

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

RAFAEL DA SILVEIRA BORAHEL

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE UM CONJUNTO DE ALETAS COM
DIFERENTES INCLINAÇÕES E POSIÇÕES EM UMA CAVIDADE RETANGULAR
PREENCHIDA POR PCM EM PROCESSO DE FUSÃO**

SÃO LEOPOLDO

2020

RAFAEL DA SILVEIRA BORAHEL

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE UM CONJUNTO DE ALETAS COM
DIFERENTES INCLINAÇÕES E POSIÇÕES EM UMA CAVIDADE RETANGULAR
PREENCHIDA POR PCM EM PROCESSO DE FUSÃO**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Orientadora: Profa. Dra. Rejane de César Oliveski

Banca Examinadora

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani (UNISINOS)

Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti (UNISINOS)

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (FURG)

São Leopoldo

2020

B726a Borahel, Rafael da Silveira.
Análise numérica da influência de um conjunto de aletas com diferentes inclinações e posições em uma cavidade retangular preenchida por PCM em processo de fusão / Rafael da Silveira Borahel. – 2020.
94 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.
“Orientadora: Profa. Dra. Rejane de César Oliveski.”

1. Armazenamento de energia térmica. 2. Acúmulo de calor latente. 3. Reservatório térmico aletado. 4. Materiais de mudança de fase (PCM). 5. Ácido láurico. I. Título.

CDU 621

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

AGRADECIMENTOS

Destino este trecho para agradecer às pessoas e instituições que de fato colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho. Deste modo, gostaria de agradecer:

- à Profa. Dra. Rejane de César Oliveski por todo companheirismo e dedicação na orientação deste trabalho, bem como ao longo de todos os anos que trabalhamos juntos;

- aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Simulação Numérica da UNISINOS, principalmente ao Ionatan Schroer, por todo o auxílio no controle das simulações numéricas e criação de malhas computacionais;

- à minha mãe (Aglair Jussara da Silveira Borahel) e noiva (Samanta dos Santos Alexandre) por todo companheirismo, apoio e paciência que comigo tiveram durante todo o curso de mestrado;

- à CAPES pela bolsa de estudos concedida, a qual me permitiu frequentar e concluir o curso;

- ao PPG em Engenharia Mecânica da UNISINOS por toda a infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Dedico a realização deste trabalho à minha família, principalmente ao meu pai (Ricardo Mendes Borahel) que partiu logo no início desta jornada. Aonde quer que o senhor esteja, tenho certeza que está muito orgulhoso de todo meu esforço e resiliência. TE AMO PAI!

RESUMO

Por intermédio da utilização do método dos volumes finitos, conduziu-se no presente trabalho o estudo numérico do processo de fusão de ácido láurico contido em uma cavidade retangular aletada. Na cavidade, duas aletas longitudinais de formato retangular encontram-se acopladas à superfície aquecida do sistema sob diferentes inclinações. Como objetivos, definiu-se: **(i)** determinar quais os metais mais indicados para serem utilizados no conjunto de aletas; **(ii)** investigar a possibilidade da modelagem computacional das aletas ser realizada de modo idealizado, onde o perímetro das aletas apresenta temperaturas idênticas a de sua base, **(iii)** analisar o processo de fusão para uma faixa amostral de diferentes inclinações (θ) utilizadas na instalação das aletas junto à superfície aquecida do sistema; **(iv)** identificar a existência ou não de uma inclinação mais adequada; **(v)** compreender os efeitos causados pelas diferentes inclinações sob a transferência de calor por convecção ocorrida no interior sistema; **(vi)** avaliar o efeito da posição vertical de instalação das aletas sob o processo de fusão por elas intensificado e **(vii)** determinar o espaçamento mais adequado a ser admitido entre as duas aletas modeladas. Para alcançar os objetivos propostos, simulações numéricas bidimensionais transientes, conduzidas no software comercial ANSYS Fluent 19.2, foram utilizadas para a solução do problema proposto. Neste software, malhas computacionais não estruturadas foram utilizadas para a discretização espacial do problema, enquanto diferentes intervalos de tempo foram testados para a discretização temporal. Como modelo implementado, utilizou-se as equações diferenciais da massa, energia e quantidade de movimento, acrescidas ainda de um modelo de fechamento (método da entalpia-porosidade) utilizado para tratar a fusão do ácido láurico. Resultados obtidos demonstraram que o modelo implementado é adequado para o estudo proposto. Quanto aos resultados referentes ao estudo de caso, os mesmos apontaram que alumínio e cobre são os materiais mais indicados para o conjunto de aletas, enquanto o aço mostrou-se prejudicial. Inclinações utilizadas na instalação das aletas influenciaram o processo de modo distinto, ficando provado que para os estágios mais iniciais e intermediários $\theta = 90^\circ$ acelerou consideravelmente a fusão, enquanto valores de θ superiores saíram-se melhor nos estágios mais avançados. Basicamente, não se tem um valor mais adequado de θ , mas sim uma faixa de valores possíveis, os quais variam entre 90 e 115° . Em termos de desempenho, quanto mais inferior a posição de instalação das aletas, mais rapidamente se dá a fusão.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia Térmica. Acúmulo de Calor Latente.

Reservatório Térmico Aletado. Materiais de Mudança de Fase (PCM). Ácido Láurico.

ABSTRACT

Through the use of the finite volume method, the numerical study of the melting process of lauric acid contained in a finned rectangular cavity was conducted in this work. In the cavity, two longitudinal fins of rectangular shape are attached to the heated surface of the system under different inclinations. The aims of this study was **(i)** determine which metals are most suitable to be used in the fins; **(ii)** investigate the possibility of computational modeling of the fins to be performed in an idealized way, where the perimeter of the fins has identical temperatures to that of their base; **(iii)** analyze the melting process for a range of different inclinations (θ) used in the installation of the fins to the heated surface of the system; **(iv)** identify the existence or not of a more adequate inclination; **(v)** understand the effects caused by the different inclinations under the convection heat transfer that occurs inside the system; **(vi)** evaluate the effect of the vertical position of installation of the fins under the melting process intensified by them and **(vii)** determine the most suitable spacing to be allowed between the fins. To achieve the proposed objectives, two-dimensional transient numerical simulations, conducted in the commercial software ANSYS Fluent 19.2, were used to solve the proposed problem. In this software, unstructured computational meshes were used for the spatial discretization of the problem, while different time intervals were tested for temporal discretization. The mathematical model was composed by the differential equations of continuity, energy and momentum, plus the enthalpy-porosity method used to treat the lauric acid melting. The results obtained demonstrated that the implemented model is adequate for the proposed study and aluminum and copper are the most suitable materials for the fins, while steel was shown to be harmful to the heat transfer. The inclinations used in the installation of the fins influenced the process in different ways, proving that for the most initial and intermediate stages $\theta = 90^\circ$ it considerably accelerated the melting, while higher θ values did better in the more advanced stages. Basically, there is no more suitable value for θ , but a range of possible values, which vary between 90 and 115° . In terms of performance, the lower the installation position of the fins, the faster the melting occurs.

Keywords: Thermal Energy Storage. Latent Heat Accumulation. Finned Thermal Reservoir. Phase Change Materials (PCM). Lauric Acid.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Sistemas de LHTES de Benlekham et al. (2018) e Sciacovelli et al. (2015)	19
Fig. 2.1	Técnicas tradicionalmente utilizadas no armazenamento de energia térmica	23
Fig. 2.2	Variação de temperatura ao longo do tempo para um material genérico	24
Fig. 3.1	Sistema de classificação dos PCM existentes	25
Fig. 3.2	Representação de um sistema de climatização por convecção natural	27
Fig. 3.3	Conjunto de aletas em um sistema de LHTES de tubos concêntricos	34
Fig. 4.1	Representação esquemática da cavidade retangular estudada	42
Fig. 4.2	Malhas testadas para a discretização espacial do domínio computacional	50
Fig. 4.3	Posição espacial transiente da interface sólido-líquido do ácido láurico	51
Fig. 4.4	Valores transientes de γ para as cavidades numérica e experimental	52
Fig. 5.1	Valores transientes de γ para cavidades com aletas de diferentes materiais	54
Fig. 5.2	Campos de temperaturas dos casos com aletas de aço, alumínio e cobre	55
Fig. 5.3	Valores transientes de γ para cavidades modeladas com aletas reais e ideais	56
Fig. 5.4	Valores transientes de γ para os casos com aletas inclinadas em 30° , 60° , 90° , 120° e 150° .	57
Fig. 5.5	Campos de temperaturas para os instantes de (I) 10, (II) 30 e (III) 50 min onde: (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 60^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$, (d) $\theta = 120^\circ$ e (e) $\theta = 150^\circ$.	58
Fig. 5.6	Nusselt médio em função de Fourier para cavidades com aletas inclinadas sob diferentes valores de θ	59
Fig. 5.7	Valores de $t_{(\gamma=1)}$ para os casos com aletas ideais inclinadas no intervalo de $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$	60
Fig. 5.8	Valores transientes de γ para os casos com aletas vazadas apenas em $hole_1$, onde: (a) $\theta = 90^\circ$, (b) $\theta = 120^\circ$ e (c) $\theta = 150^\circ$.	61
Fig. 5.9	Valores de Nusselt médio por Fourier para os casos de $\theta = 150^\circ$ com aletas vazadas apenas em $hole_1$	62
Fig. 5.10	Campos de temperaturas em $t = 45$ min para casos de $\theta = 150^\circ$ com aletas vazadas apenas em $hole_1$, onde: (a) $L_{o1} = 0.0$, (b) 1.5, (c) 2.5, (d) 3.5 e (e) 4.5 mm	63
Fig. 5.11	Valores transientes de γ para os casos com aletas vazadas tanto em $hole_1$ quanto em $hole_2$	65

- Fig. 5.12 Valores transientes de γ para os casos de $\theta = 90^\circ$ com aletas instaladas a diferentes alturas 66
- Fig. 5.13 Nusselt por Fourier ara os casos de $\theta = 90^\circ$ com aletas instaladas a diferentes alturas 67
- Fig. 5.14 Valores transientes de γ para os casos de $\theta = 90^\circ$ com diferentes espaçamentos entre aletas 68

LISTA DE TABELAS

Tab. 4.1	Configuração geométrica dos casos simulados com aletas não-vazadas reais e ideais de diferentes materiais	43
Tab. 4.2	Configuração geométrica dos casos simulados com aletas não-vazadas ideais sob diferentes valores de θ	43
Tab. 4.3	Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais não-vazadas e vazadas para $\theta = 90, 120$ e 150°	44
Tab. 4.4	Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais instaladas sob diferentes valores de H_1	44
Tab. 4.5	Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais espaçadas sob diferentes valores de H_2	44
Tab. 4.6	Propriedades termofísicas do aço, alumínio e cobre	45
Tab. 4.7	Valores adotados para $C_p, Q_{lat}, \beta, \rho, T_l$ e T_s do ácido láurico	45
Tab. 4.8	Valores adotados para a condutividade térmica do ácido láurico	45
Tab. 4.9	Valores adotados para a viscosidade dinâmica do ácido láurico	45

LISTA DE SIGLAS

CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
GCI	Índice de Convergência de Malha (<i>Grid Convergence Index</i>)
LHTES	Armazenamento de Calor Latente (<i>Latent Heat Thermal Energy Storage</i>)
FVM	Método dos Volumes Finitos (<i>Finite Volume Method</i>)
PCM	Materiais de Mudança de Fase (<i>Phase Change Materials</i>)
SHTES	Armazenamento de Calor Sensível (<i>Sensible Heat Thermal Energy Storage</i>)
TES	Armazenamento de Energia Térmica (<i>Thermal Energy Storage</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área da Cavidade	$[m^2]$
C	Constante da <i>Mushy Zone</i>	$[kg\ m^{-3}\ s^{-1}]$
C_p	Calor Específico	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
e	Espessura	$[m]$
fin_1	Aleta Inferior do Sistema	$[-]$
fin_2	Aleta Superior do Sistema	$[-]$
Fo	Número de Fourier	$[-]$
\vec{g}	Aceleração da Gravidade	$[m\ s^{-2}]$
\bar{h}	Coefficiente Médio de Transferência de Calor por Convecção	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
$hole_1$	Orifício 1 da Aleta	$[-]$
$hole_2$	Orifício 2 da Aleta	$[-]$
H	Altura da Cavidade	$[m]$
H_1	Posição de Instalação de fin_1	$[m]$
H_2	Espaçamento entre Aletas	$[m]$
k	Condutividade Térmica	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
L	Comprimento	$[m]$
L_c	Comprimento Característico	$[m]$
L_{o1}	Comprimento de $hole_1$	$[m]$
L_{o2}	Comprimento de $hole_2$	$[m]$
\bar{Nu}	Número de Nusselt Médio	$[-]$
p	Pressão	$[Pa]$
q''	Fluxo de Calor	$[W\ m^{-2}]$
Q_{lat}	Calor Latente de Fusão	$[J\ kg^{-1}]$
\vec{S}	Termo Fonte da Equação Conservativa da Quantidade de Movimento	$[kg\ m^{-2}\ s^{-2}]$
t	Tempo	$[s]$
T	Temperatura	$[K]$
\vec{V}	Vetor Velocidade	$[m\ s^{-1}]$
W	Largura	$[m]$

Símbolos Gregos

α	Difusividade Térmica	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
β	Coefficiente de Expansão Térmica	$[\text{K}^{-1}]$
γ	Fração de Líquido	$[-]$
θ	Inclinação de Instalação das Aletas	$[\text{°}]$
λ	Entalpia Específica Total	$[\text{J kg}^{-1}]$
u	Viscosidade Dinâmica	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$
ρ	Massa Específica	$[\text{kg m}^{-3}]$
ω	Constante de Valor Fixo	$[-]$

Subscritos

fin	Aleta
i	Inicial
l	Líquido
lat	Latente
ref	Referência
s	Sólido
se	Sensível
$wall$	Parede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.2 Objetivos do Trabalho.....	19
1.2.1 Objetivos Específicos	20
1.3 Justificativas.....	20
1.4 Estrutura do Trabalho	21
2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	22
2.1 Armazenamento de Energia Térmica.....	22
2.1.2 Energia Proveniente de Processos Térmicos	23
2.1.2.1 <i>Sistemas de Armazenamento de Calor Latente</i>	24
3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM).....	26
3.1 Classificação dos PCM	26
3.2 Aplicações Práticas para os PCM	27
3.2.1 Área Médica	28
3.2.2 Construção Civil.....	28
3.2.3 Eletrônica e Informática	30
3.2.4 Setor de Transportes	31
3.3 Técnicas para Contornar a Difusão Térmica Deficiente dos PCMs Orgânicos	32
3.3.1 Adição de Materiais Altamente Condutivos ao PCM	32
3.3.2 Incorporação de Aletas aos Sistemas de Armazenamento	33
3.4 Cavidades Retangulares Aletadas	35
3.4.1 Efeito da Orientação Espacial da Cavidade sob a Eficiência do Sistema	36
3.4.2 Efeito do Material Adotado para as Aletas sob a Eficiência do Sistema	37
3.4.3 Efeito da Razão de Aspecto das Aletas sob a Eficiência do Sistema	38
3.4.4 Efeito da Inclinação das Aletas sob a Eficiência do Sistema	38
3.5 Abordagem Numérica de Problemas Envolvendo PCM.....	39
3.5.1 Estudos Desenvolvidos pelo Grupo.....	40
4 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO.....	42
4.1 Modelo Matemático e Numérico	46
4.1.1 Condições Iniciais e de Contorno.....	47
4.2 Abordagem Numérica	48
4.2.1 Avaliação das Malhas Computacionais.....	49
4.2.2 Validação Numérica do Modelo Implementado.....	50

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1 Material das Aletas	53
5.2 Aletas Reais x Aletas Ideais	55
5.3 Inclinação de Instalação	56
5.4 Aletas Vazadas	60
5.5 Posição de Instalação e Espaçamento entre Aletas.....	65
6 CONCLUSÕES.....	69
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICE – ARTIGO SUBMETIDO AO MERCOFRIO 2020	81

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas apropriados ao armazenamento de energia é tão importante quanto a concepção de novas fontes energéticas. (SHARMA *et al.*, 2009). Dentre os sistemas utilizados para esta finalidade, os reservatórios térmicos merecem destaque. Tais sistemas, não apenas reduzem a lacuna existente entre a oferta e a demanda de energia, eles também atuam melhorando o desempenho e a eficiência dos sistemas térmicos e energéticos. (GARG *et al.*, 1985 e SHARMA *et al.*, 2009). Construção civil, medicina, indústria têxtil e eletrônica são alguns dos setores beneficiados pelo uso dos sistemas de armazenamento térmico, os quais podem operar tanto com o uso de calor sensível quanto através de calor latente. (AGYENIM *et al.*, 2010). Do ponto de vista prático, sistemas baseados no uso de calor latente são os mais indicados na maioria das aplicações, uma vez que os mesmos possuem a capacidade de armazenar quantidades consideráveis de energia sob condições de operação praticamente isotérmicas. Tal característica, ocorre basicamente pela utilização dos materiais de mudança de fase (PCM) que armazenam calor latente ao longo de seus processos de fusão/solidificação. Todavia, a baixa condutividade térmica destes materiais, principalmente dos PCM orgânicos, acaba por restringir o uso dos sistemas de armazenamento térmico em determinadas aplicações, como naquelas em que os processos de carga/descarga necessitam ser realizados em um curto intervalo de tempo. (SHARMA *et al.*, 2009 e KHAN *et al.*, 2016).

Diferentemente das aplicações onde PCM são utilizados para fins de isolamento, quando é desejável que a transferência de calor seja a menor possível, aplicações como o controle de temperatura de dispositivos eletrônicos exigem que altas taxas de calor sejam rapidamente absorvidas. Para tornar isto possível, mesmo para aqueles materiais cuja condutividade térmica é baixíssima (PCM orgânicos), algumas técnicas podem ser utilizadas para contornar a difusão de calor deficientes destes materiais, como: impregnação dos PCM em matrizes metálicas porosas (espumas metálicas), adição de compostos altamente condutivos (metais particulados) ao PCM ainda líquido ou a incorporação de superfícies extendidas (aletas) aos reservatórios térmicos. (LAMBERG e SIRÉN, 2003 e SHATIKIAN *et al.*, 2005). Através destas técnicas, incrementos substanciais para as taxas de transferência de calor podem ser alcançados, porém, por motivos distintos. Basicamente, incrementos relacionados às espumas metálicas e aos PCM modificados (misturas de PCM com metais particulados) se dão pelo aumento da condutividade térmica efetiva do meio, enquanto os relacionados às aletas ocorrem devido à ampliação da área de troca térmica do sistema. (SHARMA *et al.*, 2009).

Para Esapour *et al.* (2018), espumas metálicas impregnadas por PCM são muito mais eficientes em sistemas tubulares de armazenamento de calor latente (LHTES) que o PCM puro. Conforme os autores, reduções percentuais de até 55% podem ser alcançadas para o tempo total de carga dos sistemas quando PCM são congregados às espumas metálicas. Partilhando desta mesma opinião, Wang *et al.* (2015) afirmam ser possível conduzir de forma muito mais satisfatória o controle de temperatura de uma bateria de lítio quando PCM é impregnado à matrizes metálicas porosas, já que a condutividade térmica deste compósito (espuma-PCM) é aproximadamente 218 vezes superior à do PCM puro. Aumentos relevantes, porém não tão expressivos, também são observados para a condutividade térmica de diferentes PCM ao misturar neles materiais de elevada condutividade. Sari e Karaipeki (2007), Xia *et al.* (2010) e Oya *et al.* (2013) evidenciam isto ao aumentar a condutividade de diversos PCM orgânicos ao adicionar, nos mesmos, grafite. Variando a concentração deste material e testando-o em duas diferentes formas (expandida e particulada), os autores incrementaram entre 3 e 10 vezes a condutividade térmica do PCM.

Apesar das técnicas citadas (matrizes metálicas porosas e aditivos de condutividade) serem de fato eficientes, o uso de aletas metálicas ainda é a técnica mais utilizada na prática, uma vez que sua incorporação junto aos sistemas de LHTES ocorre de maneira extremamente simples e muito pouco onerosa. (KANDASAMY *et al.*, 2008 e ALSHAER *et al.*, 2015). Seja nos formatos tradicionais (retangular, triangular e circular); respectivamente estudados por Kamkari e Shokouhmand (2014), Liu *et al.* (2019) e Ali *et al.* (2017); quanto nos inovadores (favo de mel, raiz de árvore, letras V e Y); analisados nos estudos de Mahmoud *et al.* (2013), Pizzolato *et al.* (2017), Sciacovelli *et al.* (2015) e Sheikholeslami *et al.* (2019); aletas de diferentes tamanhos e parâmetros geométricos já tiveram seu desempenho testado na literatura para os mais diversos sistemas de LHTES. Conforme Biwole *et al.* (2018), reduções percentuais na ordem dos 32% podem ser obtidas para o tempo total de carga de um sistema retangular de LHTES pela utilização de aletas longitudinais retangulares. Reduções ainda maiores são relatadas por Kamkari e Shokouhmand (2014) e Tian *et al.* (2020), as quais variaram entre 37 e 41% para o mesmo tipo de sistema e aleta. Sciacovelli *et al.* (2015) e Pizzolato *et al.* (2017) também evidenciam os benefícios da utilização de aletas em reservatórios térmicos de calor latente, porém para os de geometria de tubos concêntricos. Utilizando aletas no formato da letra Y, Sciacovelli *et al.* (2015) tornaram o processo de carga do sistema estudado 24% mais eficiente, valor inferior aos 37% alcançados por Pizzolato *et al.* (2017), este utilizando aletas no formato de raiz de árvore. Além do formato, parâmetros geométricos utilizados na

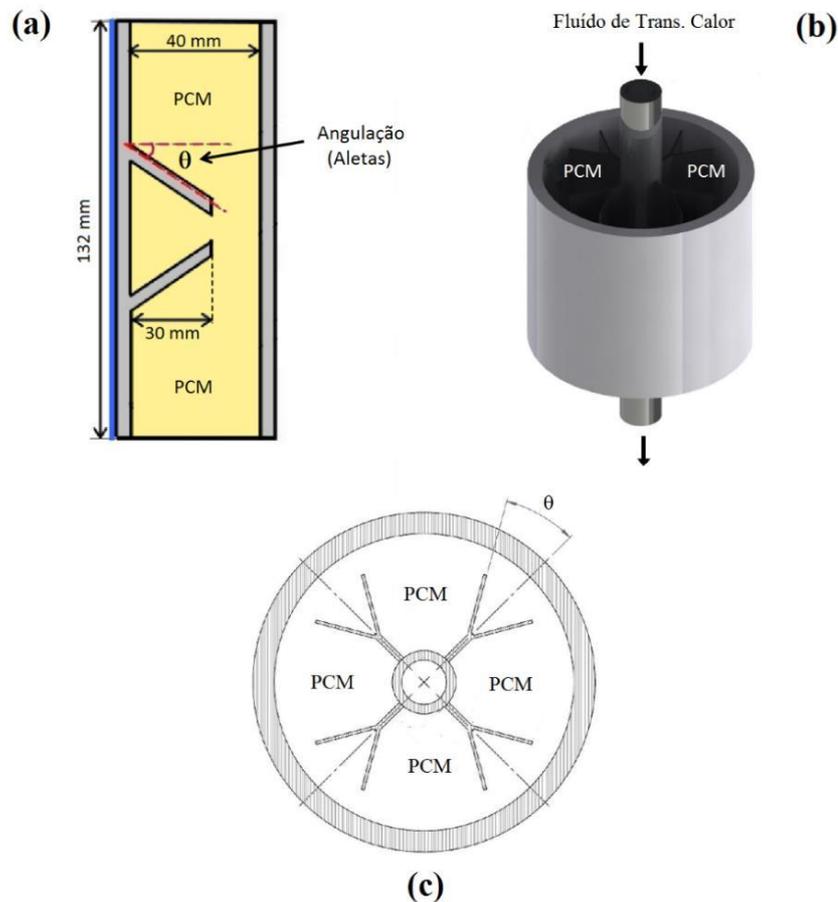
construção e instalação das aletas também devem ser considerados para o projeto dos sistemas de LHTES.

Para aletas longitudinais retangulares, modelo mais utilizado na prática, parâmetros como razão de aspecto e inclinação de instalação desempenham um papel fundamental sobre a transferência de calor por elas intensificada, de modo que diversos são os estudos que analisam tais parâmetros, principalmente o primeiro. Segundo Wang *et al.* (2016) e Biwole *et al.* (2018), aletas de reduzida razão de aspecto são mais eficientes para a maioria dos sistemas. Nesta configuração (longa e delgada), mais facilmente o calor é transferido para as regiões mais centrais dos sistemas, acelerando assim o processo de troca dos materiais de mudança de fase. Todavia, aletas demasiadamente longas podem vir a subdividir os reservatórios térmicos em pequenas partições individuais, onde o PCM fundido permanece confinado sem conseguir escoar, o que invariavelmente acaba por prejudicar o seu processo de convecção natural. (JMAL e BACCAR, 2018). Também estudando a importância da razão de aspecto das aletas para os sistemas de LHTES, porém dando um enfoque maior à inclinação a que estas estruturas são instaladas, Ji *et al.* (2018) comentam que inclinações não usuais (diferentes de 90°) podem aumentar a troca térmica em sistemas retangulares de armazenamento. Compartilhando da mesma opinião, Benlekkam *et al.* (2018) afirmam que aletas levemente inclinadas são mais eficazes para o controle de temperatura de células fotovoltaicas arrefecidas pelo uso de PCM.

No entanto, apesar dos relatos positivos de Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018) quanto ao potencial de uso de aletas inclinadas em sistemas retangulares de LHTES, apenas uma faixa amostral restrita de inclinações foi analisada pelos pesquisadores em seus estudos. Somado a isto, outros trabalhos que analisam a importância deste parâmetro sob o processo de fusão de PCM contido em sistemas retangulares de LHTES não são existentes na literatura, configurando assim a existência de uma lacuna de conhecimento ainda não explorada. Na verdade, outros estudos até existem, vide os trabalhos de Sciacovelli *et al.* (2015) e Sheikholeslami *et al.* (2019), porém os mesmos diferem-se pelo formato do sistema estudado e pela abordagem realizada. Sciacovelli *et al.* (2015) e Sheikholeslami *et al.* (2019) analisaram as angulações responsáveis por conferir o formato (letras V e Y) das aletas por eles utilizadas, enquanto Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018) avaliaram as inclinações relacionadas ao modo que as aletas são instaladas no sistema. Ou seja, enquanto as angulações analisadas por Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018) são parâmetros de configuração dos sistemas, aquelas estudadas por Sciacovelli *et al.* (2015) e Sheikholeslami *et al.* (2019) são parâmetros geométricos das aletas. Tal diferença pode ser observada na Figura 1.1 (a-c), onde estão apresentados os sistemas estudados por Benlekkam *et al.* (2018) e Sciacovelli *et al.* (2015).

Nesta imagem, Fig. 1.1 (a) mostra a cavidade estudada por Benlekkam *et al.* (2018), Fig. 1.1 (b) apresenta um esboço de como as aletas analisadas por Sciacovelli *et al.* (2015) encontravam-se instaladas no sistema tubular de armazenamento analisado e Fig. 1.1 (c) apresenta a vista superior da Fig. 1.1 (b). Deste modo, tendo ciência destas diferenças entre os trabalhos citados, as quais comprovam que o conhecimento relacionado ao uso de aletas inclinadas em sistemas retangulares de LHTES está restrito aos estudos de Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018), identificou-se aqui um objeto de estudo ainda pouco explorado, o que justifica a escolha deste tema para o presente trabalho.

Figura 1.1 – Sistemas de LHTES de (a) Benlekkam *et al.* (2018) e (b-c) Sciacovelli *et al.* (2015)



Fonte: Adaptado de Sciacovelli *et al.* (2015) e Benlekkam *et al.* (2018).

1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar como aletas inclinadas podem influenciar o processo de fusão que ocorre em um reservatório térmico retangular, verticalmente orientado, que se encontra completamente preenchido por PCM (ácido láurico) em estado sólido.

