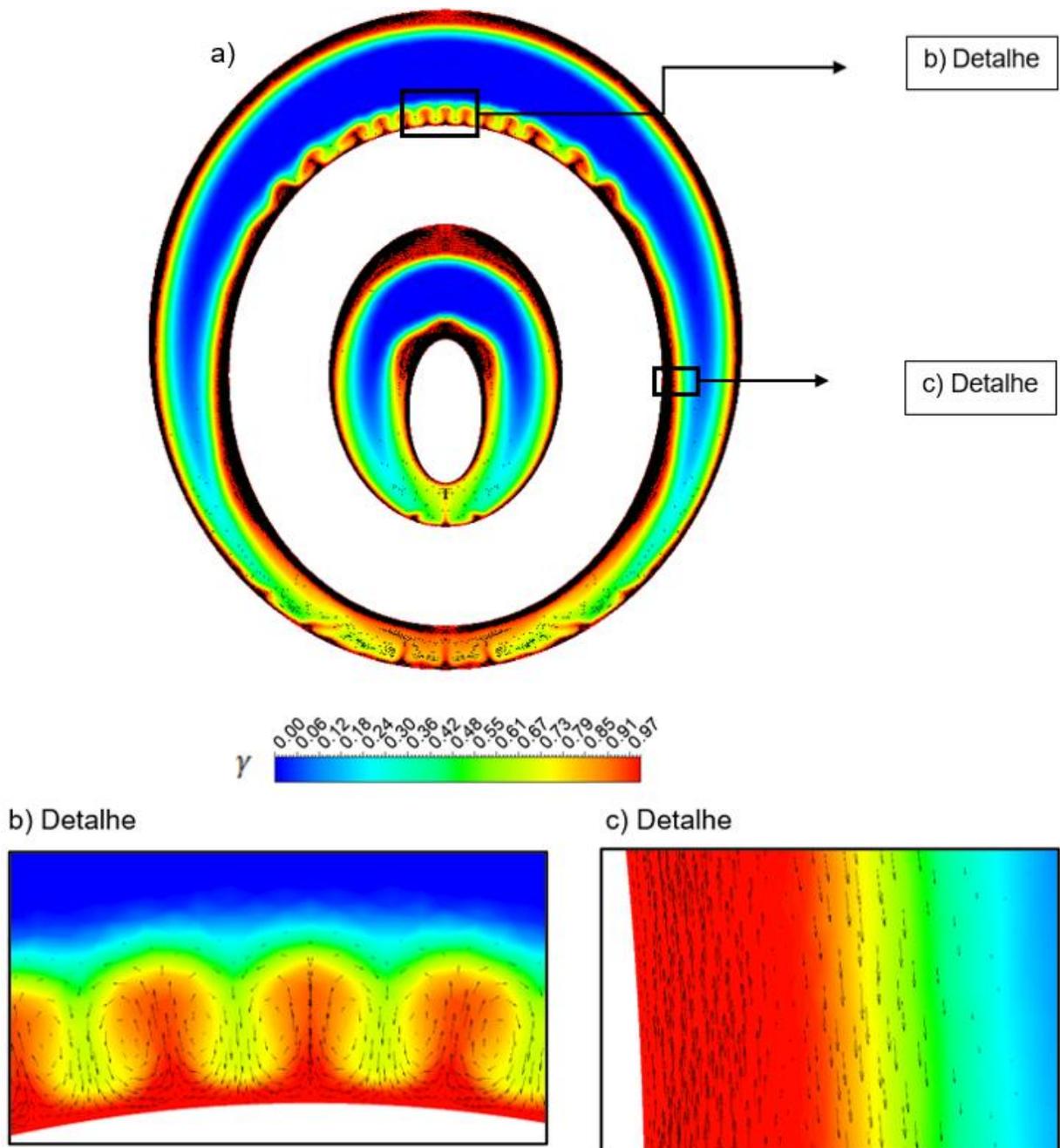
A Figura 21 mostra os campos de fração líquida e vetores de velocidade para o caso 18. O instante de tempo escolhido para representar os resultados com detalhes é de 25 min. Na Figura 21, pode-se observar que os campos de fração de líquido se comportam de forma diferente em cada região do anel de PCM.