1.2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, têm-se **(i)** determinar quais são os metais mais indicados para serem utilizados no conjunto de aletas; **(ii)** investigar a possibilidade da modelagem computacional das aletas ser realizada de modo idealizado, onde o perímetro destas estruturas apresenta temperaturas idênticas a de sua base; **(iii)** analisar o processo de fusão para uma faixa amostral de diferentes inclinações (θ) utilizadas na instalação das aletas junto à superfície aquecida do sistema; **(iv)** identificar a existência ou não de uma inclinação mais adequada, a qual deve ser capaz de reduzir o tempo necessário para a completa fusão do PCM utilizado; **(v)** compreender os efeitos causados pelas diferentes inclinações sob a transferência de calor por convecção ocorrida no interior do sistema, inclusive sugerindo algumas soluções inovadoras (aletas vazadas) para evitar que o movimento ascendente do PCM líquido seja prejudicado pela estrutura das aletas; **(vi)** avaliar o efeito da posição vertical de instalação das aletas sob o processo de fusão por elas intensificado e **(vii)** determinar o espaçamento mais adequado a ser admitido entre as duas aletas modeladas.

1.3 Justificativas

Simulações numéricas transientes de problemas complexos, invariavelmente resultam em elevados tempos de simulação. Uma das formas mais tradicionais para se reduzir a demanda computacional de um problema qualquer é através da adoção de simplificações. Deste modo, objetivos específicos (i) e (ii) tornam-se essenciais, respectivamente, para a identificação do metal mais adequado para ser utilizado nas aletas e para investigar a possibilidade destas estruturas (aletas) serem modeladas de forma simplificada, admitindo a elas um comportamento idealizado (temperatura do perímetro idêntica àquela registrada na base). Em razão dos estudos conduzidos por Benlekkam et al. (2018) e Ji et al. (2018) serem os únicos a analisarem os efeitos causados pela instalação de aletas com inclinações distintas daquelas tradicionalmente utilizadas (90°), os objetivos específicos (iii) e (iv) são fundamentais para a ampliação do conhecimento que se tem acerca deste parâmetro. Para todas as inclinações que possam ser utilizadas, algumas possivelmente prejudicarão a transferência de calor por convecção no interior da cavidade, uma vez que as aletas podem vir a exercer o papel de obstáculos que dificultarão o movimento do PCM fundido, o que torna o objetivo específico (v) essencial para evitar que problemas como este reduzam a troca térmica convectiva no interior do sistema. Além da inclinação, parâmetros como a posição vertical de instalação do conjunto de aletas e o

distanciamento admitido entre elas também possuem a capacidade de influenciar o processo de fusão do PCM, sendo os objetivos específicos (vi) e (vii) destinados à compreensão da importância destes parâmetros.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos, havendo ainda um apêndice ao seu final. Capítulo 1 traz a introdução, objetivos e justificativas do trabalho; Capítulos 2 e 3 apresentam a revisão bibliográfica, onde discute-se, respectivamente, todos os aspectos dos sistemas de armazenamento de energia e dos materiais de mudança de fase; Capítulo 4 apresenta o problema analisado, bem como todos os detalhes metodológicos que devem ser adotados caso deseje-se reproduzir qualquer um dos resultados apresentados; Capítulo 5 traz os resultados obtidos junto da discussão dos mesmos; Capítulo 6 expõe as conclusões da pesquisa; Capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos futuros envolvendo o mesmo tema e o Apêndice apresenta o artigo que foi submetido para apresentação e publicação no MERCOFRIO 2021 (evento científico da área).

2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

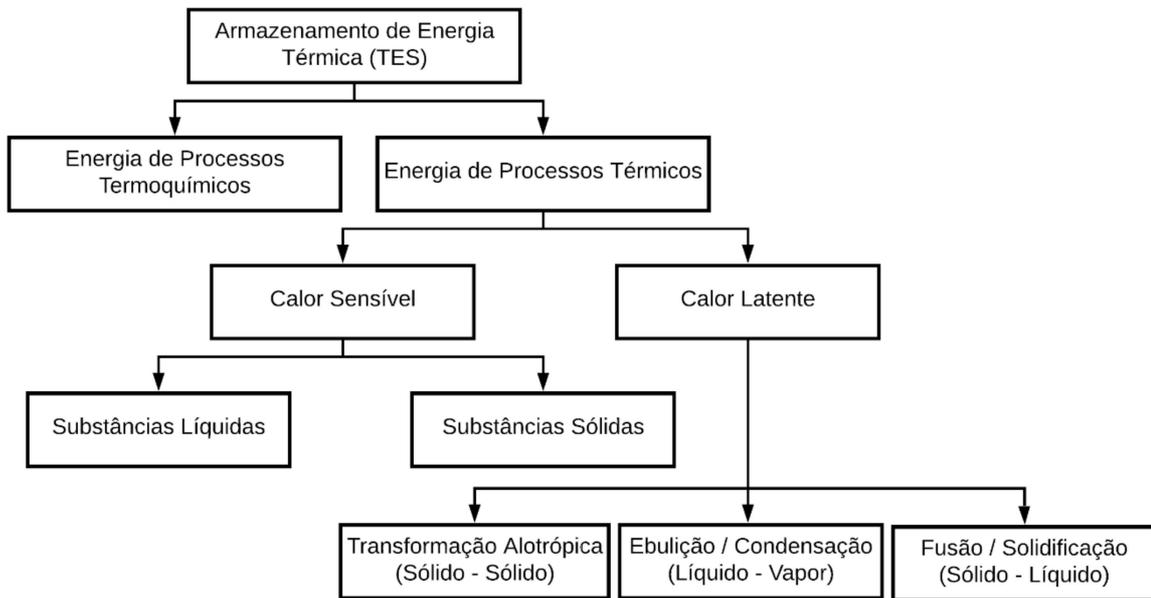
O desenvolvimento de sistemas destinados ao armazenamento de energia térmica é tão importante quanto a concepção de novas fontes energéticas. Estes sistemas, não apenas reduzem a lacuna existente entre a oferta e a demanda de energia nos horários de pico, mas também melhoram o desempenho e a confiabilidade dos sistemas energéticos. Basicamente, eles colaboram para a redução do desperdício de energia e a consequente diminuição do consumo de combustíveis, fatores estes que resultam em uma substancial economia de capital. Dentre os sistemas de armazenamento existentes, merece destaque aqueles destinados ao armazenamento de energia térmica, como discutido a seguir. (GARG *et al.*, 1985 e SHARMA *et al.*, 2009).

2.1 Armazenamento de Energia Térmica

Embora a prática do armazenamento de energia térmica (TES) ocorra desde os primórdios das civilizações, grande parte das técnicas e sistemas hoje existentes foram desenvolvidos e aprimorados nas últimas quatro ou cinco décadas. (REGIN *et al.*, 2008). Para Dincer (2002), o desenvolvimento de sistemas voltados ao TES é considerado um dos mais importantes avanços tecnológicos ocorridos recentemente na área energética. Por sua vez, Hasnain (1998) comenta que o armazenamento de energia térmica é importante para diversas aplicações de engenharia, sendo uma delas os problemas envolvendo coletores de energia solar. Além desta aplicação, tal tecnologia também pode ser utilizada em sistemas de ar condicionado, conforme comentado por Al-Abidi *et al.* (2012); materiais destinados à construção civil, como afirmado por Zhou *et al.* (2012), secagem/desidratação de produtos alimentícios e plantas, conforme explanado por Kant *et al.* (2016) e no controle da temperatura de dispositivos eletrônicos portáteis, como estudado por Kandasamy *et al.* (2007).

De modo geral, o armazenamento de energia térmica pode ser realizado ao se aquecer, resfriar, fundir, solidificar, vaporizar ou então reagir quimicamente uma determinada substância/material. (PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014). Portanto, três diferentes formas de calor (Figura. 2.1) podem ser utilizadas para se realizar o armazenamento de energia térmica: (i) calor sensível, (ii) calor latente e (iii) calor proveniente das reações químicas. (DINCER, 2002; SHARMA *et al.*, 2009 e PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014).

Figura 2.1 –Técnicas tradicionalmente utilizadas pelos sistemas de armazenamento de energia térmica.



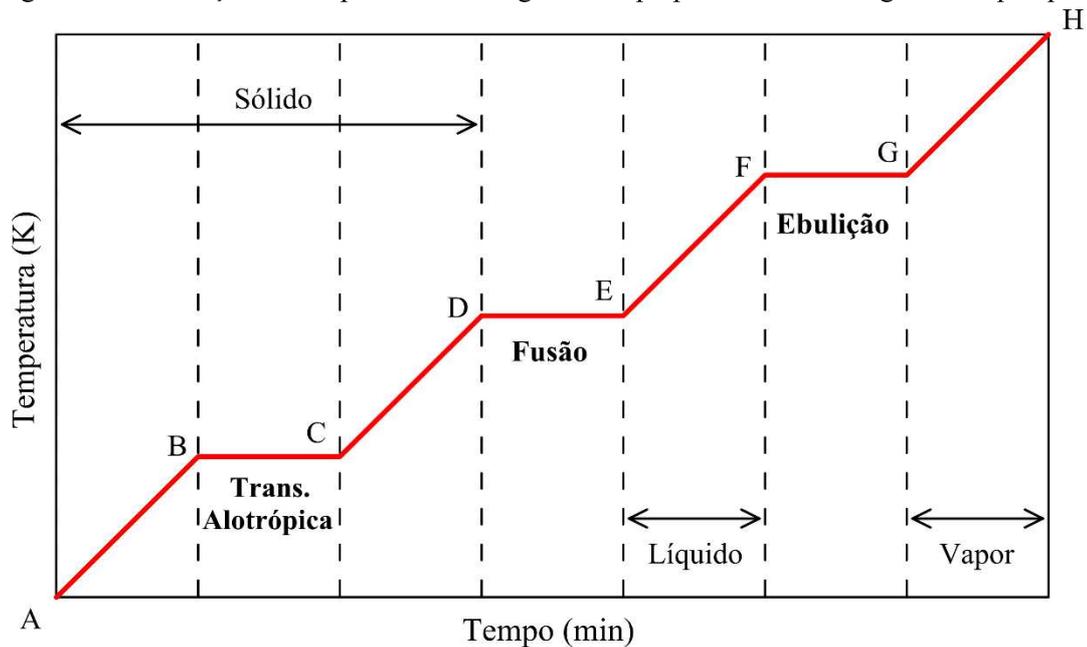
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2 Energia Proveniente de Processos Térmicos

Grande parte dos processos térmicos existentes, sejam eles naturais ou não, acabam por gerar consideráveis quantidades de calor residual, o qual tradicionalmente é dispensado por não se acreditar que seu uso é possível. Combatendo tal prática, os sistemas de TES baseados na utilização do calor proveniente de processos térmicos surgem como uma alternativa eficaz para conduzir o armazenamento da energia outrora descartada. De modo geral, tais sistemas podem operar de três modos: utilizando (i) calor sensível, (ii) calor latente ou (iii) a combinação deles. (HASNAIN, 1998; REGIN *et al.*, 2008; SHARMA *et al.*, 2009 e FAN e KHODADADI, 2011).

Conforme Hasnain (1998), o armazenamento térmico de energia por calor sensível (SHTES) se dá ao conduzir o aumento da temperatura de um material, este sendo diferente do armazenamento térmico de energia por calor latente (LHTES), que ocorre a temperaturas praticamente constantes. Ou seja, os sistemas de SHTES dependem da variação de temperatura dos materiais utilizados, enquanto os sistemas de LHTES dependem da mudança de fase dos mesmos. (REGIN *et al.*, 2008). A Figura 2.2 mostra a relação existente entre temperatura e tempo para diferentes formas de armazenamento de calor. Nesta figura, pode-se observar a elevação da temperatura nos processos A-B, C-D, E-F e G-H (armazenamento de calor sensível) e a mudança de fase do material a temperaturas constantes nos processos B-C, D-E, F-G (armazenamento de calor latente).

Figura 2.2 – Variação de temperatura ao longo do tempo para um material genérico qualquer.



Fonte: Adaptado de Regin *et al.* (2008).

2.1.2.1 Sistemas de Armazenamento de Calor Latente

Sistemas voltados ao armazenamento de energia térmica na forma de calor latente levam vantagem frente aos demais sistemas de armazenamento. Conforme Estrázulas (2015), tais sistemas possuem a capacidade de armazenar consideráveis quantidades de energia sob condições de operação praticamente isotérmicas, algo que não ocorre nos sistemas de SHTES. Além dos benefícios inerentes ao armazenamento de energia sob temperaturas praticamente constantes, sistemas de LHTES são capazes de armazenar a mesma quantidade de energia que os sistemas de calor sensível, porém ocupando volumes significante menores, apresentando assim uma melhor densidade de armazenamento. (AGYENIM *et al.*, 2010).

De modo geral, sistemas de LHTES podem utilizar processos de armazenamento envolvendo transformações alotrópicas (transição sólido-sólido) ou mudança de fase (transições sólido-líquido e líquido-vapor). Enquanto na transição sólido-sólido o calor é absorvido em razão das transformações cristalinas ocorridas na estrutura molecular do material, o calor absorvido nas transições sólido-líquido e líquido-vapor está relacionado aos processos de fusão e vaporização. (REGIN *et al.*, 2008 e SHARMA *et al.*, 2009). Embora três modos distintos possam ser teoricamente utilizados no armazenamento de calor latente, somente dois possuem potencial de uso em aplicações práticas, sendo estes: transição sólido-sólido e transição sólido-líquido (inclusive seu inverso). Tanto para Sharma e Sagara (2005), quanto

para Agyenim *et al.* (2010), sistemas que operam com materiais que armazenam energia através da transição líquido-vapor acabam tendo que lidar com grandes variações de volume, o que os torna muito complexos e onerosos para serem utilizados na prática.

Dentre os sistemas viáveis de uso, aqueles que armazenam o calor proveniente da transição sólido-líquido, bem como o seu inverso (transição líquido-sólido), costumam ser os mais utilizados na prática. Tais sistemas possuem a capacidade de operar em amplas faixas de temperatura, uma vez que sua operação depende apenas do PCM escolhido, o qual deve apresentar pontos de fusão/solidificação coincidentes com as temperaturas da aplicação pretendida ao sistema. (SHARMA *et al.*, 2009 e PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014).

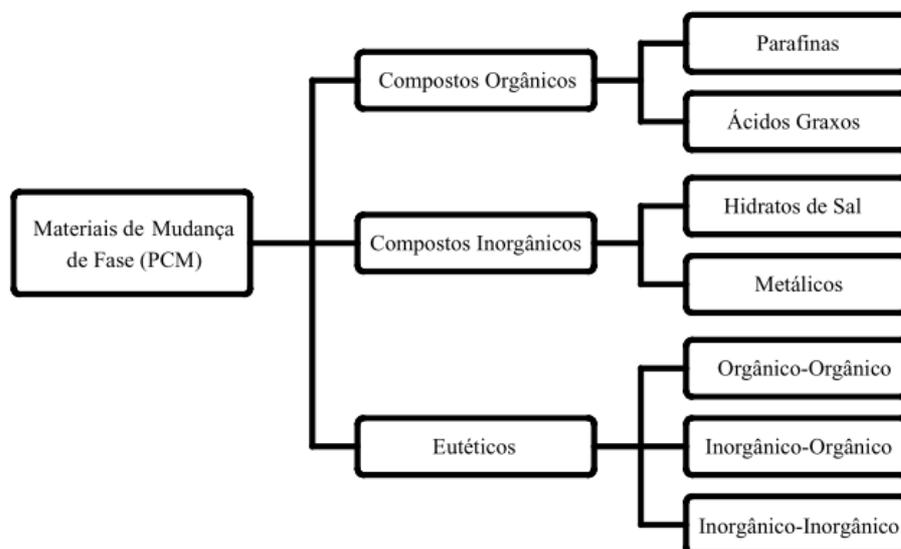
3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

Embora a utilização dos materiais de mudança de fase (PCM) em sistemas destinados ao LHTES aparente ser algo recente, uma vez que grande parte dos avanços realizados nesta área tenham ocorrido ao longo das quatro últimas décadas, relatos quanto ao potencial de uso destes materiais são encontrados na literatura desde o término da segunda guerra mundial. Na época, pesquisadores buscavam soluções alternativas para promover a substituição dos volumosos sistemas de calor sensível por sistemas mais compactos de armazenamento, os quais seriam utilizados no aquecimento de ambientes fechados, principalmente residências. Dentre todos os possíveis sistemas testados na época, aqueles que empregavam calor latente se mostraram os mais eficientes, fator este que disseminou a prática do armazenamento de energia por intermédio do uso de PCM. (KHUDHAIR e FARID, 2004). Passados quase 70 anos dos primeiros estudos na área, o uso de PCM em sistemas de armazenamento térmico não se limita mais apenas aos sistemas de aquecimento residencial. Estes materiais também são atualmente utilizados em outras aplicações que variam desde sua incorporação em tecidos destinados à produção de roupas, até seu uso em equipamentos da área médica e fogões/coletores solares. (TANG e STYLIONS, 2006 e SHARMA *et al.*, 2009). Tais aplicações, tão distintas uma da outra, somente são possíveis graças à numerosa quantidade de PCM hoje existentes, quantidade tão grande que utiliza-se inclusive um sistema de classificação para melhor definir os PCM existentes.

3.1 Classificação dos PCM

A escolha do PCM a ser utilizado para cada aplicação deve ser baseada em uma série de características do material, sendo a principal delas a sua temperatura de mudança de fase. (SHARMA *et al.*, 2009 e YUAN *et al.*, 2014). De modo geral, tomando como base suas características físico-químicas, os PCM podem ser classificados em três macro categorias: (i) orgânicos; (ii) inorgânicos e (iii) eutéticos, estas apresentadas na Figura 3.1 junto das subcategorias que as compõem. Enquanto materiais parafínicos e ácidos-graxos fazem parte dos PCM orgânicos, substâncias metálicas e os hidratos de sal compõem os PCM inorgânicos. Por último, porém não menos importantes, PCM eutéticos nada mais são que uma simples mistura envolvendo PCM das outras duas categorias, de modo que suas subcategorias se referem aos PCM utilizados na mistura, sendo orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico ou orgânico-inorgânico. (SHARMA *et al.*, 2009).

Figura 3.1 – Sistema de classificação utilizado para os PCMs hoje existentes.



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2012).

Segundo Mojifur *et al.* (2019), Akgün *et al.* (2007) e Khan *et al.* (2016), os PCM orgânicos – especialmente as parafinas – são os mais utilizados na prática. Tal material, apresenta algumas características que torna o seu uso tão mais frequente, como: (i) fundir/solidificar ao longo de uma ampla faixa de temperatura (-7 a 135°C); (ii) ser quimicamente inerte, estável e não corrosiva em temperaturas inferiores a 500°C e (iii) ser considerada segura, confiável, previsível e menos onerosa que os demais tipos de materiais. (SHARMA *et al.*, 2009 e KHAN *et al.*, 2016). Apesar de todas estas características, alguns fatores ainda limitam o uso das parafinas para o armazenamento de calor latente em determinadas aplicações, como nos sistemas que demandam ser carregados/descarregados em um curto intervalo de tempo. Em tais sistemas, fatores como a sua baixa condutividade térmica acaba por prejudicar a transferência de calor ali existente, algo que é prejudicial para a eficiência do sistema. (SHALABY *et al.*, 2014 e KHAN *et al.*, 2016). Contudo, ainda são diversos os sistemas que tal material pode ser utilizado na prática, como nas aplicações discutidas a seguir.

3.2 Aplicações Práticas para os PCM

Inicialmente os PCM foram utilizados apenas em sistemas destinados ao aquecimento residencial. Contudo, os mesmos ganharam relevância ao passar dos anos, principalmente após a década de 70. Impulsionados pelo crescente número de pesquisas realizadas na época para contornar a crise energética do petróleo, tais materiais começaram ali a também ser aplicados em sistemas destinados ao acúmulo de energia solar. Desde então, os mesmos vêm sendo

utilizados nas mais variadas áreas, como: área médica, construção civil, eletrônica/informática e no setor de transportes. (AGYENIM *et al.*, 2010 e ESTRÁZULAS, 2015).

3.2.1 Área Médica

Apesar de poucos, alguns relatos podem ser encontrados na literatura quanto à utilização de PCM em aplicações próprias da área médica. De modo geral, tais materiais tradicionalmente são utilizados no tratamento de lesões de baixa complexidade, as quais são tratadas pela remoção/adição de calor. (REGIN *et al.*, 2008 e WHIFFEN e RIFFAT, 2013). Contudo, convém salientar que enfermidades mais complexas também podem ser tratadas com o auxílio destes materiais, como casos severos de febre e hipotermia. Visando disponibilizar ao mercado um produto inovador para o tratamento de tais distúrbios, Buckley (1992) desenvolveu e patenteou um material flexível, preenchido por PCM, que julgou ser adequado para a produção de roupas e bandagens terapêuticas. Embora extremamente interessante e inovador para a época, nenhum novo relato quanto ao uso deste material em situações reais foi encontrado na literatura, o que possivelmente evidencia o seu fracasso. Casos como este, embora desmotivadores para pesquisadores da área, são de certo modo exceções, uma vez que o aprimoramento de processos/equipamentos sempre é bem visto pela medicina moderna. Como exemplo disto, pode-se mencionar os novos recipientes utilizados para o transporte de sangue e órgãos que adotam PCM de baixa temperatura como material ativo de isolamento térmico. (REGIN *et al.*, 2008 e ORÓ *et al.*, 2013). Segundo Mondieig (2003), recipientes de transporte que utilizam PCM são capazes de proteger termicamente, por um período de até 6 h, os materiais biológicos (sangue e órgãos) por eles transportados; tempo suficientemente alto para permitir o transporte destes materiais entre diferentes regiões ou cidades.

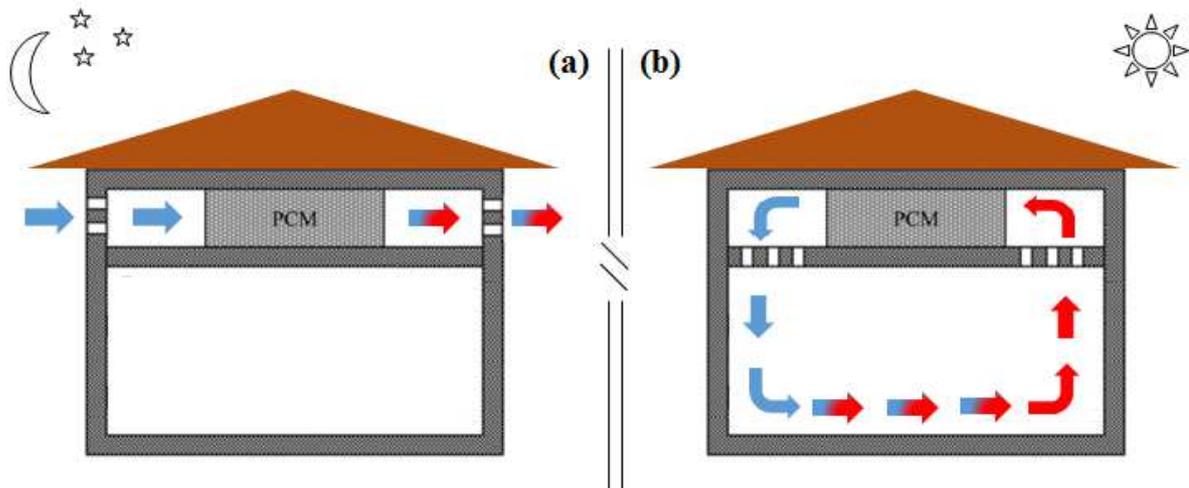
3.2.2 Construção Civil

Conforme Tyagi e Buddhi (2007), PCM costumeiramente são utilizados para aumentar a eficácia dos sistemas de aquecimento e resfriamento de edificações modernas, podendo ainda ser utilizados no isolamento térmico das edificações e no aquecimento de seu sistema de água. Castell *et al.* (2010), por exemplo, estudou experimentalmente a flutuação de temperatura no interior de três protótipos de edificações em tamanho real. Enquanto a primeira edificação construída e testada não possuía nenhuma camada de isolamento sob seus tijolos, as demais foram isoladas do ambiente externo com o uso de poliuretano e PCM macroencapsulado em painéis metálicos retangulares. Seus resultados demonstraram que as menores flutuações de

temperatura foram associadas aos protótipos no qual PCM (SP25 e RT27) foram utilizados como material de isolamento, isto sendo visualizado principalmente durante os períodos de forte irradiação solar. Já para o período noturno, Castell *et al.* (2010) observaram uma considerável redução no gasto energético necessário para manter o interior dos protótipos em uma temperatura considerada amena (24°C), isto quando utilizou o PCM como isolante. Observações semelhantes são apresentadas por Shilei *et al.* (2006), Kuznic *et al.* (2008), Silva *et al.* (2012), Lee *et al.* (2015) e Barreneche *et al.* (2016). Estes autores identificaram que a incorporação de finas camadas de PCM junto às paredes de uma edificação acaba por atenuar a transferência de calor existente entre o meio externo e o interior da construção; algo extremamente desejado, uma vez que estima-se que aproximadamente 20% a 40% de toda energia consumida em países desenvolvidos está relacionada ao uso de equipamentos residenciais de climatização. (OSTERMAN *et al.*, 2012 e SOARES *et al.*, 2013).

Além de mostrarem-se adequados para alavancar a inércia térmica de ambientes residenciais, os materiais de mudança de fase também podem atuar de forma ativa na climatização destes ambientes. Acoplando-os aos dutos de ar utilizados pelos tradicionais sistemas de ventilação, tais materiais possuem a capacidade de aquecer/refrigerar o ar por ali transportado. Deste modo, o sistema em questão deixa de ser um simples sistema de ventilação, tornando-se assim um sistema de climatização que opera sob os princípios da técnica conhecida como “*free cooling*”. (WAQAS e DIN, 2013). Tal técnica, aplicada na climatização de uma residência térrea é mostrada na Figura 3.2 (a-b). A Fig. 3.2 (a) apresenta o sistema operando durante o período noturno, enquanto a Fig. 3.2 (b) durante o período diurno. Como visto, o sistema de ventilação basicamente trabalha sob duas diferentes condições de operação. Para o período noturno, onde o ar externo apresenta temperaturas menores do que as registradas no interior da edificação, o sistema busca realizar a captação do “ar frio” para promover a solidificação do PCM acoplado aos dutos de ventilação. Já para o período diurno, onde temperaturas maiores são registradas ao lado externo da edificação, o sistema de ventilação é bloqueado e apenas o ar contido no interior da residência é que circula pelos dutos. Desta maneira, resfria-se o ambiente pela perda de energia sofrida pelo ar ao passar pelas secções do duto onde o PCM sólido se encontra acoplado, dando início assim a sua fusão. (BUTELA e STRITIH, 2009; WAQAS e DIN, 2013).

Figura 3.2 – Representação de um sistema de climatização residencial por convecção natural, onde: (a) operação noturna e (b) operação diurna.



Fonte: Adaptado de Veerakumar e Sreekumar (2016).

3.2.3 Eletrônica e Informática

Segundo Alshaer *et al.* (2015), a crescente compactação dos dispositivos eletrônicos portáteis, aliado às elevadas taxas de dissipação de calor de seus chips e processadores, acaba por ocasionar o superaquecimento dos mesmos, reduzindo assim a vida útil de tais dispositivos. Deste modo, visando garantir a durabilidade e segurança destes equipamentos, torna-se fundamental assegurar a correta dissipação de todo o calor por eles gerado, o que pode ser realizado inclusive com a utilização de materiais de mudança de fase no seu arrefecimento. (KANDASAMY *et al.*, 2008 e ALSHAER *et al.*, 2015).

Cientes do potencial de uso dos PCM para o controle de temperatura de dispositivos eletrônicos portáteis, Kandasamy *et al.* (2008) e Arshad *et al.* (2017) buscaram analisar a influência causada pela inserção destes materiais em dissipadores de calor metálicos. Empregando tanto técnicas experimentais quanto numéricas na realização de seus estudos, estes autores verificaram que a utilização destes materiais foi capaz de atenuar consideravelmente o aquecimento da base dos dissipadores testados. Enquanto uma redução de aproximadamente 12°C foi observada por Kandasamy *et al.* (2008), uma redução ainda maior (aprox. 15°C) foi alcançada no estudo conduzido por Arshad *et al.* (2017). Reduções de temperatura semelhantes, inclusive em questão de magnitude, também foram observadas por Setoh *et al.* (2010) e Mahmoud *et al.* (2013). Enquanto Setoh *et al.* (2010) empregaram n-eicosane para controlar o aquecimento de protótipos que representavam telefones celulares, Mahmoud *et al.* (2013) construíram diversos dissipadores de calor e os testaram com ou sem a utilização de PCM.

Ainda na área eletrônica, porém em sistemas um pouco mais robustos, Al Hallaj *et al.* (2005) e Khateeb *et al.* (2005) testaram a aplicabilidade dos PCM para o controle de temperatura de baterias de lítio. Tais baterias, atualmente utilizadas em veículos híbridos e/ou elétricos, tiveram suas temperaturas de operação reduzidas quando ambos os autores empregaram PCM no seu arrefecimento. Conforme Al Hallaj *et al.* (2005), o emprego dos materiais de mudança de fase possibilitou o funcionamento das baterias por um tempo 2,5 vezes superior aquele registrado quando os mesmos não foram utilizados, isto ocorrendo principalmente pelo melhor controle de temperatura realizado.

3.2.4 Setor de Transportes

Seja utilizando-os para o isolamento térmico do baú refrigerado de grandes caminhões frigoríficos, ou diretamente acoplados ao sistema mecânico de refrigeração destes veículos, PCM apresentam-se como uma alternativa economicamente viável para baratear o custo do transporte refrigerado da indústria alimentícia e farmacêutica, principalmente nos países desenvolvidos. Conforme Oró *et al.* (2014), estima-se que 80% das cidades norte-americanas são abastecidas apenas por caminhões e demais veículos terrestres, sendo que 9% desta frota é composta por caminhões refrigerados. Já a níveis globais, isto não é muito diferente. Até o término deste ano, estima-se que existirá mais de 1,2 bilhões de caminhões refrigerados transportando produtos perecíveis, sendo que o custo total para o transporte deverá superar a cifra dos 1,3 trilhões de dólares. (LIU *et al.*, 2012 e ESTRÁZULAS, 2015).

Visando atenuar os custos inerentes ao transporte refrigerado de produtos termo sensíveis, bem como reduzir a emissão de gases do efeito estufa associados aos sistemas mecânicos de refrigeração utilizados pelos veículos de transporte, Liu *et al.* (2012) desenvolveram um sistema veicular de refrigeração que opera com o uso de PCM de baixa temperatura. Testando a eficácia do sistema em manter um compartimento refrigerado em uma temperatura menor ou igual a -18°C , Liu *et al.* (2012) observaram ser possível assegurar esta temperatura por um período de até 10 h em um dia de verão extremamente quente na Austrália. Segundos os autores, os custos de operação deste sistema, são cerca de 87% mais baratos que um sistema tradicional de refrigeração mecânica, tornando-os assim economicamente viáveis.

Além de atuarem ativamente no resfriamento de containers e compartimentos refrigerados, os materiais de mudança de fase também podem ser acoplados às paredes de tais estruturas para assegurar seu isolamento térmico. (ORÓ *et al.*, 2014). Encapsulando PCM de baixa temperatura em estruturas tubulares, Ahmed *et al.* (2010) buscaram isolar termicamente um compartimento cúbico que representava o baú de transporte de um caminhão frigorífico

genérico, que deveria preservar a sua temperatura interna em um valor não superior à 4°C. Expondo tal compartimento à condições ambientais externas, os autores mensuraram o fluxo de calor existente em cada parede do compartimento, quantificando ainda possíveis reduções associadas ao isolamento fornecido pelos PCM. Conforme os autores, o sistema de isolamento testado foi capaz de reduzir em aproximadamente 29,1% o fluxo de calor médio total que adentrava no compartimento isolado, sendo que reduções ainda maiores foram observadas nas paredes leste (43,8%), superior (41,1%) e sul (34,8%); contudo a média geral acabou sendo prejudicada em razão do isolamento térmico não ter sido tão eficiente nas paredes norte (14,6%) e oeste (11,3%). Embora a condutividade térmica deficiente das parafinas seja benéfica para aplicações como esta, onde busca-se isolar térmicamente um compartimento, tal característica é prejudicial para aplicações em que deseja-se promover a rápida dissipação de elevadas taxas de calor (vide resfriamento de eletrônicos). Nestas ocasiões, algumas técnicas podem ser aplicadas para contornar o problema relacionado à baixa condutividade, como a adição de compostos condutivos ao PCM (carbono e metais particulados) ou a incorporação de aletas aos sistemas de armazenamento. (SHALABY *et al.*, 2014 e KHAN *et al.*, 2016).

3.3 Técnicas para Contornar a Difusão Térmica Deficiente dos PCMs Orgânicos

Propriedades físicas inerentes aos PCMs orgânicos acabam por limitar o uso destes materiais em determinados sistemas de armazenamento, como o fato de tais materiais serem inflamáveis e péssimos condutores de calor. (KHAN *et al.*, 2016). Enquanto a primeira característica pode ser contornada pela adição de retardantes de chama ao PCM, uma análise quanto à necessidade ou não de se incrementar a sua condutividade térmica deve ser realizada levando em conta a função a ser exercida pelo material no sistema em que ele será utilizado. Desde modo, caso planeja-se utilizar o PCM para fins de isolamento, nenhuma medida se faz necessária; contudo, caso o mesmo esteja sendo acoplado a um sistema no qual os processos de carga/descarga necessitem ser realizados rapidamente, obrigatoriamente a sua condutividade deverá ser corrigida. (SHARMA *et al.*, 2009; SHALABY *et al.*, 2014 e KHAN *et al.*, 2016).

3.3.1 Adição de Materiais Altamente Condutivos ao PCM

Seja na forma de fibras ou partículas, materiais como o grafite e alumínio são costumeiramente utilizados para incrementar a condutividade térmica dos PCM orgânicos. Para que isto ocorra, tais materiais são homogeneamente misturados ao PCM em laboratório, dando origem assim a compostos altamente difusivos que conservam todas as demais

propriedades do PCM originalmente puro. (ZALBA *et al.*, 2003 e SHALABY *et al.*, 2014). Embora a produção destes compostos pareça ser algo complexo, uma vez que a mesma se dá em laboratório, apenas técnicas laboratoriais simples são utilizadas para se conduzir a mistura. Deste modo, os compostos formados tornam-se uma alternativa adequada para substituir os PCMs orgânicos puros em determinadas aplicações. (LI, 2013).

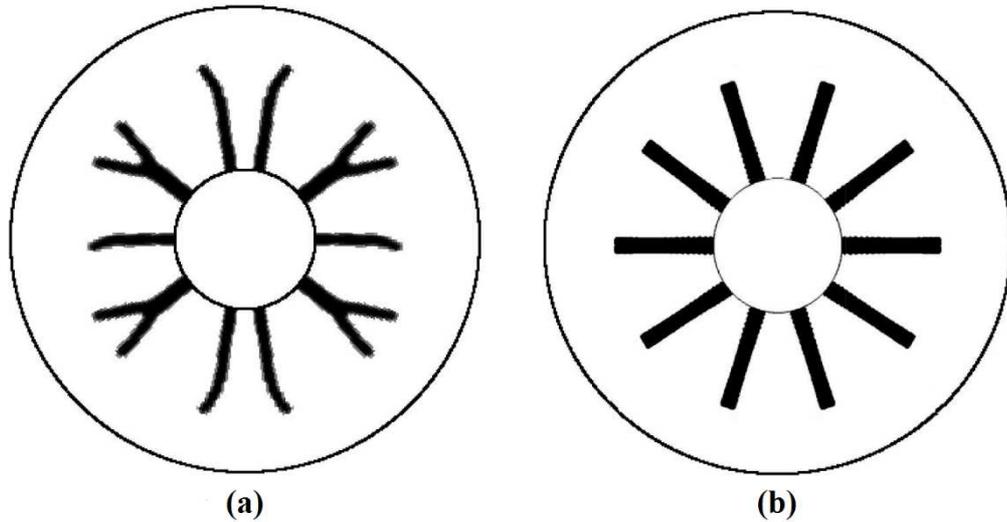
Utilizando técnicas laboratoriais tão simples quanto as mencionadas por Li (2013), Oya *et al.* (2013) buscaram promover o aumento da condutividade térmica de um PCM ao incorporar nele dois materiais: grafite (expandido ou particulado) e níquel (particulado). Resultados obtidos evidenciaram que aumentos graduais na condutividade térmica do PCM foram obtidos ao misturar nele os materiais mencionados em sua forma particulada. Já utilizando o grafite na forma expandida, Oya *et al.* (2013) relataram ter sido possível aumentar em aproximadamente 640% a condutividade térmica do eritritol (PCM) puro. Incrementos igualmente surpreendentes para diferentes parafinas também são relatados por Sari e Karaipekli (2007) e Xia *et al.* (2010). Enquanto Sari e Karaipeki (2007) obtiveram um aumento de aproximadamente 280% ao produzir um composto cuja concentração de grafite frente à parafina era igual a 10%; Xia *et al.* (2010) obtiveram um incremento superior a 1000% para uma mistura de mesma concentração. Concentrações similares, porém utilizando partículas metálicas como aditivos, também são capazes de promover aumentos na condutividade térmica de diferentes PCM, porém de um modo menos expressivo, conforme relatado por Babapoor e Karimi (2015) e Reyes *et al.* (2017). Utilizando óxido de ferro III particulado, Babapoor e Karimi (2015) observaram ser possível aumentar em 144% a condutividade térmica de diferentes parafinas quando a concentração do metal era de 10%; aumento levemente superior ao alcançado (103%) por Reyes *et al.* (2017) ao utilizar alumínio como aditivo em uma concentração de 8%.

3.3.2 Incorporação de Aletas aos Sistemas de Armazenamento

Segundo Eslamnezhad e Rahimi (2017), a instalação de aletas apresenta-se como a alternativa mais adequada para acelerar os processos de carga/descarga da maioria dos sistemas. Tais estruturas são simples, baratas e de fácil produção, além de serem extremamente eficientes caso bem dimensionadas. Geralmente produzidas em alumínio ou cobre, diferentes formatos são admitidos às aletas nos sistemas de armazenamento de calor latente. Deste modo, pode-se encontrar tais estruturas tanto nos formatos tradicionais (retangular, circular e triangular) como também nos inovadores, como: favo de mel (MAHMOUD *et al.*, 2013), raiz de árvore (PIZZOLATO *et al.*, 2017), letra V (SHEIKHOESLAMI *et al.*, 2019) e letra Y

(SCIACOVELLI *et al.*, 2015). Para aletas no formato de raiz de árvore, aplicadas a uma unidade de armazenamento térmico de tubos concêntricos, Pizzolato *et al.* (2017) provaram ser mais efetivo este formato de aleta que o longitudinal, os dois sendo respectivamente apresentados nas Figuras 3.3 (a) e 3.3 (b).

Figura 3.3 – Conjunto de aletas instalado em um sistema de LHTES de tubos concêntricos, onde: (a) aletas no formato de raiz de árvore e (b) aletas no formato longitudinal



Fonte: Pizzolato *et al.* (2017).

Ao adotar o formato inovador (raiz de árvore), Pizzolato *et al.* (2017) relatam terem atenuado o tempo de carga do sistema em até 37% se comparado à redução obtida pelas aletas de formato longitudinal. Já para o processo de descarga, onde o PCM é submetido ao processo inverso (solidificação), o percentual de melhora variou entre 11 e 15%. Para o mesmo tipo de sistema (tubos concêntricos), porém utilizando aletas com um formato distinto (letra Y), Sciacovelli *et al.* (2015) reduziram em aproximadamente 24% o tempo total de fusão do PCM contido na unidade de armazenamento por eles estudada. Conforme os autores, tal percentual de redução é variável, pois o mesmo depende da extensão do processo de troca e da angulação existente na bifurcação que dá o formato de Y às aletas. Observações semelhantes a estas também são realizadas por Sheikholeslami *et al.* (2019), que utilizaram aletas no formato da letra V. Segundo os autores, observou-se um incremento na troca térmica existente em um sistema de tubos concêntricos pelo uso deste formato de aleta; sendo que a angulação que dá este formato às aletas também apresentou capacidade de influenciar o processo de troca.

Em razão desta grande disponibilidade de formatos, o uso de superfícies aletadas se faz possível para sistemas de diferentes geometrias e aplicações, não se limitando apenas aos tubos

concêntricos já comentados. No grande universo dos sistemas, cavidades retangulares aletadas destoam frente às demais geometrias, principalmente para aplicações na área da microeletrônica e/ou informática. (KANDASAMY *et al.*, 2008 e ALSHAER *et al.*, 2015).

3.4 Cavidades Retangulares Aletadas

Conforme Kamkari e Shokouhmand (2014), cavidades retangulares aletadas são classificadas em dois grupos distintos, isto dependendo do tamanho de suas aletas. Para os casos em que as aletas são demasiadamente longas, de modo em que as mesmas acabam subdividindo a cavidade em pequenas partições igualmente espaçadas, classifica-se a cavidade como sendo uma cavidade particionada; já para o caso em que as aletas possuem um comprimento menor que não chega a subdividir a cavidade, classifica-se a mesma como sendo não particionada. Para ambas as configurações, diversos são os estudos que buscam identificar parâmetros geométricos e de processo que possam incrementar a transferência de calor destes sistemas.

Para problemas envolvendo cavidades particionadas, estudos como os conduzidos por Wang e Yang (2011) e Jmal e Baccar (2018) merecem destaque. Embora mais artigos abordando tais cavidades estejam disponíveis na literatura, raros são os que não se apoiam em hipóteses simplificativas que limitam as análises apenas a uma única partição, desconsiderando assim todas as demais. Evitando o uso destes procedimentos, Wang e Yang (2011) estudaram numericamente uma cavidade retangular aletada por inteiro, considerando em seu estudo todas as seis partições que a integravam. Utilizando n-icosano como material de mudança de fase, a cavidade em questão foi integralmente preenchida pelo PCM para posteriormente ser aquecida sob diferentes intensidades. Apesar de teoricamente o uso de aletas intensificar a transferência de calor existente no sistema, reduzindo assim o tempo necessário para que a fusão se dê por completa, tal comportamento não foi observado nos resultados de Wang e Yang (2011). Na ocasião, um incremento de aproximadamente 38 min foi observado no tempo de carga do sistema quando 6 aletas foram utilizadas, tempo 27% superior ao registrado para a cavidade sem aletas. Dificuldades em intensificar a troca térmica pela incorporação de variadas aletas, também foi relatado por Jmal e Baccar (2018), que estudaram numericamente o processo de solidificação do RT27 em cavidades horizontais aprimoradas por aletas verticalmente instaladas. Apesar das aletas acopladas à cavidade não terem prejudicado o processo de troca como ocorrido no estudo de Wang e Yang (2011), Jmal e Baccar (2018) relatam que reduções significativas no tempo de descarga do sistema não foram observadas, de modo que a incorporação das aletas não surtiu nenhum efeito significativamente positivo no sistema. Ainda segundo Jmal e Baccar (2018), a instalação de grandes quantidades de aletas deu origem

à diminutas partições, onde o processo de convecção natural não conseguiu se desenvolver, fazendo com que a transferência de calor fosse quase inteiramente realizada pelo mecanismo de condução, o que prejudicou a eficiência do sistema. Muito possivelmente, tal comportamento também foi o causador da perda de eficiência do sistema analisado por Wang e Yang (2011), uma vez que partições de tamanho reduzido também ali existiam.

Relatos mais favoráveis quanto ao uso de aletas em cavidades retangulares são encontrados na literatura quando se adentra ao universo das cavidades não particionadas. Segundo Kamkari e Shokouhmand (2014), reduções na ordem dos 37% são observadas no tempo de carga de uma cavidade não particionada ao incorporar a ela três aletas horizontais. Ainda segundo os autores, reduções de menor intensidade (18%) também foram por eles obtidas, isto ocorrendo nos casos em que apenas uma aleta foi utilizada. Mais do que quaduplicando o número máximo de aletas analisadas por Kamkari e Shokouhmand (2014), Biwolé *et al.* (2018) estudaram numericamente os benefícios associados à incorporação de até 16 aletas em uma cavidade verticalmente orientada. Também tomando como base o tempo necessário para a carga completa do sistema, Biwolé *et al.* (2018) relataram ser possível reduzir em aproximadamente 25 min este parâmetro de processo, o que equivale a uma redução percentual de 32%. Apesar de terem utilizado muito mais aletas no seu estudo, a redução alcançada por Biwolé *et al.* (2018) mostra-se inferior àquela obtida experimentalmente por Kamkari e Shokouhmand (2014). Tal comportamento, de fato surpreendente, evidencia que não somente a quantidade de aletas é que importa para o aumento da eficácia de troca das cavidades aletadas, demais aspectos também a influenciam. Deste modo, fatores como a orientação espacial da cavidade, material e razão de aspecto adotado para as aletas e a inclinação a que elas são instaladas, todos obrigatoriamente devem ser considerados para fins de projeto, uma vez que a adoção de uma configuração não tão apropriada pode por vir a prejudicar a eficiência do sistema ao invés de incrementá-la. (ABDULATEEF *et al.*, 2018).

3.4.1 Efeito da Orientação Espacial da Cavidade sob a Eficiência do Sistema

Visando compreender o papel efetivo da orientação espacial de uma cavidade aletada sob todos os processos térmicos que em seu interior ocorrem, Kamkari e Amlashi (2017) se apoiaram em técnicas de CFD (fluidodinâmica computacional) para estudar numericamente o processo de fusão de ácido láurico enclausurado em uma cavidade retangular não aletada. Adotando três diferentes orientações para a cavidade em questão ($\theta = 0, 45$ e 90°), parâmetros como tempo de carga do sistema e velocidade máxima registrada para a fase líquida foram avaliados. Resultados referentes às velocidades registradas evidenciaram que os maiores

valores deste parâmetro ocorreram quando a cavidade foi horizontalmente posicionada ($\theta = 0^\circ$). Sob esta posição, picos com magnitude de quase 10 mm/s foram registrados aos 75 min de processo para a velocidade do PCM líquido, valor duas vezes superior ao registrado na cavidade verticalmente orientada ($\theta = 90^\circ$). Resultados semelhantes para uma cavidade de mesmas dimensões, porém aletada, foram obtidos por Kamkari e Groulx (2018). Neste estudo, ficou provado que o posicionamento horizontal da cavidade intensifica significativamente a transferência de calor convectiva em seu interior, o que pode ser explicado por tal orientação propiciar uma maior velocidade ao PCM fundido, exatamente como já visualizado por Kamkari e Amlashi (2017). Em ambos os trabalhos, os menores tempo de carga do sistema estão associados às menores inclinações testadas ($\theta = 0^\circ$), o que é plenamente compreensível, uma vez que nestes casos a convecção é maximizada. Deste modo, fica claro que o aumento da eficiência dos sistemas retangulares de LHTES não se dá apenas pelo incremento de sua transferência de calor condutiva, a qual é potencializada pelo uso de aletas, ela também se dá pela definição de uma adequada orientação espacial do sistema, isto sendo fundamental para garantir adequadas taxas convectivas de transferência de calor.

3.4.2 Efeito do Material Adotado para as Aletas sob a Eficiência do Sistema

De nada adianta uma aleta corretamente dimensionada caso o material desta não facilite a difusão do calor. Em função disso, normalmente as aletas são fabricadas com metais altamente condutivos, como alumínio e cobre. Para uma cavidade vertical, Tian *et al.* (2020) simularam numericamente o processo de fusão de um PCM aquecido por aletas feitas de aço 302, aço-carbono, alumínio e cobre. Para estes materiais, os autores relatam que reduções percentuais de aproximadamente 37,2% (aço 302); 40,1% (aço-carbono); 41,0% (alumínio) e 41,6% (cobre) foram observadas no tempo total de carga da cavidade. Em relação à quantidade total de energia armazenada pelo sistema, a qual é menor em razão das aletas ocuparem um espaço anteriormente preenchido pelo PCM, Tian *et al.* (2020) afirmaram que o material menos prejudicial a este parâmetro é o aço 302. Tal afirmação se dá pelo material em questão apresentar uma maior densidade de armazenamento de calor sensível, calor este computado por mais reduzida que seja a sua quantidade. Tomando como base estes dois parâmetros (tempo total de carga e energia armazenada), junto ao custo de aquisição dos materiais, Tian *et al.* (2020) estabeleceram que o metal mais apropriado para a fabricação de aletas é o alumínio, o qual já é utilizado pela maioria dos pesquisadores que trabalham com sistemas de LHTES aletados.

3.4.3 Efeito da Razão de Aspecto das Aletas sob a Eficiência do Sistema

Parâmetros geométricos como comprimento e espessura, estes associados às aletas de formato retangular longitudinal, normalmente são analisados através da razão de aspecto (e_{fin}/L_{fin}). Diversos são os estudos que buscam quantificar o efeito deste parâmetro sob a transferência de calor ocorrida no interior das cavidades. Analisando a influência deste parâmetro sob o processo de fusão do RT44HC em uma cavidade retangular multi-aletada, Parkrouh *et al.* (2015) inferiram que quanto menor a razão de aspecto, mais eficientemente ocorre a troca no interior da cavidade. Deste modo, aletas longas e delgadas são mais indicadas que curtas e grossas, afirmação também realizada por Biwole *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018). Nestes trabalhos, reduções no tempo total de carga das cavidades foram observadas quando as menores razões de aspecto foram testadas. Tal comportamento, ocorre principalmente por esta configuração permitir que as aletas adentrem mais profundamente ao centro do sistema, garantindo assim um aquecimento mais acentuado do PCM sólido contido naquela região. (BIWOLE *et al.*, 2018 e JI *et al.*, 2018).

3.4.4 Efeito da Inclinação das Aletas sob a Eficiência do Sistema

Além da razão de aspecto, Ji *et al.* (2018) também avaliaram os efeitos causados ao adotar-se diferentes inclinações na instalação de aletas em cavidades retangulares verticalmente orientadas. Testando quatro diferentes inclinações (60, 75, 105 e 120°) para a instalação, os autores concluíram que os dois maiores valores potencializaram o processo de fusão, enquanto os dois menores prejudicaram, isto em comparação ao caso de inclinação usual (90°). Também utilizando superfícies aletadas em cavidades retangulares, porém abordando de modo distinto a inclinação, Benlekkam *et al.* (2018) assumiram que um conjunto de duas aletas pode ser instalado nestes sistemas de dois modos distintos: convergente e divergente. Enquanto na configuração divergente as aletas são inclinadas em sentidos opostos (aleta superior em direção ao topo do sistema e aleta inferior em direção à base), orienta-se as aletas na configuração convergente em direção de uma mesma região, neste caso o centro da cavidade. Com estas condições, os autores mostraram que aletas divergentes são mais adequadas para controlar a temperatura em painéis fotovoltaicos. Tal configuração, permitiu que uma temperatura não superior a 34°C fosse mantida no equipamento por um período de aproximadamente 170 min, algo não conseguido com o uso da configuração convergente.

Apesar dos relatos positivos trazidos por Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018), mais estudos ainda se fazem necessários para que de fato se possa atestar o potencial de uso das

aletas inclinadas em cavidades retangulares, uma vez que tais trabalhos são os únicos a analisarem esta questão. Outros estudos relacionando angulações com aletas em sistemas de LHTES até são existentes, vide Sciacovelli *et al.* (2015) e Sheikholeslami *et al.* (2019), porém a abordagem utilizada não é a mesma adotada por Benlekkam *et al.* (2018) e Ji *et al.* (2018). Nestes trabalhos, as angulações analisadas não se referem àquela existente entre a parede e as aletas em si (angulação de instalação), mas sim à angulação que confere o formato das aletas, neste caso aletas com o formato das letras V e Y. Para estas aletas, uma determinada angulação é existente na bifurcação para conferir estes formatos às elas, sendo esta variável um parâmetro geométrico destas estruturas.

3.5 Abordagem Numérica de Problemas Envolvendo PCM

O estudo numérico dos sistemas de armazenamento térmico baseados em calor latente é algo amplamente difundido no meio acadêmico, vide a grande quantidade de artigos que utilizam softwares de CFD para a solução de problemas envolvendo PCM. Tais softwares, caso corretamente manipulados, propiciam resultados fisicamente coerentes com aqueles que seriam obtidos de forma experimental, isto em um tempo relativamente curto dependendo da complexidade do problema. De modo geral, softwares de CFD, sejam eles de código aberto ou não, empregam métodos numéricos para realizar a discretização do modelo matemático implementado, como: o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos ou o método dos volumes finitos. Para a solução destes métodos, o domínio computacional é subdividido em um número pré-determinado de pequenas partes, as quais podem ser pontos, elementos ou volumes de controle. Deste modo, a solução das equações que compõem o modelo matemático e numérico é obtida para cada pequena parte utilizada em sua representação. (PANTAKAR, 1980 e MALISKA, 2004). Diferenças marcantes entre os métodos, estão principalmente relacionadas à aproximação das variáveis e do processo de discretização. Conforme Chapra e Canale (2010), o método das diferenças finitas faz uso de pontos para a discretização espacial, sendo que a aproximação das equações diferenciais que compõem o método é realizada através de expansões de séries de Taylor truncadas. Diferentemente do método das diferenças finitas, funções de aproximação e interpolação são utilizadas pelo método dos elementos finitos para a solução aproximada de uma variável qualquer em cada elemento da discretização espacial. Para a continuidade da solução, bem como a redução de erros, funções de ajuste e integração são utilizadas, sendo obtidas posteriormente as equações algébricas das funções. (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995 e NAZZI EHMS, 2018). Quanto ao método dos volumes finitos (MFV), volumes de controle infinitesimais se

encarregam da discretização espacial, enquanto a solução das equações aproximadas ocorre pela realização de balanços conservativos das propriedades físicas dos materiais que compõem o domínio computacional. (PANTAKAR, 1980 e MALISKA, 2004).

3.5.1 Estudos Desenvolvidos pelo Grupo

Embora a presente linha de pesquisa (PCM) seja considerada hoje como algo consolidado no programa de pós-graduação, tal cenário era diferente a cerca de seis anos. Na ocasião, conduzia-se no Laboratório de Simulação Numérica apenas os primeiros estudos envolvendo esta temática, os quais deram origem às duas primeiras publicações do grupo em congressos [Borahel *et al.* (2014) e Raymundo Junior *et al.* (2014)] como também a primeira dissertação de mestrado defendida [Estrázulas (2015)]. Para estes trabalhos, diversas análises foram realizadas, as quais objetivaram avaliar a importância da temperatura utilizada no aquecimento de um PCM submetido ao processo de fusão. Resultados obtidos na época, isto para todos os trabalhos citados, sugeriram que a temperatura de aquecimento relaciona-se de modo inversamente proporcional ao tempo de fusão do PCM. Ou seja, quanto maior ela for, menor será o tempo necessário para que o material derreta por completo.

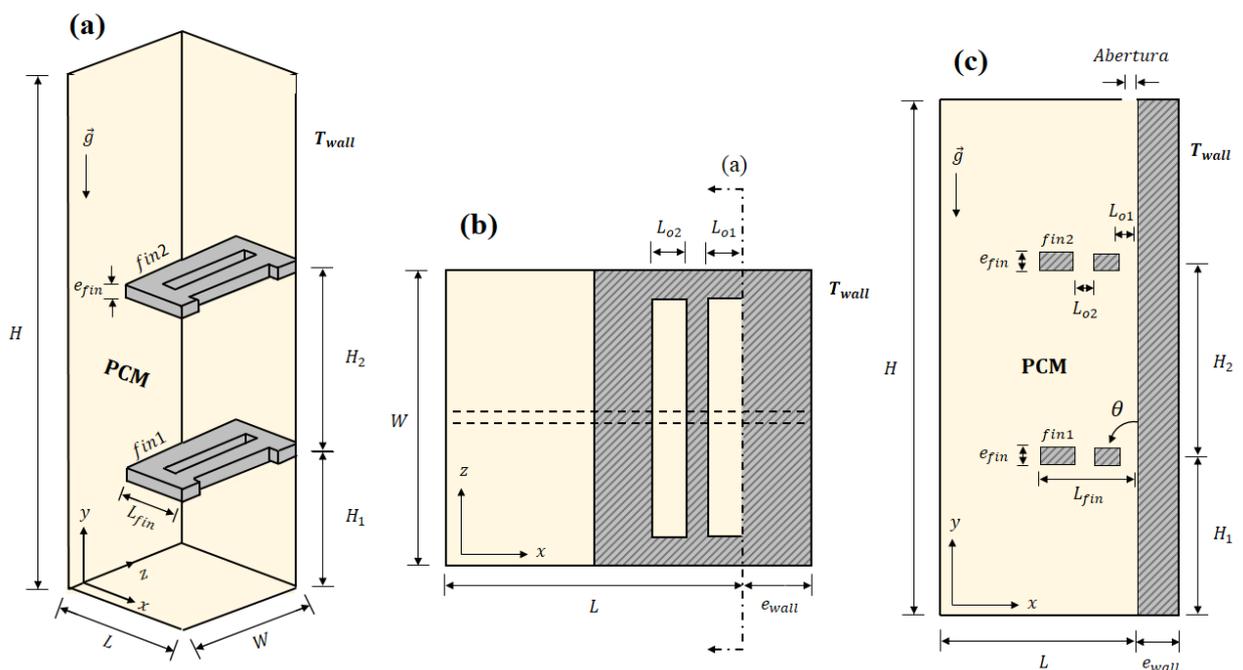
Além dos trabalhos iniciais, diversos outros foram produzidos pelo grupo ao longo destes seis últimos anos. Separando-os por geometria, se pode citar para esferas os estudos conduzidos por Borahel *et al.* (2015a), Faistauer *et al.* (2017), Nazzi Ehms *et al.* (2018) e Raymundo Junior *et al.* (2018); tubos cilíndricos estudados por Estrázulas e Oliveski (2017) e Spengler *et al.* (2018) e cavidades retangulares analisadas por Raymundo Junior *et al.* (2015), Borahel *et al.* (2015b), Da Silveira *et al.* (2018), Becker *et al.* (2019) e também Tacques (2019). Através destes trabalhos, diversos foram os parâmetros de operação/design comumente relacionados aos sistemas de LHTEs que já foram estudados pelo grupo, isto ocorrendo de forma gradual. Enquanto os parâmetros mais simples foram estudados nos primeiros trabalhos, os mais complexos foram abordados nos mais recentes, ocorrendo assim um aprofundamento natural dos estudos realizados. Seguindo este movimento para as cavidades retangulares, questões não tão complexas (temperatura de aquecimento do sistema e altura da cavidade) foram avaliadas por Borahel *et al.* (2015b), enquanto parâmetros construtivos mais complexos foram avaliados por Da Silveira *et al.* (2018), Becker *et al.* (2019) e Tacques (2019). Nestes estudos, questões referentes aos efeitos produzidos por aletas de diferentes razões de aspecto foram avaliadas para o processo de fusão simulado, sendo que os resultados obtidos sugeriram que aletas de menor razão de aspecto são as mais indicadas. Além deste parâmetro, outras variáveis de design também podem potencializar ou não a troca térmica das aletas

analisadas pelos autores, como a inclinação das mesmas, o que é estudado aqui. Ou seja, o presente trabalho se insere adequadamente à linha de pesquisa já consolidada no programa, inclusive dando continuidade à temática de estudo que busca compreender o papel exercido pelas características geométricas das aletas sob os processos de fusão por elas intensificados.