O campo azul, que representa a camada sólida do PCM, se encontra com maior dominância nas regiões onde há o maior afastamento das paredes dos tubos em cada um dos anéis de PCM, visto que o tempo que se leva para o calor dos tubos atingir essas regiões é maior. Nota-se, também, que existe uma camada de PCM líquido próxima às paredes dos tubos, as quais são as fontes de calor do sistema. Inicialmente, nessa região, o mecanismo de transferência de calor é por condução, para então, assim que se inicia a mudança de fase, através da transferência de calor por convecção natural, o PCM líquido sobe para região acima do PCM sólido. Isso ocorre devido às diferenças de massa específica que estão presentes no processo de fusão do PCM, onde a fração líquida, com menor massa específica, tende a subir e se acumular na região acima do PCM sólido.

É interessante observar, conforme o Detalhe (b) da Figura 21, a recirculação dos vetores de velocidade na região inferior do anel superior de PCM, onde há um maior gradiente de temperatura, o que atesta a ocorrência da convecção Rayleigh-Bénard.

Conforme visto no Detalhe (c), o perfil de velocidade está bem desenvolvido, o que indica a boa qualidade da malha utilizada. Os vetores de velocidade tendem a zero nas regiões próximas às paredes dos tubos devido à condição de não deslizamento (efeito da camada limite fluidodinâmica). Esses vetores estão direcionados de forma ascendente, sendo que essa região, por estar mais aquecida, promove uma massa específica menor do PCM.

Figura 21 – Fração líquida e vetores de velocidade: a) integral, b) detalhe e c) detalhe.



Fonte: elaborado pelo autor

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, todos os casos analisados possuem a mesma quantidade de massa de PCM e área dos tubos, mantendo, portanto, a capacidade de armazenamento térmico. No entanto, pequenas alterações nas geometrias e disposição dos anéis de PCM podem influenciar significativamente na transferência de calor.

A validação do modelo foi realizada através da comparação com os resultados experimentais e numéricos de Al-Abidi et al. (2013), utilizando-se RT-82 como PCM. Após a validação, foram definidas 30 geometrias de tubos elípticos de trocadores de calor, mantendo, conforme explicado anteriormente, a massa de PCM e área de troca de calor, para analisar o processo de fusão do PCM RT-82. Estudou-se o comportamento de cada caso variando as relações dimensionais a/b do tubo interno para 1,5x, 1,75x e 2x. Também foi variado, ao longo das simulações, a excentricidade vertical descendente dos tubos em relação aos anéis de PCM, aumentando gradualmente essa excentricidade, para 0, 5, 10, 15 e 20 mm. A orientação geométrica também foi considerada, variando entre horizontal e vertical para os casos estudados.

Para as condições citadas anteriormente, foram apresentados resultados de tempo total de fusão, fração de líquido em função do tempo e tempo total de fusão em função das relações a/b e excentricidade. Os resultados do estudo indicaram que:

- O fator excentricidade vertical influencia diretamente no tempo total de fusão dos casos estudados, sendo a excentricidade vertical descendente de 10 mm responsável pelo menor tempo de fusão.
- As relações dimensionais de a/b , independente das demais configurações analisadas, pouco influenciam no processo de fusão se comparados aos efeitos da excentricidade.
- A orientação geométrica pouco influencia no tempo total de fusão. Dentre os casos estudados, as geometrias com o menor tempo total de fusão são orientadas verticalmente.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através das conclusões obtidas ao término deste trabalho, e com a intenção de aprimorar os conhecimentos sobre o uso de PCM em aplicações de armazenamento energético, indica-se fazer um estudo sobre o processo de solidificação do PCM. Sugere-se também realizar uma análise experimental das condições apresentadas neste trabalho. Recomenda-se, por fim, aprofundar o estudo considerando não apenas fatores geométricos e orientações, como também o uso de nanopartículas metálicas a fim de otimizar a transferência de calor.

REFERÊNCIAS

ABDULJALIL, A. Al-Abidi. *et al.* Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, University Kebangsaan Malaysia, v. 53, n. 1, p. 147-156, jan./2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113000410>>. Acesso em: 15 set. 2020.

AGYENIM, F. *et al.* A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Centre for Sustainable Technologies, University of Ulster, Newtownabbey BT37 0QB, UK, v. 14, n. 2, p. 615-628, nov./2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002469>. Acesso em: 15 out. 2020.

BRENT, A. D.; VOLLER, V. R.; REID, K. J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal. **Numerical Heat Transfer**, v. 13, n. 3, p. 297–318, 1988. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407788808913615>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, 2008. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/130/7/078001/444689/Procedure-for-Estimation-and-Reporting-of>>. Acesso em: 10 abr. 2021.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **TERMODINÂMICA**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. p. 112-116

CUI, Haiting; YUAN, Xiugan; HOU, Xinbin. Thermal performance analysis for a heat receiver using multiple phase change materials. **Applied Thermal Engineering**, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, v. 23, n. 18, p. 2353-2361, ago./2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431103002102>. Acesso em: 10 out. 2020.

ELSANUSI, Omer S.; NSOFOR, Emmanuel C.. Melting of multiple PCMs with different arrangements inside a heat exchanger for energy storage. **Applied Thermal Engineering**, Department of Mechanical Engineering and Energy Processes, Southern Illinois University Carbondale, Carbondale, IL, USA, v. 137, n. 2020, p. 1-30, set./2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431120335274?via%3Dihub>. Acesso em: 18 nov. 2020.

ESAPOUR, M. et al. Numerical study on geometrical specifications and operational parameters of multi-tube heat storage systems. **Applied Thermal Engineering**, School of Mechanical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran, v. 109, n. 2016, p. 351-363, ago./2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116314429>. Acesso em: 25 nov. 2020.

FARID, M. M. *et al.* A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy Conversion and Management**, Department of Chemical & Materials Engineering, The University of Auckland, Private Bag 92019, Auckland, New Zealand, v. 45, n. 10, p. 1597-1615, jun./2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890403002668>. Acesso em: 15 mar. 2021.

HOSSEINI, M. J. *et al.* Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems. **Energy and Buildings**, Department of Mechanical Engineering, Golestan University, P.O. Box 155, Gorgan, Iran, v. 99, n. 2015, p. 263-272, abr./2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815003448>. Acesso em: 3 out. 2020.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4 ed. Ano: 1996.

ISMAIL, Kamal A.r.; JESUS, A. B. D. Parametric study of solidification of PCM around a cylinder for ice-bank applications. **International Journal of Refrigeration**, Thermal and Fluid Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, PO Box 6122, Campinas, SP, Brazil, v. 24, n. 8, p. 809-822, out./2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700700000591>. Acesso em: 25 nov. 2020.

JAGUEMONT, J.; OMAR N.; BOSSCHE, P. V.; MIERLO, J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 132, p. 308-320, 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117319762>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

JOULIN, Annabelle; ZALEWSKI, Laurent; LASSUE, Stéphane. Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release. **Applied Energy**, Univ Lille Nord de France, F59000 Lille, France, v. 88, n. 7, p. 2454-2462, fev./2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911000547>. Acesso em: 2 out. 2020.

KONSTANTINIDIS, Christine Vasiliki. Integration of Thermal Energy Storage in Buildings. **Master degree thesis**. Texas, 2010. Disponível em:

<<https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/44399/KONSTANTINIDIS-THESIS-2010.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 out. 2020.

LEDUCQ, D.; NDOYE, F. T.; ALVAREZ, G. Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation. **International Journal of Refrigeration**, v. 52, p. 133-139, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070071400214X>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MANNEVILLE, Paul. Rayleigh-Bénard Convection: Thirty Years of Experimental, Theoretical, and Modeling Work. *In*: [s.l.: s.n.], 2006.