4 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

O sistema estudado, essencialmente consiste de uma cavidade retangular vertical preenchida por ácido láurico (PCM), possuindo 50 mm de comprimento (L) e largura (W) por 120 mm de altura (H). No interior da cavidade, duas aletas retangulares longitudinais encontram-se instaladas junto à parede direita sob diferentes inclinações ($30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$). Tanto aletas quanto paredes, tiveram seus desempenhos avaliados para três diferentes metais: aço 302, alumínio e cobre. Identificadas por fin_1 (aleta inferior) e fin_2 (aleta superior), cada aleta possui 25 mm de comprimento (L_{fin}) por 4 mm de espessura (e_{fin}), enquanto a parede em que elas estão fixadas possui 17.5 mm de espessura (e_{wall}). Em razão dos objetivos propostos, testaram-se diferentes valores para o espaçamento entre aletas (H_2), bem como para a posição de instalação (H_1) de fin_1 . Em ambas aletas, dois orifícios retangulares de comprimentos variados (L_{o1} e L_{o2}) foram admitidos a elas em alguns casos, um junto à parede direita ($hole_1$) e outro em seu centro ($hole_2$). Estes orifícios, podem ser observados tanto na Fig. 4.1 (a) [vista tridimensional do sistema] quanto na Fig. 4.1 (b) [vista superior de uma das aletas]. Nesta última figura, linha traço-ponto demarca o limite entre o interior da cavidade e a parede direita, enquanto as linhas tracejadas demarcam o plano bidimensional [Fig. 4.1 (c)] considerado nas simulações. Esta hipótese simplificativa, também utilizada por Ji *et al.* (2018) e Tian *et al.* (2020), somente é possível pelos efeitos de borda serem aqui desprezíveis.

Figura 4.1 – Representação esquemática da cavidade estudada, onde: (a) vista tridimensional, (b) vista superior de uma das aletas e (c) plano bidimensional adotado nas análises.



Configurações geométricas da cavidade para cada um dos 38 casos simulados são apresentadas em detalhes nas Tabelas 4.1–4.5, onde identifica-se individualmente os valores testados para H_1 , H_2 , L_{o1} , L_{o2} e θ . Deste maneira, Tab 4.1 apresenta os casos utilizados para a avaliação do material mais adequado a ser adotado para as aletas e parede direita do sistema, bem como para analisar a possibilidade de modelar as aletas com um comportamento ideal (T_{wall} diretamente aplicado ao seu perímetro, reproduzindo o comportamento de uma aleta com eficiência de 100%).

Tabela 4.1 – Configuração geométrica dos casos simulados com aletas não-vazadas reais e ideais de diferentes materiais.

Caso	θ (°)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	L_{o1} (mm)	L_{o2} (mm)	e_{wall} (mm)	Material (Aletas)	Comportamento (Aletas)
01	90	40,0	40,0	0,0	0,0	17,5	Aço 302	Comportamento Real
02	90	40,0	40,0	0,0	0,0	17,5	Alumínio	Comportamento Real
03	90	40,0	40,0	0,0	0,0	17,5	Cobre	Comportamento Real
04	90	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0	-	Comportamento Ideal

Tab. 4.2 apresenta todos os casos simulados com aletas ideais instaladas sob diferentes inclinações, de modo que a influência de θ sob o processo de fusão intensificado pelas aletas pode ser analisado.

Tabela 4.2 – Configuração geométrica dos casos simulados com aletas não-vazadas ideais sob diferentes valores de θ .

Caso	θ (°)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	L_{o1} (mm)	L_{o2} (mm)	e_{wall} (mm)
04	90	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
05	30	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
06	60	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
07	65	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
08	70	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
09	75	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
10	80	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
11	85	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
12	95	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
13	100	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
14	105	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
15	110	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
16	115	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
17	120	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
18	150	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 4.3 expõe as configurações geométricas dos casos simulados com aletas tradicionais (não-vazadas) e inovadoras (vazadas) para as inclinações de $\theta = 90, 120$ e 150 .

Tabela 4.3 – Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais não-vazadas e vazadas para $\theta = 90, 120$ e 150° .

Caso	θ ($^\circ$)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	L_{o1} (mm)	L_{o2} (mm)	e_{wall} (mm)	Modelo de Aleta
04	90	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0	Não-Vazada
17	120	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0	Não-Vazada
18	150	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0	Não-Vazada
19	90	40,0	40,0	1,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
20	90	40,0	40,0	2,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
21	90	40,0	40,0	3,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
22	90	40,0	40,0	4,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
23	120	40,0	40,0	1,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
24	120	40,0	40,0	2,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
25	120	40,0	40,0	3,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
26	120	40,0	40,0	4,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
27	150	40,0	40,0	1,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
28	150	40,0	40,0	2,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
29	150	40,0	40,0	3,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
30	150	40,0	40,0	4,5	0,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁
31	150	40,0	40,0	3,5	1,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁ e <i>hole</i> ₂
32	150	40,0	40,0	2,5	2,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁ e <i>hole</i> ₂
33	150	40,0	40,0	1,5	3,0	0,0	Vazada em <i>hole</i> ₁ e <i>hole</i> ₂

Tab. 4.4 apresenta os casos simulados com aletas ideais instaladas sob diferentes posições verticais de instalação (H_1) e Tab. 4.5 os casos com aletas ideais espaçadas sob diferentes valores de H_2 .

Tabela 4.4 – Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais instaladas sob diferentes valores de H_1 .

Caso	θ ($^\circ$)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	L_{o1} (mm)	L_{o2} (mm)	e_{wall} (mm)
04	90	40,0	40,0	0,0	0,0	0,0
34	90	30,0	40,0	0,0	0,0	0,0
35	90	20,0	40,0	0,0	0,0	0,0
36	90	10,0	40,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 4.5 – Configuração geométrica dos casos simulados com aletas ideais espaçadas sob diferentes valores de H_2 .

Caso	θ ($^\circ$)	H_1 (mm)	H_2 (mm)	L_{o1} (mm)	L_{o2} (mm)	e_{wall} (mm)
36	90	10,0	40,0	0,0	0,0	0,0
37	90	10,0	30,0	0,0	0,0	0,0
38	90	10,0	20,0	0,0	0,0	0,0

Propriedades termofísicas dos materiais que compõem a cavidade foram obtidas junto à literatura. Valores de massa específica (ρ), calor específico (c_p) e condutividade térmica (k) do aço, alumínio e cobre (Tab. 4.6) são aqueles utilizados como padrão pelo ANSYS Fluent 19.2; enquanto o PCM foi modelado com valores obtidos de diversas fontes. Deste modo, utilizou-se para o ácido láurico os valores de temperatura de sólido (T_s), temperatura de líquido (T_l), calor latente de fusão (Q_{lat}), (ρ), (c_p) e (k) obtidos de Shokouhmand e Kamkari (2013); valores de viscosidade dinâmica (μ) fornecidos por Valeri e Meirelles (1997) e o coeficiente de expansão térmica (β) informado por Yuan *et al.* (2016). Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam todos os valores admitidos às propriedades do ácido láurico, bem como indicam suas fontes.

Tabela 4.6 – Propriedades termofísicas do aço, alumínio e cobre.

Materiais	c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)
Aço 302	502,48	16,27	8030
Alumínio	871	202,4	2719
Cobre	381	387,6	8978

Fonte: Adaptado de ANSYS Fluent (2019)

Tabela 4.7 – Valores adotados para k , Q_{lat} , β , ρ , T_l e T_s do ácido láurico.

Propriedades do Ácido Láurico	Valores
Calor Específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	2180 (T_s) e 2390 (T_l)
Calor Latente de Fusão (J kg ⁻¹)	187210
Coeficiente de Expansão Térmica (K ⁻¹)	0,000615
Massa Específica (kg m ⁻³)	885 (T_l)
Temperatura de Sólido (K)	316,65
Temperatura de Líquido (K)	321,35

Fonte: Adaptado de Shokouhmand e Kamkari (2013) e Yuan *et al.* (2016)

Tabela 4.8 – Valores adotados para a condutividade térmica do ácido láurico.

Ácido Láurico				Condutividade Térmica (W m⁻¹ K⁻¹)			
293 K	303 K	313 K	323 K	328 K	333 K	338 K	343 K
0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138

Fonte: Adaptado de Shokouhmand e Kamkari (2013)

Tabela 4.9 – Valores adotados para a viscosidade dinâmica do ácido láurico.

Ácido Láurico				Viscosidade Dinâmica (kg m⁻¹ s⁻¹)		
321,2 K	322 K	333 K	344 K	355 K	372 K	383 K
0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210

Fonte: Adaptado de Valeri e Meirelles (1997)

4.1 Modelo Matemático e Numérico

No presente trabalho, o problema proposto é analisado através da solução das equações diferenciais da massa (Eq. 4.1), energia (Eq. 4.2) e quantidade movimento (Eq. 4.3), acrescidas do método da entalpia-porosidade, proposto por Voller e Prakash (1987), para a modelagem do processo de mudança de fase do PCM.

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

$$\frac{\partial(\rho \lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (4.3)$$

onde t representa o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, λ a entalpia específica total, T a temperatura, p a pressão, \vec{g} a aceleração da gravidade e \vec{S} o termo fonte da quantidade de movimento, este obtido através da solução da Eq. 4.4:

$$\vec{S} = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \omega)} \vec{V} \quad (4.4)$$

onde C representa a constante da zona porosa, cujo valor (10^{-7} no presente trabalho) depende da morfologia desta região, ω uma constante (0,001) utilizada para evitar divisões por zero e γ a fração de PCM líquido, a qual é calculada pela Eq. 4.5. (VOLLER e PRAKASH, 1987).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{se } T > T_l \end{cases} \quad (4.5)$$

Valores de entalpia específica total (λ) do PCM são dependentes do processo de mudança de fase, bem como da variação de temperatura submetida ao material. Deste modo, esta propriedade é obtida através da adição da entalpia específica sensível (λ_{se}) com a entalpia específica latente (λ_{lat}), respectivamente, Eqs. 4.6 e 4.7. (SHMUELI *et al.*, 2010).

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (4.6)$$

$$\lambda_{lat} = \begin{cases} 0 & se \quad T < T_s \\ \gamma Q_{lat} & se \quad T_s < T < T_l \\ Q_{lat} & se \quad T > T_l \end{cases} \quad (4.7)$$

onde λ_{ref} representa uma entalpia de referência associada a uma temperatura de referência (T_{ref}).

Utilizados para a análise e plotagem dos resultados, número de Nusselt médio (\bar{Nu}) e número de Fourier (Fo) são obtidos por intermédio da solução das Eqs 4.8 e 4.9, sendo \bar{h} (coeficiente médio de transferência de valor por convecção) obtido pela Eq. 4.10 e α (difusividade térmica do PCM) obtida pela Eq. 4.11:

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h} L_c}{k_l} \quad (4.8)$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (4.9)$$

$$\bar{h} = \frac{q''}{T_{wall} - T_l} \quad (4.10)$$

$$\alpha = \frac{k_l}{\rho_l c_p} \quad (4.11)$$

onde L_c representa o comprimento característico dado pela raiz da área da cavidade ($\sqrt{A_{cav}}$), q'' representa o fluxo de calor proveniente da parede direita do sistema e perímetro das aletas e k_l e ρ_l representam, respectivamente, a condutividade térmica e a massa específica do PCM na temperatura T_l .

4.1.1 Condições Iniciais e de Contorno

Para todos os casos simulados, uma temperatura inicial (T_i) de 313,15 K foi considerada como condição inicial; condição de contorno adiabática foi atribuída às paredes esquerda (Eq. 4.12), inferior (Eq. 4.13) e superior (Eq. 4.14) do sistema e a condição de não-deslizamento (Eq. 4.15) foi associada à todas superfícies sólidas do interior da cavidade:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad (4.12)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-L \\ y=0}} = 0 \quad (4.13)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-L \\ y=H}} = 0 \quad (4.14)$$

$$\vec{V} \Big|_{\substack{x=0-L \\ y=0-H}} = 0 \quad (4.15)$$

Como condição de contorno das aletas e parede direita, isto a depender do caso analisado, uma temperatura constante (T_{wall}) de 343,15 K foi utilizada. Assim, para os casos onde admitiu-se às aletas um comportamento real (casos 01-03), esta condição de contorno foi atribuída apenas à parede direita (Eq. 4.16) do sistema, enquanto no casos com aletas ideais (04-38) ela foi associada ao perímetro das aletas (E. 4.17) e de sua base (Eq. 4.18):

$$T \Big|_{\substack{x=e_{wall} \\ y=0-H}} = T_{wall} \quad (4.16)$$

$$T \Big|_{\substack{x=L/2 - L_{fin} \\ y=e_{fin}}} = T_{wall} \quad (4.17)$$

$$T \Big|_{\substack{x=L \\ y=0-H}} = T_{wall} \quad (4.18)$$

4.2 Abordagem Numérica

Utilizando o método dos volumes finitos (MFV), simulações numéricas bidimensionais foram executadas para cada caso das Tabelas 4.1–4.5 através do software comercial ANSYS Fluent 19.2. Testes preliminares foram realizados para a determinação do intervalo de tempo mais adequado para a discretização temporal do problema. Adotando o caso 04 para a realização destes testes, três intervalos de tempo foram testados (0,05; 0,1 e 0,2 s), sendo que os resultados

obtidos mostraram não existir diferenças relevantes entre eles. Para os três intervalos de tempo, uma diferença percentual máxima de 0,51% foi registrada entre os resultados, de modo que optou-se pelo uso do valor intermediário testado (0,1s) para a simulação de todos os demais casos. Tal escolha, basicamente se dá em razão deste valor ter proporcionado uma melhor convergência das simulações realizadas, o que permitiu uma redução no tempo total de cálculo, o qual variou entre 10 e 20 dias a depender do caso e da configuração do computador utilizado.

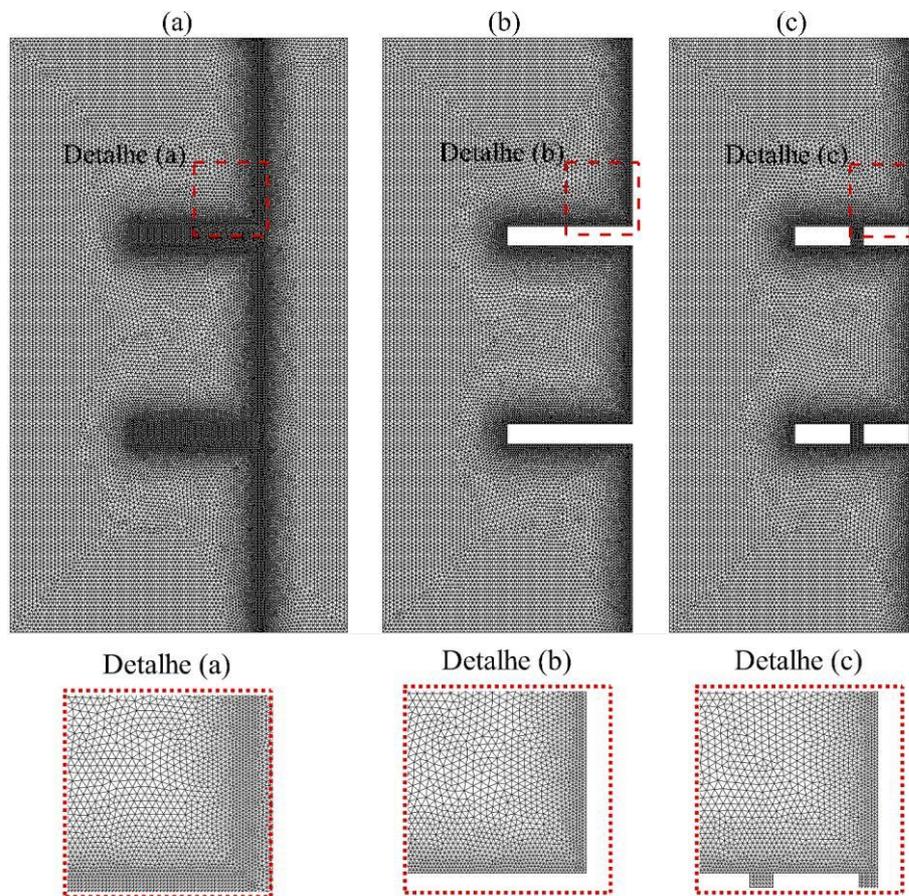
Como critérios de convergência para as equações que compõem o modelo implementado, adotaram-se os residuais de 10^{-5} para as equações diferenciais da massa e da quantidade de movimento e 10^{-8} para a equação diferencial da energia, admitindo-se um número máximo de 1000 iterações por intervalo de tempo. Como métodos de solução, esquema SIMPLE foi utilizado para tratar o acoplamento pressão-velocidade; PRESTO! utilizado para a discretização espacial da pressão; *Least Squares Cell Based* empregue na solução do gradiente espacialmente discretizado e *Second Order Upwind* para tratar a discretização espacial das equações da energia e da quantidade de movimento, bem como a discretização temporal.

4.2.1 Avaliação das Malhas Computacionais

Na discretização espacial do problema estudado, malhas bidimensionais não-estruturadas foram utilizadas. Células de formato triangular foram adotadas para a construção das malhas, uma vez que este formato foi o que melhor se adaptou às regiões mais próximas às aletas no domínio computacional quando $\theta \neq 90^\circ$ foi testado. Junto às superfícies quentes do sistema (aleta e perímetro de sua base), uma maior densidade de células foi utilizada, configurando assim um refino nas regiões de ocorrência dos maiores gradientes de velocidade e temperatura. Determinação da quantidade de elementos mais apropriada para cada malha foi realizada através do método GCI (*Grid Convergence Index*), este proposto por Celik *et al.* (2008). Tal método, permite quantificar a incerteza numérica existente entre malhas de diferentes níveis de refino, tornando possível identificar a malha mais apropriada para a discretização espacial. Para a aplicação deste método, três malhas com diferentes números de células foram geradas e testadas para simulação de uma das configurações (caso 04) admitidas à cavidade. 16,186, 27,144 e 46,412 células foram utilizadas para a criação de cada uma destas malhas, as quais foram respectivamente nomeadas de M1, M2 e M3. Para os resultados obtidos, adotando como parâmetro de análise a fração líquida global ($0 \leq \gamma \leq 1$) no interior da cavidade, ficou provado existir uma incerteza numérica média de 1,93% (GCI_{32}) entre as malhas M3 e M2 e 1,83% (GCI_{21}) entre as malhas M2 e M1; valores que evidenciam, conforme o método GCI, que os parâmetros adotados na criação da malha mais refinada (M3) são adequados.

Deste modo, para a criação de todas as malhas dos demais casos, os mesmos parâmetros foram utilizados, dando origem assim a uma malha de 71,328 elementos para a simulação dos três primeiros casos (01-03) e 35 malhas com 46,412 (± 400) elementos para os casos restantes (04-38). Fig. 4.2 (a-c) apresenta algumas destas malhas, onde (a) trata-se da malha utilizada para as simulações envolvendo aletas reais (casos 01-03), (b) uma das malhas criadas para os problemas com aletas ideais não-vazadas (casos 04-18 e 34-38) e (c) para os casos com aletas ideais vazadas (casos 19-33); sendo mostrado nos detalhes o refinamento aplicado às malhas.

Figura 4.2 – Malhas computacionais utilizadas na discretização espacial da cavidade estudada, onde: (a) malha dos casos 01-03, (b) malha do caso 05 e (c) malha do caso 32.

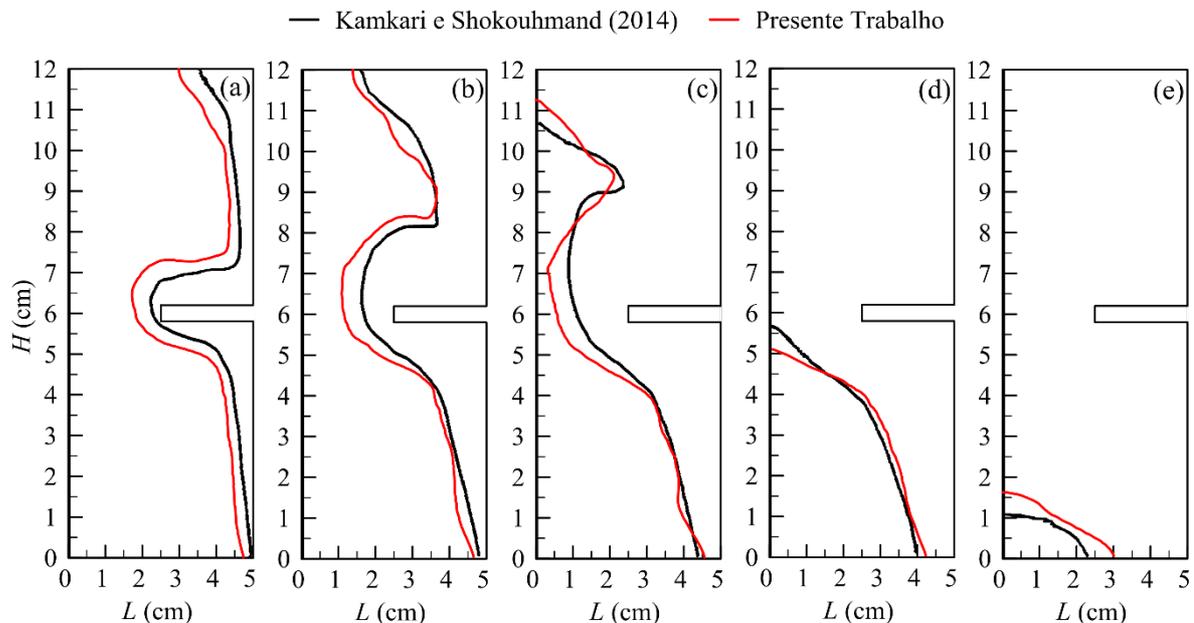


4.2.2 Validação Numérica do Modelo Implementado

Para fins de validação, utilizou-se o modelo implementado para a reprodução numérica do estudo experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014), o qual foi adotado por possuir grande similaridade com o problema proposto. Neste estudo, uma cavidade retangular aletada é utilizada como reservatório térmico, também sendo ácido láurico o PCM utilizado na fusão. Para esta etapa de validação, conduziram-se as análises de modo qualitativo e quantitativo.

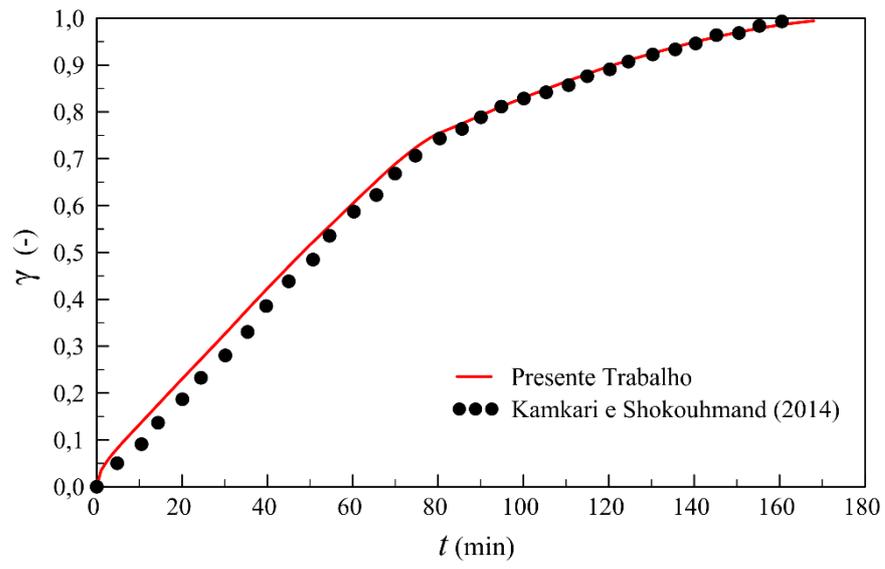
Fig. 4.3 (a-e) traz a interface sólido-líquido do ácido láurico para os instantes de 20, 40, 60, 80 e 140 min. Como pode ser observado, resultados experimentais e numéricos assemelham-se de modo satisfatório para todos os instantes de tempo apresentados. Diferenças sutis são visualizadas nos três primeiros instantes, bem como no último. Nos três primeiros instantes a interface numérica encontra-se um pouco deslocada para a esquerda da cavidade se comparada à interface experimental, enquanto no último instante ela se encontra deslocada para a direita. Apesar disto, o formato da interface ainda é bem representado e a área ocupada pelo PCM sólido é semelhante àquela visualizada nos resultados de Kamkari e Shokouhmand (2014), de modo que o deslocamento observado é aceitável pela complexidade do processo de fusão.

Figura 4.3 – Posição espacial da interface sólido-líquido do ácido láurico para diversos instantes, onde: (a) 20 min, (b) 40 min, (c) 60 min, (d) 80 min e (e) 140 min.



Resultados transientes da fração de líquido na cavidade são apresentados na Fig 4.4. Nesta figura, observa-se inicialmente uma grande semelhança entre os resultados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014) e os numéricos obtidos no presente trabalho. Embora pequena, uma diferença entre os resultados nos primeiros 60 min de processo pode ser observada, algo já sugerido pela análise qualitativa. Superado este instante, resultados numéricos convergem em direção aos experimentais, tornando-os praticamente idênticos após 90 min. Comparando o tempo necessário para a completa fusão ($\gamma = 1$) do PCM, verifica-se uma diferença de apenas 3,7% entre os resultados, enquanto a diferença média para o processo todo foi de 4,6%. Assim, devido à considerável similaridade entre os resultados experimentais e numéricos, considera-se que o modelo implementado é apropriado para o estudo proposto.

Figura 4.4 – Valores transientes globais de fração de líquido nas cavidades experimental e numérica.



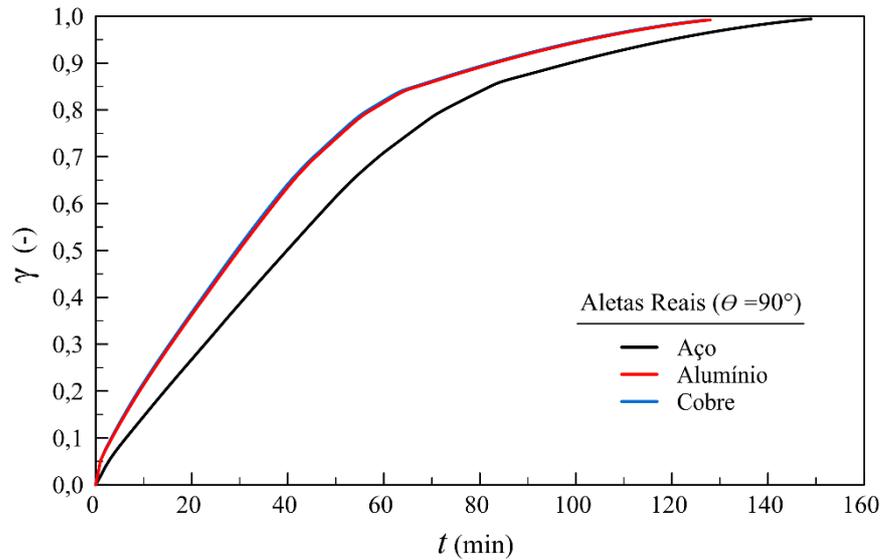
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como visto nas Tabelas 4.1–4.5, diversas foram as configurações avaliadas para o conjunto de aletas no presente trabalho. Basicamente, testaram-se para as aletas diferentes materiais, inclinações de instalação, modelos, posições e espaçamentos. Deste modo, para fins de organização, optou-se pela apresentação individualizada, através de subitens, dos resultados obtidos para cada um destes parâmetros.

5.1 Material das Aletas

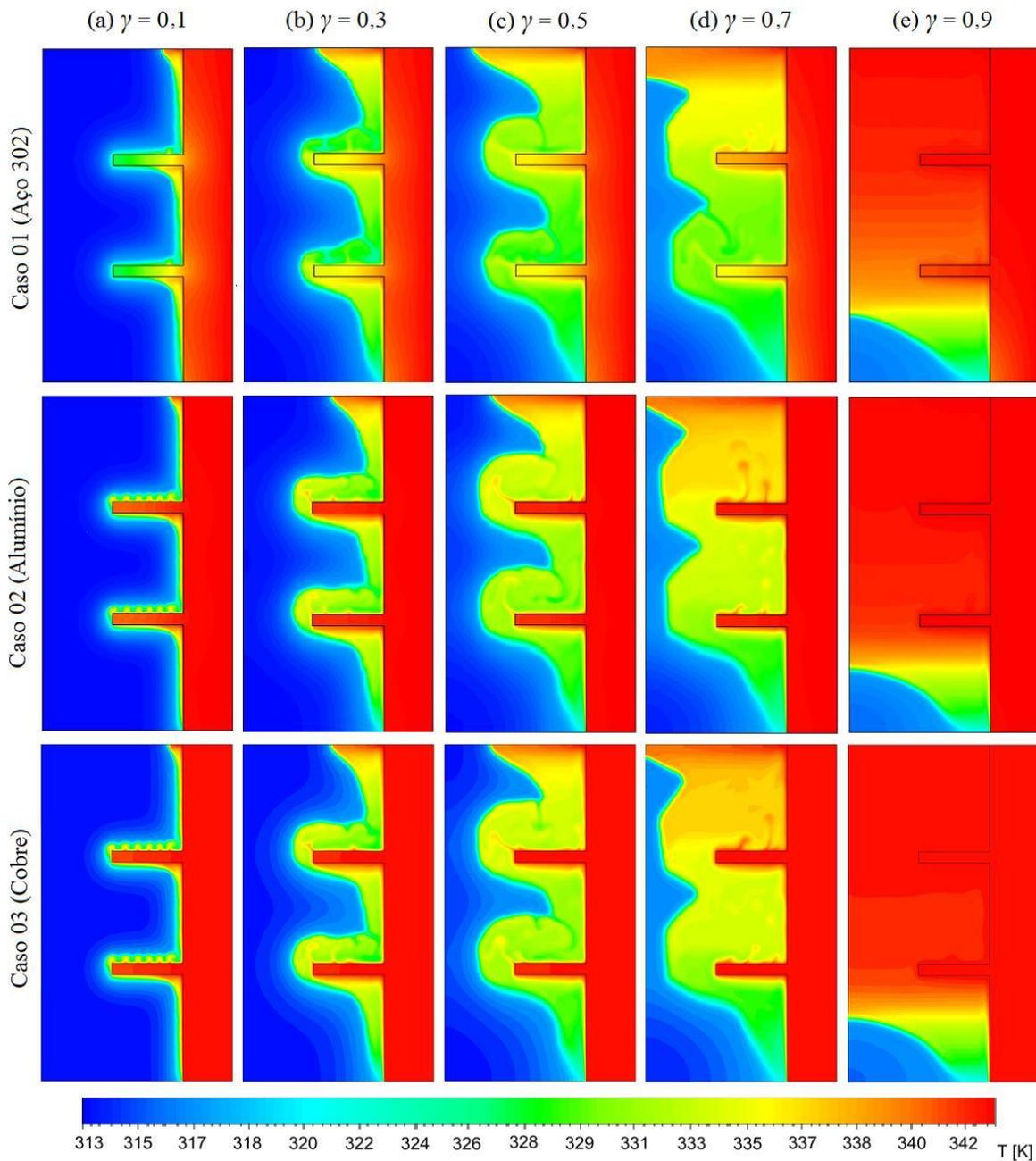
Fig. 5.1 apresenta os valores transientes globais de γ para os casos 01, 02 e 03 da Tab. 4.1, onde três foram os materiais (aço 302, alumínio e cobre) testados para o conjunto de aletas. Como pode ser observado, resultados obtidos referentes ao alumínio e o cobre são idênticos, enquanto os do aço divergem dos demais. Para este material (aço 302), 150 min foram necessários para que a fusão ocorresse por completo, tempo 12,6% superior ao registrado (131 min) para alumínio e cobre. Em termos de γ , diferenças percentuais ainda maiores foram observadas, sendo de 64,7% o valor máximo registrado entre os casos, isto ocorrendo aos 2 min de processo. Resultados semelhantes são apresentados por Tian *et al.* (2020), onde alumínio e cobre também mostraram-se mais adequados, isto frente ao aço-carbono e o AISI 302. Conforme os autores, quando alumínio e cobre foram utilizados, respectivamente, o tempo de carga do sistema foi reduzido em 41,6% e 41%, reduções superiores às observadas para aletas de aço-carbono (40,1%) e AISI 302 (37,6%). Em ambos os estudos, presente trabalho e Tian *et al.* (2020), metais de maior condutividade térmica destacaram-se, comprovando existir assim uma relação inversamente proporcional entre k_{fin} e $t_{(\gamma=1)}$. Deste modo, quanto maior a condutividade do metal adotado para as aletas e a parede de aquecimento, mais rapidamente ocorrerá o processo de fusão. Todavia, tal relação se dá até um certo limite, uma vez que o tempo de carga para os casos envolvendo alumínio e cobre são praticamente idênticos, apesar da condutividade térmica do cobre ser consideravelmente superior (aproximadamente 1,9 vezes). Este comportamento sugere que o limite em questão se dá para valores de condutividade térmica próximos ao do alumínio, os quais já são elevados o suficiente para permitir a adequada difusão do calor ao longo das aletas, garantindo assim que sua temperatura rapidamente se aproxime de T_{wall} .

Figura 5.1 – Valores transientes de γ para cavidades com aletas de diferentes materiais.



Figs. 5.2 (a-e) apresentam os campos de temperatura dos três casos analisados [Aço 302 (Caso 01), Alumínio (Caso 02) e Cobre (Caso 04)] para diferentes valores de γ : (a) 0,1; (b) 0,3; (c) 0,5; (d) 0,7 e (e) 0,9. Como se pode ver, independentemente do material utilizado, mantém-se preservado o formato da interface sólido-líquido para cada etapa, comprovando assim que o processo de fusão ocorre de modo similar, porém com velocidades distintas (vide Fig. 5.1). Diferenças somente são observadas na distribuição de temperatura que ocorre ao longo das aletas. Alumínio e cobre permitem um aquecimento mais intenso destas estruturas, enquanto o aço 302 origina um aquecimento lento e defasado. Tal diferença está essencialmente relacionada à baixa condutividade térmica deste material, a qual dificulta a difusão do calor ao longo das aletas, não permitindo a adequada elevação de suas temperaturas. Para os metais de maior condutividade (alumínio e cobre), temperaturas próximas a T_{wall} são alcançadas logo nos instantes mais iniciais da fusão ($\gamma = 0,1$), algo que não ocorre para o aço. Com este material, atinge-se um aquecimento considerado adequado para o conjunto de aletas somente quando a fusão está quase finalizada ($\gamma = 0,9$), o que invariavelmente reduz a troca térmica existente entre aletas e PCM, conseqüentemente assim prejudicando as taxas de fusão. Deste modo, fica evidente que os metais mais adequados são o alumínio e o cobre, os quais já são adotados pela grande maioria dos estudos relacionados aos sistemas de LHTES, como: Kamkari e Shokouhmand (2014), Benlekkam *et al.* (2018), Biwole *et al.* (2018), Ji *et al.* (2018) e Kamkari e Groulx (2018).

Figura 5.2 – Campos de temperatura dos casos com aletas reais de aço 302, alumínio e cobre, onde: (a) $\gamma = 0.1$, (b) $\gamma = 0.3$, (c) $\gamma = 0.5$, (d) $\gamma = 0.7$ e (e) $\gamma = 0.9$.

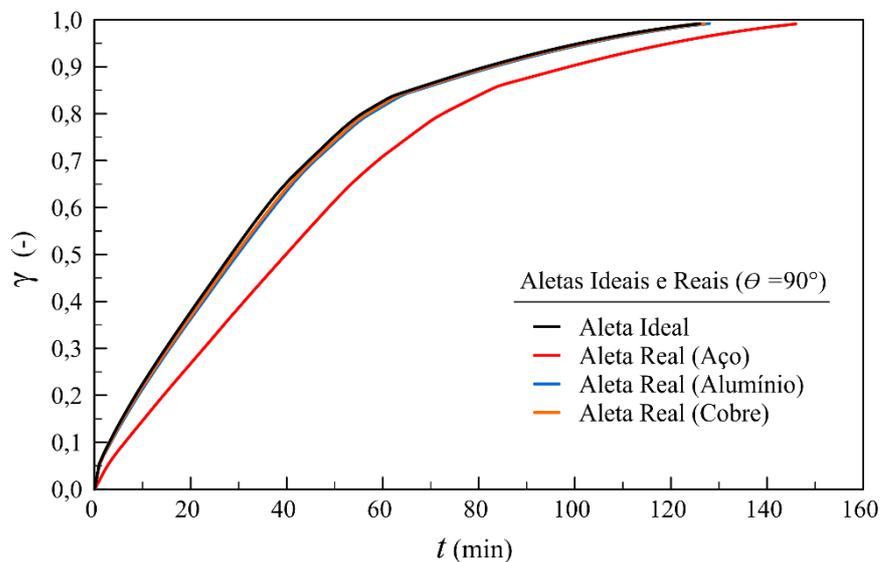


5.2 Aletas Reais x Aletas Ideais

Fig. 5.3 apresenta os valores transientes de γ para os casos da Tab. 4.1, estes simulados com aletas reais de aço 302, alumínio, e cobre; como também com aletas ideais. Diferenças entre os resultados do caso simulado com aletas ideais inexistem frente aos obtidos com aletas reais de alumínio e cobre. Tal semelhança, basicamente ocorre pela intensa difusão de calor registrada ao longo das aletas quando estes dois materiais (alumínio e cobre) são utilizados na

fabricação das aletas. Por serem ótimos condutores de calor, estes metais permitem que a temperatura registrada na extremidade das aletas seja levemente inferior à T_{wall} logo no início do processo, como já discutido e mostrado na Fig. 5.2 (a) (Caso 02 e 03). Assim, aletas e base rapidamente assumem um comportamento próximo ao ideal, de modo que a modelagem de forma idealizada destas estruturas é uma alternativa viável para metais altamente condutivos. Nestes casos, além de reproduzir adequadamente a física do problema, esta abordagem acelera a obtenção dos resultados por reduzir a quantidade de células existentes na malha, sendo esta uma simplificação já utilizada em outros estudos numéricos, como os conduzidos por Ben-Nakhi e Chamkha (2006) e Hatami (2017).

Figura 5.3 – Valores transientes globais de γ para cavidades modeladas com aletas reais e ideais.



5.3 Inclinação de Instalação

Adotando o comportamento ideal para o conjunto de aletas, casos 04-18 foram solucionados com as aletas instaladas sob diferentes inclinações (θ). Fig. 5.4 apresenta os valores transientes de γ para cinco valores de θ : 30, 60, 90, 120 e 150°. Como bem visto, valores intermediários de θ propiciaram uma fusão mais acelerada, enquanto os valores mais extremos não aceleraram o processo com a mesma intensidade. Para 30 e 150°, deu-se por completa a fusão do PCM, respectivamente, aos 157 e 152 min de processo; valores superiores aos registrados para 60° (141 min), 90° (129 min) e 120° (128 min). Dois são os motivos que explicam este desempenho dos casos de θ mais extremos: i) reduzido tempo de contato das aletas com o PCM sólido quando $\theta = 30^\circ$ e ii) convecção prejudicada quando $\theta = 150^\circ$. No primeiro caso, à medida que o processo de fusão ocorre, rapidamente fin_2 (aleta superior) fica

submersa em meio ao PCM líquido que se acumula no topo da cavidade, isto ocorrendo devido ao conjunto de aletas estar orientado em direção desta região do sistema. Deste modo, tal aleta perde sua função, deixando assim de contribuir para o aquecimento/fusão do PCM sólido. Por sua vez, aletas inclinadas em 150° dificultam a ascensão do PCM líquido no interior da cavidade, chegando inclusive à represá-lo. Em vista disso, mais lentamente se dá o processo de fusão, já que menor é a transferência de calor por convecção neste caso.

Figura 5.4 – Valores transientes globais de γ para casos com aletas inclinadas em 30, 60, 90, 120 e 150° .

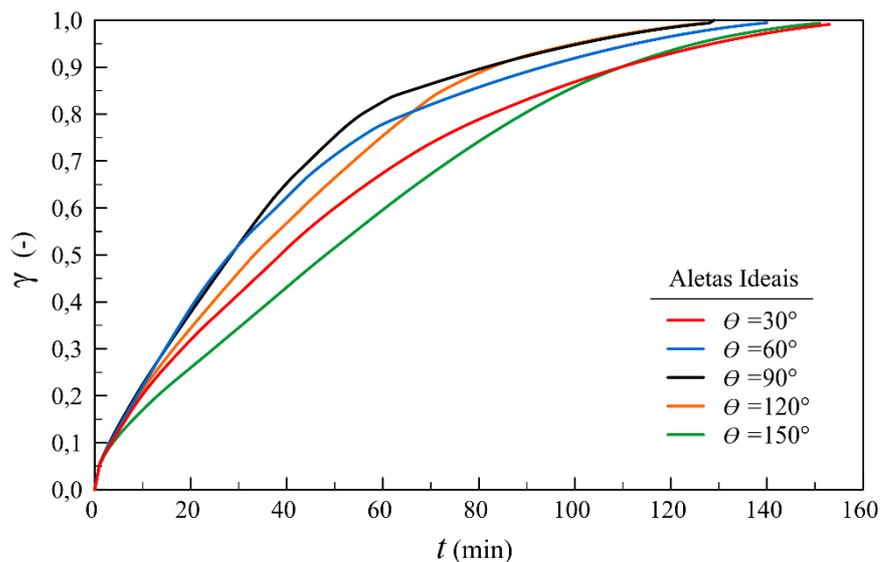
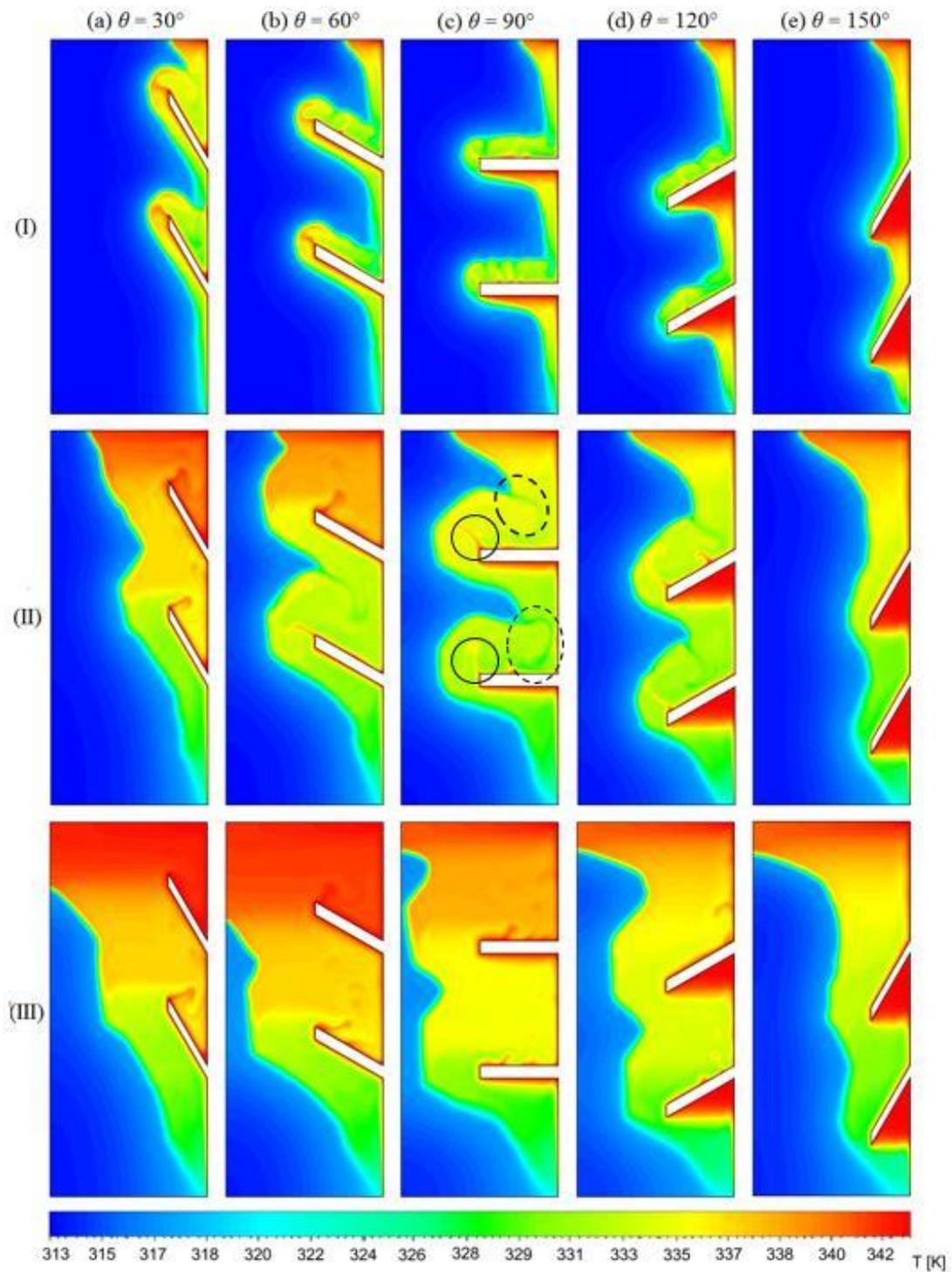


Fig. 5.5 (a-e) mostram os campos de temperatura dos casos apresentados na Fig. 5.4 para os instantes de (I) 10 min, (II) 30 min e (III) 50 min. Na Fig. 5.5 (a) percebe-se o conjunto de aletas totalmente imerso em meio ao PCM líquido, principalmente fin_2 . Tal comportamento estende-se também ao caso com $\theta = 60^\circ$ [Fig. 5.5 (b)]. Isto explica o afastamento visualizado na Fig. 5.4 para os resultados deste caso em comparação aos obtidos com $\theta = 90^\circ$. Até 30 min, casos com $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ apresentavam valores transientes de γ idênticos, porém, os referentes ao caso de menor inclinação ($\theta = 60^\circ$) começaram a se afastar em razão do conjunto de aletas perder eficácia. Para todos os casos, exceto $\theta = 150^\circ$ [Fig. 5.5 (e)], estreitas faixas de coloração contrastantes (vermelho-amarelado e verde-amarelado), observadas junto à ponta superior das aletas (região indicada pelo círculo contínuo) e à direita da concavidade formada no sólido (indicada pelo círculo tracejado), indicam a ocorrência de processos convectivos intensos nos instantes de (I) 10 min e (II) 30 min. Além de não permitirem o desenvolvimento da convecção sugerida aos demais casos por represar o PCM líquido proveniente das regiões inferiores do sistema, aletas inclinadas em 150° também não adentram tão ao centro da cavidade, ocasionando assim um menor aquecimento das porções mais centrais do PCM sólido.

Deste modo, aletas sob esta inclinação acabam operando como se apresentassem uma razão de aspecto (e_{fin}/L_{fin}) excessivamente elevada; configuração geométrica prejudicial para a fusão em algumas situações, como apontado por Parkrouh *et al.* (2015) e Biwole *et al.* (2018).

Figura 5.5 – Campos de temperatura para os instantes de (I) 10 min, (II) 30 min e (III) 50 min, onde: (a) $\theta = 30^\circ$, (b) $\theta = 60^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$, (d) $\theta = 120^\circ$ e (e) $\theta = 150^\circ$.



O número de Nusselt médio em função do número de Fourier para a cavidade dos casos de $\theta = 30, 60, 90, 120$ e 150° é apresentado na Fig. 5.6. Como pode ser observado, linhas verticais tracejadas subdividem a figura em três regiões, demarcando a transição entre os diferentes mecanismos de transferência de calor que regem o processo do caso de inclinação intermediária (90°). Basicamente, (i) indica a predominância do mecanismo de condução, (ii) convecção intensa e (iii) convecção branda; comportamento também relatado por Shokouhmand e Kamkari (2013) e Ji *et al.* (2018). Para todos os casos, os maiores valores de Nusselt são registrados logo no início do processo, os quais estão associados à pequena resistência térmica da fina camada de PCM líquido que se forma com o início da fusão. Nesta etapa, resultados referentes aos casos de $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ e 120° são idênticos, enquanto àqueles relacionados aos casos de $\theta = 30^\circ$ e 150° divergem dos demais, sendo menores. Ainda nesta etapa, à medida que o PCM funde e a camada de líquido ganha espessura, rapidamente a resistência térmica à condução aumenta, levando Nusselt a um decréscimo linear abrupto em todos os casos. Este decréscimo somente é atenuado pelo início do processo de convecção natural (ii), onde Nusselt continua a cair, porém em menor intensidade. Aqui, novamente observa-se o caso de $\theta = 150^\circ$ apresentando os menores valores de Nusselt, próximo ao caso de $\theta = 30^\circ$. No entanto, por suas aletas estarem orientadas em direção à base da cavidade, região onde o PCM sólido se encontra nos instantes finais do processo, $\theta = 150^\circ$ consegue retardar o enfraquecimento da convecção (iii), preservando assim o Nusselt. Deste modo, mais rapidamente se dá a fusão nos estágios mais avançados para este caso, este sendo o motivo pelo qual $\theta = 150^\circ$ superou $\theta = 30^\circ$ na Fig. 5.4 após os 90 min de processo.

Figura 5.6 – Nusselt médio em função de Fourier para cavidades com aletas inclinadas sob diferentes θ

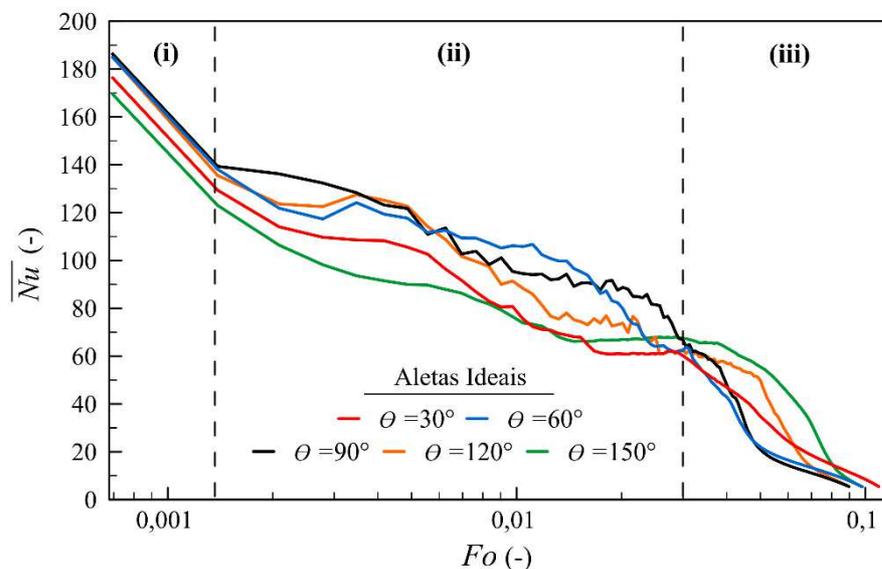
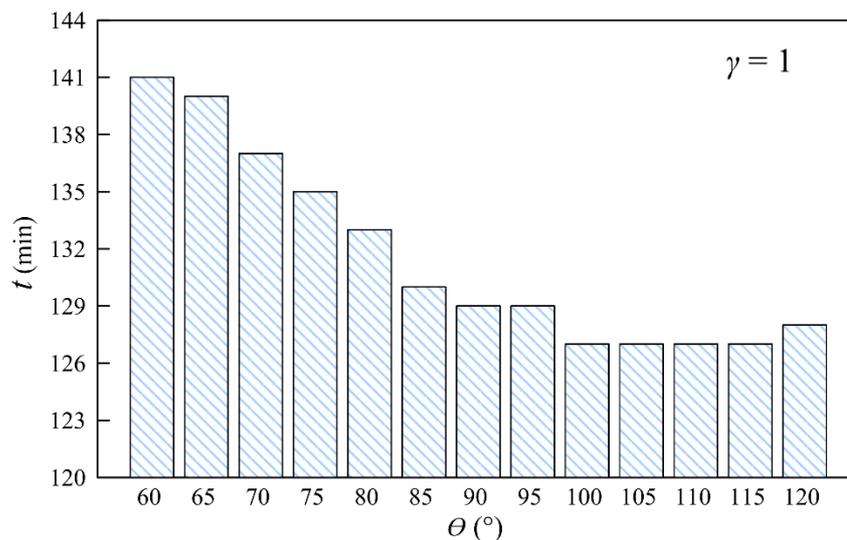


Fig. 5.7 apresenta, através de um diagrama de barras, o tempo total necessário para que a fusão se dê por completo ($\gamma = 1$) nos casos simulados com θ variando entre 60 e 120°. Para estes casos (04; 06-17), apresentados na Tab. 4.2, identificou-se que 127 min foi o menor valor de $t_{(\gamma = 1)}$ obtido, este alcançado pelos casos de $\theta = 100, 105, 110$ e 115° . Inclinações inferiores à 90° mostraram ser incapazes de acelerar a fusão com a mesma intensidade, já que foram necessários entre 131 e 141 min para que $\gamma = 1$ fosse atingido quando $60^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$. Este comportamento também é observado por Ji *et al.* (2018), onde cinco diferentes valores de θ (60, 75, 90, 105 e 120°) foram testados para a instalação de um conjunto de aletas longitudinais em uma cavidade vertical. Conforme os autores, mais lentamente se dá a fusão para as duas menores inclinações, enquanto as duas maiores aceleram o processo, especialmente $\theta = 105^\circ$ (exatamente como visto aqui). No entanto, não se pode apontar uma inclinação ideal para as aletas apenas em termos de $t_{(\gamma = 1)}$, uma vez cada inclinação age sobre o processo de fusão de modo distinto. Em ambos os estudos, $\theta = 90^\circ$ acelerou mais intensamente a fusão nos estágios iniciais e intermediários (vide Fig. 3,4), enquanto casos de maior inclinação levam vantagem nos estágios mais avançados ($\gamma > 0,7$). Deste modo, não se chega a um valor ideal para θ , mas sim uma faixa de valores possíveis, os quais variam entre 90 e 115° a depender das características térmicas do sistema de LHTES em que as aletas serão instaladas.

Figura 5.7 – Valores de $t_{(\gamma = 1)}$ para os casos de aletas inclinadas no intervalo de $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$.