NIE, B. *et al.* Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Birmingham Centre for Energy Storage & School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, B15 2TT, UK, v. 134, n. 2020, p. 1-20, set./2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120306286>. Acesso em: 15 out. 2020.

NOMURA, Takahiro; OKINAKA, Noriyuki; AKIYAMA, Tomohiro. **Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review**. *ISIJ International*, v. 50, n. 9, p. 1229–1239, 2010. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/50/9/50_9_1229/_pdf>. Acesso em: 17 out. 2020.

OLIVEIRA, Daniel da Silva. **Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima Português**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2012. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/29583/1/Dissertação%20daniel%20oliveira%202012.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2020.

PIELICHOWSKA, Kinga; KRZYSZTOFPIELICHOWSKI. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in Materials Science**, AGH University of Science and Technology, Faculty of Materials Science and Ceramics, Department of Biomaterials, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland, v. 65, n. 2014, p. 67-123, abr./2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642514000358>. Acesso em: 28 set. 2020.

RAYMUNDO JR, João Fidelio. **ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE DE PCM EM ESFERAS COM FLUXO DE CALOR VARIÁVEL**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2017.

RUBITHERM. **Heat storage materials**. Disponível em: www.rubitherm.eu. Acesso em: 15 out. 2020.

SAS IP, Inc. ANSYS Fluent 16.1 Theory Guide, 2015.

SEDDEGH, Saeid; WANG, Xiaolin; HENDERSON, Alan D.. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials. **Applied Thermal Engineering**, School of Engineering & ICT, University of Tasmania, Hobart, TAS 7001, Australia, v. 93, n. 2016, p. 348-358, out./2015. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115010340>. Acesso em: 3 out. 2020.

SHARMA, Atul; TYAGI, V.v.. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University, 949, Da-Wan Road, Yung-Kung City, v. 13, n. 2, p. 318-345, 2009. Disponível em:
 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032107001402>>

SHMUELI, H.; ZISKIND, G.; LETAN, R. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 4082-4091, 2010. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793101000270X>. Acesso em 5 abr. 2021.

SONDAK, D. *et al.* High Rayleigh number variational multiscale large eddy simulations of Rayleigh-Bénard convection. **Mechanics Research Communications**, Institute for Applied Computational Science, Harvard University, Maxwell Dworkin, Suite G107, 33 Oxford Street, Cambridge, MA 02138, USA, v. 113, n. 103614, p. 1-9, jul./2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0093641320301427>. Acesso em: 21 mai. 2021.

TACQUES FILHO, Alexandre de Quadro. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE ASPECTO E DO POSICIONAMENTO DE ALETA EM CAVIDADE RETANGULAR CONTENDO PCM EM PROCESSO DE FUSÃO**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2019.

TRAN, Ngoctan; WANG, Chi-chuan. Effects of tube shapes on the performance of recuperative and regenerative heat exchangers. **Energy**, Department of Mechanical Engineering, National ChiaoTung University, 1001 University Road, Hsinchu 300, Taiwan, v. 169, n. 2019, p. 1-17, dez./2018. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218323387?via%3Dihub>. Acesso em: 18 abr. 2021.

TYAGI, Vineet Veer; BUDDHI, D.. PCM thermal storage in buildings: A state of art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy & Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, Indore 452017, India, v. 11, n. 6, p. 1146-1166, nov./2005. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000973>. Acesso em: 15 out. 2020.

XU, H. *et al.* Optimization on the melting performance of triplex-layer PCMs in a horizontal finned shell and tube thermal energy storage unit. **Applied Thermal Engineering**, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, PR China, v. 176, n. 2020, p. 1-12, jul./2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119377099>. Acesso em: 16 mar. 2021.

ZHOU, D.; ZHAO, C.y.; TIAN, Y.. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, School of Engineering, University of Warwick, v. 92, n. 2012, p. 593-605, set./2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911005216?via%3Di> hub. Acesso em: 10 out. 2020.