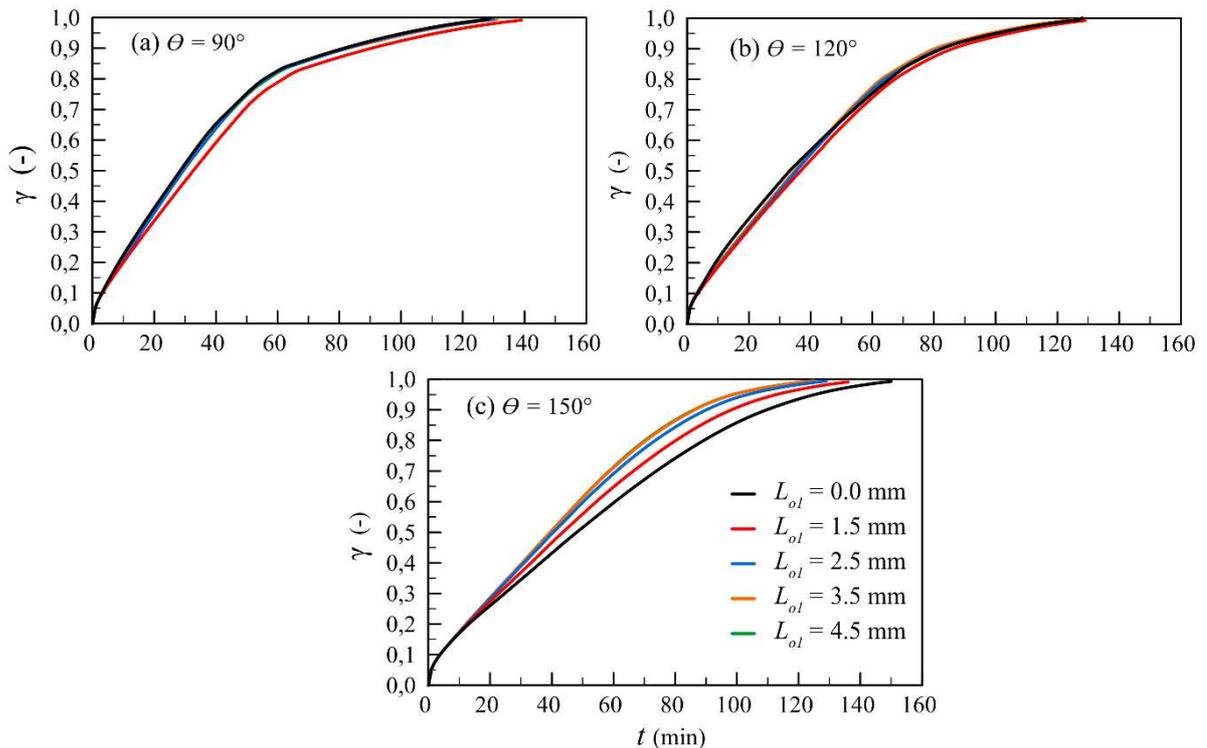


5.4 Aletas Vazadas

Por intermédio dos casos 19-33, apresentados na Tab. 4.3, testou-se para a cavidade estudada aletas com um formato inovador, as quais visam facilitar o movimento de ascensão do PCM líquido no interior do sistema. Estas aletas, nomeadas aqui de aletas vazadas, possuem

orifícios junto à parede aquecida da cavidade ($hole_1$) e em seu centro ($hole_2$), conforme apresentado na Fig. 4.1. Estes orifícios, servem de passagem para o PCM líquido, não permitindo seu acúmulo na região inferior das aletas, como visualizado na Fig. 5.5 (d-e). Resultados transientes de γ para os casos em que somente $hole_1$ foi admitido às aletas são apresentados na Fig. 5.8 (a-c); onde (a) $\theta = 90^\circ$, (b) 120° e (c) 150° .

Figura 5.8 – Valores transientes globais de γ para os casos com aletas vazadas apenas em $hole_1$, onde: (a) $\theta = 90^\circ$, (b) $\theta = 120^\circ$ e (c) $\theta = 150^\circ$.

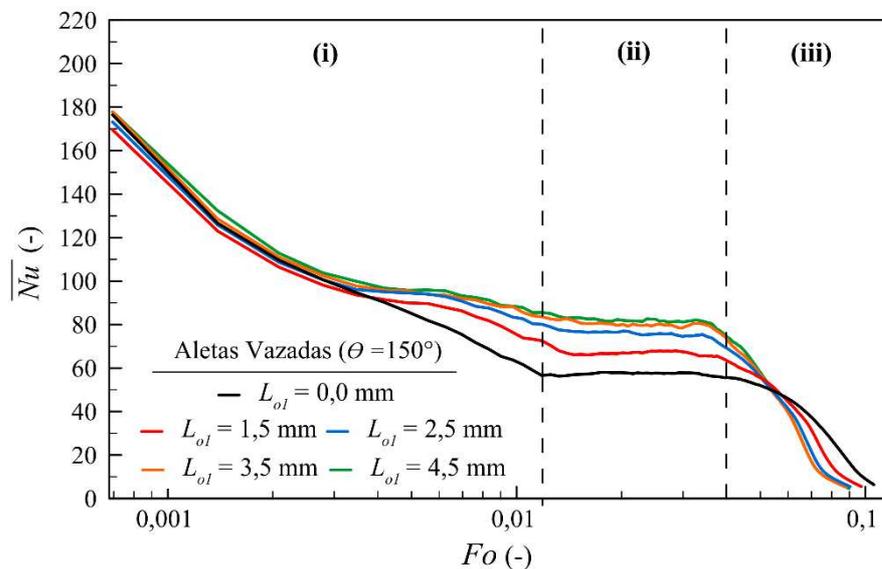


Como pode ser observado, reduções no tempo de carga do sistema pelo uso deste tipo de aleta nos casos de menor inclinação (90 e 120°) inexistem, havendo inclusive um pequeno prejuízo à fusão quando $L_{ol} = 1,5$ mm foi utilizado. No entanto, aletas vazadas mostraram-se extremamente promissoras para os casos de $\theta = 150^\circ$, os quais tiveram seu tempo de carga reduzido quando este modelo de aleta foi o adotado. Para esta inclinação (150°), utilizando $L_{ol} = 4,5$ mm, $t_{(\gamma = 0,8)}$ foi reduzido de 93 min (caso com aleta não-vazada) para 68 min, uma redução de aproximadamente 26,6%. Reduções consideráveis também foram obtidas com os demais valores de L_{ol} , sendo $t_{(\gamma = 0,8)} = 70$ min (–24,7%) para $L_{ol} = 3,5$ mm; 74 min (–20,4%) para 2,5 mm e 80 min (–13,9%) para 1,5 mm. Em todos estes casos, associa-se a intensificação da fusão pelo incremento do processo de convecção natural, como sugerido pela Fig. 5.8 (c). Nesta figura, observa-se que a fusão ocorre por igual para todos os casos quando a condução é o mecanismo de transferência de calor dominante ($t \leq 15$ min). Superado este período, cresce a

quantidade de líquido no interior da cavidade, de modo que a convecção natural prevalece e a fusão é beneficiada pelo uso das aletas vazadas. Assim, diferenças entre os resultados começam a surgir, sendo mais intensa a fusão para os maiores valores de L_{ol} .

Valores de \bar{Nu} em função de Fourier para os casos da Fig. 5.8 (c) são apresentados na Fig. 5.9, onde de fato a intensificação do processo de convecção natural pelo uso das aletas vazadas é confirmada. Novamente, divide-se o processo em três etapas, tomando agora como base os mecanismos de transferência de calor predominantes do caso de $L_{ol} = 0,0$ mm.

Figura 5.9 – Valores de Nusselt por Fourier para os casos de $\theta = 150^\circ$ com aletas vazadas em $hole_1$.

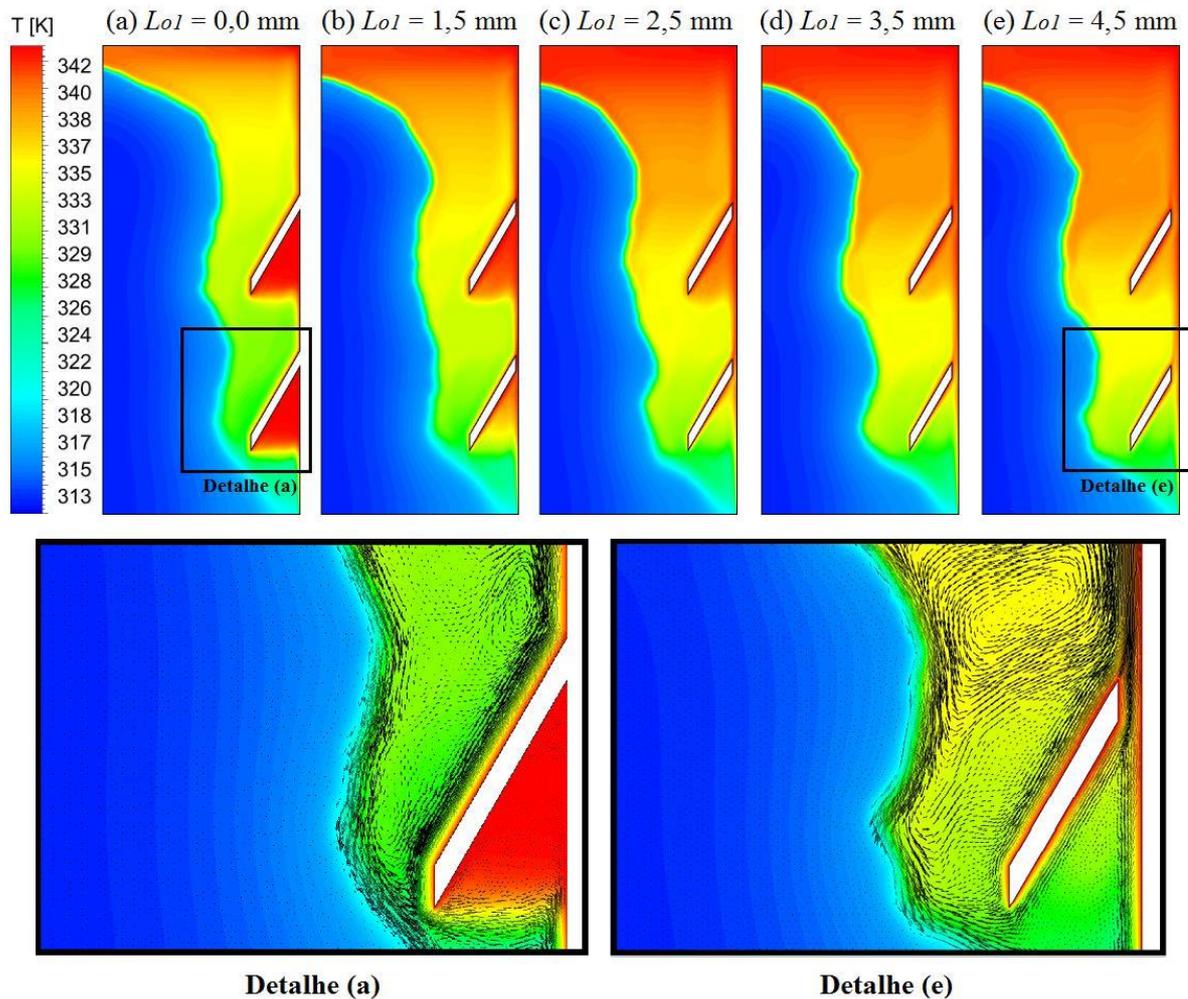


Como pode ser observado, além de intensificar a convecção natural no interior da cavidade (vide incremento de \bar{Nu} nas etapas ii e iii), aletas vazadas também abreviam a etapa na qual o processo de condução governa a troca térmica. Com estas aletas, o processo de condução deixa de ser dominante quando $Fo = 0,003$ é alcançado; o que somente ocorre com as aletas não-vazadas ($L_{ol} = 0,0$ mm) quando $Fo = 0,01$ é superado. Enquanto aletas não-vazadas agem como um obstáculo para o movimento de ascensão do líquido, aletas vazadas não o impedem, de modo que rapidamente um escoamento é estabelecido e a convecção natural predomina no interior da cavidade. Quando isto acontece ($Fo \geq 0,003$), percebe-se em todos os casos uma relação entre \bar{Nu} e L_{ol} , onde os maiores valores de \bar{Nu} são obtidos por intermédio dos maiores L_{ol} testados; isto sendo coerente ao comportamento observado para γ na Fig. 5.8 (c). Todavia, os resultados também sugerem que valores de L_{ol} superiores à 4,5 mm não mais influenciam o processo, haja visto que \bar{Nu} e γ são praticamente idênticos quando

$L_{ol} = 3,5$ e $4,5$ mm. Desta maneira, ganhos ocasionados pela utilização de aletas vazadas em $hole_1$ possuem um certo limite, o qual é devidamente alcançado com $L_{ol} = 4,5$ mm.

Fig. 5.10 (a-e) apresenta os campos de temperatura dos casos de $\theta = 150^\circ$ que tiveram sua convecção incrementada pela utilização de aletas vazadas em $hole_1$. Nesta figura, $t = 45$ min e (a) refere-se ao caso de $L_{ol} = 0,0$ mm, (b) 1,5 mm, (c) 2,5 mm, (d) 3,5 mm e (e) 4,5 mm.

Figura 5.10 – Campos de temperatura em $t = 45$ min para os casos de $\theta = 150^\circ$ com aletas vazadas apenas em $hole_1$, onde: (a) $L_{ol} = 0,0$ mm, (b) 1,5 mm, (c) 2,5 mm, (d) 3,5 mm, (e) 4,5 mm.



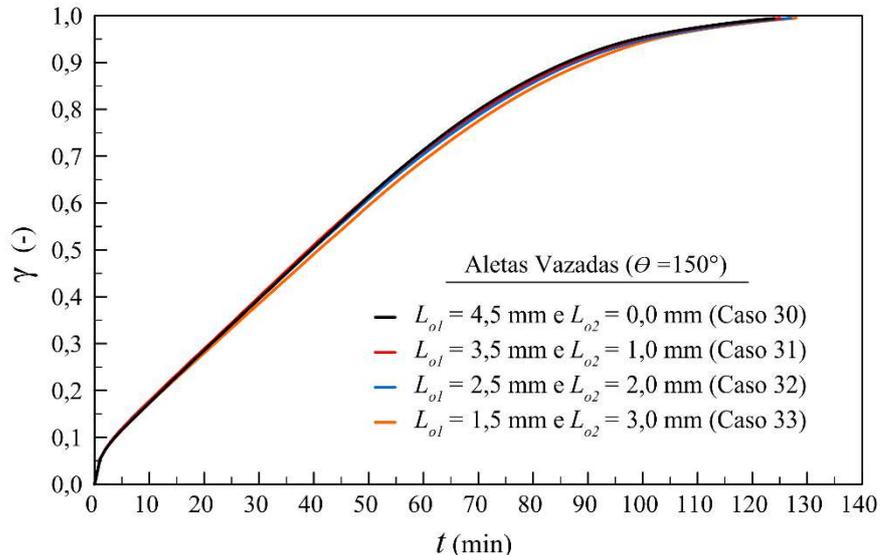
Para o caso padrão [Fig. 5.10 (a)], onde aletas vazadas não são utilizadas, regiões de coloração vermelha indicam o acúmulo de PCM líquido, à elevadas temperaturas, logo abaixo das aletas. Por apresentar uma temperatura maior, a qual reduz sua massa específica, esta parcela de PCM fundido deveria ascender, ocupando as regiões mais superiores do sistema. Todavia, isto acaba não ocorrendo, uma vez que $\theta = 150^\circ$ transforma as aletas em barreiras físicas de difícil superação, que impedem o movimento ascendente do líquido, estagnando-o

como apontado pela ausência de vetores de velocidade na região vermelha do detalhe (a). Este comportamento, prejudicial ao processo de convecção natural, não é observado quando aletas vazadas em $hole_1$ são utilizadas [vide Fig. 5.10 (c-e)]. Nestes casos, observa-se que o acúmulo de PCM fundido em fin_1 deixa de existir com $L_{o1} \geq 2,5$ mm, enquanto em fin_2 ele inexistente para $L_{o1} \geq 3,5$ mm. Em ambas situações, $hole_1$ foi o responsável pela ascensão do PCM fundido no interior do sistema, uma vez que através dele é que o líquido escoar. Tal escoamento, pode ser visualizado pelos vetores de velocidade plotados no detalhe da Fig. 5.10 (e), onde fica evidente que o líquido proveniente das regiões mais inferiores consegue superar as aletas ao escoar através de $hole_1$. Com base nisto, pode-se afirmar que aletas vazadas apresentam um potencial de aplicação interessante, podendo ser utilizadas em situações onde aletas tradicionais dificultam o escoamento da fase líquida, como nos sistemas analisados por Wang e Yang (2011) e Jmal e Baccar (2018). Estes autores, praticamente não obtiveram benefícios aumentando o número de aletas instaladas em cavidades preenchidas por PCM. Pelo contrário, o número excessivo de aletas acabou por subdividir as cavidades em pequenas partições individuais, de modo que a fase líquida ficou represada entre as aletas. Desta maneira, por não haver escoamento entre as partições, mais fracamente se deu a convecção, o que poderia ter sido evitado pela utilização de aletas vazadas.

Observado o potencial das aletas de apenas um orifício, testou-se a incorporação de um orifício extra a estas estruturas, chamado aqui de $hole_2$. Nestes casos (31-34 da Tab. 4.3), fixou-se o tamanho de 4,5 mm como sendo o valor total atribuído aos dois orifícios juntos ($L_{o1} + L_{o2}$), já que esta medida foi a que melhor acelerou o processo de fusão quando apenas $hole_1$ foi utilizado. Fig. 5.11 apresenta os resultados transientes de γ para estes casos, comparando-os obtido para o caso 30, onde $L_{o1} = 4,5$ mm e $L_{o2} = 0,0$ mm. Como pode ser observado, praticamente não existem diferenças relevantes entre os resultados. Por exemplo, para uma fração de líquido de 0,7 os tempos são de 56, 57 e 58 min para os casos 31, 32 e 33, respectivamente. Ou seja, aletas de apenas um orifício, este situado próximo à base das mesmas, de fato mostram ser as mais indicadas. Além de propiciar uma fusão mais intensa, este design de aleta vazada certamente é o menos prejudicial à difusão de calor que deve ocorrer nas aletas em casos reais, onde o calor deve difundir ao longo das aletas para garantir o aquecimento de sua extremidade. Todavia, análises tridimensionais ainda necessitam ser realizadas para assegurar que este orifício não interfere na distribuição de temperatura das aletas ao ponto de prejudicar a transferência de calor e a fusão no interior da cavidade. Tais análises, obrigatoriamente devem ser realizadas com o uso de supercomputadores ou então conduzidas experimentalmente, pois simulações preliminares para este problema até foram executadas,

porém o custo computacional tornou inviável o prosseguimento das mesmas, uma vez que o tempo estimado para conclusão dos cálculos foi superior a 12 meses, utilizando computadores equipados com processadores Intel I7 4790 (3.6 GHz) e 32 GB de memória RAM.

Figura 5.11 – Valores transientes de γ para os casos com aletas vazadas apenas em $hole_1$ e $hole_2$

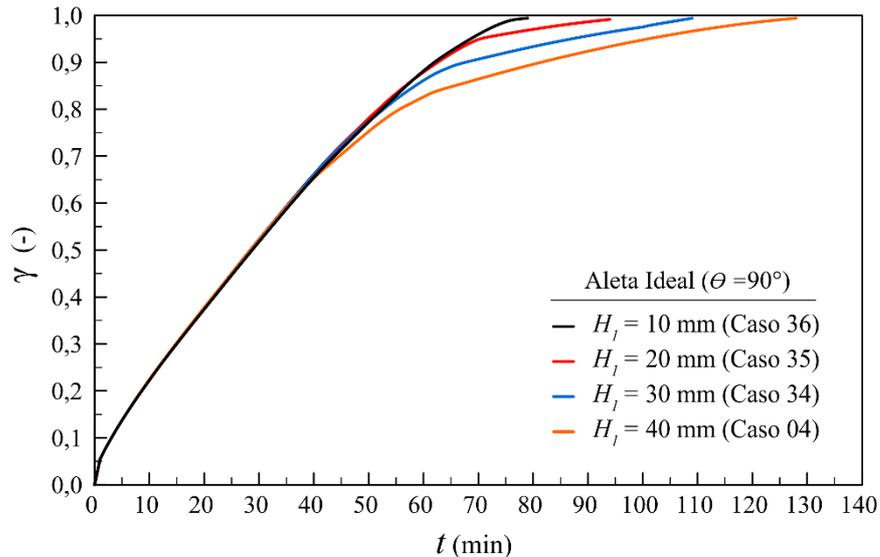


5.5 Posição de Instalação e Espaçamento entre Aletas

Além da inclinação de instalação das aletas junto à parede aquecida do sistema, testou-se também a posição de instalação, conforme esquema da Fig. 4.1. Nestes casos, manteve-se o espaçamento entre aletas constante ($H_2 = 40$ mm), variando apenas a posição de instalação da primeira aleta (fin_1). Deste modo, testou-se H_1 para 10, 20, 30 e 40 mm; enquanto a segunda aleta (fin_2) foi posicionada em $y = 50, 60, 70$ e 80 mm para respeitar o espaçamento entre aletas. Fig. 5.12 apresenta γ em função do tempo para todos estes casos, os quais foram simulados com aletas ideais não-vazadas de $\theta = 90^\circ$. Observa-se que para $\gamma \leq 0.65$, os resultados são praticamente iguais. No entanto, para valores acima deste, diferenças significativas entre os resultados são observadas. As maiores taxas de fusão são obtidas quando o conjunto de aletas é posicionado nas regiões mais inferiores do sistema, como $H_1 = 10$ mm. Para esta posição, a fusão ocorreu aos 78 min, enquanto isto somente ocorreu aos 95 min para $H_1 = 20$ mm e 108 min para $H_1 = 30$ mm; todos inferiores ao $t(\gamma = 1)$ registrado (129 min) para o caso padrão ($H_1 = 40$ mm). A alteração de posição mostrou-se capaz de reduzir consideravelmente o tempo total de carga do sistema, algo não alcançado com o uso das aletas vazadas. Em números percentuais, reduziu-se $t(\gamma = 1)$ na ordem dos 39,5% (-51 min) com $H_1 = 10$ mm, 26,3% (-34 min) com $H_1 = 20$ mm e 14,7% (-21 min) com $H_1 = 30$ mm; ao passo que a máxima redução

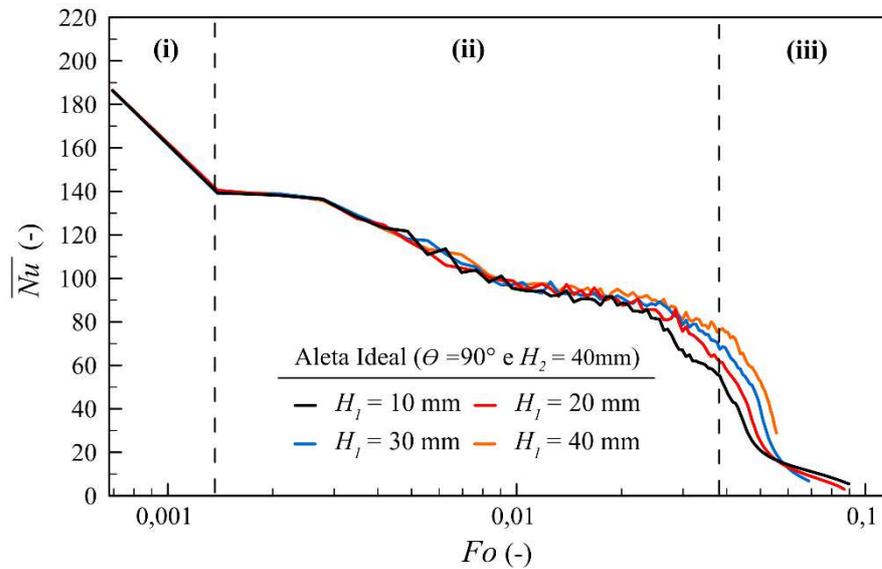
registrada para os casos com aletas inclinadas foi de apenas 1.6% (-2 min). Deste modo, pode-se dizer que a instalação das aletas em posições mais inferiores, foi de fato a melhor maneira encontrada para acelerar o processo de fusão do ácido láurico. Além de mais eficiente, esta é a medida mais prática de se implementar para os reservatórios térmicos reais, haja visto que a produção/installação das aletas inclinadas e/ou vazadas é mais complexa.

Figura 5.12 – Valores transientes de γ para os casos de $\theta = 90^\circ$ com aletas instaladas a diferentes alturas

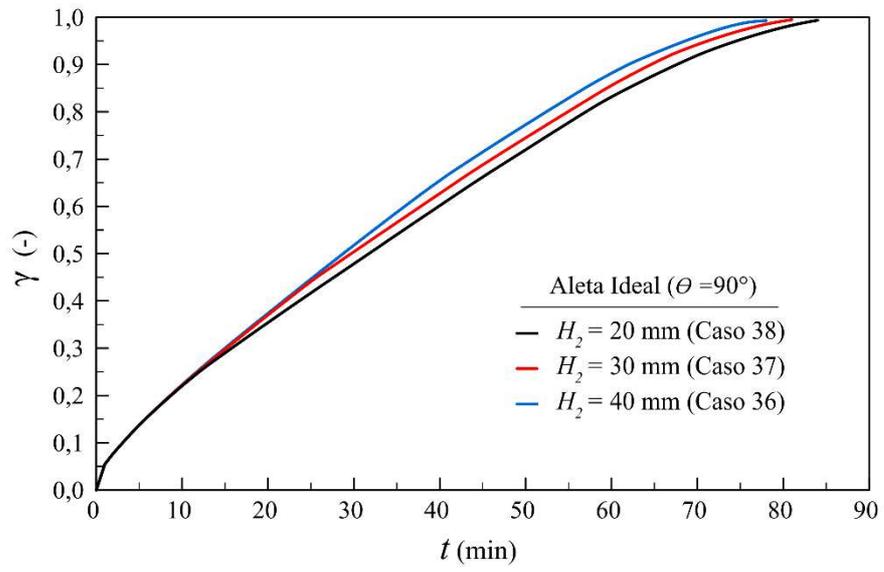


Para os casos apresentados na Fig. 5.12, os quais tiveram seu processo de fusão aprimorado pela utilização de menores valores de H_l na instalação do conjunto de aletas, resultados na forma de \bar{Nu} por Fo são apresentados na Fig. 5.13. Mais uma vez, divide-se o processo em três etapas, demarcando assim o período em que cada mecanismo de transferência de calor é predominante no processo. Para a primeira etapa, onde a troca térmica é predominantemente condutiva, diferenças entre os resultados não são observadas, algo já esperado, visto a grande similaridade dos resultados da Fig. 5.12. No entanto, à medida que o processo de fusão avança e a convecção predomina, pequenas diferenças de \bar{Nu} são identificadas a partir de $Fo = 0,004$. No entanto, diferenças, de fato significativas, somente ocorrem a partir de $Fo = 0,03$. Neste caso, observa-se que mais lentamente \bar{Nu} diminui para os casos de menor H_l . Isto ocorre, essencialmente pela posição inferior das aletas permitir uma troca térmica mais efetiva, uma vez que é maior a proximidade entre aletas e o PCM sólido que fica acumulado junto ao fundo do sistema nos estágios mais avançados do processo. Deste modo, está explicada as maiores taxas de fusão observadas para $H_l = 10$ e 20 mm na Fig. 5.12, as quais não se deram fundamentalmente pela intensificação da transferência de calor, mas sim por sua manutenção nos instantes finais.

Figura 5.13 – Nusselt por Fourier para os casos de $\theta = 90^\circ$ com aletas instaladas a diferentes alturas.



Fixando H_1 na melhor posição possível (10 mm) e variando H_2 , analisou-se como o espaçamento entre aletas afeta o processo de fusão. Para isto, testaram-se três diferentes valores para H_2 (20, 30 e 40 mm) através dos casos 36-38 da Tab. 4.5. Resultados de γ em função de t , para cada um destes casos, são apresentados na Fig. 5.14. Para os instantes iniciais ($t \leq 15$ min), onde a condução prevalece, diferenças entre os resultados não são observadas. Essencialmente, tal comportamento indica que a condução de calor não se deixa influenciar pelo espaçamento entre aletas, mas a convecção sim. Quando este mecanismo prevalece, mais lentamente se dá a fusão dos casos de menor espaçamento, afetando assim o tempo total de carga do sistema. Conseqüentemente, $\gamma = 1$ é alcançado aos 84, 80 e 78 min para $H_2 = 20, 30$ e 40 mm; este último mostrando ser o espaçamento mais adequado para ser adotado entre as aletas. Resultados obtidos por Wang e Yang (2011) e Jmal e Baccar (2018) também sugerem que um menor espaçamento entre aletas é prejudicial. Embora os autores não tenham de fato analisado este parâmetro, uma análise de seus resultados torna possível concluir isto. Em ambos os estudos, aletas retangulares em elevadas quantidades não aceleraram o processo de fusão conduzido em sistemas retangulares de LHTES, inclusive o prejudicaram em alguns casos. Nestes estudos, cada vez menor era o espaçamento entre aletas à medida que a quantidade destas estruturas aumentava no interior dos sistemas. Tão logo, os resultados destes estudos não apenas indicam que um número excessivo de aletas é prejudicial, eles indiretamente sugerem também que este comportamento pode estar relacionado à diminuição do espaçamento existente entre as aletas; algo demonstrado aqui.

Figura 5.14 – Valores transientes de γ para os casos de $\theta = 90^\circ$ com diferente espaçamento entre aletas.

6 CONCLUSÕES

Para um reservatório térmico retangular totalmente preenchido por PCM (ácido láurico), investigou-se numericamente como aletas de diferentes parâmetros geométricos e de instalação podem influenciar o processo de fusão que ali ocorre. Para as aletas, os seguintes parâmetros foram testados, dando origem a 38 casos analisados: tipo de material (aço 302, alumínio e cobre), comportamento térmico (ideal vs. real), inclinação de instalação no sistema ($30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$), modelo (aleta não-vazada ou vazada), posição vertical de instalação (H_1) e espaçamento (H_2). Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir:

i) Aço, alumínio e cobre afetaram de modo distinto a difusão de calor ao longo das aletas; alumínio e cobre a intensificam, enquanto aço 302 mostrou-se ineficiente. Tal comportamento, chegou inclusive a influenciar o processo de fusão no interior do sistema, o qual se deu mais lentamente para o aço 302. Para este material, 150 min se fizeram necessários para que o processo de fusão ocorresse por completo, tempo 12,6% superior ao registrado (131 min) para alumínio e cobre. Deste modo, torna-se possível afirmar que o aço 302 não é um material adequado para as aletas, mas o alumínio e o cobre sim, uma vez que suas condutividades térmicas são mais elevadas;

ii) Aletas de alumínio e cobre aqueceram de forma rápida e homogênea, alcançando temperaturas próximas de sua base (T_{wall}) logo no início do processo. Por aquecerem tão rapidamente, estas estruturas podem ser modeladas de forma idealizada, aplicando-se T_{wall} diretamente ao seu perímetro, tornando desnecessária a discretização espacial da região interna das aletas e de sua base;

iii) A instalação das aletas sob diferentes inclinações afetou a intensidade do processo de fusão no interior da cavidade. A depender do estágio que o processo se encontra, determinadas inclinações destacaram-se mais que outras. Para os estágios iniciais e intermediários do processo, $\theta = 90^\circ$ acelerou consideravelmente a fusão, sendo necessários 45 min para que $\gamma = 0,7$ fosse alcançado com esta inclinação, enquanto 64 min foram necessários para 30° , 49 min (60°), 54 min (120°) e 74 min (150°). Já para os estágios mais avançados ($\gamma > 0,7$), mais rapidamente se deu a fusão para os casos de maior inclinação. Deste modo, não se tem um valor ótimo de θ , mas sim uma faixa de valores possíveis, os quais variam entre 90 e 115° dependendo das características térmicas do sistema em que as aletas serão instaladas;

iv) Aletas de formato inovador, nomeadas aqui de aletas vazadas, apresentaram um potencial interessante de uso para casos onde o movimento do PCM líquido é dificultado pelas aletas tradicionais (não-vazadas). Para $\theta = 150^\circ$, onde aletas tradicionais represavam o líquido, uma redução percentual de até 17.7% (-25 min) foi obtida para o tempo total de carga do sistema quando o formato inovador de aletas foi utilizado. No entanto, mais análises ainda se fazem necessárias para que de fato se ateste que este formato pode ser aplicado em situações práticas;

v) Quanto mais inferior a posição de instalação das aletas, mais intensamente ocorre a fusão no interior da cavidade. Reduções percentuais de até 39,7% (-51 min) puderam ser alcançadas para $t_{(\gamma = 1)}$ quando diferentes valores de H_l foram testados na instalação das aletas. Essencialmente, este parâmetro foi o que melhor acelerou o processo de fusão estudado. Além de ter se mostrado mais eficiente, ele também é mais prático de se implementar em reservatórios térmicos reais, uma vez que a simples instalação das aletas em posições mais inferiores é muito mais fácil que a produção/instalação de aletas inclinadas e/ou vazadas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o prosseguimento da pesquisa, tomando como base os resultados obtidos e as questões ainda não respondidas, sugere-se como temas para trabalhos futuros:

i) Análises experimentais e/ou numéricas para a compreensão de como os orifícios existentes nas aletas vazadas afetam a distribuição de temperatura nestas estruturas em situações reais, para que assim se possa atestar a viabilidade de uso deste modelo inovador de aleta;

ii) Aplicação de métodos de otimização (design construtal e/ou algoritmo genético) para definição do melhor arranjo geométrico das aletas em sistemas retangulares de LHTES, considerando na análise a razão de aspecto, inclinação, posição de instalação e espaçamento entre aletas.

REFERÊNCIAS

- ABDULATEEF, Ammar; MAT, Sohif; ABDULATEEF, Jasim; SOPIAN, Kamaruzzaman; AL-ABIDI, Abduljalil A. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1620-1635, 2018.
- AGYENIM, Francis; HEWITT, Neil; EAMES, Philip; SMYTH, Mervyn. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 615-628, 2010.
- AHMED, Mashud; MEADE, Oliver; MEDINA, Mario A. Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 3, p. 383-392, 2010.
- AKGÜN, Mithat; AYDIN, Orhan; KAYGUSUZ, Kamil. Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 2, p. 669-678, 2007.
- AL-ABIDI, Abduljalil A.; BIN MAT, Sohif; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; LIM, C. H.; TH, Abdulrahman. Review of thermal energy storage for air conditioning systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5802-5819, 2012.
- AL-HALLAJ, S.; KIZILEL, R.; LATEEF A. et al. Passive Thermal Management Using Phase Change Material (PCM) for EV and HEV Li-ion Batteries. **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, p. 376-380, 2005.
- ALI, Hafiz Muhammad; ARSHAD, Adeel. Experimental investigation of n-eicosane based circular pin-fin heat sinks for passive cooling of electronic devices. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 112, p. 649-661, 2017.
- ALSHAER, W. G.; NADA, S. A.; RADY, M. A.; DEL BARRIO, E. P.; SOMMIER, A. Thermal management of electronic devices using carbon foam and PCM/nano-composite. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 89, p. 79-86, 2015.
- ARSHAD, Adeel; ALI, Hafiz Muhammad; ALI, Muzaffar; MANZOOR, Shehryar. Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 143-155, 2017.
- BABAPOOR, Aziz; KARIMI, Gholamreza. Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffinnanoparticles composites phase change material: Comparison and optimization. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 945-951, 2015.
- BARRENECHE, Camila; NAVARRO, Lidia; DE GRACIA, Alvaro; FERNÁNDEZ, A. Inés; CABEZA, Luisa F. In situ thermal and acoustic performance and environmental impact of the introduction of a shape-stabilized PCM layer for building applications. **Renewable Energy**, v. 85, p. 281-286, 2016.

BECKER, F.; OLIVESKI, R. C.; ROCHA, L. A. O. Estudo numérico para obtenção da razão de aspecto ótima de uma aleta no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM). **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 5, p. 13-21, 2019.

BENLEKKAM, Mohamed L.; NEHARI, Driss; MADANI, Habib I. The thermal impact of the fin tilt angle and its orientation on performance of PV cell using PCM. **International Journal of Heat and Technology**, v. 36, n. 3, p. 919-926, 2018.

BEN-NAKHI, Abdullatif; CHAMKHA, Ali J. Conjugate natural convection in a square enclosure with inclined thin fin of arbitrary length. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, p. 467-478, 2007.

BIWOLE, Pascal Henry; GROULX, Dominic; SOUAYFANE, Farah; CHIU, Tim. Influence of fin size and distribution on solid-liquid phase change in a rectangular enclosure. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 124, p. 433-446, 2018.

BORAHÉL, R. S.; OLIVESKI, R. C.; FAISTAUER, F. Erythritol solidification in a sphere: a numerical study. *In: 15th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING (ENCIT)*, 2014, Belem.

BORAHÉL, R. S.; RAYMUNDO JÚNIOR, J. F.; OLIVESKI, R. C. Numerical study of the erythritol melting process in a vertical cylindrical tube. *In: 23rd INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM)*, 2015a, Rio de Janeiro.

BORAHÉL, R. S.; RAYMUNDO JÚNIOR, J. F.; OLIVESKI, R. C. Análise bidimensional do processo de fusão de um material de mudança de fase em uma cavidade retangular. **Scientia Plena**, v. 11, p. 1-11, 2015b.

BUCKLEY, Theresa M. Flexible composite material with phase change thermal storage. Estados Unidos: United States Patent Office, 1992. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US6183855B1>>. Acesso em: 31 jan. 2020.

BUTALA, Vincenc; STRITIH, Uroš. Experimental investigation of PCM cold storage. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 354-359, 2009.

CASTELL, A.; MARTORELL, I.; MEDRANO, M.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. F. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 4, p. 534-540, 2010.

CELIK, I.; 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.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical Methods for Engineers**. 6. ed. McGraw-Hill, 2010.

DA SILVEIRA, A. M. **Efeito de aletas em cavidades retangulares no processo de fusão do PCM ácido láurico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

DA SILVEIRA, A. M.; DOS SANTOS, I. Dal-Ri; OLIVESKI, R. C. Análise da fusão do PCM ácido láurico em cavidade retangular com aleta horizontal. **Perspectiva Online**, v. 8, p. 43-55, 2018.

DINCER, Ibrahim. On thermal energy storage systems and applications in buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 4, p. 377-388, 2002.

ESAPOUR, M.; HAMZEHNEZHAD, A.; DARZI, A. A. R.; JOURABIAN, M. Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 398-410, 2018.

ESLAMNEZHAD, Hamidreza; RAHIMI, Asghar B. Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins. **Applied Thermal Engineering**, v. 113, p. 813-821, 2017.

ESTRÁZULAS, Jutai Juárez. **Estudo numérico da mudança de fase de PCMs em cavidades cilíndricas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

ESTRÁZULAS, Jutai Juárez; OLIVESKI, R. C. Estudo numérico do processo de fusão de PCMs em cavidade cilíndrica. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería**, p. 1-10, 2017.

FAISTAUER, F.; RODRIGUES, P.; OLIVESKI, R. C. Numerical study of phase change of PCM in spherical cavities. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 21-30, 2017.

FAN, Liwu; KHODADADI, Jay M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 1, p. 24-46, 2011.

GARG, H. P.; MULLICK, S. C.; BHARGAVA, A. K. **Solar Thermal Energy Storage**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985.

HASNAIN, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. **Energy conversion and management**, v. 233, p. 1-8, 2017.

HATAMI, M. Numerical study of nanofluids natural convection in a rectangular cavity including heated fins. **Journal of Molecular Liquids**, v. 39, n. 11, p. 1127-1138, 1998.

JI, Chenzhen; QIN, Zhen; LOW, Zhenghua; DUBEY, Swapnil; CHOO, Fook Hoong; DUAN, Fei. Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 269-279, 2018.

JMAL, Imen; BACCAR, Mounir. Numerical investigation of PCM solidification in a finned rectangular heat exchanger including natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 127, p. 714-727, 2018.

KANDASAMY, Ravi; WANG, Xiang-Qi; MUJUMDAR, Arun S. Application of phase change materials in thermal management of electronics. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 17-18, p. 2822-2832, 2007.

- KANDASAMY, Ravi; WANG, Xiang-Qi; MUJUMDAR, Transient cooling of electronics using phase change material (PCM) – based heat sinks. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 8-9, p. 1047-1057, 2008.
- KANT, K.; SHUKLA, A.; SHARMA, A.; KUMAR, A.; JAIN, A. Thermal energy storage based solar drying systems: A review. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 34, p. 86-99, 2016.
- KAMKARI, Babak; SHOKOUHMAND, Hossein. Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 78, p. 839-851, 2014.
- KAMKARI, Babak; AMLASHI, Hamid Jahedi. Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 88, p. 211-219, 2017.
- KAMKARI, Babak; GROULX, Dominic. Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 97, p. 94-108, 2018.
- KARAMI, Ramin; KAMKARI, Babak. Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units. **Applied Thermal Engineering**, v. 146, p. 45-60, 2019.
- KHAN, Zakir; KHAN, Zulfiqar; GHAFOR, Abdul. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 132-158, 2016.
- KHATEEB, S.; AMIRUDDIN, S.; FARID M. et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation. **Journal of Power Sources**, v. 142, p. 345-253, 2005.
- KHUDHAIR, Amar M.; FARID, Mohammed M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 2, p. 263-275, 2004.
- KUZNIK, Frederic; VIRGONE, Joseph; ROUX, Jean-Jacques. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 2, p. 148-156, 2008.
- LAMBERG, Piia; SIREN, Kai. Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins. **Applied Mathematical Modelling**, v. 27, n. 7, p. 491-513, 2003.
- LEE, Kyoung Ok; MEDINA, Mario A.; RAITH, Erik; SUN, Xiaoqín. Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. **Applied Energy**, v. 137, p. 699-706, 2015.
- LI, Min. A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity. **Applied Energy**, v. 106, p. 25-30, 2013.

- LIU, M.; SAMAN, W.; BRUNO, F. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material. **Applied Energy**, v. 92, p. 336-342, 2012.
- LIU, S.; PENG, H.; HU, Z.; LING, X.; HUANG, J. Solidification performance of a latent heat storage unit with innovative longitudinal triangular fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 138, p. 667-676, 2019.
- MAHMOUD, Saad; TANG, Aaron; TOH, Chin; AL-DADAH, Raya; SOO, Sein Leung. Experimental investigation of inserts configurations and PCM type on the thermal performance of PCM based heat sinks. **Applied Energy**, v. 112, p. 1349-1356, 2013.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- MOFIJUR, M; MAHLIA, T. M. I.; SILITONGA, A. S.; ONG, H. C.; SILAKHORI, M.; HASAN, M. H.; PUTRA, N.; RAHMAN, S. M. A. Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: an overview. **Energies**, v. 12, n. 16, p. 3167, 2019.
- MONDIEIG, Denise; RAJABALEE, Fazil; LAPRIE, Alain; OONK, Harry A. J.; CALVET, Thereza; CUEVAS-DIARTE, Miguel Angel. Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material. **Transfusion and Apheresis Science**, v. 28, n. 2, p. 143-148, 2003.
- MOORE, D. R.; WEISS, N. O. Two-dimensional Rayleigh-Bénard convection. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 58, n. 2, p. 289-312, 1973.
- NAZZI EHMS, José Henrique. **Comparação de Modelos Numéricos de Malha Fixa Baseados em Entalpia para os Processos de Fusão e Solidificação de PCM em Esferas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.
- NAZZI EHMS, José Henrique; OLIVESKI, Rejane de César; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira; BISERNI, Cesare e GARAI, Massimo. Fixed Grid Numerical Models for Solidification and Melting of Phase Change Materials (PCMs). **Applied Sciences**, v. 9, n. 20, p. 4334, 2019.
- ORÓ, Eduard; MIRÓ, Laia; BARRENECHE, Camila; MARTORELL, Ingrid; FARID, Mohammed M.; CABEZA, Luisa F. Corrosion of metal and polymer containers for use in PCM cold storage. **Applied energy**, v. 109, p. 449-453, 2013.
- ORÓ, Eduard; MIRÓ, Laia; FARID, Mohammed M.; MARTIN, Viktoria; CABEZA, Luisa F. Energy management and CO2 mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport. **International Journal of Refrigeration**, v. 42, p. 26-35, 2014.
- OSTERMAN, E.; TYAGI, V. V.; BUTALA, V.; RAHIM, N.A.; STRITIH, U. Review of PCM based cooling technologies for buildings. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 37-49, 2012.
- OYA, Teppei; NOMURA, Takahiro; TSUBOTA, Masakatsu; OKINAKA, Noriyuki; AKIYAMA, Tomohiro. Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, n. 2, p. 825-828, 2013.

PAKROUH, R.; HOSSEINI, M. J.; RANJBAR, A. A.; BAHRAMPOURY, R. A numerical method for PCM-based pin fin heat sinks optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 542-552, 2015.

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. CRC Press, 1980.

PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in materials science**, v. 65, p. 67-123, 2014.

PIZZOLATO, Alberto; SHARMA, Ashesh; MAUTE, Kurt; SCIACOVELLI, Adriano; VERDA, Vittorio. Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization. **Applied Energy**, v. 208, p. 210-227, 2017.

RAYMUNDO JÚNIOR, J. F.; BORAHEL, R. S.; OLIVESKI, R. C. Numerical simulation of the erythritol melting process. *In: 15th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING (ENCIT)*, 2014, Belém.

RAYMUNDO JÚNIOR, J. F.; BORAHEL, R. S.; OLIVESKI, R. C. Numerical study of the erythritol melting process in a tridimensional rectangular cavity. **Revista Engenharia Térmica (RETERM)**, v. 14, p. 88-94, 2015.

RAYMUNDO JÚNIOR, J. F.; OLIVESKI, R. C.; ROCHA, L. A. O.; BISERNI, C. Numerical investigation on phase change materials (PCM): the melting process of erythritol in spheres under different thermal conditions. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 148, p. 20-30, 2018.

REGIN, A. Felix; SOLANKI, S. C.; SAINI, J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2438-2458, 2008.

REYES, A.; HENRÍQUEZ-VARGAS, L.; RIVERA, J.; SEPÚLVEDA, F. Theoretical and experimental study of aluminum foils and paraffin wax mixtures as thermal energy storage material. **Renewable Energy**, v. 101, p. 225-235, 2017.

SARI, Ahmet; KARAIPEKLI, Ali. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 8-9, p. 1271-1277, 2007.

SCIACOVELLI, A.; GAGLIARDI, F.; VERDA, V. Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. **Applied Energy**, v. 137, p. 707-715, 2015.

SETOH, G.; TAN, F. L.; FOK, S. C. Experimental studies on the use of a phase change material for cooling mobile phones. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 9, p. 1403-1410, 2010.

SHALABY, S. M.; BEK, M. A.; EL-SEBAII, A. A. Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 110-116, 2014.

SHARMA, S. Dutt; SAGARA, Kazunobu. Latent heat storage materials and systems: a review. **International Journal of Green Energy**, v. 2, n. 1, p. 1-56, 2005.

- SHARMA, A.; TYAGI, V. V.; CHEN, C. R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 318-345, 2009.
- SHATIKIAN, V.; ZISKIND, G.; LETAN, R. Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 17, p. 3689-3706, 2005.
- SHEIKHOLESAMI, M.; HAQ, R.; SHAFEE, A.; LI, Z. Heat transfer behavior of nanoparticle enhanced PCM solidification through an enclosure with V shaped fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 130, p. 1322-1342, 2019.
- SHILEI, L. V.; NENG, Zhu; GUOHUI, Feng. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 1, p. 18-24, 2006.
- 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, n. 19-20, p. 4082-4091, 2010.
- SHOKOUHMAND, 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, 2013.
- SILVA, Tiago; VICENTE, Romeu; SOARES, Nelson; FERREIRA, Victor. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: a passive construction solution. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 235-245, 2012.
- SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 82-103, 2013.
- SPENGLER, Fernando Claudio. **Estudo numérico da influência geométrica de aletas em trocador de calor cilíndrico contendo PCM em processo de fusão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
- TACQUES, Alexandre. **Análise da influência da razão de aspecto e do posicionamento de aleta em cavidade retangular contendo PCM em processo de fusão**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
- TANG, S. Lam Po; STYLIOS, G. K. An overview of smart technologies for clothing design and engineering. **International Journal of Clothing Science and Technology**, v. 18, n. 02, p. 108-128, 2006.
- TIAN, Lin-Li; LIU, Xun; CHEN, Shuai; SHEN, Zu-Guo. Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure. **Applied Thermal Engineering**, v. 167, p. 114764, 2020.
- TU, Jiyuan; YEOH, Guan Heng; LIU, Chaoqun. **Computational Fluid Dynamics: a practical approach**. Third Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.

TYAGI, Vineet Veer; BUDDHI, D. PCM thermal storage in buildings: a state of art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 6, p. 1146-1166, 2007.

VALERI, Daniella; MEIRELLES, Antonio JA. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 74, n. 10, p. 1221-1226, 1997.

VEERAKUMAR, C.; SREEKUMAR, A. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review. **International Journal of Refrigeration**, v. 67, p. 271-289, 2016.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. Longman Scientific & Technical, 1995.

VOLLER, Vaughan R.; PRAKASH, C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 30, n. 8, p. 1709-1719, 1987.

WANG, Yi-Hsien; YANG, Yue-Tzu. Three-dimensional transient cooling simulations of a portable electronic device using PCM (phase change materials) in multi-fin heat sink. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 5214-5224, 2011.

WANG, Z.; ZHANG, Z.; JIA, L.; YANG, L. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery. **Applied Thermal Engineering**, v. 78, p. 428-436, 2015.

WANG, Peilun; YAO, Hua; LAN, Zhipeng; PENG, Zhijian; HUANG, Yun; DING, Yulong. Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 428-435, 2016.

WAQAS, Adeel; DIN, Zia Ud. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 607-625, 2013.

WHIFFEN, T. R.; RIFFAT, S. B. A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part II. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 8, n. 3, p. 159-164, 2013.

XIA, L.; ZHANG, P.; WANG, R. Z. Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material. **Carbon**, v. 48, n. 9, p. 2538-2548, 2010.

YUAN, Yanping; ZHANG, Nan; TAO, Wenquan; CAO, Xiaoling; HE, Yaling. Fatty acids as phase change materials: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 482-498, 2014.

YUAN, Yanping; CAO, Xiaoling; XIANG, Bo; DU, Yanxia. Effect of installation angle of fins on melting characteristics of annular unit for latent heat thermal energy storage. **Solar Energy**, v. 136, p. 365-378, 2016.

ZALBA, Belán; MARÍN, José M.; CABEZA, Luisa F.; MEHLING, Harald. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 3, p. 251-283, 2003.

ZHOU, Dan; ZHAO, Chang-Ying; TIAN, Yuan. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, v. 92, p. 593-605, 2012.

APÊNDICE – ARTIGO SUBMETIDO AO MERCOFRIO 2020

(12º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação)

“Ajuste da Constante *C* (*Mushy Zone Constant*) para a Implementação do Método da Entalpia-Porosidade no Estudo Numérico do Processo de Fusão de um PCM”

Autores: Rafael da Silveira Borahel; Ionatan Anton Schroer e Rejane de César Oliveski.

Resumo: O desenvolvimento de sistemas destinados ao armazenamento térmico de energia é extremamente importante para diversas áreas. Basicamente, duas são as formas de armazenamento: através de calor sensível e/ou latente. Sistemas baseados em calor latente levam vantagem frente aos que operam com calor sensível, uma vez que os mesmos são mais compactos e também operam a temperaturas praticamente constantes. Diversas são as técnicas que podem ser utilizadas para o estudo destes sistemas, sendo a abordagem numérica por fluidodinâmica computacional (CFD) através do método da entalpia-porosidade uma das mais populares. Para a implementação de tal método, cuidados são necessários na determinação de um dos principais parâmetros que o compõem: a constante *C* (*mushy zone constant*). O objetivo deste trabalho é basicamente determinar o valor mais adequado desta constante no estudo computacional do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada. Neste trabalho, diferentes valores de *C* (10^4 até 10^{12}) foram testados com o software comercial ANSYS Fluent 19.2. Resultados obtidos sugerem que valores de *C* inferiores a 1×10^7 são inapropriados para a reprodução numérica do processo de fusão do ácido láurico, enquanto valores superiores a 5×10^7 são incapazes de influenciar o processo. Assim, pode-se concluir que valores entre 1×10^7 e 5×10^7 se mostram os mais adequados para o ajuste da constante em questão, principalmente o primeiro deles, o qual seus resultados diferiram dos resultados experimentais constantes na literatura em apenas 3,7%.

Palavras-Chave: Mushy Zone Constant; Processo de Fusão; Ácido Láurico; PCM.

1) Introdução

De modo geral, o desenvolvimento de sistemas destinados ao armazenamento térmico de energia é considerado um dos mais importantes avanços tecnológicos já ocorridos. (DINCER, 2002). Tais sistemas, tradicionalmente conhecidos por reservatórios térmicos, atuam melhorando o desempenho e a eficiência dos mais variados sistemas termo energéticos, como também reduzem a lacuna existente entre a demanda e a oferta de energia nestes sistemas. (REGIN *et al.*, 2008 e SHARMA *et al.*, 2009). Basicamente, dois são os principais tipos de armazenamento térmico: armazenamento de calor sensível e armazenamento de calor latente. Segundo Regin *et al.* (2008), variações na temperatura da substância contida nos reservatórios térmicos é que propiciam o armazenamento de calor sensível, enquanto a mudança de fase desta substância é que dá origem ao armazenamento de calor latente. Do ponto de vista prático, reservatórios térmicos de calor latente com uso dos materiais de mudança de fase (PCM) levam

vantagem frente aqueles que armazenam calor sensível, pois além de operarem sob temperaturas praticamente constantes, sistemas de calor latente apresentam uma maior densidade de armazenamento, o que os tornam mais compactos. (AGYENIM *et al.*, 2010). Área médica, construção civil, eletrônica, informática e setor industrial de transporte refrigerado, estas são algumas das áreas em que os sistemas de armazenamento de calor latente são utilizados. Conforme Pielichowska e Pielichowski (2014), devido a este grande potencial de uso, um crescente interesse da comunidade científica no aprimoramento/estudo destes sistemas pôde ser observado na última década. Uma das principais técnicas utilizadas nestes estudos é a utilização de ferramentas computacionais de análise, principalmente as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD).

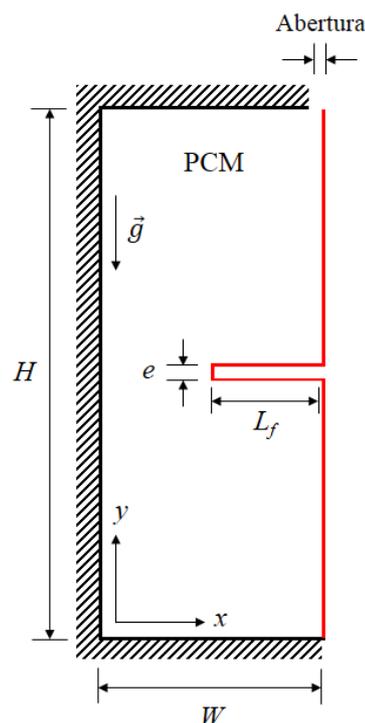
A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta de grande valia para a otimização de processos de inúmeras áreas, principalmente por seu uso dispensar a necessidade de equipamentos sofisticados de análise, propiciar a obtenção de uma grande gama de resultados em um curto espaço de tempo e conseguir representar adequadamente a física dos processos estudados. (VERMA *et al.*, 2008 e DUTIL *et al.*, 2011). Para os reservatórios térmicos de armazenamento de calor latente, diversos são os métodos matemáticos e numéricos atualmente disponíveis para o estudo destes sistemas através dos softwares de CFD, sendo que um deles merece destaque, o método da entalpia-porosidade proposto por Voller e Prakash (1987). Tal método, consiste em considerar regiões parcialmente sólidas (*Mushy Zone*) como se fossem um meio poroso, sendo diversos os estudos que o utilizam para a análise numérica dos sistemas de calor latente. Dentre os estudos que adotam tal método, pode-se destacar os conduzidos por Kamkari e Amlashi (2017), Fadl e Eames (2019) e Yadav e Samir (2019). Ainda que em todos os trabalhos o mesmo método tenha sido compartilhado para solução de seus problemas, diferenças significativas podem ser observadas no que diz respeito aos valores utilizados para o ajuste de um dos principais parâmetros que compõem o método em questão, no caso a constante C (conhecida por *Mushy Zone Constant*). Conforme Fadl e Eames (2019), esta constante é responsável por tratar a transição entre as fases sólida e líquida do PCM, sendo seu valor dependente de fatores intrínsecos dos sistemas de armazenamento, como geometria e morfologia do PCM utilizado. Para os sistemas de formato retangular, como a cavidade vertical analisada no presente trabalho, valores de C variando entre 10^3 (VOGEL *et al.*, 2016) e 10^8 (KOZAK e ZISKIND, 2017) já se mostraram adequados em outras situações, porém sua determinação sempre se faz necessária como uma etapa preliminar de estudos numéricos mais complexos, uma vez que o correto ajuste da referida constante é fundamental para a obtenção de resultados fisicamente coerentes.

Deste modo, compreendendo a real importância da constante C para o estudo por CFD de problemas modelados pelo método da entalpia-porosidade, bem como visando facilitar a modelagem de trabalhos futuros que façam uso do método em questão, objetivou-se no presente trabalho a identificação do valor mais adequado a ser atribuído a esta constante quando o processo de fusão do ácido láurico é numericamente estudado para uma cavidade retangular aletada.

2) Problema Estudado

Em razão do presente trabalho ser basicamente um estudo de validação, o problema proposto consiste na reprodução numérica do estudo experimental conduzido por Kamkari e Shokouhmand (2014). O estudo em questão, buscou avaliar o processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada, a qual é bidimensionalmente representada aqui (vide Fig.1). Medindo 50 mm de largura (W) por 120 mm de altura (H), a cavidade analisada possui em seu interior uma aleta com 4 mm de espessura (e) por 25 mm de largura (L_f), a qual está instalada de modo centralizado junto a sua parede direita. Destacadas em vermelho, perímetro da aleta e parede direita da cavidade são as superfícies responsáveis pelo aquecimento do sistema, enquanto as demais paredes da cavidade são termicamente isoladas. Para atenuar qualquer pico de pressão que venha a ocorrer durante o processo de fusão, uma pequena abertura é admitida à região superior direita do sistema, esta medindo 2 mm.

Figura 1 – Representação esquemática da retangular estudada.



Fundindo em uma faixa de temperatura que varia de 316,65 K (T_s) até 321,35 K (T_l), ácido láurico (conhecido também por ácido dodecanóico) é o PCM utilizado no presente trabalho. Propriedades necessárias a sua modelagem foram obtidas junto à literatura, de modo que valores de massa específica (ρ), calor específico (cp), condutividade térmica (k) e calor latente de fusão (L) são os fornecidos por Shokouhmand e Kamkari (2013); valores de viscosidade dinâmica (μ) foram obtidos do estudo de Valeri e Meirelles (1997) e o valor do coeficiente de expansão térmica (β) obtido junto ao trabalho de Yuan *et al.* (2016); estando todos estes valores apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Propriedades termofísicas do ácido láurico.

Propriedades do Ácido Láurico		Valores					
Calor Específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)		2180 (T_s) e 2390 (T_l)					
Calor Latente de Fusão (J kg ⁻¹)		187210					
Coeficiente de Expansão Térmica (K ⁻¹)		0,000615					
Massa Específica (kg m ⁻³)		885 (T_l)					
Temperatura de Sólido (K)		316,65					
Temperatura de Líquido (K)		321,35					
Condutividade Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)							
293 K	303 K	313 K	323 K	328 K	333 K	338 K	343 K
0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138
Viscosidade Dinâmica (kg m ⁻¹ s ⁻¹)							
321,2 K	322 K	333 K	344 K	355 K	372 K	383 K	
0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210	

2.1) Modelo Matemático e Numérico

No presente trabalho, equações diferenciais da massa (Eq. 1), energia (Eq. 2) e quantidade de movimento (Eq. 3), acrescidas ainda do método da entalpia-porosidade proposto por Voller e Prakash (1987), compõem o modelo matemático e numérico implementado.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (3)$$

onde t representa o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, λ a entalpia específica total, p a pressão, T a temperatura, \vec{g} a aceleração da gravidade e \vec{S} o termo fonte da equação conservativa da quantidade de movimento, o qual é representado pela Eq.4:

$$\vec{S} = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \omega)} \vec{V} \quad (4)$$

onde ω representa uma pequena constante (10^{-3}) utilizada para evitar divisões por zero, C representa a constante da zona porosa que depende da morfologia desta região e γ representa a fração de líquido do PCM, a qual é obtida pela Eq. 5. (VOLLER e PRAKASH, 1987).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{se } T > T_l \end{cases} \quad (5)$$

Para o método utilizado (entalpia-porosidade) na modelagem do processo de fusão, valores de entalpia específica total foram obtidos para cada volume infinitesimal do domínio computacional pela soma das entalpias específicas sensível (λ_{se}) e latente (λ_L) do ácido láurico, respectivamente calculadas por intermédio das Eqs. 6 e 7. (SHMUELI *et al.*, 2010).

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (6)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \\ L & \text{se } T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

onde λ_{ref} representa uma entalpia associada a uma temperatura de referência (T_{ref}).

2.2) Condições Iniciais e de Contorno

Admitiu-se como condição inicial do PCM a sua temperatura inicial (298,15 K), enquanto as seguintes condições de contorno foram atribuídas às paredes da cavidade:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad e \quad \vec{V} \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad (8)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad e \quad \left. \vec{V} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad (9)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=H}} = 0 \quad e \quad \left. \vec{V} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=H}} = 0 \quad (10)$$

$$T|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = T_w \quad e \quad \left. \vec{V} \right|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = 0 \quad (11)$$

onde q'' representa o fluxo de calor na parede e T_w a temperatura da parede quente (343,15 K).

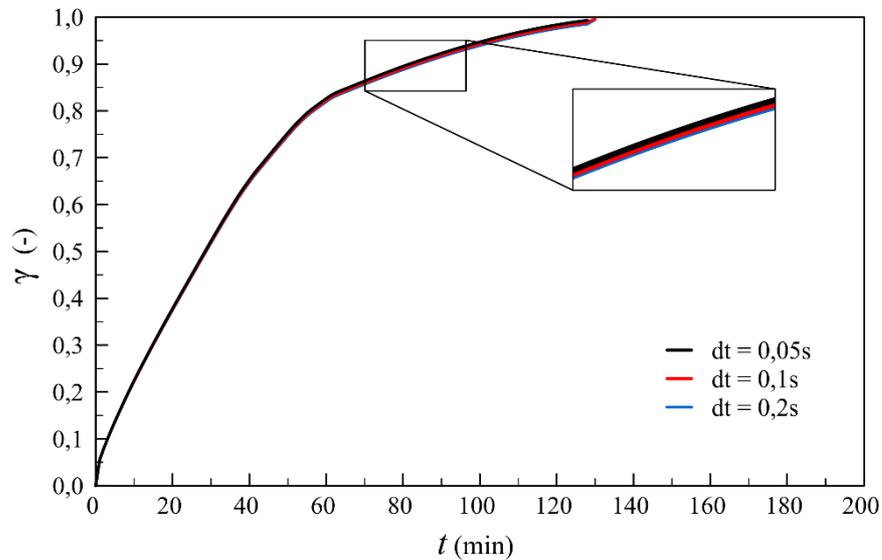
Já para o perímetro da aleta, as condições de contorno apresentadas na Eq.12 foram utilizadas, enquanto na abertura superior da cavidade admitiu-se uma pressão manométrica de 0 Pa como condição de contorno.

$$T|_{\substack{x=Lf \\ y=e}} = T_w \quad e \quad \left. \vec{V} \right|_{\substack{x=Lf \\ y=e}} = 0 \quad (12)$$

2.4) Parâmetros de Simulação

Para a análise do problema estudado, utilizou-se o método dos volumes finitos (MVF). Através de tal método, todas as equações conservativas anteriormente apresentadas foram solucionadas para cada volume infinitesimal do domínio computacional, isto sendo realizado com o uso do software comercial ANSYS-FLUENT 19.2. Empregando tal software, três diferentes intervalos de tempo (0,05; 0,1 e 0,2s) foram testados para a discretização temporal do problema proposto, sendo apresentados na Fig. 2 os valores transientes da fração de líquido obtidos para cada intervalo de tempo utilizado. Apesar de diferenças relevantes não possam ser visualizadas entre os resultados, não optou-se aqui pela utilização do maior valor testado, mas sim pelo intermediário (0,1s), uma vez que seu uso propiciou uma melhor convergência das simulações realizadas.

Figura 2 – Resultados transientes globais de γ para os três intervalos de tempo testados.

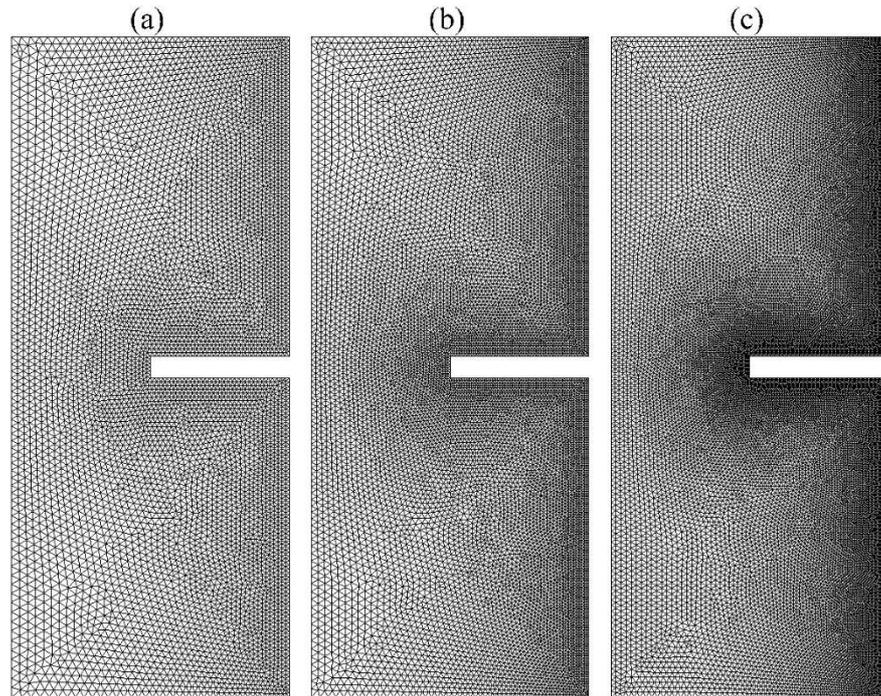


Como critério de convergência, adotou-se o valor residual de 10^{-5} para as equações conservativas da massa e quantidade de movimento e 10^{-8} para a equação conservativa da energia, considerando ainda um número máximo de 1000 iterações por intervalo de tempo. Em relação aos métodos de solução empregues, adotou-se para todas as simulações executadas o esquema SIMPLE para tratar o acoplamento pressão-velocidade; PRESTO! para a discretização espacial da pressão; *Least Squares Cell Based* para a solução do gradiente espacialmente discretizado e *Second Order Upwind* para tratar a discretização espacial das equações da energia e da quantidade de movimento.

3.4) Discretização Espacial

Para todas as simulações solucionadas, malhas bidimensionais não estruturadas foram utilizadas na discretização espacial. Procedimentos quanto à verificação da qualidade de malha foram realizados através do método GCI (*Grid Convergence Index*), originalmente proposto por Celik et al. (2008). Este método, basicamente permite quantificar a incerteza existente entre três diferentes malhas, sendo que para problemas complexos, admite-se uma incerteza (GCI) numérica média de até 5%. Seguindo a metodologia imposta pelo método, três malhas bidimensionais com diferentes níveis de refinamento foram geradas e testadas para o domínio computacional, onde Fig. 3 (a) apresenta a malha M1 (12.250 elementos); Fig. 3 (b) a malha M2 (22.296 elementos) e Fig. 3 (c) a malha M3 (39.296 elementos).

Figura 3 – Malhas testadas para a discretização espacial do domínio computacional, onde: (a) representa a malha M1, (b) M2 e (c) M3.



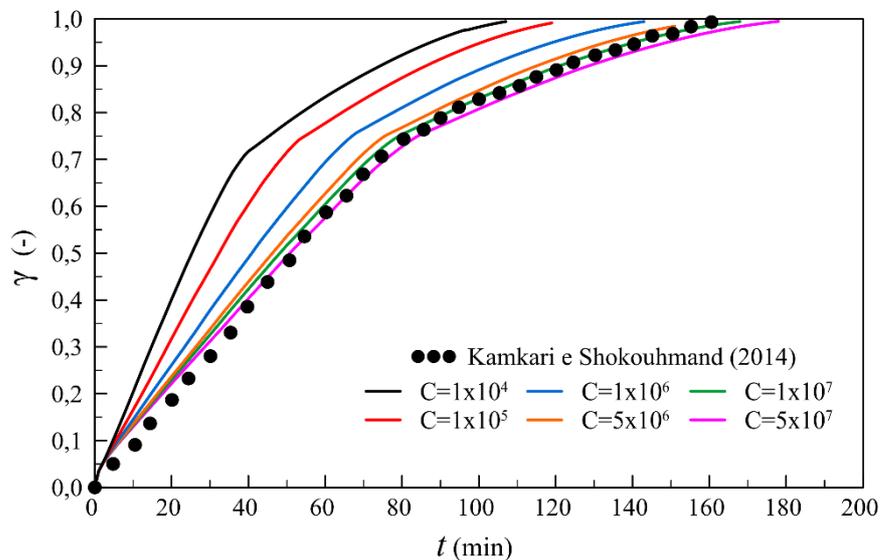
As referidas malhas, compostas exclusivamente por elementos triangulares, apresentam junto às superfícies quentes (aleta e parede direita) uma maior densidade de elementos, configurando assim um refino nas regiões onde há a ocorrência dos maiores gradientes de velocidade e temperatura do problema. Para os resultados obtidos, mais especificamente valores globais de fração líquida ao longo do tempo, ficou provado existir uma incerteza numérica média de aproximadamente 3,69% (GCI_{32}) para as malhas M3 e M2 e 3,72% (GCI_{21}) para as malhas M2 e M1; valores estes que evidenciam que a malha mais refinada (M3) é adequada para o estudo proposto. Deste modo, todos os resultados aqui apresentados foram obtidos com o uso da malha em questão (M3), garantindo assim a qualidade dos mesmos.

3) Resultados e Discussões

Comparando de forma quantitativa os resultados obtidos aqui aos apresentados por Kamkari e Shokouhmand (2014), Fig. 4 traz os resultados transientes da fração de líquido global no interior da cavidade para os diferentes valores de C testados (10^4 até 10^{12}). Nesta figura, pode-se observar que, para $C = 10^4$; 10^5 ; 10^6 e 5×10^6 , o tempo necessário para que o ácido láurico derreta por completo é de aproximadamente 108; 122; 144 e 151 min, respectivamente. Ou seja, bem inferior ao verificado (aprox. 162 min) por Kamkari e Shokouhmand (2014). Observa-se também que, para $C = 10^7$, os resultados numéricos estão próximos dos resultados

experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014). Utilizando este valor, o processo completo de fusão do ácido láurico se deu em 168 min, tempo 3,7% maior que o experimental considerado para fins de comparação. Tal diferença é pequena em grande parte do processo, com exceção dos primeiros 30 min, onde diferenças maiores são existentes. Neste período, observa-se que mais rapidamente se dá o processo de fusão estudado computacionalmente. Quanto aos demais valores testados para C ($5 \times 10^7 \leq C \leq 10^{12}$), obteve-se para todos um tempo total de processo que variou entre 180 e 182 min, de modo que optou-se aqui pela representação de apenas um destes resultados, o referente ao problema com $C = 5 \times 10^7$.

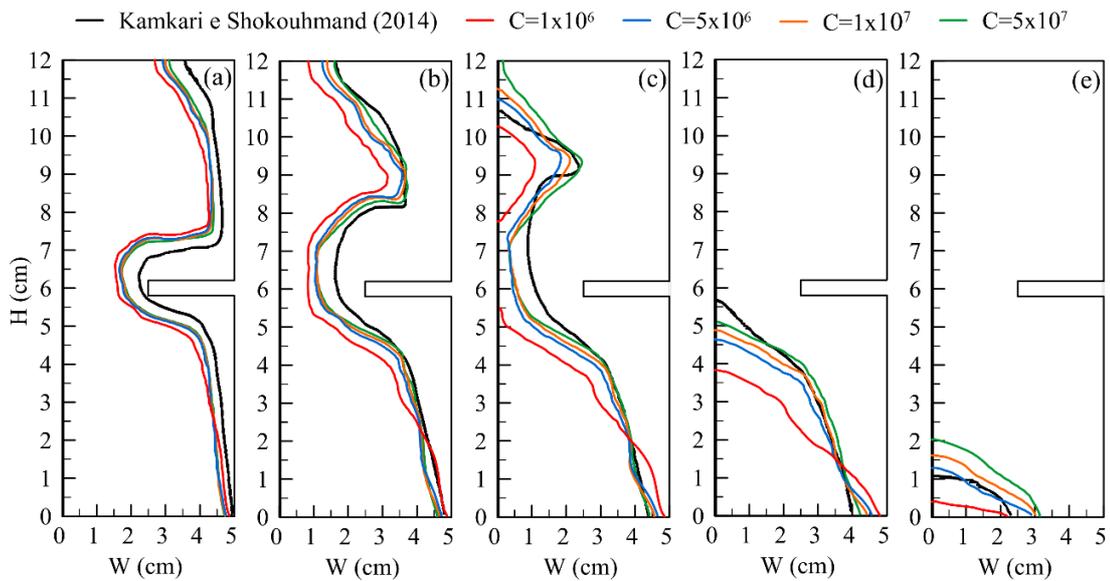
Figura 4 – Valores transientes globais da fração de líquido na cavidade para cada valor de C testado.



Resultados qualitativos são mostrados nas Fig. 5 (a-e), onde a interface sólido-líquido do ácido láurico para os diferentes valores de C (10^6 ; 5×10^6 ; 10^7 e 5×10^7) são respectivamente apresentadas para os instantes de 20, 40, 60, 80 e 140 min. Respalhando os resultados quantitativos já apresentados, percebe-se aqui uma diferença considerável entre a interface para $C = 10^6$ e a obtida por Kamkari e Shokouhmand (2014). Para todos os instantes de tempo, a interface em questão se mostrou a mais próxima da região esquerda inferior da cavidade, confirmando o processo de fusão mais intenso observado na Fig. 4 para o caso com $C=10^6$. Semelhanças marcantes podem ser relatadas entre as demais interfaces numéricas para os primeiros 40 min de processo. Neste período, percebe-se que as mesmas são praticamente idênticas, sendo semelhantes ainda em termos de formato à obtida experimentalmente, diferindo-se minimamente dela apenas por estarem posicionadas um pouco mais ao centro da cavidade. Passado este período inicial, a semelhança entre os resultados se mantém para as regiões mais inferiores da cavidade. Para os instantes de 60 e 80 min, resultados numéricos

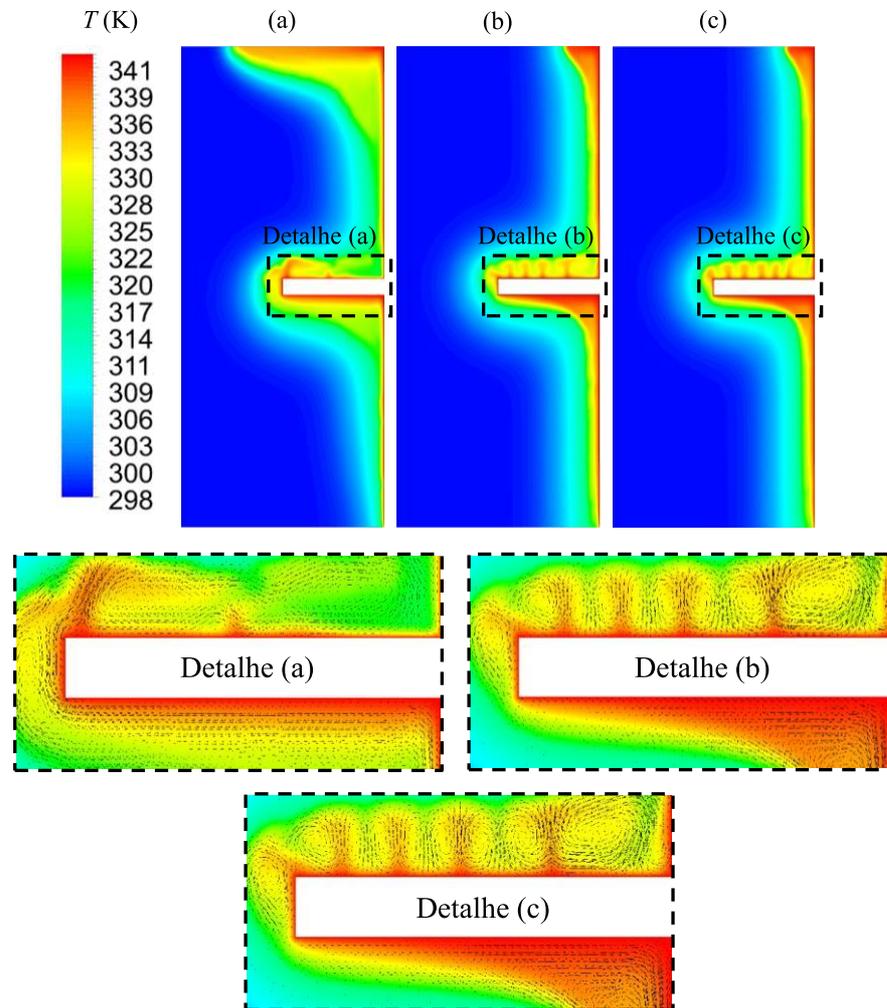
(5×10^6 ; 10^7 e 5×10^7) são praticamente idênticos aos experimentais nestas regiões ($H \leq 4.5$ cm), enquanto diferenças são registradas para as regiões superiores, as quais se devem ao acúmulo de PCM líquido à elevadas temperaturas no topo da cavidade.

Figura 5 – Posição espacial da interface sólido-líquido do ácido láurico para diferentes valores de C , onde: (a) 20 min, (b) 40 min, (c) 60 min, (d) 80 min e (e) 140 min.



Contornos de temperatura e vetores de velocidade são apresentados para um mesmo instante de tempo (8 min) na Fig. 6 (a-c), onde (a) foi obtido com $C = 10^4$; (b) $C = 10^7$ e (c) $C = 10^{11}$. Para todos os valores de C , as maiores temperaturas são observadas nas regiões próximas à parede direita, abaixo da aleta e no topo da cavidade. Basicamente, a primeira situação ocorre em razão da parede direita ser a principal superfície de aquecimento do sistema, enquanto as demais zonas se dão pelas forças de empuxo que atuam sob o PCM líquido. Como líquidos de temperatura mais elevada apresentam menor massa específica, os mesmos tendem a ascender dentro do sistema em que se encontram, posicionando-se assim em regiões mais superiores. Tal fenômeno explica a ocorrência destas zonas de superaquecimento, haja visto que o fluido de maior temperatura nas regiões mais inferiores da cavidade ascende ocupando a região existente logo abaixo da aleta, enquanto em regiões superiores (região acima da aleta) o mesmo ascende para ocupar a região do topo da cavidade.

Figura 6 – Contornos de temperatura e vetores de velocidade para o instante de 8 min com diferentes valores de C , onde: (a) $C=10^4$, (b) $C=10^7$ e (c) $C=10^{11}$.



Como já comentado, PCM líquido à elevadas temperaturas junto ao topo da cavidade é que confere a curvatura observada para interface sólido-líquido nesta região, como mostrado na Fig. 5 (a-c). Como o fluido encontra-se ali em temperaturas maiores que as observadas nas demais regiões, logicamente o PCM sólido será fundido ali de um modo mais intenso, o que faz a interface se deslocar mais ao centro da cavidade. Apesar de expressivos pontos de superaquecimento não serem observados logo acima das aletas, uma curvatura na interface sólido-líquido também é ali existente. O recuo da mesma, nesta região, se dá em razão da intensa transferência de calor por convecção que ali ocorre, isto sendo confirmado pelos vetores de velocidade exibidos nos detalhes da Fig. 6 (a-c), os quais sugerem a ocorrência do fenômeno convectivo conhecido por convecção Rayleigh-Bénard. Neste processo, uma substância líquida é simultaneamente aquecida e resfriada por duas superfícies sólidas que se encontram em temperaturas distintas, isto ocasionando recirculações da fase líquida naquela região. (MOORE e WEISS, 1973). Para o presente trabalho, a superfície superior da aleta aquece o

PCM líquido fazendo com que o mesmo ascenda em direção ao PCM sólido, o qual em menor temperatura efetua o resfriamento do líquido que acaba por descender no interior da cavidade. Regiões de escoamento ascendente e descende podem ser visualizadas no detalhe da Fig. 6 (b), tanto em termos de temperatura quanto em termos de velocidade. Para temperatura, verifica-se a existência de quatro pequenos gradientes verticais vermelho-amarelados que sugerem o arrasto de líquido quente em direção do PCM ainda sólido (movimento ascendente), enquanto o movimento contrário (descendente) é associado aos gradientes verticais de cor amarelo-esverdeada. Observando-se os vetores de velocidade sob estes gradientes, de fato percebe-se vetores ascendentes nos gradientes vermelho-amarelados e descendentes nos amarelo-esverdeados, vetores estes que dão origem a diversos pequenos turbilhonamentos circulares, o que atesta a ocorrência da convecção Rayleigh-Bénard.

4) Conclusões

Aplicando o método dos volumes finitos para o estudo numérico do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada, buscou-se identificar aqui o valor mais adequado a ser atribuído a uma das variáveis que compõem o método da entalpia-porosidade, neste caso a constante C (*mushy zone constant*). Para alcançar o objetivo proposto, simulações numéricas bidimensionais transientes foram realizadas para diferentes valores de C (10^4 até 10^{12}) através do software comercial ANSYS-FLUENT 19.2. Em todas as simulações realizadas, malhas computacionais não estruturadas foram utilizadas para a discretização especial do problema físico analisado. Com base nos resultados obtidos, estes comparados aos experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014), pode-se concluir o seguinte:

- Diferentes valores de C dão origem a resultados distintos, alguns corretos, outros não. Valores de C inferiores a 10^7 intensificam de modo irreal o processo de mudança de fase, enquanto valores de C superiores a 5×10^7 dão origem a resultados idênticos;
- O modelo matemático e numérico implementado é apropriado para a reprodução numérica do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada quando atribui-se o valor de 10^7 à constante C ;
- Gradientes de temperatura no PCM líquido originam um processo intenso de convecção no interior da cavidade, o qual confere curvaturas à interface sólido-líquido do PCM.

5) Autorizações e Reconhecimento

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) e à UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos) pelo suporte financeiro recebido durante a realização do presente trabalho, bem como reconhecem serem os únicos responsáveis por garantir o direito de publicar todo o conteúdo aqui disponível.

6) Referências

- AGYENIM, Francis; HEWITT, Neil; EAMES, Philip; SMYTH, Mervyn. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 615-628, 2010.
- CELIK, I.; 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.
- DINCER, Ibrahim. On thermal energy storage systems and applications in buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 4, p. 377-388, 2002.
- DUTIL, Y.; ROUSSE, D. R.; SALAH, N. B.; LASSUE, S.; ZALEWSKI, L. A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 112-130, 2011.
- FADL, Mohamed; EAMES, Philip C. Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter A_{mush} on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 151, p. 90-99, 2019.
- KAMKARI, Babak; AMLASHI, Hamid Jahedi. Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 88, p. 211-219, 2017.
- KOZAK, Y.; ZISKIND, G. Novel enthalpy method for modeling of PCM melting accompanied by sinking of the solid phase. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 112, p. 568-586, 2017.
- PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in materials science**, v. 65, p. 67-123, 2014.
- REGIN, A. Felix; SOLANKI, S. C.; SAINI, J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2438-2458, 2008.
- SHARMA, A.; TYAGI, V. V.; CHEN, C. R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 318-345, 2009.

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, n. 19-20, p. 4082-4091, 2010.

SHOKOUHMAND, 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, 2013.

VALERI, Daniella; MEIRELLES, Antonio JA. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 74, n. 10, p. 1221-1226, 1997.

VERMA, P.; SINGAL, S. K. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 4, p. 999-1031, 2008.

VOGEL, F.; FELBINGER, J.; JOHNSON, M. Natural convection in high temperature flat plate latent heat thermal energy storage systems. **Applied Energy**, v. 184, p. 184-196, 2016.

VOLLER, Vaughan R.; PRAKASH, C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 30, n. 8, p. 1709-1719, 1987.

YADAV, Ankit; SAMIR, Sushant. Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure. **Journal of Energy Storage**, v. 21, p. 405-417, 2019.

YUAN, Yanping; ZHANG, Nan; TAO; Wenquan; CAO, Xiaoling; HE, Yaling. Fatty acids as phase change materials: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 482-498, 2014.